

Lee Smolin

**La rivoluzione
incompiuta di Einstein**

La ricerca di ciò che c'è al di là dei quanti



Einaudi

Lee Smolin

La rivoluzione incompiuta di Einstein

La ricerca di ciò che c'è al di là dei quanti



Einaudi

Lee Smolin

La rivoluzione incompiuta di Einstein

La ricerca di ciò che c'è al di là dei quanti

Traduzione di Simonetta Frediani



Giulio Einaudi editore

Prefazione

Noi esseri umani abbiamo sempre avuto un problema con il confine tra realtà e fantasia. Per spiegare il mondo a noi stessi inventiamo storie e poi, essendo bravi narratori, ce ne infatuiamo e confondiamo le nostre rappresentazioni del mondo con il mondo stesso. Questa confusione affligge tanto gli scienziati quanto i profani; in verità, tormenta di più noi, che abbiamo storie tanto straordinarie nel nostro corredo di strumenti.

Via via che approfondiamo la nostra comprensione del mondo naturale, passando a fenomeni più elementari e di dimensioni minori, i nostri successi pongono ostacoli a ulteriori progressi. Per evitare di restare bloccati, dobbiamo bilanciare la nostra giustificata fiducia nel potere della conoscenza consolidata con un'acuta consapevolezza del fatto che anche le nostre ipotesi di maggior successo sono, appunto, ipotesi. Una lezione difficile da imparare è che le nostre sensazioni in parte sono causate dalla realtà, ma sono costruite interamente dal nostro cervello per presentarci il mondo proprio nella forma di cui abbiamo bisogno per farci strada nella natura. Al di là di queste sensazioni, si aggira la natura, fundamentalmente misteriosa e proprio al confine di ciò che possiamo conoscere.

Quelle che in base alle nostre conoscenze attuali sono le caratteristiche più importanti della natura non vengono percepite. I più semplici fatti generali a noi noti – che la materia è fatta di atomi, per esempio, o che la Terra è un guscio sferico di roccia attorno a un nucleo fuso, avvolto da una sottile atmosfera, che si muove, e sospeso in qualcosa di simile al vuoto, mentre orbita intorno a un reattore termonucleare naturale –, questi dati di fatto che impariamo appena usciti dalla culla sono il risultato di secoli di intensi sforzi di studiosi e scienziati. Ciascuno di questi fatti in origine fu considerato un'idea quasi folle in contrasto con un'ipotesi molto più ovvia e ragionevole – però sbagliata.

Avere una mentalità scientifica vuol dire rispettare i fatti su cui esiste un consenso generale, che sono la soluzione di generazioni di dispute, restando al contempo aperti nei confronti di ciò che è ancora ignoto. Provare un senso di umiltà davanti al mistero essenziale del mondo è utile perché gli aspetti conosciuti diventano ancora più misteriosi quando li esaminiamo più a fondo. Quanto più sappiamo, tanto più tutto è curioso. In natura nulla è così ordinario che la sua contemplazione non possa portarci a una muta sensazione di meraviglia e gratitudine per il solo fatto di far parte di tutto ciò.

In questa mattina primaverile, l'aria che arriva dalla finestra aperta fa entrare i freschi profumi del giardino – ma qual è il miracolo che lo fa accadere? Com'è che molecole diffuse da una brezza vengono trasformate dal mio naso in questa fragranza? Quando vediamo colori vivaci, ci ricordiamo che esiste una storia sul fatto che diverse lunghezze d'onda della luce eccitano neuroni diversi. Ma com'è possibile che le sensazioni del rosso o del blu siano causate dall'eccitazione di neuroni diversi? Che genere di cose sono le sensazioni, i *qualia*, come li chiamano i filosofi, dei diversi colori, o dei diversi profumi? In quali modi i profumi sono diversi dai colori, e perché differiscono, se si tratta in ogni caso di impulsi elettrici dei neuroni? Chi è l'io che si sveglia e che cos'è l'universo che mi circonda quando apro gli occhi? I fatti più semplici della nostra esistenza e del nostro rapporto con il mondo sono misteri.

Allontaniamoci prudentemente dalla questione difficile della coscienza e consideriamo interrogativi più semplici. Come scienziato, credo che questo sia il modo migliore per arrivare da qualche parte. Iniziamo da una domanda fondamentale: che cos'è la materia? Mio figlio ha lasciato un sasso sul tavolo. Lo prendo; dati il suo peso e la sua forma, si adatta perfettamente alla mia mano – quella che provo è di certo una sensazione antica.

Ma che cos'è un sasso?

Sappiamo che aspetto hanno i sassi e che cosa ci fanno provare, ma sono tutte caratteristiche che hanno a che fare con noi almeno quanto con i sassi. Ben poco della consistenza o dell'aspetto di un sasso fornisce indizi su ciò che costituisce, essenzialmente, l'esistenza di un sasso – il suo essere un sasso. Sappiamo che la maggior parte del sasso è spazio vuoto in cui sono disposti gli atomi. La solidità e la durezza del sasso sono costruzioni

della nostra mente, che integra le percezioni a scale molto grossolane in confronto alle dimensioni degli atomi.

La materia esiste in molte forme, e di alcune, come i sassi, come il materiale organico intessuto nelle coperte, nelle lenzuola e nei vestiti, sappiamo che sono complesse. Consideriamo quindi per prima una forma piú semplice di materia: l'acqua che beviamo. Che cos'è?

Alla vista e al tatto, l'acqua appare regolare, continua. Sino a tempi relativamente recenti, un po' piú di un secolo fa, i fisici pensavano che la materia fosse continua. All'inizio del Novecento, Albert Einstein mostrò che si trattava di un'idea sbagliata e che l'acqua è fatta di miriadi di atomi. Nell'acqua, questi atomi sono organizzati in triplette, legati insieme a formare le molecole, ciascuna costituita da due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno.

Sí, ma che cos'è un atomo? Meno di dieci anni dopo, si capí che ogni atomo è come un minuscolo sistema solare, con un nucleo al centro al posto del Sole e i pianeti rappresentati dagli elettroni.

Fin qui tutto bene, ma che cos'è un elettrone? Sappiamo che gli elettroni sono unità discrete, ciascuna con una certa quantità di massa e di carica. Un elettrone può avere una posizione nello spazio. Può muoversi: quando guardiamo una prima volta, si trova lí, ma quando guardiamo di nuovo, è là.

Oltre a questi attributi, non è facile descrivere che cos'è un elettrone. Ci vorrà gran parte di questo libro.

La comprensione migliore di ciò che è l'acqua, di ciò che sono i sassi, le molecole, gli atomi e gli elettroni è espressa dal ramo della scienza che si chiama *fisica quantistica*. Tuttavia, come ormai sembra che tutti sappiano, questo è un dominio pieno di paradossi e di misteri. La fisica quantistica descrive un mondo in cui nulla ha un'esistenza stabile: un atomo o un elettrone possono essere un'onda o una particella a seconda di come li si guarda e i gatti sono allo stesso tempo vivi e morti. Tutto ciò è perfetto per la cultura popolare, che ha fatto di «quantistico» un termine di moda sinonimo di «notevole» o «importante», però è terribile per noi che vogliamo capire il mondo in cui viviamo, dato che non sembra esistere una risposta facile alla semplice domanda «che cos'è un sasso?»

Nel primo quarto del Novecento, per spiegare la fisica quantistica fu elaborata una teoria detta *meccanica quantistica*. Sin dal principio, questa

teoria è stata la creatura preferita della scienza. È la base della nostra comprensione degli atomi, della radiazione e di molto altro, dalle particelle elementari alle forze fondamentali e al comportamento dei materiali. È stata altresì, per un tempo altrettanto lungo, una creatura problematica. Fin dall'inizio, i suoi inventori furono profondamente divisi su che cosa farne. Alcuni espressero turbamento e timori, persino indignazione. Altri la dichiararono un nuovo tipo rivoluzionario di scienza, che demoliva gli assunti metafisici sulla natura e sul nostro rapporto con essa che le generazioni precedenti avevano giudicato essenziali per il successo della scienza.

Nelle pagine che seguono spero di convincervi che i problemi concettuali e i violenti disaccordi che hanno tormentato la meccanica quantistica sin dagli inizi sono irrisolti e irrisolvibili, per la semplice ragione che la teoria è sbagliata. È una teoria di grande successo, ma è incompleta. Il nostro compito – se vogliamo ottenere risposte semplici per le domande semplici su ciò che sono i sassi – deve essere andare al di là della meccanica quantistica e ottenere una descrizione del mondo a una scala atomica che abbia senso.

Questo compito potrebbe sembrare estremamente difficile, se non fosse per un aspetto a lungo ignorato e quasi dimenticato della storia della meccanica quantistica. Sin dagli inizi dell'era quantistica, negli anni Venti del secolo scorso, è sempre esistita una versione alternativa della fisica quantistica che è perfettamente sensata. Questa teoria ombra risolve gli evidenti paradossi e misteri del dominio quantistico. Lo scandalo – sono convinto che il termine sia giustificato – è che questa forma alternativa della teoria quantistica viene insegnata di rado. È citata raramente, nei libri di testo per gli aspiranti fisici come nei libri e negli articoli divulgativi per i profani.

Esistono diverse formulazioni alternative della fisica quantistica che hanno un senso coerente. La sfida ora consiste nel basarsi su queste per trovare il modo giusto di interpretare la fisica quantistica – quello usato dalla natura. Credo che ciò avrà ampie ripercussioni, poiché la nuova forma di fisica quantistica sarà la base delle soluzioni di molti problemi irrisolti della fisica. A mio avviso, problemi quali la gravità quantistica e l'unificazione delle forze, sui quali abbiamo fatto pochi progressi definitivi, non vengono risolti perché alla base della nostra teorizzazione vi è una teoria che non è corretta.

I fisici sono d'accordo sul comportamento del mondo quantistico. Conveniamo tutti che gli atomi e la radiazione si comportano in modo diverso dai sassi e dai gatti e che la meccanica quantistica riesce a prevedere alcuni aspetti di quel comportamento. Non siamo invece d'accordo su cosa significhi che il nostro mondo è un mondo quantistico. Un cambiamento radicale della nostra comprensione della natura è chiaramente necessario, però abbiamo opinioni diverse su quale dovrebbe essere questo cambiamento. Alcuni sostengono che dobbiamo rinunciare ad avere una qualche immagine della realtà e accontentarci di una teoria che descrive la conoscenza che possiamo avere del mondo. Altri ritengono che il nostro concetto di realtà debba essere ampliato tanto da comprendere un'infinità di realtà parallele.

Di fatto, nulla di tutto ciò è necessario. I modi alternativi di comprendere il mondo quantistico non ci impongono di rinunciare a pensare che la fisica descriva una realtà indipendente dalla conoscenza che ne abbiamo né di espandere la realtà al di là del concetto sensato dell'esistenza di un solo mondo, quello che vediamo quando ci guardiamo intorno. Come spiegherò nelle pagine di questo libro, il realismo di buon senso, secondo cui la scienza può aspirare a fornire un quadro completo del mondo naturale così com'è, o come sarebbe in nostra assenza, in realtà non è minacciato da nulla di ciò che sappiamo della fisica quantistica.

È quindi inopportuno e non necessario che il dominio quantistico sia stato presentato come misterioso e controintuitivo. Uno degli obiettivi di questo libro è esporre le teorie quantistiche alternative ai profani e, così facendo, eliminare il mistero e presentare il mondo quantistico in maniera intuitiva e comprensibile dalle persone che non hanno una conoscenza approfondita della fisica.

Immagino che i miei lettori siano persone con una forte curiosità per la natura, che forse seguono la scienza attraverso i notiziari, i blog e i libri divulgativi, ma che non hanno studiato la matematica di solito assunta come linguaggio della fisica. Al suo posto, uso parole e immagini per dare l'idea dei fenomeni fondamentali che troviamo nel mondo quantistico e dei principi che il loro studio ha ispirato. Dopo questa introduzione, il libro inizia con tre brevi capitoli che descrivono le basi essenziali della fisica quantistica. Queste ci permetteranno di esplorare i vari universi concettuali che emergono dalle diverse forme di teoria quantistica che sono state proposte.

Che cosa è in gioco nella discussione sulla meccanica quantistica? Perché è importante se la nostra teoria fondamentale del mondo naturale è misteriosa e paradossale?

Dietro a questa discussione che va avanti da un secolo vi è un disaccordo fondamentale sulla natura della realtà – un disaccordo che, non risolto, si intensifica generando una discussione sulla natura della scienza.

Alla base dello scisma vi sono due domande.

Innanzitutto, il mondo naturale esiste indipendentemente dalla nostra mente? Per essere più precisi, la materia ha un insieme stabile di proprietà in sé e per sé, a prescindere dalle nostre percezioni e conoscenze?

In secondo luogo, queste proprietà possono essere comprese e descritte da noi? Possiamo capire le leggi della natura tanto da spiegare la storia dell'universo e predirne il futuro?

Le risposte che diamo a queste due domande hanno implicazioni per interrogativi più ampi sulla natura e lo scopo della scienza e sul suo ruolo nel progetto umano più generale. In effetti, sono domande sul confine tra realtà e fantasia.

Coloro che rispondono di sí a queste due domande sono chiamati realisti. Einstein era un realista. Anch'io lo sono. Noi realisti crediamo che esista un mondo reale là fuori, le cui proprietà non dipendono in alcun modo dalla conoscenza e dalle percezioni che ne abbiamo. È la natura – come sarebbe, e per lo più è, in nostra assenza. Siamo anche convinti che il mondo possa essere compreso e descritto in modo abbastanza preciso per spiegare il comportamento di qualsiasi sistema del mondo naturale.

Se siete realisti, credete che la scienza sia la ricerca sistematica di quella spiegazione, sulla base di un concetto naturale di verità. Le affermazioni su oggetti o sistemi della natura sono vere nella misura in cui corrispondono a proprietà genuine della natura.

Se rispondete di no a una delle domande o a entrambe, siete antirealisti.

Per la maggior parte gli scienziati sono realisti nei confronti degli oggetti quotidiani alla scala umana. Le cose che possiamo vedere, raccogliere e gettare hanno proprietà semplici e facili da comprendere. In ogni momento, esistono da qualche parte nello spazio. Quando si spostano, seguono una traiettoria e questa traiettoria ha, relativamente a qualcuno che le descrive, una determinata velocità. Hanno una massa e un peso.

Quando diciamo al nostro partner che il taccuino rosso che sta cercando è sul tavolo, ci aspettiamo che ciò sia semplicemente vero o falso, in modo del tutto indipendente dalla nostra conoscenza o percezione.

La descrizione della materia a questo livello, dalle dimensioni più piccole che possiamo distinguere con gli occhi fino alle stelle e ai pianeti, è la fisica classica, che fu inventata da Galileo, Keplero e Newton. Le teorie della relatività di Einstein sono i suoi successi supremi.

Per noi, tuttavia, non è facile né ovvio essere realisti nei confronti della materia alla scala dei singoli atomi. Ciò è dovuto alla meccanica quantistica.

La meccanica quantistica è oggi la nostra teoria migliore della natura alla scala atomica. Questa teoria, come ho già accennato, ha alcune caratteristiche molto sconcertanti. È opinione diffusa che queste caratteristiche precludano il realismo. In altre parole, la meccanica quantistica ci impone di dire di no a una o a entrambe le domande in questione. Nella misura in cui la meccanica quantistica è la descrizione corretta della natura, siamo obbligati a rinunciare al realismo.

La maggior parte dei fisici non è realista nei confronti degli atomi, della radiazione e delle particelle elementari. La loro convinzione, per lo più, deriva non da un desiderio di rifiutare il realismo sulla base di posizioni filosofiche radicali, ma dal credere che la meccanica quantistica sia corretta e che, come è stato loro insegnato, precluda il realismo.

Se è vero che la meccanica quantistica ci impone di rinunciare al realismo, allora, se siete realisti, dovete credere che la meccanica quantistica sia una teoria falsa. Può avere successo temporaneamente, ma non può essere la descrizione del tutto corretta della natura a una scala atomica. Questa fu la ragione che spinse Einstein a respingere la meccanica quantistica come null'altro che un semplice espediente provvisorio.

Secondo Einstein e altri realisti, la meccanica quantistica fornisce una descrizione incompleta della natura, a cui mancano alcune caratteristiche necessarie per una piena comprensione del mondo. A volte Einstein immaginava che esistessero «variabili nascoste» che avrebbero completato la descrizione del mondo offerta dalla teoria quantistica; era convinto che la descrizione completa, comprendente le caratteristiche mancanti, sarebbe stata compatibile con il realismo.

Se siete realisti e siete fisici, quindi, avete un imperativo di primaria importanza, ossia andare al di là della meccanica quantistica per scoprire quelle caratteristiche mancanti e usare quella conoscenza per costruire una vera teoria degli atomi. Questa è stata la missione incompiuta di Einstein ed è anche la mia.

Esistono tipi diversi di antirealisti, che hanno opinioni diverse sulla meccanica quantistica.

Alcuni antirealisti credono che le proprietà che attribuiamo agli atomi e alle particelle elementari non siano intrinseche a questi oggetti, ma siano create soltanto dalle nostre interazioni con essi ed esistano solo nel momento in cui le misuriamo. Possiamo chiamarli antirealisti radicali. Il più autorevole è stato Niels Bohr. Egli fu il primo ad applicare la teoria quantistica all'atomo, dopo di che divenne il leader e il mentore della generazione successiva di rivoluzionari quantistici. Il suo antirealismo radicale influenzò in grande misura quello che divenne il modo di interpretare la teoria quantistica.

Un altro gruppo di antirealisti crede che la scienza, nel suo complesso, non si occupi e non parli di ciò che è reale in natura, ma parli soltanto della nostra conoscenza del mondo. A loro giudizio, le proprietà che la fisica attribuisce a un atomo non riguardano quell'atomo, ma solamente la conoscenza che ne abbiamo. Questi scienziati possono essere chiamati epistemologi quantistici.

Vi sono poi gli operazionalisti, un gruppo di antirealisti che sono agnostici riguardo all'esistenza di una realtà fondamentale indipendente da noi. La meccanica quantistica, sostengono, non ha mai a che vedere con la realtà; è piuttosto un insieme di procedure per interrogare gli atomi. Non riguarda gli atomi stessi, ma ciò che accade quando gli atomi entrano in contatto con i grandi strumenti che usiamo per misurarli. Il migliore dei protégé di Bohr, Heisenberg, che inventò le equazioni della meccanica quantistica, era, almeno in parte, un operazionalista.

In contrasto con le dispute fra gli antirealisti radicali, gli epistemologi quantistici e gli operazionalisti, tutti i realisti hanno una visione simile – siamo d'accordo sulle risposte da dare alle due domande citate. Rispondiamo però in modo diverso a una terza domanda: il mondo naturale consiste

principalmente dei tipi di oggetti che vediamo intorno a noi e di ciò che li compone? In altre parole, ciò che vediamo intorno a noi è tipico dell'universo nel suo complesso?

Chi di noi risponde di sí a questa domanda può definirsi realista semplice o ingenuo. Devo avvisare i lettori che in relazione al realismo uso l'aggettivo «ingenuo» nel senso di forte, puro e senza complicazioni. Secondo me, una visione è ingenua se non ha bisogno di argomenti sofisticati o giustificazioni contorte. Direi che un realismo ingenuo, quando è possibile, è da preferire.

Esistono realisti che non sono ingenui in questo senso: sono convinti che la realtà sia enormemente diversa dal mondo che percepiamo e misuriamo.

Un esempio di questa concezione è l'«interpretazione a molti mondi», secondo cui il mondo che percepiamo è soltanto uno di molti e sempre piú numerosi mondi paralleli. I suoi fautori si definiscono realisti e hanno qualche diritto a questo titolo in virtù del fatto che rispondono di sí alle prime due domande. A mio avviso, però, sono realisti solamente nel senso piú tecnico, accademico. Potremmo forse considerarli sostenitori del realismo magico, perché credono che ciò che è reale sia ben diverso dal mondo che percepiamo. In questo senso, il realismo magico è quasi una forma di misticismo, in quanto implica che il mondo vero sia nascosto ai nostri sensi.

È possibile formulare una teoria degli atomi che sia realistica nel senso piú generale e ingenuo, e quindi rispondere di sí a tutt'e tre le domande? Si può, e questa è la storia che voglio raccontare. Questa teoria, però, non è la meccanica quantistica e, se fosse corretta, allora la meccanica quantistica sarebbe sbagliata, nel senso che la sua descrizione della natura sarebbe necessariamente molto incompleta.

In questo libro racconterò anche come questa teoria della natura basata sul realismo ingenuo è stata messa da parte, mentre ha continuato a prosperare una teoria che impone di abbracciare o l'antirealismo o il misticismo. Concluderò tuttavia con una nota di speranza, tracciando a grandi linee il modo in cui potremmo procedere verso una visione realistica della natura che comprenda il dominio quantistico.

Tutto ciò è importante perché in questi primi anni del nuovo secolo la scienza è sotto attacco. La scienza è sotto attacco e con essa anche il credere in un mondo reale in cui i fatti sono veri o falsi. A quanto pare, parti della nostra società stanno letteralmente perdendo la cognizione del confine tra realtà e fantasia.

La scienza è sotto attacco da parte di quanti giudicano le sue conclusioni di ostacolo ai propri obiettivi politici e commerciali. Il cambiamento climatico non dovrebbe essere un problema politico; non è una questione ideologica, ma un problema di sicurezza nazionale e come tale dovrebbe essere trattato. È un problema reale, che richiederà soluzioni basate su dati concreti. La scienza è sotto attacco anche da parte di fondamentalisti religiosi secondo i quali alcuni testi dell'antichità sono insegnamenti divini di verità immutabili.

A mio parere, tra la maggior parte delle religioni e la scienza non vi sono ragioni di conflitto. Molte religioni accettano – e addirittura celebrano – la scienza come la via verso la conoscenza del mondo naturale. Oltre a ciò, l'esistenza e il significato del mondo sono comunque un mistero, che sia la scienza sia la religione possono indurci a discutere, ma che nessuna delle due può risolvere.

È necessario soltanto che le religioni non attacchino né cerchino di screditare quelle scoperte scientifiche che sono considerate conoscenze acquisite perché supportate da prove schiaccianti, secondo il giudizio di persone sufficientemente istruite per valutarne la validità. In effetti, sono di questa opinione molti leader religiosi di tutte le fedi. In cambio, gli scienziati dovrebbero vedere questi leader illuminati come alleati nell'opera di rendere migliore il mondo.

In aggiunta, la scienza è sotto attacco a causa di un atteggiamento di moda tra certi accademici umanisti – che dovrebbero avere più giudizio – secondo i quali la scienza non è altro che una costruzione sociale che produce solo una delle molte prospettive altrettanto valide.

Affinché la scienza possa rispondere in modo chiaro e forte a queste sfide, essa stessa non deve essere corrotta da aspirazioni mistiche e programmi metafisici dei suoi professionisti. I singoli scienziati possono essere – e, ammettiamolo, a volte sono – motivati da sentimenti mistici e preconcetti metafisici. Ciò non danneggia la scienza a patto che i criteri rigorosi che

distinguono le ipotesi e le intuizioni dalle verità comprovate siano universalmente compresi e adottati.

Quando però la fisica fondamentale viene dirottata da una filosofia anti-realistica, siamo in pericolo. Rischiamo di rinunciare al progetto secolare del realismo, che non è altro che l'aggiustamento continuo, un poco alla volta con il procedere della conoscenza, del confine tra la nostra conoscenza della realtà e il dominio della fantasia.

Uno dei pericoli dell'antirealismo riguarda la pratica stessa della fisica. L'antirealismo riduce la nostra aspirazione a ottenere una comprensione assolutamente chiara della natura e quindi indebolisce i nostri criteri di valutazione di ciò che vale come comprensione di un sistema fisico.

In seguito al trionfo dell'antirealismo in relazione al mondo atomico, abbiamo dovuto combattere con le congetture antirealistiche sulla natura alla scala più grande possibile. Una minoranza rumorosa di cosmologi dichiara che l'universo che vediamo intorno a noi è solo una bolla in un vasto oceano, il multiverso, che contiene un'infinità di altre bolle. Inoltre, mentre è ragionevole ipotizzare che le galassie che possiamo vedere siano tipiche del resto del nostro universo, le altre bolle invisibili sono da considerare governate da leggi differenti e distribuite in modo casuale, perciò il nostro universo è tutt'altro che tipico. Questo, insieme al fatto che tutte, o quasi tutte, le altre bolle sono e saranno sempre fuori della portata delle nostre osservazioni, significa che l'ipotesi del multiverso non potrà mai essere verificata o falsificata, il che pone questa fantasia al di là dei confini della scienza. Ciò nonostante, non pochi fisici e matematici stimati difendono questa idea.

Confondere questa fantasia del multiverso con l'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica sarebbe un errore. Sono due idee distinte, che però hanno in comune un sovvertimento magico-realistico dell'obiettivo della scienza di non spiegare il mondo intorno a noi in termini di qualcos'altro. Vorrei suggerire che la chiarezza riguardo all'obiettivo e alla funzione della scienza non avrebbe potuto essere danneggiata dagli entusiastici proponenti del multiverso se la maggioranza dei fisici non avesse adottato acriticamente versioni antirealistiche della fisica quantistica.

Certo, la meccanica quantistica spiega molti aspetti della natura e lo fa con suprema eleganza. I fisici hanno sviluppato un insieme di strumenti molto potenti per spiegare fenomeni diversi in termini quantomeccanici,

perciò quando si padroneggia la meccanica quantistica si controllano molti aspetti della natura. Allo stesso tempo, i fisici girano sempre intorno ai buchi profondi che la meccanica quantistica lascia nella nostra comprensione della natura. La teoria non offre un quadro generale di ciò che accade nei singoli processi e spesso non riesce a spiegare perché un esperimento va a finire in un modo anziché in un altro.

Queste lacune e mancanze sono importanti perché sono alla base del fatto che ora che sembriamo aver esaurito le forze siamo arrivati solo a metà strada verso la soluzione dei problemi fondamentali della scienza. Sono convinto che il motivo per cui non siamo ancora riusciti a unificare la teoria quantistica con la gravità e lo spaziotempo (che è ciò che intendiamo per quantizzazione della gravità), o a unificare le interazioni, è che lavoriamo con una teoria quantistica incompleta e sbagliata.

Sospetto però che le implicazioni di costruire la scienza su fondamenta sbagliate siano più ampie e più profonde. La fiducia nella scienza come metodo per risolvere le controversie e individuare la verità è compromessa quando alla base della scienza fiorisce un filone radicale di antirealismo. Quando coloro che decidono il criterio per stabilire che cosa costituisce una spiegazione sono sedotti da un misticismo virulento, la confusione che ne risulta viene avvertita in tutti gli ambiti della cultura.

Ho avuto il privilegio di incontrare alcuni fisici della seconda generazione dei fondatori della fisica del Novecento. Uno dei più contraddittori era John Archibald Wheeler, il fisico teorico nucleare e mistico che ha trasmesso alla mia generazione l'eredità di Albert Einstein e Niels Bohr raccontandoci dei suoi rapporti di amicizia con loro. Wheeler fu un convinto combattente della guerra fredda che lavorò alla bomba all'idrogeno proprio mentre apriva la strada allo studio degli universi quantistici e dei buchi neri. Fu anche un grande mentore che annoverò tra i suoi studenti Richard Feynman, Hugh Everett e molti pionieri della gravità quantistica. E avrebbe potuto essere il mio mentore, se avessi avuto più giudizio.

Da bravo allievo di Bohr, Wheeler parlava per indovinelli e paradossi. La sua lavagna era diversa da tutte quelle che avevo mai visto: nessuna equazione e solo pochi aforismi scritti con una calligrafia elegante, ognuno racchiuso in un riquadro, che distillavano la ricerca di una vita spesa alla ricerca della ragione per cui il nostro mondo è un universo quantistico. Un

tipico esempio è «It from bit», che sancisce l'informazione come fondamento della realtà. (Wheeler fu uno dei primi ad adottare la moda attuale di considerare il mondo costituito da informazione, di modo che l'informazione è piú fondamentale di ciò che descrive. Questa è una forma di antirealismo che discuteremo piú avanti). Eccone un altro: «Nessun fenomeno è un fenomeno reale finché non è un fenomeno osservato». Per citare un esempio del tipo di conversazione che si poteva avere con Wheeler, una volta mi disse: «Supponi che quando morirai e ti presenterai a san Pietro per l'esame finale, lui ti ponga una sola domanda: "Perché i quanti?"» (In altre parole, perché viviamo in un mondo descritto dalla meccanica quantistica?) «Che cosa gli dirai?»

Ho dedicato gran parte della mia vita alla ricerca di una risposta soddisfacente a questa domanda. Mentre scrivo queste pagine, mi tornano in mente immagini vivide dei miei primi incontri con la fisica quantistica. A diciassette anni, abbandonate le scuole superiori, andavo spesso a curiosare tra gli scaffali della biblioteca di fisica dell'Università di Cincinnati. Lì mi imbattei in un libro con un capitolo scritto da Louis de Broglie (lo incontreremo nel sesto capitolo), che fu il primo ad avanzare la proposta che gli elettroni sono sia onde sia particelle. Quel capitolo presentava la sua teoria dell'onda pilota, che è stata la prima formulazione realistica della meccanica quantistica. Era scritta in francese, una lingua che non leggevo agevolmente dopo due anni di studio al liceo, ma ricordo bene la mia eccitazione quando compresi gli elementi fondamentali. Se chiudo gli occhi, posso ancora vedere una pagina del libro, con l'equazione che mette in relazione la lunghezza d'onda con la quantità di moto.

Iniziai il mio primo corso di meccanica quantistica la primavera successiva, all'Hampshire College. Quel corso, tenuto da Herbert Bernstein, terminò con la presentazione del teorema fondamentale di John Bell che, in breve, dimostra che il mondo quantistico non si inserisce agevolmente nello spazio¹. Ricordo bene che quando capii la dimostrazione del teorema, uscii nel pomeriggio tiepido e mi sedetti sugli scalini della biblioteca del college, stordito. Tirai fuori un quaderno e scrissi di getto una poesia per una ragazza per cui avevo una cotta, in cui le dicevo che ogni volta che ci toccavamo alcuni elettroni nelle nostre mani da quel momento in poi sarebbero sempre stati collegati. Non ricordo piú chi fosse o come reagí alla

mia poesia né se mai gliela mostrai, però il mio desiderio ossessivo di penetrare il mistero dell'entanglement non locale, che nacque quel giorno, non mi ha mai abbandonato; del resto, nei decenni trascorsi da allora la mia impellente necessità di capire meglio il dominio quantistico non è diminuita. Nella mia carriera, gli enigmi della fisica quantistica sono stati il mistero più importante a cui sono tornato più e più volte. In queste pagine spero di far sí che anche i lettori ne siano affascinati.

La storia che racconto in questo libro ha la forma di un'opera in tre atti. La Parte prima insegna i concetti fondamentali della meccanica quantistica di cui avremo bisogno ripercorrendo la storia della sua invenzione. Il tema principale è il trionfo degli antirealisti, capeggiati da Bohr e Heisenberg, sui realisti, difesi da Einstein. Devo far notare che gli eventi narrati rappresentano solo una sintesi; la storia vera è molto più complicata. La Parte seconda descrive la ripresa degli approcci realistici alla meccanica quantistica, iniziata negli anni Cinquanta, e ne spiega i punti di forza e le debolezze. Gli eroi sono un fisico americano di nome David Bohm e un teorico irlandese, John Bell.

La conclusione della Parte seconda sarà che gli approcci realistici sono possibili e funzionano abbastanza bene per minare le argomentazioni secondo cui la fisica quantistica ci impone di diventare tutti antirealisti. Secondo me, comunque, nessuno di questi approcci ha l'aria di essere corretto. Penso che possiamo fare di meglio; in effetti, per ragioni che spiegherò, oserei dire che il completamento corretto della meccanica quantistica risolverà anche il problema della gravità quantistica, oltre a fornirci una buona teoria cosmologica. La Parte terza presenta gli sforzi contemporanei, da parte mia e di altri, di costruire questa teoria realistica del tutto.

Benvenuti nel mondo quantistico. Sentitevi a casa – è il nostro mondo. Ed è una fortuna che ci restino da risolvere i suoi misteri.

La rivoluzione incompiuta di Einstein

Per Dina e Kai

Tutto ciò che può fare un musicista è avvicinarsi alle fonti della natura e sentire così di essere in comunione con le leggi naturali.

JOHN COLTRANE

Posso dire con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica.

RICHARD FEYNMAN

Parte prima
Un'ortodossia dell'irreale

Capitolo primo

La natura ama nascondersi

Ciò di cui si occupa la fisica è la realtà.

ALBERT EINSTEIN ¹.

La meccanica quantistica è alla base della nostra comprensione della natura da novant'anni. È dappertutto, ma è anche profondamente misteriosa. Ben poco della scienza moderna avrebbe senso senza di essa. Tuttavia gli esperti hanno difficoltà a concordare su ciò che afferma della natura.

La meccanica quantistica spiega perché esistono gli atomi e perché sono stabili e hanno proprietà chimiche diverse. Spiega anche come si combinano formando molecole diverse. Di conseguenza, è la base della nostra comprensione delle forme e delle interazioni delle molecole. La vita sarebbe incomprensibile senza i quanti. Dal comportamento dell'acqua alle forme delle proteine e alla fedele trasmissione dell'informazione da parte del DNA e dell'RNA, tutto nella biologia dipende dai quanti.

La meccanica quantistica spiega le proprietà dei materiali, per esempio che cosa rende un metallo un buon conduttore dell'elettricità, mentre un altro è un isolante. Spiega la luce e la radioattività ed è la base della fisica nucleare. Senza di essa non capiremmo perché le stelle brillano. E non potremmo aver inventato i chip o i laser su cui si basa gran parte della tecnologia. La meccanica quantistica è il linguaggio che usiamo per scrivere il modello standard della fisica delle particelle, che contiene tutto ciò che sappiamo delle particelle elementari e delle forze fondamentali tramite le quali esse interagiscono.

Secondo la nostra migliore teoria dell'universo primordiale, tutta la materia, insieme alle configurazioni che finirono per unirsi formando le galassie, fu stratonata dalla casualità quantistica del vuoto dello spazio vuoto e

portata a esistere dalla rapida espansione dell'universo. Non mi aspetto che i lettori capiscano in modo preciso che cosa significano queste parole, che però forse evocano un'immagine. In ogni caso, se ciò è corretto, senza la fisica quantistica non esisterebbe letteralmente null'altro che spaziotempo vuoto.

Nonostante il suo grande successo, però, al cuore della meccanica quantistica vi è un enigma ostinato. Il mondo quantistico si comporta in modi che sfidano la nostra intuizione. Si dice spesso che nella fisica quantistica un atomo può essere in due posizioni allo stesso tempo, ma questo è solo l'inizio; la storia completa è molto più strana. Se un atomo può essere qui o là, dobbiamo parlare di stati in cui è, in qualche modo, simultaneamente sia qui sia là. Questa è detta sovrapposizione.

Se non sapete nulla del mondo quantistico, vi starete senza dubbio chiedendo che cosa significhi che un atomo è in qualche modo sia qui sia là. Non scoraggiatevi se la questione vi confonde. Avete assolutamente ragione a domandarvi che cosa significhi. Questo è uno dei misteri fondamentali della meccanica quantistica. Per il momento, è sufficiente che lo accettiate come un mistero, al quale associamo il termine «sovrapposizione». Più avanti riusciremo a chiarirlo.

Ecco un primo passo. L'affermazione che una particella quantistica è in una «sovrapposizione dello stato in cui si trova qui e dello stato in cui si trova là» ha a che fare con la natura ondulatoria della materia, infatti un'onda è una perturbazione che si diffonde e quindi può essere sia qui sia là.

Parliamo di particelle elementari, ma ogni entità quantistica, compresi gli atomi e le molecole, è sia una particella sia un'onda. Per cominciare a capire che cosa significa, considerate che, se realizziamo un esperimento per stabilire dove si trova un atomo, il risultato sarà una posizione precisa, ma tra una misurazione e l'altra, quando non lo stiamo cercando, risulta impossibile stimare dove potrebbe essere. È come se la tendenza o propensione a trovare la particella si diffondesse come un'onda quando non guardiamo. Appena guardiamo di nuovo, però, la particella è sempre da qualche parte.

Immaginiamo di giocare a nascondino con un atomo. Se apriamo gli occhi, o accendiamo un rivelatore, lo vediamo da qualche parte. Quando abbassiamo le palpebre, però, si dissolve in un'onda di potenzialità. Se riapriamo gli occhi, l'atomo è sempre da qualche parte.

Un'altra caratteristica unica del mondo quantistico è l'*entanglement*. Se due particelle interagiscono e poi si allontanano l'una dall'altra, restano collegate nel senso che sembrano condividere proprietà che non si possono scomporre in proprietà di cui ciascuna gode individualmente.

Con uno sforzo di immaginazione possiamo applicare questi nuovi concetti ad atomi e molecole che sono troppo piccoli per essere visti direttamente. Dobbiamo studiarli in modi indiretti e a tale scopo utilizziamo dispositivi di misurazione grandi e complessi.

Questi dispositivi fanno parte del mondo dei grandi oggetti di uso quotidiano. Una cosa di cui possiamo essere certi è che questi grandi oggetti non mostrano nessuno dei comportamenti bizzarri descritti dalla meccanica quantistica. Una sedia è qui oppure è lì, non è mai in una combinazione dei due stati. Quando ci svegliamo nel mezzo della notte in una strana stanza d'albergo, possiamo non sapere con certezza dove si trova la sedia, ma possiamo essere certi che è da qualche parte. E se, camminando al buio, andiamo a sbattere contro la sedia, il nostro futuro non resta intrecciato al suo.

Nel mondo della nostra esperienza, i gatti sono vivi oppure morti, anche se sono chiusi in una scatola. Quando la apriamo, il gatto non passa all'improvviso da una combinazione di vita e morte alla morte. Se lo troviamo morto, è probabile che lo sia da qualche tempo, come indicherebbe immediatamente l'odore.

Gli oggetti ordinari non sembrano condividere le stranezze quantistiche degli atomi di cui sono fatti. Anche se sembra ovvio, ne nasce un mistero. La meccanica quantistica è la teoria centrale della natura. Come tale deve essere universale. Se si applica a un atomo, si deve applicare anche a due atomi, o dieci o novanta. E abbiamo prove sperimentali eccellenti che lo confermano. Esperimenti delicati, in cui grandi molecole sono poste in una sovrapposizione quantistica, mostrano che hanno la stessa stranezza quantistica degli elettroni. Per dirne una, si diffrangono e interferiscono come onde.

Ma allora la meccanica quantistica si deve applicare ai grandi insiemi di atomi che costituiscono voi, me, il mio gatto o la sedia su cui è raggomitolato. Non sembra proprio, però. Non sembra nemmeno che la meccanica quantistica si applichi a qualcuno degli strumenti e delle macchine che

usiamo per ottenere immagini degli atomi e rivelarne le stranezze quantistiche.

Com'è possibile?

In particolare, quando misuriamo una proprietà di un atomo, usiamo dispositivi di grandi dimensioni. Gli atomi possono essere in una sovrapposizione di stati e quindi in posizioni diverse allo stesso tempo, ma lo strumento di misurazione indica sempre soltanto una delle risposte possibili alla domanda che poniamo. Come mai? Perché la meccanica quantistica non si applica anche ai dispositivi che usiamo per misurare i sistemi quantistici?

Questo è il cosiddetto problema della misurazione, controverso e irrisolto dagli anni Venti del secolo scorso. Il fatto che dopo tutto questo tempo gli esperti non abbiano ancora raggiunto un accordo significa che esiste un aspetto fondamentale della natura che non abbiamo ancora capito.

Da qualche parte si ha quindi una transizione dal mondo quantistico, in cui un atomo può essere in posti diversi allo stesso tempo, al mondo ordinario, in cui tutto è sempre da qualche parte. Se una molecola composta da dieci o novanta atomi può essere descritta dalla meccanica quantistica, ma un gatto no, da qualche parte tra i due vi è una linea che indica dove si ferma il mondo quantistico. Una soluzione del problema della misurazione rivelerebbe dove sta quella linea e spiegherebbe la transizione.

Vi sono persone che sono certe di conoscere la soluzione del problema della misurazione. Più avanti, incontreremo alcune di queste persone e le loro idee. Vogliamo cercare di capire quale prezzo dobbiamo pagare per eliminare questa follia quantistica dalla nostra comprensione del mondo.

In linea generale, le persone che mirano ad affrontare i misteri della meccanica quantistica appartengono a due categorie.

Il primo gruppo presume che la teoria così come fu formulata negli anni Venti sia essenzialmente corretta. Sono convinti che il problema non sia legato alla meccanica quantistica, ma invece al modo in cui la interpretiamo o ne parliamo. Questa strategia per mitigare la bizzarria della meccanica quantistica risale ad alcuni dei fondatori, a partire da Niels Bohr.

Il fisico danese Niels Bohr fu il primo, quando non aveva ancora trent'anni, ad applicare la teoria quantistica agli atomi. Più in là negli anni divenne il leader *de facto* della rivoluzione quantistica, in parte per il fascino

delle sue idee e in parte perché istruí e fu il mentore di molti giovani rivoluzionari.

Il secondo gruppo ha concluso che la teoria è incompleta. Non se ne può capire il significato perché è solo una parte della storia. Cercano un completamento della teoria che racconti il resto e risolva così i misteri della meccanica quantistica. Questa strategia risale ad Albert Einstein.

Einstein fu piú di chiunque altro il responsabile dell'inizio della rivoluzione quantistica. Fu il primo a esprimere con chiarezza la natura duale della luce come particella e come onda. Ormai è piú noto per la teoria della relatività, ma vinse il premio Nobel per il suo lavoro sulla teoria quantistica, e per sua stessa ammissione dedicò piú tempo alla teoria quantistica che alla relatività. Tuttavia, pur avendo dato inizio alla rivoluzione quantistica, Einstein non divenne uno dei suoi leader, perché il suo realismo lo obbligava a respingere la teoria nella forma sviluppata alla fine degli anni Venti.

Nel linguaggio presentato nella Prefazione, i componenti del primo gruppo sono per lo piú sostenitori dell'antirealismo o del realismo magico. I realisti appartengono al secondo gruppo.

Coloro che sostengono l'incompletezza della meccanica quantistica sottolineano il fatto che nella maggior parte dei casi può solo formulare previsioni statistiche dei risultati degli esperimenti. Anziché indicare che cosa accadrà, fornisce le probabilità dei possibili eventi. In una lettera del 1926 all'amico Max Born, Einstein scrisse:

La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare piú a fondo il segreto del gran Vecchio.

In ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi col mondo ².

Einstein era amico anche di Niels Bohr e le loro reazioni divergenti alla meccanica quantistica alimentarono un dibattito appassionato tra i due che proseguí per piú di quarant'anni, fino alla morte di Einstein. Questo dibattito è tuttora in corso tra i loro discendenti intellettuali. Einstein fu la prima persona a esprimere chiaramente la necessità di una teoria rivoluzionaria degli atomi e della radiazione, ma non poteva accettare che la meccanica quantistica fosse quella teoria. La sua prima reazione alla meccanica

quantistica fu quella di sostenere che era incoerente. Quando non riuscì a dimostrarlo, sostenne invece che la meccanica quantistica dà una descrizione incompleta della natura, che tralascia una parte essenziale del quadro complessivo.

Credo che Einstein non potesse accettare la meccanica quantistica come una teoria definitiva perché si poneva obiettivi scientifici troppo elevati. Era guidato dalla speranza di trascendere l'opinione soggettiva e scoprire un autentico specchio della natura che mostrasse l'essenza della realtà in poche leggi matematiche atemporali. Secondo Einstein, la scienza aspira a cogliere la vera essenza del mondo e quell'essenza è indipendente da noi e può non avere a che fare con ciò che crediamo o che ne sappiamo.

Einstein doveva pensare più di chiunque altro di avere il diritto di esigerlo perché aveva raggiunto questo obiettivo nelle sue scoperte della relatività generale e della relatività ristretta. Dopo aver gettato le basi della fisica quantistica, cercò di cogliere l'essenza del mondo atomico con una descrizione completa degli atomi, degli elettroni e della luce.

Bohr replicò che la fisica atomica richiedeva una revisione rivoluzionaria della nostra idea di che cos'è la scienza, come del nostro modo di concepire il rapporto tra la realtà e la conoscenza che ne abbiamo. Ciò era dovuto al fatto che noi facciamo parte del mondo, quindi dobbiamo interagire con gli atomi che cerchiamo di descrivere.

Bohr asseriva che, una volta assimilato questo cambiamento rivoluzionario nel nostro pensiero, la completezza della meccanica quantistica sarebbe stata inevitabile, poiché era parte integrante del nostro essere partecipi del mondo che cerchiamo di descrivere. Dalla prospettiva di Bohr, la teoria quantistica è completa nel senso che non possiamo avere una descrizione del mondo più completa.

Se rifiutiamo queste rivoluzioni filosofiche e ci ostiniamo ad avere un'antiquata concezione di buon senso della realtà e del suo rapporto con le nostre osservazioni e conoscenze, dobbiamo pagare un prezzo di un altro genere. Dobbiamo considerare che ci sbagliamo riguardo a qualche proprietà della natura. Dobbiamo scoprire quale assunto comune è sbagliato e sostituirlo con un'ipotesi fisica radicalmente nuova che apra la strada a una nuova teoria che completerà la meccanica quantistica.

Grazie a una combinazione di teoria ed esperimento, a partire da un articolo pubblicato nel 1935 da Einstein insieme a due collaboratori, cono-

sciamo un aspetto di questo completamento. La nuova teoria deve violare l'assunto comune che le cose interagiscano soltanto con altre cose vicine nello spazio.

Questo è l'assunto della località. In una grossa parte della storia narrata nei capitoli seguenti spiegherò come questa idea sensata debba essere trascinata nella teoria che sostituirà la meccanica quantistica.

Con questo libro mi pongo tre obiettivi. Innanzitutto, voglio spiegare ai non addetti ai lavori quali sono gli enigmi al cuore della meccanica quantistica. Dopo quasi un secolo di studio della fisica quantistica, è notevole che continui a mancare un accordo sulla soluzione di questi enigmi.

Dopo aver spiegato le ragioni del dibattito in modo corretto nei confronti di entrambi gli schieramenti, però, non resterò imparziale. Nel grande dibattito per stabilire se la meccanica quantistica sia o no l'ultima parola, sto dalla parte di Einstein. Sono convinto che esista uno strato di realtà più profondo di quello descritto da Bohr, che può essere capito senza pregiudicare concetti antiquati di realtà e la nostra capacità di capirla e di descriverla.

Il mio secondo obiettivo è quindi difendere un punto di vista sugli enigmi della meccanica quantistica, ossia che i problemi possono essere risolti soltanto dal progresso della scienza che scoprirà un mondo al di là della meccanica quantistica. Mentre la meccanica quantistica è misteriosa e confondente, questa teoria più profonda sarà pienamente comprensibile.

Posso fare questa affermazione perché sappiamo sin dall'invenzione della meccanica quantistica come presentare la teoria in un modo che scioglie i misteri e risolve gli enigmi. In questo approccio non vengono contestate le nostre credenze in una realtà oggettiva, una realtà non influenzata da ciò che ne sappiamo o ne facciamo e di cui è possibile avere una conoscenza completa. In questa realtà, esiste un solo universo e quando osserviamo qualcosa dell'universo è perché è vero. Possiamo giustamente chiamarlo un approccio realistico al mondo quantistico.

Un approccio antirealistico attribuisce i misteri della meccanica quantistica a sottigliezze che hanno a che fare con il nostro modo di giungere alla conoscenza della natura. Gli approcci di questo tipo hanno proposte radicali da avanzare riguardo all'epistemologia, la branca della filosofia che si occupa dell'acquisizione della conoscenza. Gli approcci realistici presumo-

no che prima o poi si possa arrivare a una vera rappresentazione del mondo e quindi sono volutamente ingenui rispetto all'epistemologia. I realisti sono invece interessati all'ontologia, lo studio di ciò che esiste. Per contro, gli antirealisti sono convinti che non possiamo conoscere ciò che esiste realmente, a parte la nostra rappresentazione della conoscenza che abbiamo del mondo, che acquisiamo soltanto interagendo con esso.

Cercherò quindi di rassicurare i lettori riguardo alla possibilità di avere una comprensione completa della meccanica quantistica da una prospettiva realistica in cui il mondo esterno è pienamente compreso come indipendente da noi. L'osservatore non produce alcun effetto misterioso sull'osservato. La realtà è là fuori, per nulla disposta a conformarsi alla nostra volontà e alle nostre scelte. Questa realtà è totalmente comprensibile. Ed è costituita da un unico mondo.

L'esistenza di questi approcci realistici alla meccanica quantistica non significa di per sé che le proposte filosoficamente più stravaganti siano sbagliate. Però significa che non abbiamo motivi scientifici fondati per credere a questi approcci, perché il realismo è sempre da preferire nella scienza, quando è possibile.

Per quale motivo, allora, gran parte dei discorsi sulla teoria quantistica si ispira alle idee più strane in cui la realtà dipende dalla conoscenza che ne abbiamo, oppure esistono molte realtà? Questo è un problema per gli storici delle idee. Uno di loro, Paul Forman, ha collegato il predominio nella comunità scientifica della filosofia antirealistica di Bohr e Heisenberg, negli anni Venti e Trenta, all'accettazione del caos e dell'irrazionalità propugnata da Spengler e altri all'indomani della prima guerra mondiale.

È una questione storica affascinante, ma spetta agli storici chiarirla. Non sono uno storico, sono uno scienziato, e questo mi porta al terzo obiettivo che mi prefiggo.

Mi sono schierato con Einstein nella ricerca di una realtà più profonda ma più semplice dietro alla meccanica quantistica sin da quando lessi per la prima volta la sua opinione sull'argomento, dopo aver abbandonato le scuole superiori. Il mio viaggio nella fisica iniziò leggendo l'autobiografia di Einstein, in cui, alla fine della vita, negli anni Cinquanta, rifletteva sui due compiti principali che secondo lui non erano ancora stati portati a termine nella fisica: in primo luogo capire la fisica quantistica e, in seguito, unificare la nuova comprensione dei quanti con la gravità, con il che inten-

deva la sua teoria generale della relatività. Ricordo di aver pensato che forse avrei potuto provare a contribuire. Era improbabile che ci riuscissi, ma forse era qualcosa per cui valeva la pena lottare.

Dopo aver, per così dire, ricavato la mia missione dalla lettura dell'auto-biografia di Einstein, scoprii quel libro di de Broglie, riuscii a entrare in un buon college discutendo con abilità, trovai ottimi insegnanti ed ebbi più volte fortuna con le domande di ammissione per il dottorato e per le borse postdoc. Ho una vita meravigliosa e come scienziato di frontiera ho avuto molte opportunità di tirare in porta, per risolvere i due grandi problemi di Einstein.

Non ci sono riuscito, per lo meno finora. Purtroppo, non ci è riuscito nessuno. Va detto, però, che negli ultimi decenni abbiamo fatto almeno qualche passo avanti nella comprensione del problema. Non è affatto come se fossimo arrivati alla soluzione, ma non si può neppure dire che non siamo andati avanti. Conosciamo molto meglio di Einstein gli ostacoli che deve superare una teoria che trascenda i limiti della meccanica quantistica. Per questo motivo, sono state avanzate alcune proposte e ipotesi molto interessanti, che potrebbero impostare la teoria più profonda che cerchiamo^a.

Rifletto sulla questione di come andare al di là della meccanica quantistica dalla metà degli anni Settanta e non sono mai stato più entusiasta e ottimista riguardo alle prospettive di successo. La mia terza ragione per scrivere questo libro è quindi portare a un pubblico più vasto un resoconto dalla frontiera della ricerca del mondo al di là dei quanti.

a. Una nota per i lettori esperti. I fondamenti quantistici sono al momento un settore assai vivace, con vari sviluppi sperimentali e teorici entusiasmanti. Molte proposte competono per risolvere gli enigmi che incontreremo in queste pagine. Devo avvertire i lettori che attraverseremo queste frontiere percorrendo un sentiero molto stretto e che esistono molti risultati e idee entusiasmanti che non cito in queste pagine. Se avessi cercato di passare in rassegna l'intero settore, o di considerare tutti gli ultimi ingegnosi passi avanti, il risultato sarebbe stato un libro di meno facile lettura. Il mio primo obiettivo è presentare il mondo dei fenomeni quantistici, non tutto lo spettro di interpretazioni contrastanti di questi fenomeni. Mi scuso in anticipo con quegli esperti che non troveranno qui la propria versione

preferita della fisica quantistica e li incoraggio a scrivere essi stessi un libro. Chiedo scusa anche agli storici. Non sono uno studioso della materia e le storie che racconto sono miti della creazione, tramandati da maestro ad allievo, che in alcuni casi hanno avuto origine dai fondatori stessi.

Capitolo secondo

I quanti

Il principio piú essenziale a cui potremmo ridurre la meccanica quantistica è questo:

Possiamo conoscere soltanto metà di ciò che dovremmo conoscere se volessimo controllare completamente, o prevedere in modo preciso, il futuro.

Questo principio fa crollare l'obiettivo fondamentale della fisica, che è riuscire a prevedere il futuro. Si sperava che se solo avessimo potuto descrivere in modo completo il mondo fisico avremmo ottenuto questo potere. Descrivendo in ogni dettaglio il movimento di ogni particella e l'azione di ogni forza, saremmo riusciti a capire esattamente che cosa sarebbe successo in futuro. Prima della formulazione della meccanica quantistica negli anni Venti, noi fisici eravamo certi che scoprendo le leggi che governano le particelle fondamentali saremmo stati capaci di prevedere e spiegare tutto ciò che accade nel mondo.

L'ipotesi che il futuro sia completamente determinato dalle leggi della fisica che agiscono sull'attuale configurazione del mondo è detta determinismo. È un'idea straordinariamente potente, la cui influenza è visibile in diversi settori. Se vi rendete conto di quanto il determinismo abbia dominato nel Novecento, potete iniziare a capire l'impatto rivoluzionario della meccanica quantistica in ogni settore, dato che la meccanica quantistica preclude il determinismo.

Per sottolineare questo punto, mi piace citare il dramma *Arcadia* di Tom Stoppard, in cui la giovanissima eroina, Thomasina, spiega al suo tutore:

Se potessimo fermare la posizione e la direzione di ciascun atomo e se la nostra mente potesse concepire ogni singola azione così sospesa, e se fossimo veramente, ma veramente bravi in algebra, potremmo scrivere la formula di tutto il futuro; e anche se nessuno è così intelligente da poterla scrivere, io sono certa che quella formula esiste ¹.

Una descrizione completa della natura, in un dato momento, è chiamata *stato*. Per esempio, se pensiamo che il mondo sia composto di particelle che sfrecciano tutt'intorno, lo stato ci dice di ciascuna di esse dove si trova e a quale velocità e in quale direzione si muove, in quel momento.

Il potere della fisica deriva dalle sue leggi, che determinano come cambia la natura nel corso del tempo, trasformando lo stato del mondo come è in questo momento nello stato in un qualsiasi momento futuro. Una legge della fisica funziona per certi versi come un programma per computer: legge un input e produce un output. L'input è lo stato in un dato momento e l'output è lo stato in qualche momento futuro ^a.

Al calcolo si accompagna una spiegazione di come il mondo cambia nel tempo. La legge che agisce sullo stato presente *causa* gli stati futuri. Una previsione corretta dello stato futuro è considerata una convalida di quella spiegazione. La previsione è deterministica, in quanto un input preciso porta a un output preciso. Ciò conferma la convinzione che le informazioni utilizzate per descrivere lo stato siano di fatto una descrizione completa del mondo in un dato istante.

Questo concetto di legge è fondamentale per una concezione realistica della natura e, come tale, trascende qualsiasi teoria. La meccanica newtoniana e le due teorie della relatività di Einstein funzionano tutte nello stesso modo. Applicata allo stato in un momento iniziale, la legge lo trasforma nello stato in un momento futuro. Questo schema per spiegare la natura fu inventato da Newton, perciò lo chiamiamo paradigma newtoniano.

Va anche detto che, in quasi tutti i casi noti finora, le leggi sono reversibili. Si può dare come input lo stato in un momento futuro e applicare la legge nel senso opposto per ottenere lo stato in un momento precedente. (La questione della reversibilità del tempo e delle leggi fondamentali è un argomento centrale dei capitoli XIV e XV).

Spesso le informazioni necessarie per descrivere completamente lo stato di un sistema fisico vanno in coppia. Posizione e quantità di moto ^b. Vo-

lume e pressione. Campo elettrico e campo magnetico. Abbiamo bisogno di tutt'e due per prevedere il futuro. La meccanica quantistica ci dice che possiamo conoscere solo un elemento della coppia.

Ciò significa che non possiamo prevedere in modo preciso il futuro. Questo è solo il primo dei colpi che la teoria quantistica inferirà alle nostre confortevoli intuizioni.

Di ciascuna coppia, qual è il membro che possiamo conoscere? La meccanica quantistica dice che lo scegliamo noi! Questa è la base della sua sfida al realismo.

Vi sono altre cose da dire sull'impossibilità di prevedere il futuro. Per arrivarci, sfruttiamo la grande generalità che la meccanica quantistica pretende di avere e parliamo in maniera un po' astratta. Vogliamo descrivere un sistema fisico in termini di una coppia di variabili, che chiameremo A e B. La fisica quantistica afferma un principio in due parti.

1. Se conoscessimo A e B in un dato momento, potremmo prevedere in modo preciso il futuro del sistema.
2. Possiamo scegliere di misurare A o B e in entrambi i casi ci riusciremmo. Ma non possiamo fare di meglio. Non possiamo scegliere di misurare contemporaneamente A e B.

Così enunciato, questo principio è un divieto relativo a ciò che possiamo misurare, ma, se preferite, possiamo considerarlo come un divieto relativo a ciò che possiamo conoscere del sistema.

Un momento, però: non si potrebbe misurare A e poi, in un momento successivo, misurare B? Si potrebbe, ma la misurazione di B renderebbe irrilevante (al fine di prevedere il futuro) la conoscenza precedente di A. Può accadere in diversi modi. Uno è che, dopo la misurazione di B, il valore di A è randomizzato. Non possiamo misurare B senza alterare il valore di A e viceversa. Così, se misuriamo A, poi B e poi di nuovo A, il valore di A che otteniamo la seconda volta sarà casuale e quindi non collegato al valore ottenuto con la prima misurazione.

Insieme, i punti 1 e 2 sono chiamati *principio di non commutatività*. Si dice che due azioni *commutano* se l'ordine in cui vengono eseguite non ha importanza. Se conta quale azione viene eseguita per prima, diciamo che le due azioni sono non commutative. Non importa (se non a qualche fanati-

col) se nel caffè mettiamo prima lo zucchero o il latte; le due azioni commutano. Vestirsi richiede alcune operazioni non commutative; l'ordine in cui ci mettiamo le mutande e i pantaloni è importante. Però non importa quale calza infiliamo per prima, o se ce le mettiamo come prima cosa, nel mezzo del processo o alla fine. L'azione di mettersi le calze commuta con tutto tranne con quella di mettersi le scarpe. (I lettori portati per la matematica la vedranno come un'applicazione dell'algebra alla topologia).

Che cosa succede se si permette una data quantità di incertezza nella misurazione di A? In questo caso possiamo misurare B, ma solo fino a un certo livello di precisione. Queste incertezze sono reciproche – tanto più conosciamo A, tanto meno possiamo conoscere B e viceversa.

Supponiamo per esempio che A sia la posizione di una particella. Allora B è la quantità di moto. Se ora eseguiamo una misurazione che indica la posizione con un'approssimazione di un metro, possiamo poi misurare la quantità di moto con la stessa incertezza. Se aumentiamo l'incertezza nella misura di A, possiamo rendere più precisa la misura di B e viceversa. Si ottiene così un principio chiamato appunto *principio di incertezza*².

$$(\text{incertezza in A}) \times (\text{incertezza in B}) > \text{una costante}^c$$

Applicato alla posizione e alla quantità di moto, diventa

$$(\text{incertezza nella posizione}) \times (\text{incertezza nella quantità di moto}) > \text{una costante}$$

La fisica è come un campus universitario in cui ogni edificio prende il nome da qualcuno. La costante prende il nome da Max Planck e il principio di incertezza da Werner Heisenberg.

Il principio di incertezza è molto potente, come mostra questa sua importante conseguenza. Torniamo allo scenario in cui misuriamo A, poi B e poi di nuovo A. Come ho già detto, una volta che conosciamo il risultato della misurazione di B, la seconda misura di A è randomizzata; non è più uguale al valore originario di A. Supponiamo però di fare qualcosa, appena prima di rimisurare A, per dimenticare quale sia il valore di B. In quel caso,

il sistema ricorda – sí, è proprio la parola che usiamo per descrivere questa situazione – il valore originario di A.

Questa si chiama *interferenza*. È permessa dal principio di incertezza perché una volta dimenticata la misura di B, l'incertezza di B è molto grande, perciò quella di A può essere piccola.

Ma come possiamo annullare una misurazione? Vorrei presentare un esempio di fantasia. Esistono molti casi semplici in cui A e B hanno ciascuno due valori possibili. Immaginiamo di studiare un sistema costituito da persone; poniamo che A sia l'identità politica, che per semplificare riduciamo a una scelta binaria, destra o sinistra, e B la preferenza per un dato animale da compagnia, che divide le persone in amanti dei cani o dei gatti. Ora giochiamo a un gioco in cui una persona non può avere sia una preferenza sia un'identità politica ben determinate. Andiamo a una festa in cui tutti hanno opinioni di sinistra e chiediamo a ognuno se è un amante dei gatti o dei cani. Mettiamo gli amanti dei gatti in soggiorno e gli amanti dei cani in cucina. In entrambe le stanze, se ci informiamo sulle opinioni politiche dei presenti, ora metà di loro saranno di destra. Questo è quanto deve accadere se l'identità politica e la preferenza per cani o gatti non commutano.

In seguito però riuniamo di nuovo tutti nella sala da pranzo. Per un po' lasciamo che i due gruppi si mescolino, poi scegliamo a caso una persona alla volta. Non sappiamo da quale stanza provenga, quindi non siamo più al corrente di quale animale preferisca. Quando poi domandiamo l'identità politica, scopriamo che sono di nuovo tutti di sinistra.

Questi sono principî del tutto generali. Spesso A e B sono le risposte a domande polari; nel caso originario, però, A era la posizione di una particella elementare, per esempio un elettrone, e B era la sua quantità di moto.

La quantità di moto è una di quelle espressioni che costituiscono un ostacolo alla comprensione, quindi prendiamoci un momento per definirla.

Nella fisica, spesso dobbiamo fare riferimento alla rapidità e alla direzione del moto di una particella, che combiniamo in un'unica grandezza chiamata *velocità*. Potete pensare alla velocità di una particella come a una freccia che punta in direzione del suo moto e che è tanto più lunga quanto maggiore è la rapidità.

Per sopravvivere a una collisione volete che la forza a cui siete sottoposti sia la minore possibile. La forza esercitata da un camion su un'auto-

bile è proporzionale alla variazione di rapidità del camion. Ma è anche proporzionale alla sua massa. Preferite scontrarvi con una pallina da ping pong che con un camion, anche se viaggiano verso di voi con la stessa rapidità. Per esprimere questo concetto, i fisici definiscono la quantità di moto come il prodotto della massa per la velocità. Anche questa è una freccia nella direzione del moto, ora però la lunghezza è proporzionale sia alla rapidità sia alla massa.

La quantità di moto è un concetto centrale nella fisica perché si conserva. Ciò significa che in qualunque processo possiamo sommare le quantità di moto delle varie particelle coinvolte all'inizio e, indipendentemente da ciò che accade, la quantità di moto risultante non cambierà nel tempo. Prima, durante e dopo una collisione, la quantità di moto totale resta invariata. Ciò che accade in una collisione è che la quantità di moto viene scambiata da un corpo all'altro. Questo cambiamento della quantità di moto viene avvertito come una forza.

L'energia è un'altra grandezza che si conserva. L'energia totale di un sistema di particelle non cambia mai nel corso del tempo. Quando le particelle interagiscono, una può acquisire energia mentre le altre la perdono, ma l'energia totale resta invariata; non viene né creata né distrutta.

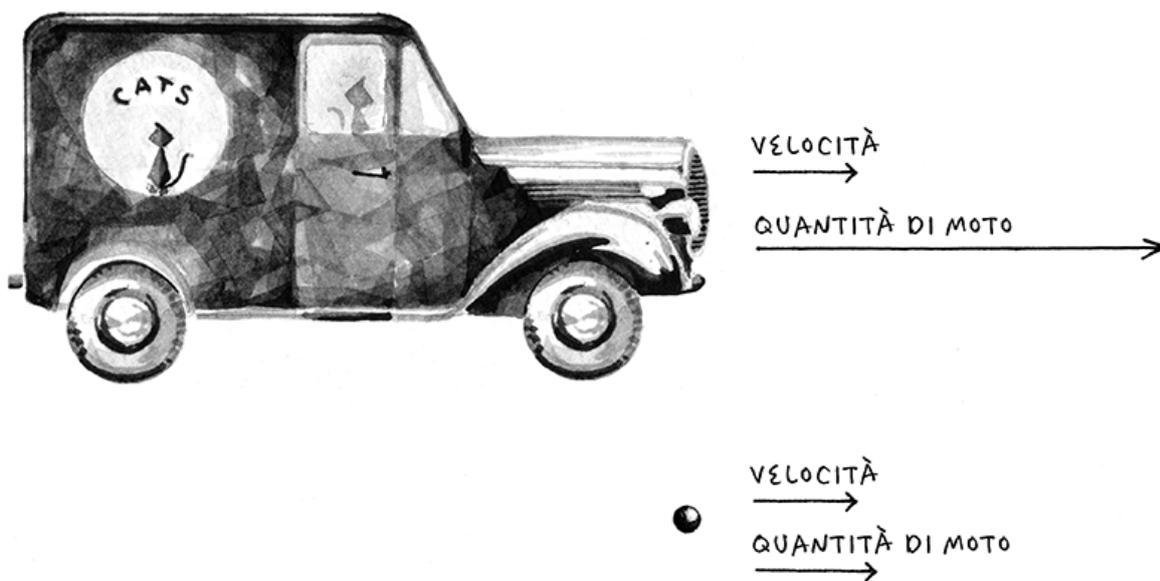


Figura 1.

Un camion ha una quantità di moto molto maggiore di una pallina da ping pong che viaggia alla stessa velocità, poiché la sua massa è molto maggiore e la quantità di moto è il prodotto della massa per la velocità.

L'energia e la quantità di moto sono collegate. Non avremo bisogno di conoscere l'esatta relazione, ma dobbiamo sapere che una particella che si muove liberamente, e ha un valore preciso di quantità di moto, ha anche una precisa energia.

Il principio di incertezza dice quindi che non possiamo conoscere allo stesso tempo la posizione e la quantità di moto di un corpo. Ciò significa che non possiamo formulare una previsione precisa del suo futuro, dato che per farlo dovremmo conoscere con esattezza sia dove si trova sia la velocità e la direzione del suo movimento.

Se vogliamo sviluppare un'intuizione su come si comportano le particelle quantistiche, dovremo essere capaci di visualizzare una particella con una posizione determinata, ma, a causa del principio di incertezza, senza una quantità di moto o una velocità determinate. Non è difficile, basta visualizzare la particella temporaneamente da qualche parte. Anche all'istante successivo sarà in una determinata posizione, ma da qualche altra parte. Poiché la sua quantità di moto è indeterminata, la particella salta di qua e di là a caso.

Ma come visualizziamo una particella con una quantità di moto determinata, ma con una posizione del tutto indeterminata? Questo sembra più impegnativo. Se la cerchiamo, abbiamo la stessa probabilità di trovarla da qualsiasi parte. Quindi è distribuita dappertutto. Ma come visualizziamo la sua quantità di moto?

La risposta è che una particella con una determinata quantità di moto ma una posizione del tutto indeterminata può essere visualizzata come un'onda. E non come un'onda qualsiasi, ma come un'onda pura, un'onda che vibra a un'unica frequenza.

Un'onda può essere descritta da due numeri. Uno è la sua frequenza, cioè il numero di oscillazioni al secondo. L'altro è la distanza tra le creste, nota come lunghezza d'onda. I due numeri sono collegati in questo modo: il loro prodotto corrisponde alla velocità a cui viaggia l'onda. Quindi un'on-

da che oscilla con un'unica frequenza avrà anche una lunghezza d'onda determinata.

La meccanica quantistica afferma che la quantità di moto della particella e la lunghezza d'onda dell'onda che la rappresenta sono collegate in un modo semplice, ossia sono inversamente proporzionali:

$$\text{lunghezza d'onda} = h / \text{quantità di moto}$$

dove h è la costante di Planck, che abbiamo già incontrato nel principio di incertezza.

Supponiamo per un momento che nessuna forza agisca sulla nostra particella, magari perché è molto lontana da qualsiasi altra cosa. In assenza di forze, una particella con una quantità di moto determinata ha anche un'energia determinata. Questa energia a sua volta è collegata alla frequenza dell'onda, in quanto variano in modo proporzionale:

$$\text{Energia} = h \times \text{frequenza}$$

Queste relazioni e corrispondenze sono universali. Nel mondo quantistico, tutto può essere visto come un'onda e come una particella. È una conseguenza diretta del principio fondamentale secondo cui possiamo misurare la posizione della particella oppure la sua quantità di moto, ma non entrambe allo stesso tempo.

Quando vogliamo misurarne la posizione, la visualizziamo come una particella, situata, ma solo momentaneamente, in un punto dello spazio. La quantità di moto è del tutto incerta, quindi all'istante successivo, se cerchiamo di nuovo la particella, troveremo che è saltata in modo casuale da qualche altra parte. Non può restare nello stesso posto perché, se così fosse, avrebbe un valore determinato, cioè zero, di quantità di moto.

D'altra parte, se scegliamo di misurare la quantità di moto della particella, scopriamo che ha un valore determinato. Non è da nessuna parte in particolare, quindi la visualizziamo come un'onda, un'onda però con una lunghezza d'onda e una frequenza determinate, secondo le relazioni citate poc'anzi.

Tutto ciò è folle e straordinario perché le onde e le particelle sono molto diverse. Una particella ha sempre una posizione determinata, localizzata

da qualche parte nello spazio. Il suo movimento traccia un percorso nello spazio, che chiamiamo traiettoria. Inoltre, secondo la fisica newtoniana, in ciascun istante una particella ha anche una velocità determinata e, di conseguenza, una quantità di moto determinata. Un'onda è quasi l'opposto. Non è localizzata, si diffonde mentre viaggia, occupando tutto lo spazio a sua disposizione.

Ora però scopriamo che onde e particelle sono aspetti diversi di una realtà duale, cioè modi diversi di visualizzare una stessa realtà. Un'unica realtà con una natura duale: il dualismo onda-particella.

Una particella quantistica può avere una posizione. Se ci domandiamo dove sia, la troveremo da qualche parte. Ma una particella quantistica non ha mai una traiettoria dato che, se sappiamo dov'è, dove sarà all'istante successivo è del tutto incerto. Dobbiamo abituarci a pensare a particelle in posizioni determinate che non sono punti di una traiettoria. In maniera analoga, se misuriamo una quantità di moto, troveremo sempre un valore. Ma in questo caso è un'onda, distribuita dappertutto. Dove troveremo la particella, se poi misuriamo la sua posizione, è del tutto incerto.

Questo schema, va riconosciuto, ha un'eleganza incredibile. Ma l'aspetto più convincente è la sua universalità. Si applica alla luce, agli elettroni e a tutte le altre particelle elementari conosciute. Si applica a combinazioni di queste particelle, come atomi e molecole. Si è dimostrato capace di descrivere i movimenti di grandi molecole, come fullereni sferici e proteine. Non è mai successo che un esperimento abbastanza sensibile da rivelare la natura quantistica di un oggetto non sia riuscito a farlo. Per lo meno finora, le dimensioni e la complessità non pongono limiti. Ancora non sappiamo se il dualismo onda-particella si applichi alle persone, ai gatti, ai pianeti e alle stelle, ma non sono note ragioni per cui è certamente impossibile.

In tutti questi casi, l'effetto è sempre lo stesso: possiamo conoscere soltanto metà di ciò che avremmo bisogno di sapere per prevedere in modo preciso il futuro.

- a. La metafora dell'universo come un computer è utile per illustrare il determinismo, ma nel complesso è fuorviante, come sosterrò più avanti.

- b. La quantità di moto sarà definita tra poco, ma approssimativamente la quantità di moto di un corpo è proporzionale alla sua velocità e alla sua massa.
- c. Il segno $>$ significa «maggiore di».

Capitolo terzo

Come cambiano i quanti

Ricordo che nella prima lezione del suo corso di meccanica quantistica il professor Herbert Bernstein affermò che la fisica è la scienza di tutto. Il nostro obiettivo nella fisica è trovare le leggi più generali della natura, che permettano di spiegare tutta la moltitudine di fenomeni prodotti dalla natura.

La meccanica quantistica spiega la più ampia varietà di fenomeni rispetto a ogni altra teoria esistente. Allo stesso tempo, riduce notevolmente ciò che si può domandare di qualsiasi fenomeno specifico. Abbiamo già incontrato un tipo di limitazione, cioè il fatto che di un sistema possiamo conoscere soltanto metà di ciò che dovremmo conoscere per formulare previsioni precise sul suo futuro. Di conseguenza, dobbiamo rinunciare a descrivere in modo esatto ciò che accade nei singoli atomi a favore di previsioni statistiche, che si applicano soltanto alle medie di molti casi. Ne segue che per credere nella teoria quantistica dobbiamo rinunciare all'ambizione di prevedere con precisione il futuro.

Di fronte al successo della meccanica quantistica, la maggior parte dei fisici ha rinunciato a queste ambizioni. Credo però che questo sia un atteggiamento poco lungimirante e che vi sia un livello più profondo della realtà ancora da scoprire, la cui conoscenza farà rinascere le nostre ambizioni di arrivare alla comprensione completa della natura.

Un'altra restrizione che limita la portata della teoria quantistica si può esprimere con un principio che chiamo *principio del sottosistema*:

Ogni sistema a cui si applica la meccanica quantistica deve essere un sottosistema di un sistema più grande.

Una delle ragioni è che la meccanica quantistica fa riferimento soltanto a grandezze fisiche che vengono misurate da strumenti di misurazione, che

devono essere esterni al sistema studiato. Inoltre, i risultati di queste misurazioni sono rilevati e registrati da osservatori e anch'essi non fanno parte del sistema studiato.

La maggior parte di noi si accosta alla scienza aspettandosi ingenuamente che ci dirà che cosa è reale. Possiamo seguire John Bell e chiamare *esseribile* una proprietà reale di un sistema: fa parte di ciò che è. Bell coniò la parola in contrapposizione al termine *osservabili*, che indica ciò che gli antirealisti vogliono da una teoria.

«Osservabili» ed «esseribili» sono termini insidiosi, il cui uso può significare fedeltà all'uno o all'altro schieramento nel dibattito su realismo e anti-realismo. Un'osservabile è una grandezza prodotta da un esperimento o da un'osservazione. Non si è affatto tenuti a credere che corrisponda a qualcosa che esiste a prescindere dalla misurazione o che aveva un valore prima della misurazione. Gli antirealisti usano questo termine per sottolineare che le grandezze che i fisici quantistici misurano non devono esistere a prescindere dalle nostre osservazioni, o prima di esse. I realisti usano il termine di John Bell «esseribile» per indicare la realtà che credono esista che si misuri o no qualcosa.

La maggior parte delle spiegazioni scientifiche, per esempio del volo di palle da cannone, uccelli o api, parla di *esseribili*.

Ma la meccanica quantistica no! Come sostenevano fermamente Heisenberg e Bohr, la meccanica quantistica non parla di ciò che è, ma solo di ciò che è stato osservato. Secondo loro, non è utile parlare di *esseribili* nel dominio atomico; la meccanica quantistica si occupa invece solo di *osservabili*.

Per misurare le *osservabili* di un atomo, lo poniamo in un grande strumento macroscopico. Per definizione, quell'apparecchio non fa parte del sistema di cui studiamo le *osservabili*. Nemmeno l'osservatore ne fa parte.

Per essere descritto nel linguaggio della meccanica quantistica, quindi, un sistema deve far parte di un sistema più grande che comprende l'osservatore e i suoi strumenti di misurazione. Da qui il nostro principio del sottosistema.

La maggior parte delle applicazioni della teoria quantistica ha a che fare con atomi e molecole o altri sistemi minuscoli; in questi casi la limitazione è irrilevante. Ma alcuni di noi ambiscono a descrivere l'intero universo. Riteniamo che questo sia il fine ultimo della scienza. Per definizione, però,

l'intero universo non fa parte di un sistema piú grande. Il principio del sottosistema rende vane le nostre speranze di avere una teoria dell'intero universo.

Esiste una differenza sottile ma fondamentale tra l'idea che la meccanica quantistica sia la teoria di tutto e la speranza di estendere la teoria quantistica all'intero universo. Ciò che intendeva il professor Bernstein con la sua affermazione è che la fisica è la base della descrizione corretta di ogni cosa – ciascuna considerata come un sottosistema del tutto. Molto diverso è immaginare di applicare la teoria quantistica all'intero universo, il che vorrebbe dire includere noi osservatori e i nostri strumenti di misurazione nel sistema studiato.

Nel corso dell'ultimo secolo sono stati compiuti diversi tentativi di estendere la meccanica quantistica per ottenere una teoria dell'intero universo (piú avanti ne incontreremo uno). Una parte della tesi complessiva di questo libro è il fallimento di questi tentativi.

Innanzitutto, considerare l'osservatore come una parte del sistema descritto solleva delicati problemi di autoreferenzialità. Non è chiaro nemmeno se un osservatore possa dare un'autodescrizione completa, poiché l'atto di osservare o descrivere noi stessi ci modifica.

Vi sono però ragioni piú profonde per cui la meccanica quantistica non può essere estesa in modo da diventare una teoria dell'intero universo.

In diversi miei libri (cioè *La vita del cosmo*, *La rinascita del tempo* e *The Singular Universe and the Reality of Time*, scritto insieme a Roberto Mangabeira Unger), ho indagato la questione di come si potrebbe estendere la fisica per ottenere una teoria dell'intero universo, concludendo che una tale teoria deve differire per molti aspetti cruciali da ciascuna delle teorie fisiche sviluppate finora, compresa la meccanica quantistica. Tutte queste teorie hanno senso soltanto se interpretate come descrizioni di una parte dell'universo.

In realtà, il fatto che la meccanica quantistica ha senso soltanto se intesa come una teoria di una parte dell'universo è, di per sé, una ragione sufficiente per considerarla incompleta. Una cosa che potremmo chiedere a una teoria che completi la teoria quantistica è che abbia senso se estesa a una descrizione di tutto l'universo.

In ogni caso, questa non è l'unica linea di pensiero che porta a concludere che la meccanica quantistica è incompleta. Altre preoccupazioni e

difficoltà hanno avuto un'influenza molto maggiore su come si è sviluppato storicamente l'argomento. Per il momento ignorerò le questioni cosmologiche e mi concentrerò su problemi più immediati.

Per applicare leggi generali a un sistema fisico specifico si segue un processo in tre passi.

Come prima cosa, specifichiamo il sistema fisico che vogliamo studiare.

Al secondo passo, descriviamo quel sistema in un istante di tempo in termini di un elenco di proprietà. Se il sistema è composto di particelle, le proprietà comprenderanno le posizioni e le quantità di moto di quelle particelle. Se il sistema è fatto di onde, ne forniamo le lunghezze d'onda e le frequenze. E così via. Le proprietà elencate costituiscono lo stato del sistema.

Al terzo passo, postuliamo una legge che descrive come cambia nel tempo il sistema.

Prima della fisica quantistica, i fisici avevano un'ambizione scientifica semplice ma potente. Al secondo passo avrebbero potuto descrivere un sistema in termini completi, in due sensi diversi. La completezza significa, innanzitutto, che una descrizione più dettagliata non è necessaria né possibile. Qualunque altra proprietà che il sistema potrebbe avere sarebbe una conseguenza di quelle già considerate. In più, l'elenco delle proprietà dovrebbe essere esattamente ciò che è necessario per formulare previsioni precise sul futuro. Le previsioni si formulano usando le leggi. Il futuro può essere determinato in modo preciso, data la nostra conoscenza completa del presente. Questo è il secondo significato del fatto che la descrizione è completa.

Dai tempi di Newton, alla fine del Seicento, fino all'invenzione della meccanica quantistica negli anni Venti del Novecento, si riteneva che le proprietà che formano la descrizione completa fossero le posizioni di tutte le particelle e le loro quantità di moto.

Naturalmente, può succedere di non conoscere con precisione le posizioni e le quantità di moto di tutte le particelle che compongono un sistema. L'aria in questa stanza consiste di circa 10^{28} atomi e molecole, quindi un elenco completo delle loro posizioni è impossibile. Dobbiamo usare

una descrizione molto approssimativa in termini di densità, pressione e temperatura, che si riferiscono a medie delle posizioni e delle quantità di moto delle particelle. La nostra descrizione approssimativa dovrà utilizzare probabilità e quindi le previsioni che fornisce saranno in qualche misura incerte.

Le probabilità, però, sono usate soltanto per comodità e le incertezze che ne derivano esprimono semplicemente la nostra ignoranza. Continuiamo a credere che dietro alla nostra descrizione approssimativa di un gas in termini di densità e temperatura vi sia una descrizione precisa, che comprende l'indicazione di dove si trova e come si sta muovendo ogni singolo atomo. Abbiamo tutti fiducia nel fatto che, se avessimo accesso a quella descrizione, potremmo usare le leggi per prevedere il futuro in modo preciso. Questa fiducia si basa sul fatto che crediamo nel realismo – siamo convinti dell'esistenza di una realtà oggettiva, che abbiamo la possibilità di conoscere.

La meccanica quantistica blocca questa ambizione compiaciuta, poiché il suo primo principio afferma che possiamo conoscere al massimo soltanto metà delle informazioni che sarebbero necessarie per realizzarla.

L'informazione completa necessaria per prevedere con precisione il futuro è chiamata *stato classico*. Chiamiamo «classica» la fisica com'era tra Newton e la scoperta dei quanti. È poi naturale chiamare una specificazione di metà di queste informazioni *stato quantistico*. La metà è arbitraria; si può scegliere che sia soltanto la quantità di moto, o soltanto la posizione, o qualche mescolanza delle due, a patto che metà delle informazioni necessarie per prevedere in modo preciso il futuro sia presente e metà manchi.

Lo stato quantistico è un concetto fondamentale nella teoria quantistica. Un realista si domanderà se sia reale. Lo stato quantistico di una particella corrisponde esattamente alla realtà fisica di quella particella? Oppure è soltanto un comodo strumento per formulare previsioni? Forse lo stato quantistico è una descrizione, non della particella, ma solo delle informazioni che abbiamo su di essa?

Non sono questioni che risolveremo nelle pagine che seguono. Gli esperti hanno opinioni diverse al riguardo. Tra poco avremo la possibilità di concentrarci su questi e altri interrogativi sul significato e sulla correttezza della meccanica quantistica. Per il momento, adottiamo un punto di

vista pragmatico e consideriamo lo stato quantistico come uno strumento per prevedere il futuro.

Uno stato quantistico è uno strumento utile proprio perché permette queste previsioni. Il nostro prossimo principio è il seguente:

Dato lo stato quantistico di un sistema isolato in un dato istante, esiste una legge che prevede lo stato quantistico preciso di quel sistema in ogni altro istante.

Questa legge è la *Regola I*, a volte chiamata anche equazione di Schrödinger. Il principio secondo cui esiste una tale legge è chiamato *principio di unitarietà*.

Pertanto, mentre la relazione tra lo stato quantistico e il comportamento di una singola particella può essere statistica, la teoria è deterministica riguardo a come cambia nel tempo lo stato quantistico.

Come già detto, gli stati quantistici con valori determinati di energia e quantità di moto sono rappresentati da onde pure con una frequenza e una lunghezza d'onda esatte. Questi stati quantistici, però, sono molto particolari. Che cosa si può dire di altri stati quantistici, le cui quantità di moto sono incerte e quindi non vibrano a un'unica frequenza e con un'unica lunghezza d'onda? Gli stati quantistici più generali sono rappresentati da onde con profili arbitrari, che non sono netti né per la posizione né per la quantità di moto, quindi se l'una o l'altra viene misurata, vi saranno incertezze ^a.

Esistono anche stati con una posizione determinata e una quantità di moto del tutto indeterminata; se tracciamo un grafico, ha l'aspetto di uno spike: è uguale a zero dappertutto con l'eccezione dell'unico punto in cui si trova la particella. Altri stati sono concentrati in una regione dello spazio e corrispondono a particelle che non sono localizzate in modo preciso, quindi sappiamo solo approssimativamente dove si trovano.

Uno dei modi per ottenere uno stato quantistico generale consiste nel sommare onde pure, ciascuna con una frequenza e una quantità di moto diverse.

Se misuriamo l'energia di una simile combinazione, otteniamo una serie di valori corrispondenti alle diverse frequenze che compongono l'onda.

Se si trattasse di musica, le onde sarebbero onde sonore. Il suono di un'onda pura con una singola frequenza è una singola nota. Suonare insieme diverse note produce un accordo. Il numero di note che si possono suonare contemporaneamente non ha un limite, come il numero di stati quantistici che possono essere sommati.

Quando si combinano due stati sommando le onde che li rappresentano si dice che si *sovrappongono gli stati*. Corrisponde a combinare due modi in cui può aver viaggiato la particella per arrivare al rivelatore. Nel capitolo II, quando abbiamo messo gli amanti dei cani in cucina e quelli dei gatti in soggiorno, ciascuna stanza rappresentava uno stato quantistico, definito da una ben precisa preferenza per una delle due specie. Quando abbiamo riunito tutti nella sala da pranzo, abbiamo sovrapposto questi due stati.

Questo è un esempio di un principio generale chiamato *principio di sovrapposizione*.

Due stati quantistici qualunque possono essere sovrapposti e definire un terzo stato quantistico, sommando le onde che corrispondono ai due stati. Questo corrisponde a un processo fisico che dimentica la proprietà che distingue i due.

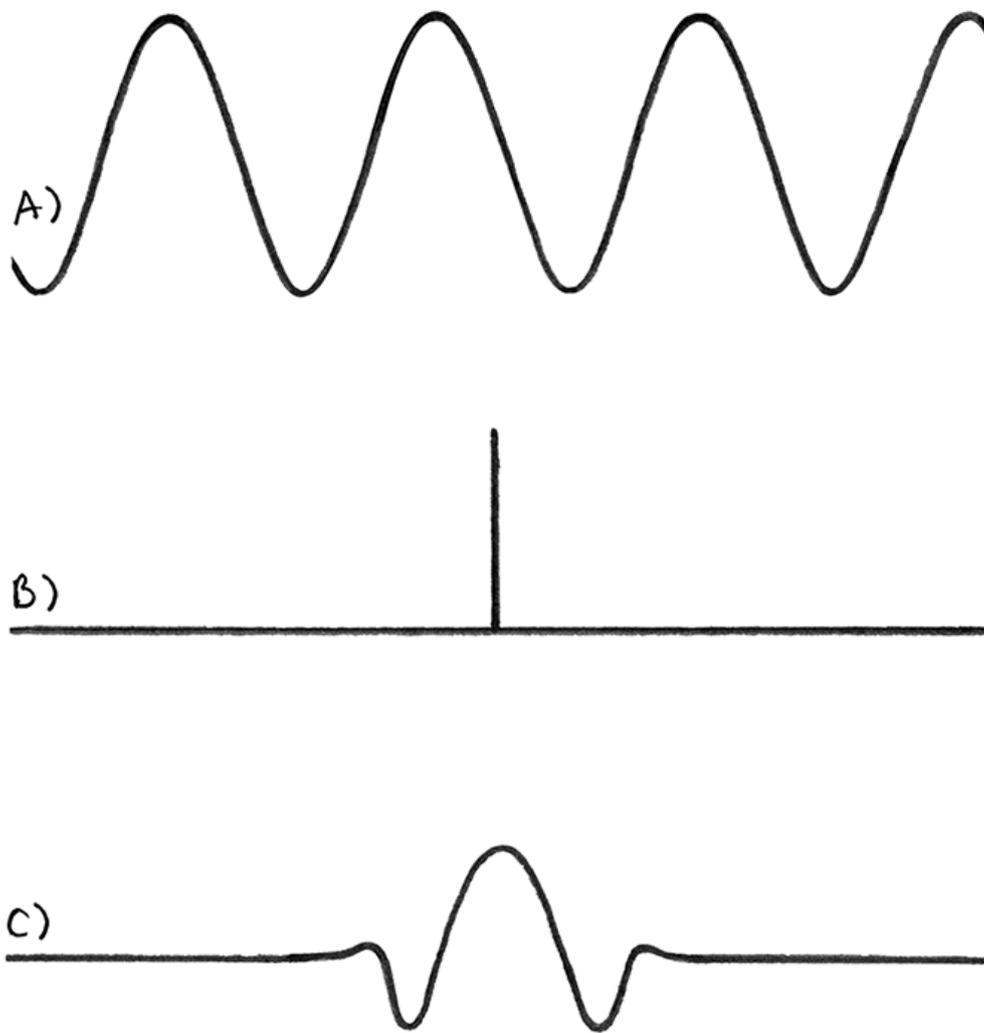


Figura 2.

Tre funzioni d'onda che mostrano come sono rappresentati diversi tipi di stati. A mostra un'onda pura con una singola lunghezza d'onda, che corrisponde a una quantità di moto determinata. La posizione è completamente incerta, come richiesto dal principio di incertezza. Lo spike in B mostra uno stato con una posizione determinata, ma la lunghezza d'onda è del tutto indeterminata e incerta. Il caso intermedio C si costruisce combinando diverse lunghezze d'onda, quindi la quantità di moto e la posizione sono entrambe alquanto incerte.

Logicamente, una sovrapposizione di due stati C e G comunica C o G. La persona può amare i cani o i gatti. La disgiunzione «o» significa che qualcosa è stato dimenticato. Una persona può essere un C o un G, ma una volta dimenticata l'associazione corretta possiamo soltanto dire che è un C o un G.

Come ho sottolineato, gli stati quantistici sono importanti perché si evolvono nel tempo seguendo una regola precisa. La relazione tra lo stato quantistico e un'osservazione è probabilistica, ma il rapporto tra quello stato quantistico adesso e in un istante diverso è determinato. Esiste però una limitazione importante: la regola evolutiva si applica soltanto a sistemi che sono isolati dal resto dell'universo. Solo nei casi in cui il sistema non subisce perturbazioni o influenze da fonti esterne la regola evolutiva è deterministica.

Quando effettuiamo una misurazione su un sistema, lo perturbiamo, di solito obbligandolo a interagire con uno strumento di misurazione. Quindi la Regola 1 non si applica alle misurazioni. Ciò è vero non solo delle misurazioni, ma anche di qualsiasi interazione tra il sistema e le forze esterne. Vi è qualcosa di speciale nelle misurazioni?

Le misurazioni sono speciali poiché si trovano là dove le probabilità entrano nella teoria quantistica.

La meccanica quantistica afferma che il rapporto tra lo stato quantistico e l'esito di una misurazione è probabilistico. In generale, vi è un insieme di possibili esiti di una data misurazione. Ciascuno di essi si verificherà con una certa probabilità e queste probabilità dipendono dallo stato quantistico. Nel caso in cui misuriamo la posizione di una particella, questa dipendenza è particolarmente semplice:

La probabilità di trovare la particella in una particolare posizione nello spazio è proporzionale al quadrato dell'altezza dell'onda corrispondente in quel punto.

Questa si chiama regola di Born, da Max Born, che la propose.

Perché il quadrato? La probabilità è sempre positiva, ma le onde in generale oscillano tra valori positivi e valori negativi. Il quadrato di un nume-

ro è sempre positivo, però, ed è il quadrato a essere collegato alla probabilità. La cosa importante da ricordare è che quanto maggiore è l'ampiezza, o altezza, dell'onda tanto più è probabile trovarvi la particella corrispondente.

Questi ultimi punti sono fondamentali per capire come funziona la meccanica quantistica, quindi è opportuno riassumerli. L'onda rappresenta lo stato quantistico. Quando lo lasciamo indisturbato, il sistema cambia nel corso del tempo in modo deterministico, secondo la Regola 1. Lo stato quantistico, tuttavia, è collegato solo indirettamente a ciò che osserviamo quando effettuiamo una misurazione e questa relazione non è deterministica. La relazione tra lo stato quantistico e ciò che osserviamo è probabilistica. La casualità entra in gioco in un modo fondamentale.

Tuttavia, anche se lo stato quantistico ci fornisce soltanto probabilità per ciò che osserviamo, una volta ottenuto un risultato, esiste qualcosa di determinato, poiché a quel punto sappiamo esattamente qual è lo stato. È lo stato corrispondente al risultato ottenuto dalla misurazione. Supponiamo di misurare la quantità di moto di un elettrone e di ottenere il risultato che l'elettrone si sposta verso nord con una quantità di moto pari a 17 (in qualche unità). Appena dopo la misurazione sappiamo quindi che lo stato quantistico è `VERSO_NORD`, $QDM = 17$.

Tutto ciò è racchiuso in un'altra regola, che chiamiamo *Regola 2*^b:

L'esito di una misurazione può essere previsto soltanto probabilisticamente. Poi, però, la misurazione cambia lo stato quantistico del sistema che viene misurato, ponendolo nello stato corrispondente al risultato della misurazione. Questo è il collasso della funzione d'onda.

Per esempio, nella nostra storia sulle preferenze in materia di politica e di animali da compagnia, appena una persona risponde a una domanda sull'una o sull'altra preferenza va nello stato quantistico definito dall'aver quella determinata preferenza.

Poiché l'esito della misurazione è probabilistico, è tale anche il cambiamento dello stato quantistico imposto dalla Regola 2.

Una volta terminata la misurazione, il sistema può essere considerato di nuovo isolato e riprende il controllo la Regola 1, fino alla misurazione successiva.

La Regola 2 solleva tutta una serie di domande.

La funzione d'onda collassa repentinamente o impiega un po' di tempo? Il collasso avviene appena il sistema interagisce con il rivelatore? O soltanto in seguito, quando si fa una registrazione? O forse ancora più tardi, quando viene percepito da una mente cosciente?

Il collasso è un cambiamento fisico, il che significa che lo stato quantistico è reale? O è soltanto un cambiamento della nostra conoscenza del sistema, il che significa che lo stato quantistico è solo una rappresentazione di quella conoscenza?

Come fa il sistema a sapere che si è verificata una particolare interazione con un rivelatore e quindi che allora, e solo allora, dovrebbe obbedire alla Regola 2?

Che cosa succede se combiniamo il sistema originario e il rivelatore in un sistema più grande? In questo caso la Regola 1 si applica all'intero sistema?

Queste domande sono tutti aspetti differenti del problema della misurazione.

Sono state date risposte diverse, che sono fonte di controversie da quasi un secolo. Avremo molto da dire su tutti questi punti, quando avremo il quadro completo.

- a. Quando un'onda rappresenta uno stato quantistico, a volte la chiamiamo funzione d'onda.
- b. Sono certo che appena ho citato la Regola 1 avete capito che doveva essercene un'altra. Devo far notare che, in alcuni libri di testo, la Regola 1 e la Regola 2 sono invertite.

Capitolo quarto

Stati condivisi

Per quanto sia utile in circostanze ordinarie affermare che il mondo esiste «là fuori» indipendentemente da noi, questo punto di vista non può più essere sostenuto.

JOHN ARCHIBALD WHEELER ¹.

La sovrapposizione di sistemi quantistici pone una seria sfida al realismo, ma un insieme di ostacoli ancora più insidioso per il realismo proviene dal modo in cui la meccanica quantistica descrive i sistemi costruiti combinando sistemi più semplici.

La sovrapposizione è la combinazione di diversi stati possibili di un unico sistema. Come ho detto, corrisponde alla disgiunzione «o». La meccanica quantistica ha qualcosa di interessante da dire anche sulla combinazione di due sistemi diversi in un sistema composto. Supponiamo di avere un elettrone e un protone. Ciascuno inizia con il proprio stato quantistico. Possiamo combinarli formando un atomo di idrogeno. L'atomo ha il proprio stato quantistico, che è prodotto combinando gli stati dei suoi costituenti. Ciò corrisponde alla congiunzione «e». Ciascuno stato quantistico rappresenta metà delle possibili informazioni necessarie per una descrizione completa dei suoi componenti. Anche lo stato quantistico congiunto rappresenta metà delle possibili informazioni sull'atomo. Ne derivano nuovi fenomeni molto interessanti.

Consideriamo di nuovo persone con due proprietà incompatibili, le opinioni politiche e la preferenza per un dato animale da compagnia. Supponiamo che Anna e Bianca, due ragazze che vivono nello stesso appartamento, considerino l'ipotesi di prendere un animale. Singolarmente, Anna è un'amante dei gatti e lo è anche Bianca. Lo stato della loro coppia è la

combinazione di questi due stati. Ciascuna ha una ben precisa preferenza per un animale, quindi entrambe hanno opinioni politiche indeterminate. Se invitate a indicare le proprie simpatie politiche, entrambe avranno una probabilità del 50 per cento di rispondere «destra» e una probabilità del 50 per cento di rispondere «sinistra», quindi metà delle volte scopriranno di essere d'accordo e metà delle volte di avere opinioni opposte. Nello stato in questione, in cui hanno separatamente un animale preferito, le loro opinioni politiche sono casuali e non correlate. Se Anna dichiara le sue opinioni politiche, la cosa non ha alcun effetto sulle opinioni di Bianca.

La fisica quantistica ci permette anche di definire stati per la coppia in cui tutte le opinioni personali sono indeterminate, però noi possiamo avere una conoscenza precisa del loro rapporto. Un esempio importante di un simile stato è quello in cui l'unica cosa certa è che, se poniamo la stessa domanda ad Anna e a Bianca, otteniamo due risposte diverse. Questo stato è detto CONTRARIO. In questo stato, possiamo porre alle due ragazze qualsiasi domanda e, quale che sia la risposta di una, l'altra darà la risposta opposta. Tuttavia è impossibile prevedere le risposte individuali.

CONTRARIO è un esempio di un fenomeno sorprendente: per due particelle, esistono stati quantistici in cui sappiamo qualcosa su come sono collegate le particelle, ma non sappiamo nulla di ciascuna particella individualmente. Questi stati sono detti *entangled*. Il fenomeno dell'entanglement è qualcosa di nuovo, che entra nella fisica con i quanti e non ha un elemento analogo nella fisica classica.

L'informazione che le ragazze daranno risposte opposte qualunque domanda venga loro rivolta equivale esattamente a metà delle informazioni che sarebbero necessarie per la previsione completa. L'altra metà riguarda le risposte individuali. Nello stato CONTRARIO, quindi, non sappiamo nulla delle loro opinioni personali e tutto di come queste sono correlate. Pertanto, quando sono nello stato CONTRARIO, Anna e Bianca hanno in comune una proprietà che non è soltanto la somma delle proprietà che possiedono individualmente.

Le due ragazze trascorrono la serata insieme e si svegliano nello stato CONTRARIO. Entrambe escono per andare al lavoro. Durante la pausa pranzo, i colleghi di Anna la interrogano sul suo orientamento politico o sull'animale che preferisce. Decidono che cosa domandarle solo all'ultimo momento, poi registrano quale domanda le hanno rivolto e la sua risposta.

I colleghi di Bianca fanno la stessa cosa. Tutto ciò si ripete ogni giorno per un anno, dopo di che i due gruppi di colleghi si incontrano a un convegno e confrontano i propri appunti. Che cosa scoprono?

Metà delle volte, alle due ragazze sono state poste domande diverse. Ignoriamo questi casi e consideriamo soltanto i giorni in cui è stata rivolta la stessa domanda a entrambe. Nel 100 per cento di questi casi le due risposte sono state opposte. E questo nonostante il fatto che, considerate individualmente, ciascuna delle loro risposte sembra essere stata del tutto casuale.

Così come l'ho descritta, questa situazione non sarebbe difficile da spiegare: basta che ogni mattina a colazione le due ragazze lancino una moneta per decidere chi risponderà in un modo e chi nell'altro alle due domande possibili. Esistono però storie analoghe in cui studiamo coppie di fotoni, non di persone. Possiamo mettere coppie di fotoni nello stato CONTRARIO e poi misurarne varie proprietà. Ogni volta che poniamo loro la stessa domanda, anch'essi rispondono in modo opposto. In questo caso, tuttavia, possiamo dimostrare che nessun accordo stabilito prima che noi ponessimo la domanda può spiegare questo fatto. La dimostrazione fu presentata in un articolo importante, scritto dal fisico irlandese John Bell, nel 1964.

Nel caso dei fotoni, la nostra domanda non riguarda la politica né gli animali da compagnia, ma la polarizzazione. Un'onda elettromagnetica consiste di campi elettrici e magnetici oscillanti. Le oscillazioni sono perpendicolari alla direzione in cui viaggia l'onda. Queste oscillazioni definiscono un piano, che salta su e giù mentre i campi oscillano. Si dice che la luce è polarizzata quando il campo elettrico oscilla sempre in un piano particolare. I singoli fotoni che passano attraverso una lente polarizzata, come quelle comuni negli occhiali da sole, hanno una ben precisa polarizzazione.

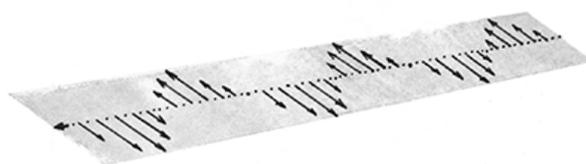
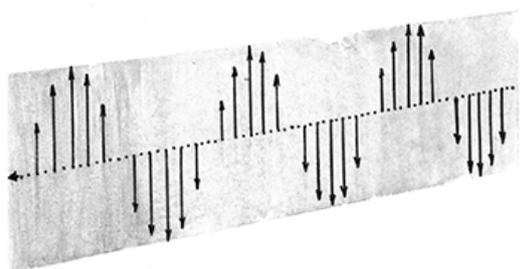


Figura 3.

Questa figura illustra che cosa intendiamo dicendo che la radiazione elettromagnetica può essere polarizzata. Sono raffigurate le tracce di due onde che si muovono nel campo elettrico, in assenza di cariche e correnti esterne. Si noti che il campo elettrico è perpendicolare alla direzione in cui si muove l'onda. Le oscillazioni del campo, insieme alla direzione del moto, definiscono un piano nello spazio tridimensionale, chiamato piano di polarizzazione. La figura mostra due piani di polarizzazione perpendicolari.

Possiamo produrre coppie di fotoni che insieme hanno polarizzazioni nello stato CONTRARIO. Per dimostrarlo, li lasciamo viaggiare in direzioni opposte fino a quando sono lontani l'uno dall'altro e a quel punto poniamo sulla loro strada una lente polarizzata, che ogni fotone può attraversare oppure no. Nello stato CONTRARIO, se le lenti hanno lo stesso piano di polarizzazione, uno dei due fotoni attraverserà la lente, ma l'altro no. Quale dei due attraversa la lente, tuttavia, è casuale poiché nello stato CONTRARIO le loro proprietà individuali sono completamente incerte.

Possiamo anche ruotare una lente, il che fa ruotare il piano di polarizzazione da un lato. I due polarizzatori ora hanno inclinazioni diverse. Ora qualche volta passano entrambi i fotoni. La frequenza con cui accade dipende dall'angolo tra i due polarizzatori. Quando è uguale a zero, la domanda posta è la stessa e non succede mai che entrambi i fotoni passino. Adesso ruotiamo di poco un polarizzatore, in modo che le due domande siano leggermente diverse. Ora in alcuni casi i fotoni passano da entrambi i lati. Vogliamo capire come aumenta la percentuale di casi in cui passano entrambi i fotoni al variare dell'angolo tra i due piani di polarizzazione.

Bell introdusse un assunto che esprime l'idea che la fisica è locale, in quanto l'informazione non può viaggiare più velocemente della luce. Ciò richiede che quando due fotoni sono molto lontani tra loro, le domande che scelgo di porre a un fotone non possono influenzare le risposte che darà l'altro fotone.

Da questo assunto Bell derivò una limitazione sulla percentuale di casi in cui entrambi i fotoni attraversano il proprio polarizzatore. Questa restrizione dipende dall'angolo tra i due piani di polarizzazione.

Come prima cosa, Bell si era domandato se le previsioni della meccanica quantistica violassero la restrizione e aveva scoperto che per certi angoli

la violavano. Ciò significa che la meccanica quantistica viola il principio di località di Bell. È facile capire che è proprio ciò che si verifica nella storia delle nostre due ragazze. Quando Anna e Bianca vanno al lavoro, condividono un unico stato quantistico, lo stato CONTRARIO. Questa non è una proprietà di nessuna delle due individualmente. È una proprietà condivisa; ha senso solo quando è attribuita alla coppia. La situazione è già in contrasto con la filosofia secondo cui le proprietà fisiche sono locali.

E in seguito le cose peggiorano. Quando i colleghi le domandano quale animale da compagnia preferisca, Bianca dice di essere un'amante dei gatti. Questo modifica immediatamente il suo stato quantistico, come prescritto dalla Regola 2. In origine era indeterminato, ma ora Bianca è un'amante dei gatti. Se le porranno di nuovo la stessa domanda, è certo che risponderà «gatto», quindi lo stato GATTO la definisce.

In base alla stessa logica, però, dato che le due ragazze hanno iniziato la giornata nello stato CONTRARIO, Anna in quel momento è diventata una persona con una preferenza per i cani. Se i suoi colleghi le domanderanno quale animale preferisce, ora è certo al 100 per cento che Anna risponderà «cane».

La misurazione della preferenza di Bianca sembra quindi influenzare immediatamente lo stato di Anna. Sebbene sia stata Bianca a essere misurata, e Anna non abbia parlato con nessuno, la Regola 2 si applica anche ad Anna. Questo è un esempio del fenomeno noto come non località quantistica.

La storia sarebbe identica se a Bianca avessero domandato del suo orientamento politico. In qualunque modo avesse risposto, Anna sarebbe istantaneamente diventata una persona dall'orientamento opposto.

Appena i colleghi interrogano Bianca sull'animale preferito, lei e Anna non condividono più uno stato. Bianca ora ha un proprio stato e possiamo dire che questo è il risultato del fatto di essere stata misurata. Ciò che è strano è che, poiché in origine le due ragazze erano insieme nello stato entangled CONTRARIO, quando Bianca viene interrogata, ciò modifica all'istante anche lo stato di Anna. In virtù della risposta data da Bianca, Anna è immediatamente definita in un suo stato quantistico, vale a dire l'opposto della risposta data da Bianca.

Ciò accade anche se nessuno ha ancora posto domande ad Anna. Bianca e i suoi colleghi potrebbero anche essere ad anni luce di distanza, di

modo che per anni Anna non potrebbe ricevere alcuna informazione sulla domanda posta a Bianca e sulla sua risposta, ipotizzando l'usuale limitazione sulla trasmissione di informazioni. Ciò vuol dire che Anna non può ancora sapere che il proprio stato quantistico è cambiato. Però è cambiato, se la teoria quantistica è corretta.

Naturalmente, la storia sarebbe identica anche se per prima venisse interrogata Anna. Le conseguenze della condivisione di uno stato entangled sono completamente simmetriche.

Lo strano comportamento dello stato quantistico CONTRARIO fu scoperto da Einstein e fu l'argomento più importante di un articolo che scrisse nel 1935 con due colleghi più giovani, Boris Podolsky e Nathan Rosen ². I tre autori (a volte indicati per brevità con la sigla EPR) usarono un esperimento simile per sostenere che la meccanica quantistica è necessariamente incompleta. Per arrivare a questa conclusione, presentarono un criterio per stabilire quando una proprietà di un sistema fisico debba essere considerata reale. Ecco il criterio:

Se, senza perturbare in alcun modo un sistema, se ne può determinare una proprietà con la certezza del 100 per cento, deve esistere un elemento della realtà fisica associato a quella proprietà.

Un altro assunto dei tre autori era che un sistema si potesse perturbare soltanto mediante un'azione fisica su di esso. Il punto più importante è che presumevano anche che qualunque perturbazione fisica fosse locale e quindi che non potesse viaggiare a una velocità superiore a quella della luce. Ciò implica in particolare che

Anna non può essere fisicamente influenzata dalla scelta delle domande poste a Bianca prima che sia passato il tempo sufficiente affinché un segnale luminoso abbia portato da Bianca ad Anna l'informazione di quale domanda è stata posta a Bianca.

Come abbiamo visto, appena i colleghi di Bianca sanno quale animale preferisce, conoscono anche la preferenza di Anna. Einstein, Podolsky e

Rosen, tuttavia, credevano fermamente nel principio di località, il quale implica che, poiché le due ragazze sono lontane l'una dall'altra, Anna non può essere stata influenzata da domande poste alla sua amica lontana. Pertanto il criterio di realtà enunciato poc'anzi è soddisfatto e possiamo concludere che *la preferenza di Anna per un dato animale è un elemento della realtà.*

In più, ciò che è reale relativamente ad Anna non può essere influenzato da nulla che succeda o non succeda a Bianca. Quindi la preferenza di Anna per un animale deve essere reale a prescindere dal fatto che Bianca sia stata interrogata in merito alla propria preferenza.

Notiamo che i colleghi di Bianca avrebbero anche potuto domandarle delle sue inclinazioni politiche. Vale lo stesso ragionamento e possiamo concludere che *anche la preferenza politica di Anna è un elemento della realtà.* E di nuovo *ciò è vero che abbiamo o no domandato a Bianca quale sia la sua.*

Dobbiamo quindi concludere che *entrambe le preferenze di Anna sono elementi della realtà!*

Tuttavia, gli stati quantistici non possono descrivere sia l'animale preferito da una persona sia il suo orientamento politico. *Pertanto, lo stato quantistico di Anna la descrive in maniera incompleta.*

Quindi, conclusero Einstein, Podolsky e Rosen, la descrizione del mondo in termini di stati quantistici è incompleta.

Rifletto su questo argomento sin dal primo anno di college. Per quanto ne so, è logicamente corretto. Va notato, però, che dipende dall'assunto che la fisica sia locale. Einstein e i suoi due giovani collaboratori presumevano la località quando presumevano *che Anna non possa essere fisicamente influenzata dalla scelta delle domande poste a Bianca quando le due sono lontane.*

Bell si basò esattamente sullo stesso assunto, in relazione ai fotoni anziché alle persone, per derivare la sua restrizione.

Quando i due fotoni sono molto lontani l'uno dall'altro, le domande che scelgo di porre a un fotone non possono influenzare le risposte che darà l'altro fotone.

Questo, in verità, è l'unico assunto non banale nel ragionamento di Bell. Poiché, come già detto, la restrizione di Bell è in disaccordo con la meccanica quantistica, ne segue che la meccanica quantistica è in disaccordo con la località.

Possiamo però fare un altro passo avanti e verificare direttamente se la località è violata dalla natura, come presunto da EPR e da Bell.

La restrizione di Bell è importante perché non si applica solo alla meccanica quantistica, ma vincola qualunque teoria che soddisfi il principio di località di Bell e di EPR, comprese le teorie che intendono sostituire la meccanica quantistica, e si applicherà anche a qualunque teoria che potrà essere inventata in futuro. Ciò significa che possiamo realizzare esperimenti che verificano direttamente il principio di località.

Per fortuna, la restrizione di Bell poteva essere verificata per mezzo di un congegno relativamente poco costoso, costruito a mano in un'unica stanza. Un gruppetto di ricercatori coraggiosi iniziò il lavoro di realizzare esperimenti per verificare il teorema. Dopo che diversi tentativi avevano prodotto risultati parziali e contraddittori, gli esperimenti definitivi furono condotti nei primi anni Ottanta a Orsay, vicino a Parigi, da Alain Aspect e dai suoi collaboratori, Jean Dalibard, Philippe Grangier e Gérard Roger³.

Negli esperimenti di Aspect le particelle entangled sono fotoni e le domande riguardano i loro piani di polarizzazione. Questi esperimenti iniziano con un atomo che viene fatto passare dal suo stato fondamentale a uno stato eccitato, da un fotone emesso da un laser. Gli atomi sono scelti in modo che, quando l'atomo eccitato decade e torna nello stato fondamentale, lo fa producendo una coppia di fotoni entangled, in stati contrari. I fotoni volano via in direzioni opposte e dopo qualche metro incontrano i polarizzatori, che ne misurano la polarizzazione rispetto a un piano. Il piano di ciascun polarizzatore può essere deciso liberamente, in qualunque posizione scelta dallo sperimentatore, in modo da poter misurare le correlazioni tra le polarizzazioni dei due fotoni. I risultati ottenuti da Aspect violavano in modo netto la restrizione di Bell pur essendo in perfetto accordo con le previsioni della teoria quantistica.

Questi esperimenti ci dicono che l'assunto di località di Bell è falso! Il mondo quantistico non obbedisce al principio di località.

Se questa non è la notizia più scioccante che vi sia mai arrivata dal mondo della scienza, forse non l'avete capita. *La natura non soddisfa l'idea di località*. Due particelle, anzi due oggetti del mondo, che si trovano a grande distanza, possono condividere proprietà impossibili da attribuire a proprietà possedute individualmente dall'uno o dall'altro.

A questo punto è naturale domandarsi se il principio che l'informazione non può essere trasmessa a una velocità superiore a quella della luce non

possa essere violato, sfruttando la circostanza che Bianca e Anna condividono uno stato entangled. È possibile che il fatto che lo stato di Anna cambi repentinamente, sulla base di quale domanda viene posta a Bianca, venga usato dai colleghi di Bianca per inviare istantaneamente un messaggio ai colleghi di Anna?

La risposta è che l'informazione non può essere inviata a una velocità superiore a quella della luce, poiché la relazione tra lo stato di Anna e le sue risposte è casuale. Indipendentemente dalla domanda posta, le sue due risposte possibili hanno entrambe il 50 per cento di probabilità. Ciò è vero prima che Bianca venga interrogata, quando condivide lo stato CONTRARIO con Anna, e continua a essere vero in seguito. La prova dell'esistenza di misteriose correlazioni compare solo quando si confrontano gli elenchi di risposte fornite da ciascuna a una serie di domande. E gli elenchi sono oggetti classici del tutto ordinari la cui trasmissione non può superare la velocità della luce.

Aspect e i suoi colleghi riuscirono a verificare un'altra possibilità, collegata alla precedente. Forse, a un livello più profondo di quello descritto dalla teoria quantistica, i due atomi sono in comunicazione e così il fotone misurato per primo trasmette informazioni all'altro fotone sulla domanda che gli è stata posta. Quindi il principio di località potrebbe essere soddisfatto. Ora però dobbiamo tenere conto della relatività ristretta, secondo cui nessuna informazione può viaggiare più velocemente della luce. Per verificare questa possibilità, l'esperimento fu condotto di nuovo, questa volta con un interruttore casuale da una parte, che poteva scegliere rapidamente quale domanda sarebbe stata posta al suo fotone. Questo interruttore era sufficientemente veloce affinché la scelta avvenisse mentre i fotoni erano in volo. Quindi la commutazione avveniva troppo velocemente per poter essere comunicata all'altro fotone per mezzo di un segnale viaggiante a una velocità minore o uguale a quella della luce. I ricercatori ottennero il medesimo risultato. Se i due fotoni sono in comunicazione, i loro messaggi sono trasmessi molto più velocemente della luce e la teoria della relatività è violata.

Come dobbiamo giudicare l'argomento di Einstein, Podolsky e Rosen, allora? Pur essendo geniale, alla luce dei risultati sperimentali deve essere considerato sbagliato poiché si basa su un assunto scorretto, cioè l'assunto di località. Le verifiche sperimentali della disuguaglianza di Bell mostrano

che, una volta che Anna e Bianca sono entangled nello stato CONTRARIO, in realtà Anna è fisicamente influenzata dalla scelta delle domande poste a Bianca. Ciò continua a essere vero anche quando sono lontane tra loro. È vero nella meccanica quantistica e deve essere vero, come implicano gli esperimenti, in qualunque teoria più profonda che completi la meccanica quantistica.

Ciò nonostante, l'articolo di EPR fu enormemente importante, poiché svelò un aspetto imprevisto della fisica quantistica, ossia l'entanglement. Furono necessari decenni per rendersene conto; in realtà, l'articolo di EPR era molto avanti rispetto ai tempi. A parte la scoperta dell'entanglement, l'articolo fu il punto di partenza per Bell e quindi per la scioccante scoperta sperimentale del fatto che la fisica viola il principio di località.

Bohr, il grande antirealista, replicò immediatamente all'articolo di EPR, con un esempio particolarmente oscuro del suo stile di ragionamento⁴. Bohr mise in discussione i criteri di realtà di EPR facendo notare che una misurazione di una particella perturba indirettamente l'altra, alterando il contesto in cui le proprietà dell'altra particella hanno senso.

Nei quindici anni successivi fu pubblicato un solo articolo che cita l'articolo di EPR. Le numerose citazioni successive sono di Bohm ed Everett, negli anni Cinquanta. John Bell fu il sesto autore a citare EPR, cosa che fece nel suo grande articolo del 1964, quasi trent'anni dopo. L'articolo, però, è stato citato più di sessanta volte nel 2015 e di nuovo nel 2016. Oggi, finalmente, viviamo nell'era dell'entanglement.

In anni recenti, la condivisione di proprietà tra coppie entangled è stata confermata in esperimenti in cui le coppie sono separate da centinaia di chilometri. L'entanglement, un tempo curiosità da laboratorio, si sta evolvendo in una tecnologia. Attualmente è considerato una risorsa, che è alla base di un nuovo tipo di computer – il computer quantistico. Nel prossimo futuro l'entanglement potrebbe permetterci di decifrare codici da tempo ritenuti sicuri, rendendo inoltre possibili nuovi tipi di codici davvero inviolabili. Oggi sono già in orbita satelliti per comunicazioni quantistiche, che utilizzano coppie entangled per criptare i messaggi che trasmettono.

Einstein pubblicò i primi articoli rivoluzionari nel 1905, quando aveva ventisei anni. Trent'anni dopo, l'articolo di EPR fu l'ultimo articolo di Einstein che colpì profondamente i fisici. A pochissimi è concesso di guidare

la scienza per tre decenni. Einstein non smise mai di cercare la teoria piú profonda al di là della meccanica quantistica e la notte in cui morí in ospedale, due decenni piú tardi, vi stava ancora lavorando, come dimostra il suo taccuino. Tuttavia non ci riuscí, per la semplice ragione che non capí mai che l'assunto fondamentale alla base di molti suoi articoli – il principio che la fisica è locale – era sbagliato.

Non esistono ragioni per cui l'articolo di Bell del 1964 non avrebbe potuto essere scritto alla fine degli anni Trenta, subito dopo l'articolo di EPR, e la confutazione della località sarebbe potuta arrivare di lí a poco. Possiamo solo immaginare che cosa avrebbe pensato Einstein se avesse saputo di Bell e di Aspect negli anni Quaranta.

Tutte insieme, le storie che ho narrato finora illustrano le stranezze del mondo quantistico: il dualismo onda-particella, la sovrapposizione e il principio di incertezza.

Ancora piú strano era il fatto che proprietà quantistiche potessero essere entangled e condivise tra sistemi separati da grandi distanze. Questo è l'insegnamento fondamentale della storia narrata da Einstein, Podolsky e Rosen, ma fu solo nel nuovo racconto di Bell che la vera morale della storia si rivelò essere la natura radicale della non località quantistica.

Come abbiamo visto, la sovrapposizione può essere interpretata come una versione quantistica della disgiunzione «o», che indicherò con O . Quando combiniamo due sistemi, usiamo una versione quantistica della congiunzione «e», che indicherò con E . Tutt'e due si comportano in modo diverso rispetto all'uso normale di «o» ed «e» a cui siamo abituati nella vita quotidiana, ma è quando agiscono insieme che accadono cose davvero strane. Lo vediamo nel famoso *esperimento del gatto di Schrödinger*.

Partiamo da un modello molto semplice di atomo, che può esistere in due stati: uno stato eccitato, instabile, che chiamiamo ECCITATO, e uno stato fondamentale stabile, lo stato FONDAMENTALE. Lo stato ECCITATO, essendo instabile, decadrà nello stato FONDAMENTALE emettendo un fotone, che porta via energia. Questi decadimenti avvengono a un ritmo misurato dall'emivita dello stato eccitato.

Mettiamo in una scatola un atomo nello stato ECCITATO e aspettiamo per un tempo paragonabile all'emivita. Se non guardiamo dentro la scatola, possiamo dedurre soltanto che aprendo la scatola abbiamo una probabilità

su due di vedere che l'atomo è decaduto nello stato FONDAMENTALE. Ma qual è il suo stato prima della nostra osservazione? Secondo la meccanica quantistica, non è né ECCITATO né FONDAMENTALE, ma è una sovrapposizione dei due. Possiamo scriverlo così:

$$\text{ATOMO} = \text{ECCITATO} \text{ O } \text{FONDAMENTALE}$$

Secondo la Regola 2, questa sovrapposizione può diventare, quando guardiamo nella scatola, uno dei due stati, ECCITATO o FONDAMENTALE. Se abbiamo una grande collezione di stati, possiamo determinare la probabilità di ciascun risultato. Queste probabilità cambiano nel tempo. Appena si crea un atomo, la probabilità che sia decaduto è molto piccola. Dopo un intervallo di tempo pari a molte volte l'emivita, l'atomo quasi certamente è decaduto.

Una sovrapposizione non equivale ad avere l'uno o l'altro stato con diverse probabilità. Una delle ragioni è che, quando rendiamo incerta l'energia sovrapponendo due stati di energie diverse, rendiamo certa un'altra osservabile. In modo analogo, abbiamo fatto sí che i nostri ospiti avessero opinioni politiche determinate sovrapponendo i loro stati con preferenze diverse per gli animali. Quindi possiamo sempre trovare una domanda complementare all'energia la cui risposta sarà certamente sí. Non sarebbe così se avessimo a che fare soltanto con le probabilità che lo stato sia ECCITATO o FONDAMENTALE.

Ora mettiamo nella scatola un contatore Geiger e lo impostiamo in modo che invii un impulso elettrico ogni volta che rileva un fotone.

Dal punto di vista della meccanica quantistica, anche il contatore Geiger può esistere in due stati diversi, lo stato SÍ e lo stato NO, a seconda che abbia o no rilevato un fotone. Può anche esistere nella sovrapposizione di questi due stati.

Mettiamo nella scatola l'atomo insieme al contatore Geiger. Dobbiamo fare attenzione a far sí che inizialmente l'atomo sia nello stato ECCITATO e il contatore Geiger sia nello stato NO.

$$\text{INIZIALE} = \text{ECCITATO} \text{ E } \text{NO}$$

Con E intendiamo che questi stati, essendo stati di due sistemi diversi, sono combinati, non sovrapposti.

Molto piú tardi, se tutto funziona bene, ci aspettiamo di vedere l'atomo nello stato FONDAMENTALE e il contatore Geiger nello stato SÍ, poiché il contatore Geiger avrà rilevato il fotone emesso quando l'atomo è decaduto.

FINALE = FONDAMENTALE E SÍ

Nella situazione intermedia, il sistema è nella sovrapposizione di questi due stati.

INTERMEDIO = (FONDAMENTALE E SÍ) O (ECCITATO E NO)

L'intero sistema è una sovrapposizione di uno stato in cui l'atomo è nello stato non decaduto ECCITATO e il contatore Geiger è nello stato NO con l'altra possibilità, ossia lo stato in cui l'atomo è decaduto nello stato FONDAMENTALE e il contatore Geiger è nello stato SÍ, in cui ha visto il fotone.

Questo stato INTERMEDIO è un esempio di *stato correlato*. È chiamato così perché le proprietà dei due sistemi sono correlate. Lo stato dell'atomo è incerto, ma se sappiamo in quale stato si trova l'atomo, possiamo dedurre in quale stato sarà il contatore Geiger.

Se poi però apriamo la scatola e guardiamo al suo interno, non vedremo mai una sovrapposizione. Guardare dentro la scatola è una misurazione che è governata dalla Regola 2. Vediamo o che il contatore Geiger è scattato, e quindi l'atomo è decaduto, o che l'atomo è ancora eccitato e il contatore non è ancora scattato.

Sembra davvero strano. Consideriamo alcune delle domande che solleva.

Perché esistono due regole che governano il cambiamento dei sistemi quantistici nel tempo e non una sola?

Perché trattiamo le misurazioni e le osservazioni in modo diverso da altri processi? Un dispositivo di misurazione è indubbiamente solo una macchina fatta di atomi. A stabilire come cambiano le cose nel tempo non dovrebbe essere un'unica regola, applicabile a tutti i casi?

E che cosa rende diversi i dispositivi di misurazione? Sono le dimensioni o la complessità dell'oggetto? È il gran numero di atomi che lo compone? O è il fatto che può essere usato per ottenere informazioni?

Quando avviene il collasso in uno stato determinato? È quando l'atomo incontra il rivelatore? O quando il segnale viene amplificato? O solo quando noi diventiamo consapevoli delle informazioni?

Queste domande rappresentano aspetti diversi del problema della misurazione.

La risposta piú semplice è che, in un modo o nell'altro, deve essere così. Non osserviamo mai grandi oggetti indeterminati: nel nostro mondo non esistono contatori Geiger che sono e non sono scattati. Tutte le domande che poniamo hanno una risposta precisa. Però abbiamo bisogno delle sovrapposizioni per spiegare gli atomi e la radiazione.

Per sottolineare la stranezza di tutto ciò, Schrödinger mise nella scatola un gatto insieme all'atomo e al contatore Geiger. Collegò il segnale del contatore Geiger a un trasformatore, la cui uscita era attaccata alle orecchie del gatto. Quando il contatore Geiger segnalava di aver rilevato il fotone, il gatto riceveva un impulso elettrico fatale. (Com'è ovvio, Schrödinger non lo fece realmente. Questo è un esperimento mentale concepito per scioccare noi, non il gatto).

Aspettiamo per un intervallo di tempo pari all'emivita e poi apriamo la scatola. Appliciamo la Regola 1 o la Regola 2? Esaminiamo che cosa prevedrebbero l'una e l'altra.

Supponiamo innanzitutto che la Regola 1 si applichi all'intero sistema all'interno della scatola, compreso il gatto. Il sistema è composto dall'atomo, dal contatore Geiger e dal gatto. Abbiamo di nuovo due stati di facile interpretazione. Uno di questi è lo stato iniziale

INIZIALE = ECCITATO E NO E VIVO

Questo è lo stato in cui l'atomo è eccitato, il contatore Geiger non ha rilevato nulla e il gatto è vivo. Trascorso molto tempo, possiamo essere certi che l'atomo sarà decaduto e il gatto sarà morto.

FINALE = FONDAMENTALE E SÍ E MORTO

In questo stato, che è il risultato del decadimento, un atomo stabile è nello stato fondamentale, un rivelatore è scattato e un gatto è morto.

Nella situazione intermedia, lo stato è una sovrapposizione di queste due possibilità.

$$\text{INTERMEDIO} = (\text{ECCITATO E NO E VIVO}) \text{ O} \\ (\text{FONDAMENTALE E SÍ E MORTO})$$

Ma un gatto è un mammifero, con un cervello e forse una mente cosciente. È quasi complesso come noi. Allora che senso ha che il gatto sia in una sovrapposizione dello stato in cui è vivo e dello stato in cui è morto? Se non ha senso per un essere umano esistere in una sovrapposizione, di certo non è sensato nemmeno per un gatto. Se applichiamo la Regola 2 alla nostra osservazione, dovremmo applicarla anche al gatto, che in sostanza osserva il segnale del rivelatore.

Quindi è meglio applicare la Regola 2. Quando apriamo la scatola, il sistema compie una scelta e salta in uno stato preciso. Troviamo un gatto vivo o un gatto morto.

Quindi la Regola 1 da sola non si applica agli esseri umani né ai gatti. Ma si applica ai contatori Geiger? E dove sta il confine? Perché si applica agli atomi e non a grandi collezioni di atomi come i rivelatori, i gatti e gli esseri umani?

Questo insieme di domande costituisce l'enigma del gatto di Schrödinger. Una misura della fecondità dell'immaginazione umana è data dal numero di soluzioni dell'enigma che sono state offerte.

Qualche anno dopo la pubblicazione della restrizione di Bell, fu presentato un risultato ancora più potente che limita ulteriormente le possibilità di teorie quantistiche realistiche. Per descriverlo, torniamo a Bell.

Per esprimere ciò che sorprende del risultato di Bell, possiamo dire che le risposte che Anna dà alle domande che le pongono devono dipendere dalle domande che vengono rivolte a Bianca. È scioccante perché Anna e Bianca sono lontane, quindi la località impedirebbe una simile dipendenza. Va notato, però, che la conclusione sarebbe valida anche se non fossero lontane. Quindi il risultato che le risposte di Anna dipendono dalle domande poste a Bianca è sorprendente per un altro motivo.

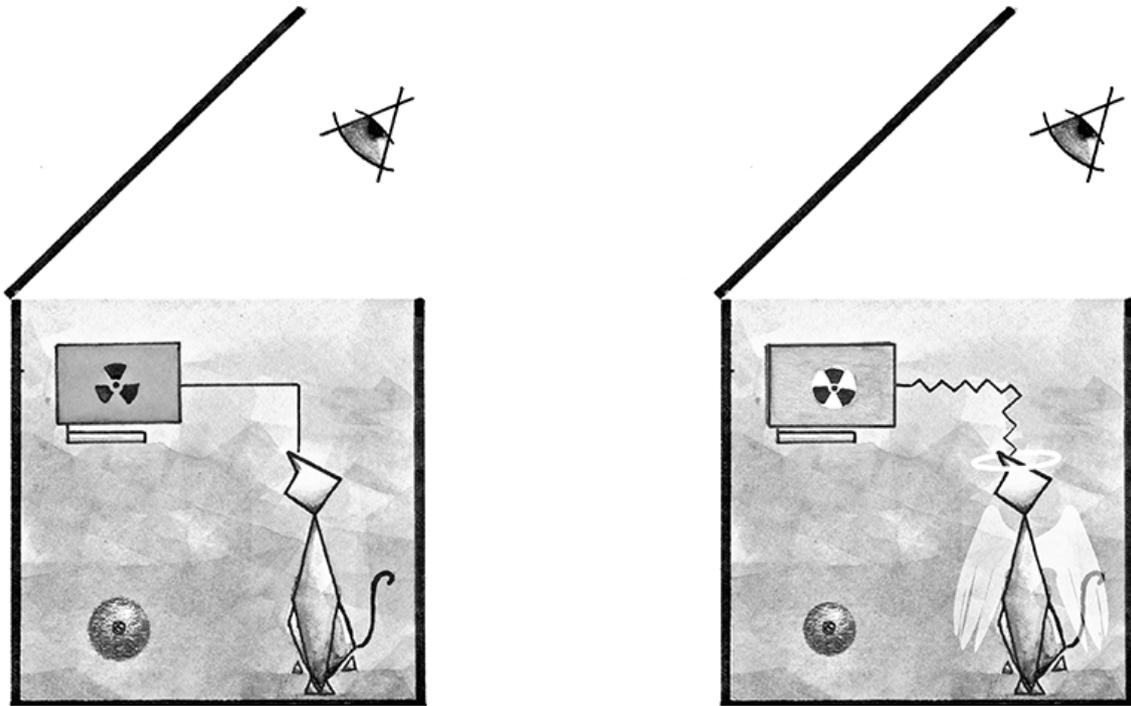


Figura 4.

L'esperimento mentale del gatto di Schrödinger. Il rivelatore è costruito per rispondere con un impulso elettrico a un fotone emesso da un atomo che decade e salta da uno stato eccitato allo stato fondamentale. Il gatto è collegato al circuito, perciò all'arrivo di un impulso resterà folgorato. Dopo poco tempo, l'atomo è in una sovrapposizione del suo stato eccitato e del suo stato fondamentale. La Regola 1 applicata a questo caso prevede quindi che il gatto all'interno della scatola chiusa sia in una sovrapposizione di due stati, in cui è al contempo vivo e morto.

In precedenza abbiamo considerato coppie di misurazioni incompatibili, come la posizione e la quantità di moto di una particella. In quei casi, sembra che l'atto di misurare una grandezza alteri o interferisca con il valore dell'altra. Abbiamo descritto la situazione dicendo che l'ordine in cui si effettuano le due misurazioni è importante.

Notiamo però che il caso di Anna e Bianca è diverso. Le domande poste a Bianca sono del tutto compatibili con le domande poste ad Anna. L'ordine in cui le due ragazze sono interrogate non ha importanza. Era vero

quando le due erano lontane al momento in cui venivano interrogate, ma sarebbe vero anche se fossero vicine.

Tuttavia, anche se l'ordine in cui si interrogano le due ragazze è irrilevante, di modo che le domande poste a una sono compatibili con le domande poste all'altra, resta il fatto che le risposte di Anna dipendono dalla scelta delle domande rivolte a Bianca.

Questa dipendenza è chiamata *contestualità*, poiché le risposte di Anna risultano dipendere dal contesto generale, fino al punto di dipendere da scelte fatte riguardo a quali altre domande verranno poste. Questa considerazione risulta vera in generale per i sistemi quantomeccanici. La contestualità si presenta in situazioni in cui il sistema in esame è descritto da almeno tre proprietà, che possiamo chiamare A, B e C. A è compatibile sia con B sia con C, quindi può essere misurata contemporaneamente a B o a C. B e C però non sono compatibili tra loro, perciò possiamo misurarle soltanto una alla volta.

Possiamo quindi misurare A e B oppure A e C. Conduciamo una serie di esperimenti in cui scegliamo l'una o l'altra possibilità e registriamo tutte le risposte. In tal modo scopriremo – nell'ipotesi che la meccanica quantistica sia corretta – che le risposte relative ad A dipendono dal fatto che abbiamo scelto di misurare anche B oppure C. La conclusione è che la natura è contestuale. Così è per la meccanica quantistica e sono stati realizzati esperimenti che confermano questa previsione della teoria. Quindi deve essere vero in qualunque teoria più profonda che sostituirà la meccanica quantistica.

A dimostrare per primo questo risultato fu John Bell nei primi anni Sessanta, prima di pubblicare il risultato sulla non località. Bell sottopose l'articolo a una rivista, ma a quanto pare questo si perse per due anni «sulla scrivania del direttore», così fu pubblicato soltanto nel 1966. Poiché nello stesso periodo la contestualità della meccanica quantistica fu dimostrata nuovamente da due matematici, Simon Kochen ed Ernst Specker, spesso questo risultato viene attribuito a loro, mentre sarebbe corretto chiamarlo teorema di Bell-Kochen-Specker⁵.

La meccanica quantistica fu ideata per spiegare alcuni risultati sperimentali sconcertanti relativi alla luce, alla radiazione e agli atomi. I tre fenomeni nuovi esaminati in questo capitolo – l'entanglement, la non località

e la contestualità – sono di gran lunga piú sconcertanti. Sono cosí strani che per qualche tempo furono usati per sostenere che la meccanica quantistica doveva essere sbagliata, finché gli esperimenti non confermarono che in realtà sono tutti aspetti del mondo naturale. Questo fu certamente un risultato inatteso. L'entanglement, la non località e la contestualità emergero dallo studio dei sistemi quantistici ed è senz'altro giusto dire che erano previsioni della teoria quantistica che, sorprendentemente, si sono dimostrate corrette.

Questi tre aspetti della fisica quantistica pongono sfide importanti al realismo. In verità, fanno scartare ampie classi di teorie realistiche. In particolare, l'entanglement non locale è incompatibile con tutte le teorie le cui esseribili si influenzano reciprocamente soltanto attraverso forze locali, le cui azioni si propagano a una velocità non superiore a quella della luce. Qualunque teoria realistica capace di simulare la meccanica quantistica deve quindi descrivere un mondo che viola questa condizione e dunque abbracciare apertamente la non località. È per questo motivo che Einstein parlava di «inquietanti azioni a distanza». La scelta che dobbiamo affrontare è semplice: possiamo rinunciare al realismo e accettare come ultima parola la meccanica quantistica, oppure possiamo andare avanti e cercare di capire in che modo la natura viola la località riuscendo al contempo ad aver senso.

Capitolo quinto

Quel che la meccanica quantistica non spiega

La meccanica quantistica non risponde a tutte le domande che possiamo porre riguardo al mondo atomico, però risponde bene a molte. Questo è un buon momento per riassumere che cosa abbiamo imparato su che cosa spiega e che cosa non spiega la meccanica quantistica.

Grosso modo, la meccanica quantistica prevede e spiega due tipi di proprietà: le proprietà di singoli sistemi e le medie relative a molti singoli sistemi. Sono due cose ben diverse.

Quando possiamo attribuire un valore preciso a una grandezza, come possiamo fare quando eseguiamo una misurazione, questa è una proprietà del singolo sistema che è stato misurato. Spesso, però, il principio di incertezza ci impedisce di parlare di qualunque cosa che non sia una media.

A che cosa si riferiscono queste medie? A causa del principio di incertezza, può succedere che due atomi, preparati in modo identico nello stesso stato iniziale, presentino valori diversi quando poi li si misura. Per esempio, gli atomi preparati nella stessa posizione di partenza tenderanno a sparpagliarsi e a trovarsi in seguito in posti diversi. Quando le risposte finali differiscono, possiamo comunque misurarne il valore medio. La meccanica quantistica ci dice che queste medie si calcolano su molte esecuzioni di un esperimento. Un esperimento ci richiede di preparare molte copie di un sistema, aspettare, poi misurare ciascuna copia e infine calcolare la media dei risultati.

Una collezione di atomi che sono simili per certi versi ma differenti per altri è chiamata *ensemble*. La meccanica quantistica si occupa di ensemble. Possiamo definirli stabilendo un valore preciso per una grandezza, per esempio l'energia, mentre altri parametri variano in un intervallo di valori, come richiesto dal principio di incertezza. Quando parliamo di medie o di probabilità nella meccanica quantistica, di solito ci riferiamo a qualcosa

che può essere misurato calcolando la media sugli elementi di un ensemble formato da molte copie dell'atomo in questione.

Spesso non è un'operazione difficile, perché molti esperimenti hanno a che fare con collezioni di atomi, come un gas. Sono ensemble reali, dato che gli atomi nella collezione sono reali. A volte, però, l'ensemble esiste soltanto nell'immaginazione del teorico.

Normalmente i risultati del calcolo delle medie su molte copie di un singolo sistema si spiegano in funzione delle proprietà di questi singoli sistemi. Nella meccanica quantistica, tuttavia, accade spesso il contrario e una proprietà di un singolo atomo viene spiegata in funzione di medie su molti atomi. Ma come fa il collettivo a determinare il singolo? I casi di questo genere sono alla base degli aspetti più misteriosi del mondo quantistico.

Una delle proprietà individuali di cui la meccanica quantistica può discutere è l'energia di un atomo o di una molecola. È noto che nella meccanica quantistica le energie di molti sistemi possono assumere certi valori discreti, il cui insieme è detto spettro. Lo spettro è una proprietà dei singoli atomi, in quanto può essere osservato in esperimenti con un solo atomo. Gli atomi, le molecole e i vari materiali hanno tutti uno spettro e in ognuno di questi casi la meccanica quantistica lo prevede nel modo corretto. Non solo, la meccanica quantistica *spiega* perché questi sistemi possono avere soltanto quelle energie. Lo fa utilizzando il dualismo onda-particella. Questo è uno dei casi in cui per spiegare che cosa accade in un singolo sistema si usano le medie su molti sistemi.

La spiegazione comprende due passi. Nel primo si usa il rapporto tra energia e frequenza, che è il fondamento del dualismo onda-particella. Uno spettro di valori discreti di energia corrisponde a uno spettro di frequenze discrete. Il secondo passo sfrutta l'immagine di uno stato quantistico come un'onda. Un'onda che ha una determinata frequenza è come una campana o una corda di chitarra che producono un suono. La corda risuona quando viene pizzicata, come la campana quando viene colpita, e produce un suono a una determinata frequenza.

Usiamo quindi l'equazione per il cambiamento nel tempo degli stati quantistici per prevedere le frequenze risonanti del sistema. Inserendo nell'equazione le masse delle particelle coinvolte e le forze che agiscono tra

loro otteniamo lo spettro delle frequenze risonanti. Queste poi vengono tradotte in energie risonanti.

Funziona bene. Per esempio, se inseriamo i dati relativi a un sistema composto da un elettrone e un protone, tenuti insieme dalla reciproca attrazione elettrica, l'equazione fornisce lo spettro dell'atomo di idrogeno.

Nella maggior parte dei casi, esiste uno stato di energia minima, chiamato stato fondamentale. Gli stati di energia maggiore sono chiamati stati eccitati. Eccitiamo lo stato fondamentale aggiungendo l'energia necessaria per fargli raggiungere il livello di uno di questi stati eccitati. Ciò provoca la transizione dallo stato fondamentale allo stato eccitato. L'energia aggiunta spesso è fornita da fotoni. Gli stati eccitati tendono a essere instabili, perché possono tornare allo stato fondamentale irradiando l'energia in eccesso sotto forma di un fotone. Lo stato fondamentale non ha uno stato di energia minore in cui decadere, pertanto è stabile. Per la maggior parte, i sistemi sono quasi sempre nel proprio stato fondamentale.

Questo metodo è stato testato su moltissimi sistemi, tra cui atomi, molecole, nuclei e solidi. In tutti i casi si sono osservati gli spettri previsti. Oltre a individuare lo spettro delle energie possibili, la meccanica quantistica prevede varie grandezze medie, come i valori medi delle posizioni delle particelle che costituiscono il sistema.

Per ciascuna frequenza risonante, possiamo risolvere l'equazione che definisce la meccanica quantistica ottenendo l'onda corrispondente. Poi usiamo la regola di Born (in base alla quale il quadrato dell'onda è proporzionale alla probabilità di trovare la particella) per prevedere le probabilità che la particella si trovi in posizioni diverse.

Gli stati con un'energia determinata hanno posizioni indeterminate. Supponiamo di preparare un milione di atomi di idrogeno, tutti nello stato fondamentale. In ciascuno, misuriamo la posizione dell'elettrone (rispetto al protone, considerato fermo al centro dell'atomo). Ciascuna misurazione dà come risultato una posizione diversa. Misurando un milione di atomi diversi otteniamo un milione di posizioni diverse. Alcune saranno lontane dal protone, ma per la maggior parte saranno raggruppate intorno al protone al centro. L'insieme delle posizioni possibili costituisce una distribuzione statistica e ciò che prevede la meccanica quantistica è questa distribuzione, non una determinata posizione.

In base al principio di incertezza, la posizione di ogni singolo elettrone non può essere prevista, però si può trovare la distribuzione statistica delle posizioni, che è il risultato della misurazione di un gran numero di casi. Queste distribuzioni statistiche sono calcolate elevando l'onda al quadrato.

Per riassumere, la meccanica quantistica formula due tipi di previsioni: le previsioni degli spettri discreti di energia, o di altre grandezze che può avere un sistema, e le previsioni delle distribuzioni statistiche di grandezze come le posizioni delle particelle.

In tutti i casi di cui sono a conoscenza, questi due tipi di previsioni sono stati confermati da esperimenti. È davvero straordinario.

Ma la meccanica quantistica spiega come funzionano i singoli atomi? Una previsione corretta è sempre equivalente a una spiegazione?

Altrettanto notevole è ciò che la meccanica quantistica non fa: non descrive né prevede dove si troverà un dato elettrone. Poiché si occupa di medie, la meccanica quantistica ha ben poco da dire su ciò che accade in singoli sistemi.

Sono molti i casi in cui ci occupiamo di medie. Non abbiamo nessun problema a misurare l'altezza media dei canadesi. Il motivo è che ciascun canadese è alto un certo numero di centimetri. Sommiamo tutti questi centimetri, dividiamo il risultato per il numero dei canadesi misurati e otteniamo la media.

In casi come questo, la media è composta dalle singole altezze, che sono proprietà degli individui. Potremmo decidere di lavorare con l'elenco completo delle altezze, ma per molti scopi, come progettare mobili o automobili, è sufficiente conoscere il valore medio dell'altezza. Se abbiamo bisogno di qualcos'altro, probabilmente è la *deviazione standard*, che indica il tipico intervallo di variazione della variabile. Usando la media e la deviazione standard, una compagnia aerea potrebbe (se volesse) costruire sedili per aeroplani in cui starebbe comodo il 95 per cento dei canadesi.

In questi casi, le informazioni che ignoriamo quando usiamo le medie sono realmente presenti nel mondo, ma noi scegliamo di eliminarle a favore delle medie. Le incertezze che emergono dall'uso delle probabilità sono dovute esclusivamente alla nostra ignoranza.

Ora invece supponiamo di ottenere un risultato diverso ogni volta che misuriamo l'altezza di qualcuno. Qui abbiamo un elemento di autentica

casualità, dato che non abbiamo modo di sapere quanto sarà alta una persona la prossima volta che la misuriamo. Questo è più simile al caso che trattiamo nella meccanica quantistica. Che cosa significa la media, e che cosa spiega, quando non esistono le storie dei singoli casi?

Pur non avendo nulla di preciso da dire sui singoli casi, la meccanica quantistica prevede le medie in modo corretto. A quanto pare, non esiste quel tipo di spiegazione che ci aspettiamo di solito in casi come l'altezza, dove la base di una media sta nel fatto che è composta di casi individuali.

Uno degli aspetti più impreveduti della meccanica quantistica è il fatto che un sistema può cambiare nel tempo in due modi, che sono stati descritti nel capitolo III. Per la maggior parte del tempo, lo stato quantistico si evolve in maniera deterministica secondo la Regola 1, però quando effettuiamo una misurazione del sistema si evolve in un modo molto diverso, secondo la Regola 2. La misurazione produrrà un numero appartenente a un insieme di valori possibili. Subito dopo la misurazione, lo stato quantistico salta in uno stato corrispondente al valore preciso che è stato misurato nell'esperimento.

La Regola 1 è continua e deterministica; la Regola 2 è invece repentina e probabilistica. Lo stato salta istantaneamente subito dopo la misurazione, ma la meccanica quantistica prevede soltanto le probabilità dei diversi risultati, quindi dello stato in cui salta il sistema.

Quasi tutti restano perplessi quando incontrano queste due regole. Come abbiamo visto, la situazione è davvero difficile da capire. Il primo punto sconcertante è il problema della misurazione. Che cos'ha di tanto speciale una misurazione? I dispositivi di misurazione e gli esseri umani che li usano sono fatti di atomi, quindi perché non si dovrebbe applicare la Regola 2?

La Regola 1, prescrivendo come cambia un sistema quantistico nel corso del tempo, ha nella teoria lo stesso ruolo essenziale che avevano le leggi del moto di Newton nella fisica prequantistica. Come le leggi di Newton, la Regola 1 è deterministica. Prende uno stato di input e lo fa evolvere in un determinato stato di output in un istante successivo. Ciò significa che prende stati di input che sono sovrapposizioni e restituisce stati di output che sono costruiti in modo analogo a partire da sovrapposizioni. La probabilità non ha alcun ruolo.

Tuttavia le misurazioni, come descritto dalla Regola 2, non fanno evolvere le sovrapposizioni in altre sovrapposizioni. Quando misuriamo una grandezza, come la posizione o la preferenza politica, otteniamo un valore preciso e in seguito lo stato è quello corrispondente a quel valore preciso. Quindi, anche se lo stato di input è una sovrapposizione di stati con valori precisi di qualche grandezza osservabile, lo stato di output non è una sovrapposizione, dato che corrisponde a un solo valore.

La Regola 2 non dice qual è questo valore preciso; prevede soltanto le probabilità dei diversi risultati possibili. Ma queste probabilità non sono spurie; fanno parte di ciò che prevede la meccanica quantistica. La Regola 2 è essenziale, perché è così che le probabilità entrano nella meccanica quantistica. E le probabilità sono essenziali in molti casi; sono ciò che si misura negli esperimenti.

La meccanica quantistica richiede però che non si applichino mai la Regola 1 e la Regola 2 allo stesso processo, perché le due regole si contraddicono. Ciò significa che dobbiamo sempre distinguere le misurazioni da altri processi naturali.

Se siamo realisti, tuttavia, le misurazioni non sono altro che processi fisici e non esiste nulla di speciale che le possa distinguere in modo fondamentale da qualunque altra cosa che si verifica in natura. Pertanto nell'ambito del realismo è molto difficile giustificare l'attribuzione di un ruolo speciale alle misurazioni. Ne segue che è difficile conciliare la meccanica quantistica con il realismo.

In definitiva, la domanda è: possiamo vivere con queste contraddizioni ed enigmi, o vogliamo e ci aspettiamo di più dalla scienza?

Capitolo sesto

Il trionfo dell'antirealismo

La teoria quantistica non descrive la realtà fisica. Ciò che fa è fornire un algoritmo per calcolare le *probabilità* degli eventi macroscopici («scatti del rivelatore») che sono conseguenze dei nostri interventi sperimentali. Questa definizione rigorosa dell'ambito della teoria quantistica è l'unica interpretazione che sia mai necessaria, agli sperimentatori come ai teorici.

CHRIS A. FUCHS e ASHER PERES ¹.

La prima persona che capì che la fisica quantistica avrebbe richiesto una teoria radicalmente nuova basata sul dualismo di onde e particelle fu Albert Einstein. Einstein era realista fino al midollo. La rivoluzione quantistica che innescò, tuttavia, vent'anni più tardi culminò in una teoria che impone di distinguere le misurazioni e trattarle diversamente da tutti gli altri processi – una distinzione che, come abbiamo visto nel capitolo precedente, è estranea al realismo. La soluzione del problema, secondo la maggior parte dei pionieri del mondo quantistico, consisteva nel rinunciare al realismo. Come avvenne questo abbandono del realismo?

L'idea del dualismo onda-particella comparve per la prima volta negli studi di Einstein sulla natura della luce nei primi anni del Novecento. Prima di allora i fisici avevano considerato teorie in cui la luce è una particella e teorie in cui la luce è un'onda, ma sempre solo l'una o l'altra cosa. Newton considerò la teoria ondulatoria e la scartò a favore di una teoria in cui la luce è trasmessa da un flusso di particelle che viaggiano dagli oggetti agli occhi. (Nell'antichità, alcuni pensatori le immaginarono viaggiare nella direzione opposta, il che rendeva difficile spiegare perché non vediamo al buio). La ragione di questa scelta di Newton è interessante: riteneva che le particelle spiegassero meglio perché la luce viaggia in linea retta. Conosceva il fenomeno della diffrazione delle onde, che possono piegarsi intorno

agli ostacoli, e non pensava che la luce potesse avere questo comportamento. La teoria corpuscolare di Newton dominò fino a quando, nei primi anni dell'Ottocento, lo scienziato inglese Thomas Young mostrò che in realtà la luce si piega e si diffrange ai bordi di un ostacolo e quando viene fatta passare per una fenditura. Young era un medico che contribuì a diversi settori della scienza e della medicina e pure all'egittologia. Era un esperto in una gran varietà di settori, cosa che di lì a poco fu resa impossibile dalla rapida espansione delle scienze. Per alcuni fu «l'ultimo uomo che sapeva tutto», ma il risultato più importante di Young è la sua teoria ondulatoria della luce, che, insieme alle prove sperimentali della diffrazione che fornì, portarono ad abbandonare la teoria corpuscolare di Newton.

Uno degli esempi considerati da Young è l'esperimento delle due fenditure, illustrato nella figura 5. Le onde marine provenienti da sinistra passano attraverso due fenditure di una barriera frangiflutti posta a protezione della spiaggia a destra. Le onde che passano per le due fenditure interferiscono tra loro: l'altezza dell'acqua in ciascun punto a destra dell'ostacolo è una combinazione delle onde che si propagano dalle due fenditure. Quando i picchi delle due onde coincidono, è visibile un rafforzamento (l'onda combinata raggiunge l'altezza massima), ma quando il picco di un'onda arriva in coincidenza del ventre dell'altra le due si annullano a vicenda. Il risultato è la forma disegnata a destra, che è chiamata *figura di interferenza*. Il punto fondamentale da capire e ricordare è che la figura di interferenza è prodotta dalle onde provenienti dalle due fenditure.

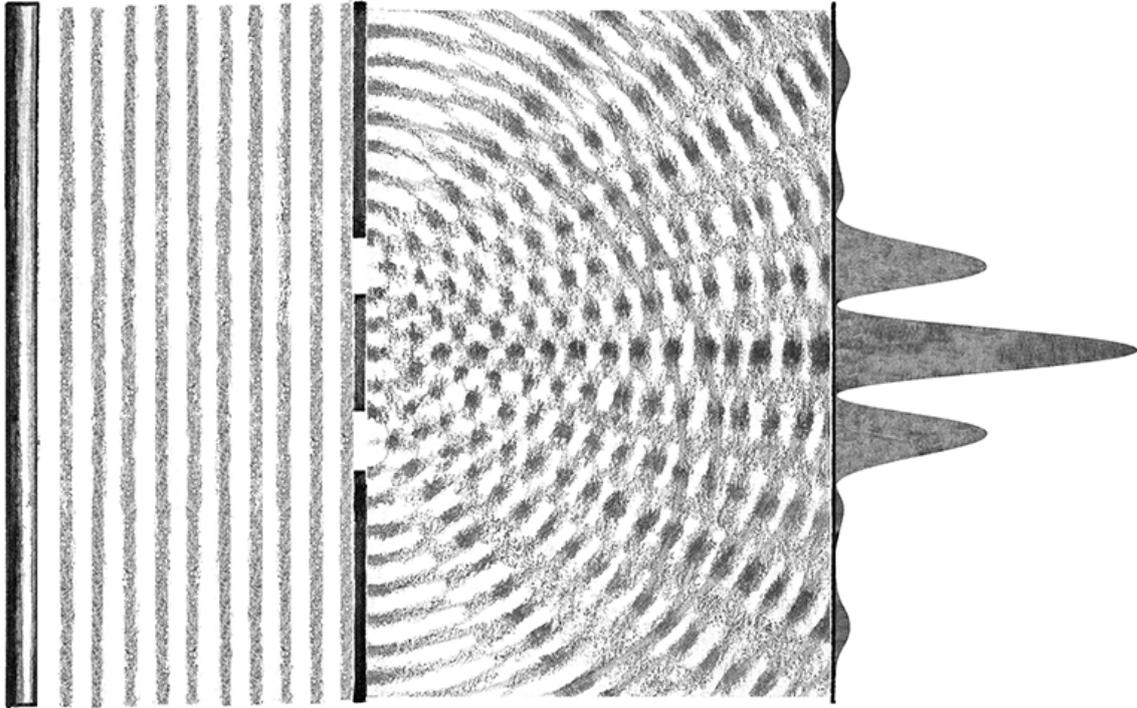


Figura 5.
L'esperimento delle due fenditure, che mostra che la luce si comporta come un'onda.

Thomas Young riuscì a costruire un apparecchio con due fenditure adatto per il caso della luce e osservò una figura di interferenza, che costituiva una prova convincente della natura ondulatoria della luce.

Altre prove a sostegno dell'idea che la luce è un'onda furono presentate dal fisico scozzese James Clerk Maxwell, che intorno al 1860 mostrò che la luce è un'onda che si propaga nei campi elettrici e magnetici che riempiono lo spazio trasmettendo forze tra cariche e magneti.

Einstein accettò l'ipotesi di Maxwell, ma a questa aggiunse la propria ipotesi che l'energia sia trasportata dalla luce in pacchetti discreti, che chiamò fotoni. Nacque così l'idea che la luce ha una natura duale – viaggia come un'onda ma trasporta energia in unità discrete come una particella. Einstein collegò le onde e le particelle con un'ipotesi semplice, in base alla quale l'energia trasportata da un fotone è proporzionale alla frequenza dell'onda luminosa.

La luce visibile ha un certo campo di frequenza, nel cui ambito la luce rossa ha la frequenza minore. La luce blu, che corrisponde praticamente alla massima frequenza che possiamo vedere, vibra a una velocità quasi doppia rispetto alla luce rossa. Quindi un fotone blu trasporta circa il doppio dell'energia di un fotone rosso.

Che cosa portò Einstein a formulare una proposta così radicale? Alcuni esperimenti di cui era a conoscenza erano riusciti a distinguere gli effetti dell'aumento di intensità di un raggio di luce dagli effetti del cambiamento del suo colore, ovvero della sua frequenza. A tal fine, si puntava un raggio di luce su una superficie di metallo, il che faceva saltar via alcuni elettroni dal metallo, creando una corrente elettrica che poteva essere rilevata da un semplice strumento utilizzabile da un elettricista.

Gli esperimenti misuravano quanta energia acquisivano dal raggio di luce gli elettroni in fuga. I risultati mostravano che se si vuole aumentare l'energia acquisita da ciascun elettrone, occorre aumentare la frequenza della luce. Aumentare l'intensità ha un effetto scarso o nullo; fa soltanto crescere il numero di fotoni che colpiscono il metallo, senza modificare l'energia che l'elettrone acquisisce dai singoli fotoni. Ciò è in accordo con l'ipotesi di Einstein che gli elettroni acquisiscano energia dalla luce assorbendo fotoni, la cui energia è proporzionale alla frequenza della luce.

In un metallo, normalmente gli elettroni sono imprigionati. L'energia che un fotone cede a un elettrone è come una cauzione atomica: libera l'elettrone, permettendogli di abbandonare il metallo. Questa cauzione, però, è fissata a un dato valore. I fotoni con un'energia insufficiente non producono effetti. Per riuscire a sfuggire, l'elettrone deve acquisire energia da un singolo fotone; non può raccogliere molti piccoli incrementi. Pertanto la luce rossa non è sufficiente a generare una corrente, mentre anche pochi fotoni di luce blu libereranno qualche elettrone, dato che ciascun fotone ha un'energia sufficiente per liberare un elettrone su cauzione.

Il fatto che nessuna quantità di luce rossa, per quanto intensa, è sufficiente a liberare un elettrone, mentre anche una minuscola quantità di luce blu riesce a farlo, suggerì a Einstein che l'energia della luce è trasportata in pacchetti discreti, con ciascuna unità proporzionale alla frequenza. Un suggerimento ancora più diretto arrivò da alcune misurazioni effettuate nel 1902 che mostrarono che, una volta superata la soglia per la cauzione, l'elettrone liberato volava via con un'energia proporzionale alla differenza

tra la frequenza e la soglia. Questo fu chiamato effetto fotoelettrico e Einstein fu l'unico a interpretarlo giustamente come il segnale di una rivoluzione nella scienza. L'articolo in questione fu uno dei quattro che scrisse in quell'anno miracoloso, il 1905, quando aveva ventisei anni e lavorava in un ufficio brevetti.

A quei tempi la teoria della luce dominante era quella di Maxwell, secondo cui la luce è un'onda che viaggia nei campi elettrici e magnetici. Einstein conosceva a fondo la teoria di Maxwell, poiché l'anno precedente, quando aveva abbandonato il liceo, aveva fatto escursioni in montagna portando sempre nello zaino il libro di Maxwell. Nessuno capì meglio di lui che la teoria ondulatoria della luce di Maxwell, per quanto eccellente, non poteva spiegare l'effetto fotoelettrico. Se Maxwell avesse avuto ragione, infatti, l'energia trasmessa da un'onda a un elettrone sarebbe aumentata con l'intensità, esattamente ciò che gli esperimenti non rilevavano.

L'effetto fotoelettrico non fu l'unico indizio. La generazione dei docenti di Einstein aveva approfondito lo studio della luce emessa da corpi caldi, come il bagliore del carbone incandescente. Ottimi risultati sperimentali, che i teorici speravano di spiegare, mostravano che riscaldando il carbone i colori della luce emessa cambiano. Nel 1900, il fisico teorico Max Planck spiegò il risultato mediante una derivazione in cui compare uno dei fraintendimenti più creativi della storia della scienza. Per farsi un'idea di questa commedia, occorre sapere che all'inizio del Novecento tra i fisici era ancora prevalente l'opinione scientifica, condivisa da Planck, che gli atomi non esistessero – la materia era ritenuta completamente continua. Ludwig Boltzmann di Vienna, uno dei pochi fisici teorici importanti che credevano negli atomi, sviluppò un metodo per derivare le proprietà dei gas trattandoli come collezioni di atomi.

Planck, pur essendo scettico nei confronti dell'ipotesi atomica, prese da Boltzmann i metodi usati per studiare i gas e li applicò alle proprietà della luce^a. Senza volerlo, in effetti descrisse la luce come un gas composto di fotoni, anziché di atomi. Navigando in acque profonde che non conosceva, scoprì che considerando l'energia di ciascun fotone proporzionale alla frequenza della luce poteva ottenere una risposta in accordo con gli esperimenti.

Planck non credeva negli atomi di luce piú di quanto credesse negli atomi di materia, quindi non capí di aver fatto la scoperta rivoluzionaria che la luce è fatta di particelle. Einstein però credeva negli uni e negli altri e, quasi da solo, capí che il successo della teoria di Planck si basava sull'idea di trattare la luce come un gas di fotoni. Quando venne a conoscenza dell'effetto fotoelettrico, pensò immediatamente di applicarlo alla proporzionalità tra l'energia di un fotone e la frequenza della luce che era comparsa nel lavoro di Planck. Quindi fu a lui, e non a Planck, che fu concessa la fortuna di fare una delle grandi scoperte della storia della scienza: la natura duale della luce, sia ondulatoria sia corpuscolare.

Sulle prime la proposta di Einstein fu accolta con grande scetticismo. Dopo tutto, occorreva ancora fare i conti con l'esperimento delle due fenditure, che mostrava chiaramente che la luce passa attraverso entrambe, come un'onda. In qualche modo, la luce è sia un'onda sia una particella. Einstein lottò per il resto della vita con questa apparente contraddizione. Nel 1921, però, dopo la conferma di alcune previsioni dettagliate che aveva formulato nell'articolo del 1905, Einstein vinse il premio Nobel per l'effetto fotoelettrico.

Come postilla a questa storia, si può aggiungere che un altro dei quattro articoli scritti da Einstein quell'anno dimostrò in maniera convincente e definitiva che la materia è fatta di atomi. All'epoca, nemmeno i microscopi migliori permettevano di vedere gli atomi, perciò Einstein concentrò la sua attenzione su oggetti sufficientemente grandi per essere osservati al microscopio: granelli di polline. Era noto che i granelli di polline sospesi nell'acqua danzano incessantemente, il che all'epoca era un gran mistero. Einstein spiegò che la danza è dovuta al fatto che i granelli urtano le molecole d'acqua, che sono esse stesse sempre in movimento ^b.

Gli altri due articoli scritti da Einstein in quell'anno importante presentavano la sua teoria della relatività e la famosa relazione tra massa ed energia, $E = mc^2$.

Se vogliamo trovare qualcosa di analogo a ciò che Einstein realizzò in quel solo anno, possiamo considerare soltanto Newton. Einstein diede inizio a due rivoluzioni – la relatività e i quanti. Riguardo ai quanti aveva estorto alla natura due intuizioni preziose: la natura duale della luce e la

relazione tra l'energia della particella e la frequenza dell'onda, che collega i due aspetti del dualismo.

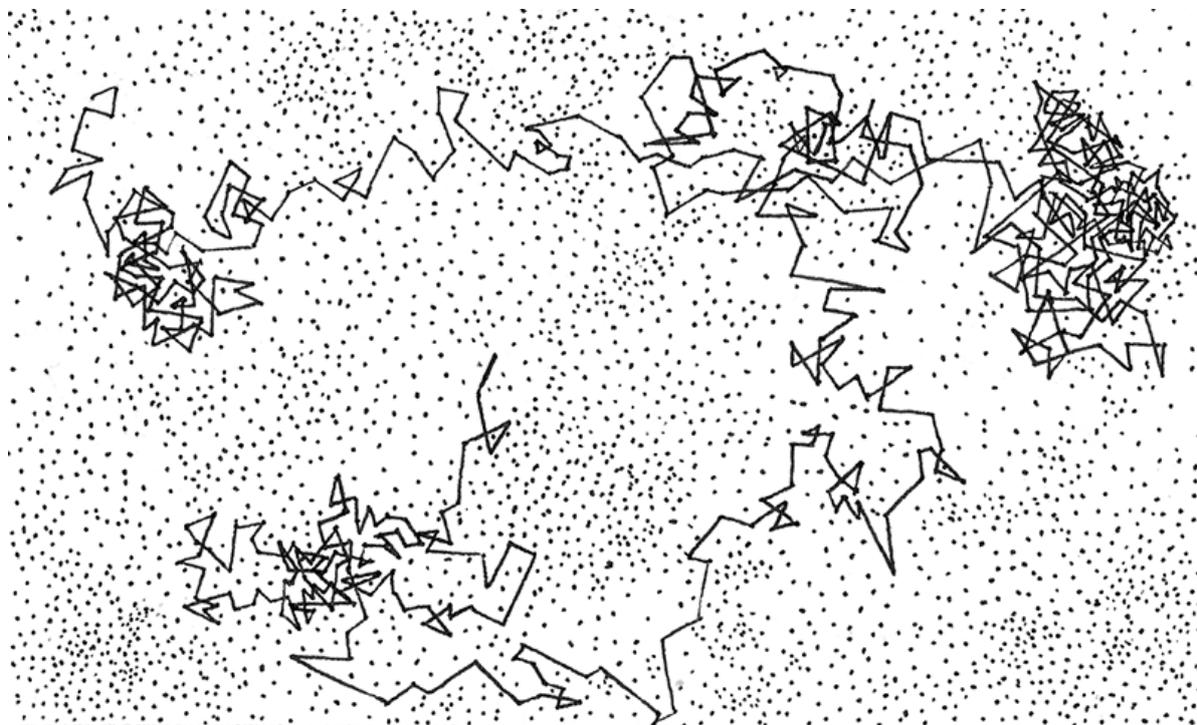


Figura 6.

Il moto browniano è il movimento casuale delle molecole e di altre piccole particelle che si trovano in natura. Einstein spiegò che il moto è il risultato delle frequenti collisioni tra le molecole che formano l'aria o l'acqua e riuscì a prevedere come l'entità degli effetti dipende dalla densità degli atomi.

Il quarto articolo di Einstein, che dimostrava l'esistenza degli atomi, non si pronunciava sulla natura quantistica della luce. Però conteneva due misteri, per risolvere i quali era necessaria la teoria quantistica. Com'è possibile che gli atomi siano stabili? E perché gli atomi dello stesso elemento chimico si comportano in modo identico?

Mentre i teorici si erano accapigliati sull'esistenza degli atomi, i fisici sperimentali si erano dati da fare a separarne i costituenti. Il primo a essere identificato fu l'elettrone, che si scoprì avere carica negativa e una massa minuscola, all'incirca duemila volte più piccola di quella di un atomo di

idrogeno. Gli elementi chimici erano classificati in base al numero di elettroni contenuti. Il carbonio ha sei elettroni e l'uranio 92, per esempio. Gli atomi sono elettricamente neutri, quindi se un atomo contiene, poniamo, sei elettroni, significa che se si eliminano quegli elettroni si ottiene una struttura con sei cariche positive. Poiché gli elettroni sono molto leggeri, questa struttura, che possiamo chiamare nucleo, ha la maggior parte della massa.

Nel 1911, Ernest Rutherford determinò che il nucleo dell'atomo è minuscolo, in confronto all'atomo. Se l'atomo è una piccola città, il nucleo è una biglia. In quel volume minuscolo sono concentrate tutte le cariche positive e quasi tutta la massa dell'atomo. Gli elettroni orbitano intorno al nucleo nel vasto spazio vuoto che costituisce la maggior parte dell'atomo.

L'analogia con il sistema solare è inevitabile. Gli elettroni e il nucleo hanno cariche di segno opposto e le cariche opposte si attraggono tramite la forza elettrica. È questo a mantenere in orbita gli elettroni intorno al nucleo, in modo simile a come i pianeti sono mantenuti in orbita intorno a una stella a causa della reciproca attrazione gravitazionale. L'analogia però è fuorviante, perché nasconde i due enigmi che ho menzionato. Ciascuno di essi fornisce una ragione per cui la fisica newtoniana, che spiega il sistema solare, non può spiegare gli atomi.

Gli elettroni sono particelle cariche e la grande teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell ci dice che una particella carica che si muove di moto circolare dovrebbe emettere luce in modo continuo. Secondo la teoria di Maxwell, vale a dire nella fisica prequantistica, la luce emessa dovrebbe avere la frequenza dell'orbita. Ma la luce porta via energia, quindi l'elettrone dovrebbe avvicinarsi al nucleo al diminuire della sua energia. Il risultato dovrebbe essere una veloce caduta a spirale sul nucleo, accompagnata da un lampo di luce. Se la teoria di Maxwell è corretta, non può esistere la situazione in cui gli elettroni seguono orbite tranquille, stabili intorno al nucleo. La possiamo chiamare la crisi della stabilità delle orbite elettroniche.

Potreste domandarvi per quale motivo le orbite dei pianeti non sono afflitte dallo stesso problema. I pianeti sono elettricamente neutri, quindi non emettono luce nello stesso modo. Secondo la relatività generale, tuttavia, i pianeti in orbita irradiano energia sotto forma di onde gravitazionali e si muovono a spirale verso il Sole. Il fatto è che la gravità è debolissima, perciò questo processo è straordinariamente lento. L'effetto è stato osser-

vato in sistemi formati da coppie di stelle di neutroni in orbita ravvicinata l'una intorno all'altra. In maniera molto spettacolare, inoltre, le antenne per onde gravitazionali hanno rilevato la radiazione emessa da coppie di buchi neri massicci che collassano l'uno sull'altro e si fondono.

Il secondo problema sollevato dal quarto articolo di Einstein è perché tutti gli atomi con un dato numero di elettroni sembrano avere proprietà identiche. In generale, due sistemi solari con sei pianeti ciascuno, a parte questa caratteristica, non sono molto simili. I pianeti hanno orbite e masse diverse e così via. La chimica invece funziona perché tutti gli atomi di carbonio interagiscono con altri atomi esattamente nello stesso modo. E in modo diverso rispetto agli atomi di ossigeno, che hanno anch'essi tutti lo stesso comportamento. Questo è l'enigma della stabilità delle proprietà chimiche. L'analogia con il sistema solare non regge per il motivo che la fisica newtoniana, che funziona benissimo per spiegare il sistema solare, non può spiegare perché tutti gli atomi con sei elettroni hanno le stesse proprietà chimiche.

Per rispondere a entrambe queste domande sugli atomi era necessario applicare agli atomi le nuove idee radicali sulla natura della luce che Einstein stava sviluppando. Era quel genere di mossa audace che Einstein era capace di fare, ma sfuggì persino a lui. Il fisico che ebbe l'intuizione fu il giovane danese Niels Bohr. Questa intuizione fece sì che ad assumere la guida dei rivoluzionari che inventarono la meccanica quantistica fu Bohr, e non Einstein. Per tutta la vita, Bohr fu un radicale antirealista ed è a lui, più che a chiunque altro, che va attribuita la responsabilità di aver fatto della rivoluzione quantistica un trionfo dell'antirealismo. Nel corso della sua carriera, Bohr elaborò una serie di argomenti a sostegno dell'impossibilità di comprendere il comportamento degli atomi e della luce dal punto di vista del realismo.

Bohr crebbe in una famiglia di accademici – il padre era professore di fisiologia e il fratello era un matematico. Fu una di quelle persone fortunate che riescono a vivere tutta la vita nella città natale, più o meno nello stesso ambiente dei genitori. Nel suo caso, però, una vita semplice e tradizionale fu l'incubatrice di un pensiero radicale.

In questo gradevole milieu intellettuale, Bohr e la moglie allevarono sei figli maschi, molti dei quali divennero professori. Uno addirittura seguì il padre tanto da vincere un premio Nobel per la fisica. Un altro figlio, il

maggiore, annegò durante una gita in barca con il padre. Un altro figlio ancora rappresentò la Danimarca alle Olimpiadi, come fece anche uno zio.

La Danimarca è un piccolo paese che tiene in grande considerazione la scienza e il ruolo di guida della rivoluzione quantistica di Bohr fu facilitato dalla creazione di un nuovo istituto a sostegno delle sue attività, sponsorizzato dal governo danese e dalla Carlsberg, un'importante azienda produttrice di birra. Bohr poté disporre quindi dell'ambiente ideale per estendere la propria influenza, circondandosi dei migliori giovani teorici di tutto il mondo. I giovani scienziati erano stimolati da un flusso continuo di visitatori che venivano per collaborare con Bohr o per discutere con lui della teoria quantistica. L'istituto gli fornì anche una casa comoda, dove la famiglia Bohr ospitò gran parte dei visitatori.

I figli di Niels Bohr dovettero dividerlo con molti di questi giovani rivoluzionari, che lo ammiravano e lo consideravano un mentore. A prendersi cura dei ragazzi era la signora Bohr, che combinò i matrimoni di molti figli, presentando loro la donna che avrebbero sposato (nella cerchia di Bohr, le donne scienziate erano poche).

Senza dubbio, Bohr affascinava le persone che lavoravano con lui. Considerava la scienza come un dialogo con la natura e anche il suo metodo di lavoro si basava sul dialogo – anche se di un genere che spesso scivolava nel monologo. Usava i collaboratori come scribi, incaricati di annotare i suoi pensieri, espressi per mezzo di indovinelli sussurrati, e modificati più e più volte, mentre camminava in tondo nella stanza.

Bohr iniziò a occuparsi di fisica quantistica poco dopo aver conseguito il dottorato. Andò dritto al cuore del problema proponendo un modello quantistico dell'atomo semplice ma profondo. Si basò sulla nascente teoria quantistica di Einstein, in particolare sull'idea che l'energia è trasportata dai fotoni. Per affrontare il problema della stabilità delle orbite elettroniche, Bohr postulò semplicemente che la teoria di Maxwell non fosse corretta alla scala atomica. Ipotizzò invece l'esistenza di un piccolo numero di orbite elettroniche stabili. Per individuarle, usò la costante di Planck, che è il fattore di conversione tra frequenza ed energia. Questo fattore di conversione è l'unità di misura di una grandezza chiamata momento angolare. Il momento angolare equivale esattamente alla quantità di moto, detta anche momento lineare, ma nel caso di moto circolare. Un corpo in rotazione tende per inerzia a continuare a ruotare. Ciò è dovuto al fatto che un

corpo che ruota su sé stesso od orbita intorno a qualcosa possiede un momento angolare, che, come l'energia e il momento lineare, non può essere creato né distrutto. È a causa della conservazione del momento angolare che la ruota della bicicletta continua a girare e che un pattinatore sul ghiaccio ruota più rapidamente quando raccoglie le braccia al petto.

Pensiamo a un atomo di idrogeno, che ha soltanto un elettrone. Bohr postulò che le orbite possibili fossero quelle in cui l'elettrone ha certi valori particolari del momento angolare. Questi valori particolari sono multipli interi dell'unità di momento angolare, data dalla costante di Planck. Bohr li chiamò *stati stazionari*. Esiste un'orbita con momento angolare nullo che ha anche il minimo valore possibile di energia per un elettrone in orbita intorno al nucleo. Questo stato è stabile; è lo stato fondamentale. Al di sopra dell'energia dello stato fondamentale vi è una serie discreta di energie che sono gli stati eccitati.

Gli atomi possono assorbire luce, acquisendo energia, e anche irradiare energia emettendo luce. Al passo successivo, Bohr postulò che questi processi si verificano quando l'elettrone salta da uno stato stazionario a un altro. Per descrivere questi salti Bohr sfruttò l'ipotesi dei fotoni di Einstein. Quando un elettrone salta da uno stato eccitato allo stato fondamentale, emette un fotone. Quel fotone ha un'energia pari alla differenza tra le energie dei due stati, e così l'energia totale resta invariata, e ha una frequenza specifica, data dalla relazione di Planck e Einstein tra frequenza ed energia.

Se invertiamo questo processo, colpendo l'elettrone con un fotone di energia pari alla differenza tra i due stati, possiamo farlo saltare dallo stato fondamentale a uno stato eccitato.

Un dato atomo può quindi emettere o assorbire luce solo alle particolari frequenze che corrispondono a queste differenze di energia tra gli stati dei suoi elettroni. Queste frequenze particolari costituiscono il cosiddetto spettro dell'atomo.

Quando Bohr arrivò a comprendere tutto ciò, nel 1912, i chimici avevano misurato lo spettro dell'idrogeno. Usando le idee appena descritte, Bohr riuscì a calcolare lo spettro e constatò che la sua semplice teoria riproduceva ciò che i ricercatori avevano osservato.

Nonostante la sua importanza, era solo un primo passo verso la comprensione dei quanti. Restava un certo numero di questioni in sospeso e

problemi aperti. Che cos'è un elettrone, che può viaggiare liberamente all'esterno dell'atomo, ma può esistere soltanto in uno degli stati stazionari quando è in un atomo? La questione più urgente da capire era se la teoria fosse applicabile anche ad altri atomi oltre a quelli di idrogeno.

Il decennio successivo fu occupato da molti tentativi ingegnosi di applicare la teoria di Bohr ad atomi diversi e ad altri sistemi. Pur ammirando l'ingegnosità di questi tentativi, volendo essere generosi possiamo dire che produssero risultati contrastanti. Questa era la situazione quando il giovane aristocratico francese Louis de Broglie iniziò gli studi di dottorato a Parigi, intorno al 1920.

Louis-Victor Pierre Raymond, principe de Broglie, nacque negli ultimi anni dell'Ottocento da una famiglia nobile e iniziò a studiare la fisica dopo essersi laureato in storia. Durante la prima guerra mondiale prestò servizio nell'esercito nella stazione di radiotelegrafia installata nella Torre Eiffel.

Il piccolo mondo della fisica teorica dell'epoca era caratterizzato, proprio come oggi, da intense relazioni sociali. Durante il periodo cruciale dello sviluppo della meccanica quantistica, i proponenti si tenevano sempre in contatto grazie a lettere e cartoline e viaggiavano spesso in treno per farsi visita e consultarsi. L'aristocratico de Broglie era estraneo a quel mondo a causa della sua personalità e della sua posizione, e perché a Parigi a quei tempi la fisica teorica languiva. L'unica persona con cui parlava regolarmente del proprio lavoro era il fratello, Maurice de Broglie, un fisico sperimentale che si occupava di raggi X.

L'isolamento di solito è un ostacolo per uno scienziato, ma a volte può portarlo a imbattersi in un'intuizione che è sfuggita a chiunque altro. De Broglie era ancora un dottorando quando diede una forte scossa alla fisica proponendo l'ipotesi audace che il dualismo onda-particella non fosse soltanto una caratteristica della luce, ma fosse universale. In particolare, de Broglie riteneva che gli elettroni, come la luce, fossero sia onde sia particelle.

Come osservò in seguito:

Quando ripresi gli studi, nel 1920, [...] ad attrarmi [...] verso la fisica teorica fu [...] il mistero per cui la struttura della materia e della radiazione diventava sempre più aggrovigliata via via che lo strano concetto dei quan-

ti, introdotto da Planck nel 1900 nelle sue ricerche sulla radiazione del corpo nero, penetrava sempre piú a fondo in tutta la fisica ².

Il potere di una mente fresca che considera un problema da una nuova prospettiva è una delle meraviglie del mondo. Fu il giovane de Broglie ad avere l'idea ovvia che per qualche motivo era sfuggita persino ad Einstein e a Bohr, i quali cercavano di evitare l'imbarazzo del dualismo onda-particella. De Broglie raddoppiò la posta. Se la luce era sia un'onda sia una particella, perché non poteva essere vero anche per gli elettroni? Perché non ipotizzare che il dualismo onda-particella si applichi universalmente alla materia e alla radiazione?

Come raccontò de Broglie molti anni dopo:

Poiché nelle conversazioni con mio fratello giungevamo sempre alla conclusione che nel caso dei raggi X si hanno onde e corpuscoli, all'improvviso [...] mi venne l'idea che si dovesse estendere questo dualismo alle particelle materiali, in particolare agli elettroni ³.

Che cosa spinse de Broglie a concepire un'idea che era sfuggita a fisici molto piú esperti? De Broglie era impegnato in un ambizioso progetto per reinventare la fisica dalle fondamenta incorporando il dualismo onda-particella. Iniziò dalla luce, un settore in cui si erano già raccolte buone prove di questo dualismo, e si pose una semplice domanda che pochi si erano posti: come si muovono i quanti di luce?

Ricordiamo che Newton era a favore di una teoria corpuscolare della luce essendo convinto che le particelle viaggiano in linea retta. Lo stesso assunto aveva portato Thomas Young ad abbandonare la spiegazione corpuscolare per abbracciare l'idea che la luce è un'onda, una volta compreso che la luce può piegarsi se diffratta da un ostacolo o rifratta passando tra due mezzi. È ragionevole pensare che la luce non sia fatta di particelle se non viaggia in linea retta. Che cosa si poteva dire dei fotoni? Non dovevano viaggiare in linea retta? De Broglie concepì l'idea che i fotoni non viaggiano in linea retta perché sono guidati dalle onde, che sono soggette a diffrazione e rifrazione.

È incredibilmente rivoluzionario. L'idea che le particelle viaggiano in linea retta è una conseguenza del principio piú fondamentale di tutta la fi-

sica, il principio di inerzia. Descritto nella prima legge del moto di Newton, afferma che in assenza di forze una particella si muove in linea retta a velocità costante. Una delle conseguenze è la conservazione della quantità di moto. È anche strettamente collegato al principio della relatività, dato che un'altra conseguenza è che la velocità è una grandezza relativa.

De Broglie capì che i quanti di luce avrebbero dovuto deviare intorno agli ostacoli, violando tutti questi principi fondamentali. L'obiettivo della sua tesi era formulare una nuova teoria rivoluzionaria del moto, da applicare alle particelle contemplate dal dualismo onda-particella. In questo contesto, un piccolo passo necessario era estendere questo dualismo dalla luce a tutte le forme di materia ed energia.

Questo fu l'argomento della tesi di dottorato di de Broglie, scritta nel 1924. La tesi era breve e intransigente. La leggenda vuole che se de Broglie non fosse stato un aristocratico, forse sarebbe stato semplicemente bocciato. Non sapendo che fare, la commissione spedì la tesi a Einstein domandandogli di valutarla. Einstein capì i ragionamenti di de Broglie e ne raccomandò l'approvazione. Allo stesso tempo, spedì la tesi ad alcuni colleghi a cui era certo che sarebbe interessata.

Una di queste persone era l'amico Max Born, un giovane professore che abitava in Germania. Un collega di Born, il fisico sperimentale Walter Elsasser, sentì parlare della tesi di de Broglie e suggerì la possibilità di verificarne la previsione della diffrazione degli elettroni facendo attraversare un cristallo da un fascio di elettroni. Born passò il suggerimento ad alcuni ricercatori in Inghilterra. Nessuno ebbe successo, ma nel frattempo due fisici statunitensi dei Bell Labs, Clinton Davisson e Lester Germer, stavano studiando per altre ragioni la diffusione di elettroni sparati su superfici di metallo. I due scoprirono accidentalmente la diffrazione degli elettroni nel 1925, quando provarono una nuova procedura che ebbe la non voluta conseguenza di sviluppare uno strato di atomi organizzati secondo i reticoli regolari di un cristallo sulla superficie del campione. Quando misurarono dove andavano a finire gli elettroni che si disperdevano dal metallo con la superficie cristallina, videro figure di interferenza. Davisson si rese conto dell'importanza di questo risultato soltanto quando partecipò a una conferenza a Oxford, nell'estate del 1926, e gli capitò di ascoltare una relazione di Max Born, che mostrò una figura tratta proprio da un articolo di Davisson come prova dell'ipotesi rivoluzionaria di de Broglie delle onde di mate-

ria. Una volta di nuovo in patria, Davisson tornò in laboratorio insieme a German e riuscì a confermare definitivamente che gli elettroni diffrangono, proprio come aveva previsto de Broglie.

Erwin Schrödinger era un brillante fisico matematico originario di Vienna, che era diventato professore all'Università di Zurigo. Schrödinger era vicino a compiere quarant'anni e non apparteneva alla giovane generazione di de Broglie e degli altri fisici che stavano rivoluzionando il settore. Il 23 novembre 1925 partecipò a un seminario tenuto da Peter Debye, che presentò con grande entusiasmo l'ipotesi ondulatoria della materia di de Broglie. Debye concluse la relazione dicendo che nel magnifico quadro generale di de Broglie mancava un'unica cosa, un'equazione che descrivesse come viaggiano nello spazio le onde degli elettroni. Lasciando la moglie a Zurigo, Schrödinger partì con la sua amante per festeggiare il Natale in montagna, portando con sé gli articoli di de Broglie (la moglie stava trascorrendo le vacanze con il grande matematico Hermann Weyl, suo amante, che era anche il miglior amico di Schrödinger). Il primo giorno si scusò del fatto che non sarebbe andato a sciare, restò nella camera dello chalet e lesse gli articoli di de Broglie. Si impose di inventare l'equazione che governava l'onda dell'elettrone di de Broglie. Ci riuscì il giorno dopo e, prima di tornare in città, aveva catturato l'equazione che porta il suo nome, l'equazione fondamentale della teoria quantistica.

Non solo: poco dopo essere tornato, con l'aiuto di Weyl, Schrödinger risolse l'equazione per il caso di un solo elettrone in orbita intorno a un nucleo e riprodusse la teoria di Bohr degli stati stazionari e la sua previsione dello spettro dell'idrogeno. L'idea chiave è che le onde degli elettroni devono adattarsi perfettamente a un'orbita, come illustrato nella figura 7. I pensieri della sua amante – e persino il suo nome – non sono passati alla storia. La leggenda però dice che Schrödinger, quando si recò a Stoccolma per ricevere il premio Nobel, si presentò insieme alla moglie e all'amica.

Nacque così la meccanica quantistica. Il problema che all'epoca tutti si trovarono ad affrontare era come immaginare l'onda dell'elettrone che de Broglie aveva inventato e Schrödinger aveva domato. Inizialmente, Schrödinger pensò che l'elettrone fosse soltanto un'onda, ma l'idea non resse, perché non fu difficile dimostrare che l'onda viaggiando tendeva a diffondersi nello spazio, mentre si poteva sempre trovare una particella localizza-

ta. Max Born allora propose la regola che collega l'onda alla probabilità di trovare la particella.

Secondo Einstein, il dualismo onda-particella, che pure rappresentava una grossa sfida, era comparso solo nelle speculazioni sui costituenti della luce. Confinato in quel dominio, aveva prodotto danni limitati, forse perché tanto le teorie corpuscolari della luce quanto quelle ondulatorie avevano una lunga storia e ben note virtù. L'idea di onde di materia era invece scioccante. De Broglie e Schrödinger trasformarono la fisica ponendo il dualismo onda-particella proprio al suo centro, dove veniva custodito come il mistero centrale della nuova fisica quantistica rivoluzionaria.

La domanda non era più «Come fa la luce a essere sia una particella sia un'onda?», ma «Come fa *ogni cosa* a essere sia una particella sia un'onda?»

Einstein, che era stato il primo a formulare il dualismo onda-particella, era molto sconcertato. Benché, per sua stessa ammissione, avesse dedicato molto più tempo alla fisica quantistica che alla relatività, non riusciva a fare una mossa convincente. Il suo impareggiabile intuito lo aveva abbandonato ed è interessante cercare di capire perché. Forse il suo realismo, la sua esigenza di chiarezza concettuale completa, lo ostacolarono.

Per un po', anche Schrödinger continuò a non sapere che fare. Come la maggior parte di tutti gli altri.

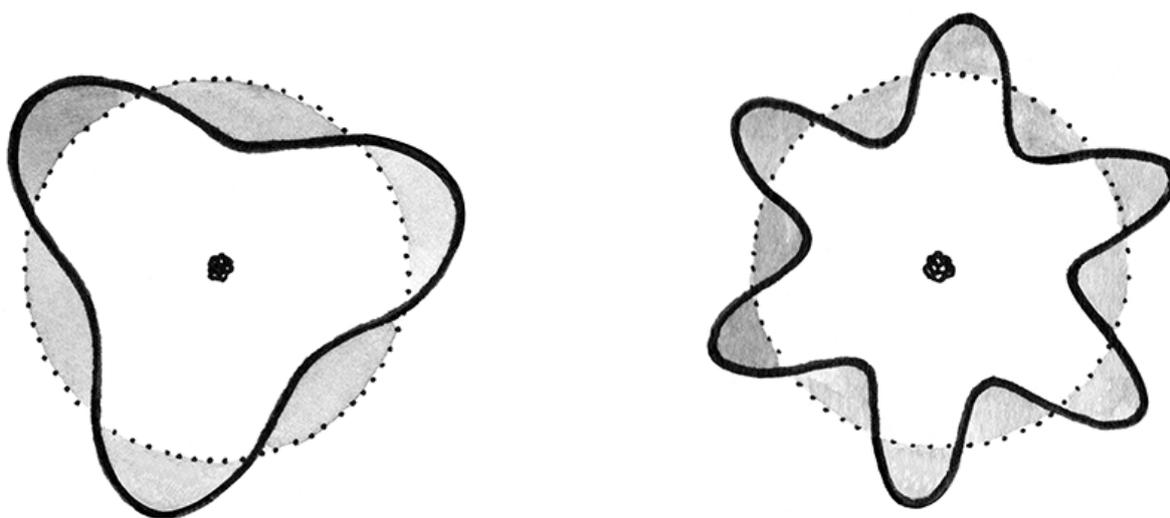


Figura 7.

Onde di elettroni nell'atomo. L'onda a sinistra compie un giro completo intorno al nucleo in tre passi, quindi la lunghezza d'onda è un terzo del diametro dell'atomo. L'onda a destra, che ha una lunghezza d'onda pari alla metà, circonda il nucleo in sei passi.

Dei grandi pionieri, solo Bohr non era perplesso. Era il suo momento e lo colse, annunciando la nascita non solo di una nuova fisica, ma di una nuova filosofia. Era arrivato il momento dell'antirealismo radicale e Bohr era pronto.

Bohr chiamò la nuova filosofia *complementarità*. Consideriamo qualche esempio di come ne parlava. Né le particelle né le onde sono attributi della natura. Non sono altro che idee nella nostra mente, che noi imponiamo al mondo naturale. Sono utili come descrizioni intuitive che costruiamo basandoci sull'osservazione di oggetti di grandi dimensioni, come biglie e onde marine. Gli elettroni non sono né l'una né l'altra cosa. Gli elettroni sono entità microscopiche che non possiamo osservare direttamente, perciò su di essi non abbiamo nessuna intuizione. Per studiare gli elettroni, dobbiamo costruire grandi attrezzature sperimentali che ci permettono di interagire con loro. Ciò che osserviamo non è mai l'elettrone stesso, ma sono soltanto le risposte dei nostri grandi apparecchi sperimentali ai minuscoli, invisibili elettroni.

Per descrivere come reagiscono agli elettroni i nostri strumenti, possiamo trovare utile impiegare immagini intuitive come quella dell'onda o della particella. Ma non possiamo prendere troppo sul serio queste immagini perché esperimenti diversi richiedono immagini diverse. Le immagini diverse sarebbero in contraddizione se dimenticassimo il contesto e le applicassimo agli elettroni stessi. Se si tengono a mente due cose, però, scompare ogni contraddizione. La prima è che le immagini sono utili soltanto come descrizioni di un elettrone in uno specifico contesto, cioè un particolare dispositivo sperimentale, e la seconda è che nessun dispositivo ci obbliga ad applicare allo stesso tempo entrambe le immagini contraddittorie.

La posizione di Bohr è estremamente antirealistica, dato che nega persino che sia possibile parlare di un elettrone o descrivere com'è di per sé, al di fuori del contesto di un esperimento realizzato da noi. Secondo questa

visione, la scienza non si occupa di elettroni, bensí di come parliamo delle nostre interazioni con gli elettroni.

Per Niels Bohr, la complementarità era qualcosa di piú di un principio; era una proposta per un'intera filosofia della scienza. Una proposta davvero radicale. Bohr difese la filosofia della complementarità per tutta la vita, come fecero altri fondatori della meccanica quantistica, compreso, in una certa misura, Heisenberg.

Per Bohr, la scienza non riguarda la natura. Non offre e non può offrire un quadro oggettivo di ciò che è la natura. Sarebbe impossibile, perché non interagiamo mai direttamente con la natura. Acquisiamo conoscenza del mondo naturale soltanto per mezzo di intermediari, che sono gli apparecchi sperimentali che inventiamo e costruiamo.

Dobbiamo quindi abbandonare l'idea che la scienza fornisca una descrizione oggettiva della natura, o che abbia qualcosa da dire su che cos'è la natura, in mancanza dei nostri interventi o della nostra stessa esistenza. La scienza è piuttosto un'estensione di un linguaggio comune che usiamo per descrivere a noi stessi e agli altri i risultati dei nostri interventi nella natura.

In vari saggi e libri, Niels Bohr sostenne l'ampia applicabilità della sua filosofia della complementarità. Secondo alcuni, prese l'idea dalla Cabala, il complesso delle dottrine mistiche ebraiche, che descrive come complementari l'amore di Dio e la giustizia di Dio. Bohr parlava della complementarità tra vita e fisica, tra energia e causalità e, in effetti, tra conoscenza e saggezza. A suo giudizio, la lezione della meccanica quantistica era una rivoluzione che si estendeva al di là della fisica, al di là della scienza.

Una delle ragioni per cui la meccanica quantistica catturò l'interesse della generazione piú giovane dei fisici era che poteva essere affrontata da diverse prospettive. Finora ho narrato la storia di una delle strade che portarono all'invenzione della teoria quantistica, centrata sul dualismo onda-particella, ma vi fu anche un'altra strada, che era stata scoperta poco prima che Schrödinger trascorresse le vacanze di Natale in montagna. Ad aprirla fu Werner Heisenberg, un giovane teorico tedesco molto sicuro di sé, che completò la sua formazione nel gruppo di Max Born a Gottinga e poi, nel 1925, si trasferí a Copenaghen con un contratto di ricerca per lavorare con Bohr. Per qualche anno Heisenberg fece la spola tra Gottinga e Copena-

ghen, il che significa che era in stretto contatto con le due personalità scientifiche più dinamiche di quel periodo, Born e Bohr. In questa storia ebbero un ruolo importante anche Max Born e molti suoi studenti e assistenti; in realtà, nella storia completa dell'invenzione della meccanica quantistica è coinvolta almeno una mezza dozzina di teorici, che avevano contatti frequenti.

Heisenberg basò il suo lavoro su un'idea particolare della fisica, un'idea in primo luogo antirealistica: sosteneva che la fisica non fornisce una descrizione di ciò che esiste, come suppongono i realisti, ma è soltanto un modo per tenere traccia di ciò che è osservabile. Nel caso di oggetti di grandi dimensioni, ci siamo abituati a confondere le due cose. Se però vogliamo interpretare la fisica atomica, dobbiamo attenerci rigorosamente all'affermazione che la scienza può fare riferimento solo a ciò che può essere osservato.

Heisenberg quindi afferma che non ha senso parlare di come si muove l'elettrone nell'atomo, a meno che quel movimento non abbia conseguenze che possono produrre effetti su dispositivi di misurazione di grandi dimensioni. Secondo il modello di Bohr, un elettrone atomico per la maggior parte del tempo si trova in stati stazionari e non ha interazioni con qualcosa di esterno all'atomo. È quindi privo di senso domandarsi come si muove l'elettrone mentre è in uno stato stazionario. L'atomo può interagire con il mondo esterno solo quando salta da uno stato stazionario a un altro, perché il salto è accompagnato dall'assorbimento o dalla creazione di un fotone e l'energia di quel fotone può essere misurata con uno spettrografo.

L'ammonimento di Heisenberg di non cercare di modellare le traiettorie degli elettroni in stati stazionari fu certamente accolto come una ventata d'aria fresca da altri fisici della sua generazione che dedicavano gran parte del tempo a tentativi frustranti e in definitiva infruttuosi di ottenere proprio quel modello.

Questo modo di pensare ispirò Heisenberg a inventare un nuovo modo di rappresentare l'energia dell'elettrone. Non con un solo numero, poiché sarebbe stato come sostenere che l'energia è una proprietà dell'atomo isolato. Ciò che conta per la fisica è soltanto l'aspetto dell'energia che produce effetti su un dispositivo di misurazione, quindi le energie dei fotoni assorbiti o emessi dagli atomi quando gli elettroni saltano da un livello di

energia a un altro. Sono le differenze tra le energie dei diversi stati stazionari.

Heisenberg organizzò queste differenze di energia in una tavola numerica. Immaginò poi che simili tavole potessero rappresentare aspetti osservabili di altre grandezze, come la posizione e la quantità di moto dell'elettrone. Per costruire una teoria non bastava, doveva trovare il modo di scrivere equazioni con queste tavole numeriche. Nelle equazioni della fisica ci ritroviamo spesso a sommare o moltiplicare numeri. Heisenberg aveva bisogno di operare nello stesso modo su tavole numeriche. Quindi dovette inventare le regole di questo tipo di calcolo.

Come membro sia dell'istituto di Bohr sia del gruppo di ricerca di Max Born, Heisenberg era sotto l'influenza di due maestri con uno stile di lavoro molto diverso e senza dubbio il contrasto tra i due stimolò il suo pensiero. Per sviluppare le sue idee nel dettaglio, tuttavia, aveva bisogno di isolamento, non meno di Einstein, de Broglie e Schrödinger. Come Schrödinger, si prese una vacanza, nel suo caso su un'isoletta chiamata Helgoland.

Una volta sbarcato, gli ci volle solo qualche giorno per intraprendere il percorso che ho appena delineato e inventare modi per scrivere e risolvere equazioni con le sue tavole di grandezze osservabili.

Mise alla prova le sue idee con un modello giocattolo dell'atomo, in cui l'elettrone è trattenuto da una forza di intensità crescente, come se fosse su una molla. Non intendeva essere un modello realistico, però era un test semplice, dato che la risposta era nota, e il metodo di Heisenberg la superò. L'unico problema era che aveva scoperto che l'ordine in cui moltiplicava due tavole aveva importanza. Nel linguaggio proposto nel capitolo II, le tavole numeriche di Heisenberg non commutano. Nel caso dei numeri ordinari, naturalmente, non è così e sulle prime questa scoperta lo sconcertò.

Ciò malgrado, presentò i suoi risultati in un articolo pubblicato alla fine del 1925. Nell'introduzione, annunciò il suo programma di costruire leggi della fisica che facessero a meno di modelli meccanici di descrizione delle traiettorie degli elettroni e facessero riferimento solo a relazioni tra grandezze osservabili, ossia gli spettri della luce emessa e assorbita dagli atomi.

Fu un passo molto importante, ma non era ancora la teoria completa. Heisenberg tornò a Gottinga e lavorò con Max Born e un suo brillante studente, Pascual Jordan. Born e Jordan, che erano già a metà strada per arrivare a una nuova teoria, gli spiegarono che le sue tavole numeriche erano

note ai matematici come matrici e riuscirono a rassicurarlo che il fatto che non commutavano era una loro caratteristica e non un suo errore. Heisenberg allora capì che, dato che le tavole o matrici rappresentano un processo di misurazione, l'ordine ha importanza – perché in quale ordine si effettuano le misurazioni è importante. Insieme, i tre teorici elaborarono il resto della nuova teoria, che chiamarono meccanica quantistica. In un articolo firmato da tutti e tre comparve la prima enunciazione completa della nuova teoria.

A ruota seguì il risultato ottenuto da un giovane e geniale fisico austriaco, Wolfgang Pauli, che applicò la nuova teoria per derivare lo spettro dell'atomo di idrogeno. Nacque così la meccanica quantistica attraverso un'altra strada, e in un modo direttamente ispirato ai principî antirealistici espressi da Heisenberg nel suo articolo del 1925. La nuova teoria di Born, Heisenberg e Jordan è espressa in funzione di grandezze che descrivono come reagisce un atomo a essere sondato da un dispositivo di misurazione; nessuna grandezza descrive le traiettorie esatte degli elettroni, indipendentemente dalle nostre interazioni con loro.

Disporre di una teoria quantistica dell'atomo era un'ottima cosa, ma averne due era un problema, in particolare perché entrambe riproducevano in modo corretto lo spettro dell'idrogeno. Le due teorie non avrebbero potuto essere più diverse, come le filosofie dei loro scopritori. Einstein, de Broglie e Schrödinger erano realisti. Pur riconoscendo l'esistenza di alcuni misteri, erano convinti che un elettrone fosse reale e in qualche modo esistesse sia come onda sia come particella. Bohr e Heisenberg, entusiasticamente antirealisti, credevano di non avere accesso alla realtà, ma soltanto a tavole numeriche che rappresentano le interazioni con l'atomo, ma non l'atomo direttamente.

La tensione durò qualche mese, poi si dissolse in modo inaspettato quando Schrödinger dimostrò la completa equivalenza delle due forme di meccanica quantistica. Come accade con due lingue diverse, si poteva parlare in termini di onde o utilizzare il linguaggio delle matrici, ma i problemi matematici che dovevano essere risolti risultavano essere soltanto espressioni diverse della stessa logica.

Heisenberg e Bohr, insieme a Copenaghen, condividendo una prospettiva antirealistica, cercavano di capire come parlare in modo coerente di proprietà inconoscibili simultaneamente, come posizione e quantità di

moto oppure natura ondulatoria e natura corpuscolare. La soluzione di Bohr degli apparenti paradossi era il suo principio di complementarità, quella di Heisenberg era il suo grande principio di incertezza, di cui abbiamo parlato nel capitolo II.

Il principio di incertezza è un principio molto generale, in quanto afferma che non possiamo conoscere esattamente allo stesso tempo dove si trova una particella e qual è la sua quantità di moto. Le sue conseguenze sono stupefacenti, come si resero conto immediatamente Heisenberg e il suo mentore Bohr. Una è che il determinismo della fisica newtoniana non può sopravvivere nel mondo quantistico, poiché per prevedere il movimento futuro di una particella dobbiamo conoscere sia la sua posizione attuale sia la rapidità e la direzione del suo movimento, quindi la sua quantità di moto. Se non possiamo conoscere tutto ciò in modo preciso, non possiamo prevedere dove si troverà la particella in istanti successivi. Di conseguenza, il meglio che possa fare la teoria quantistica è formulare previsioni probabilistiche.

La coerenza della complementarità dipende dal fatto che nessun caso ci obblighi a usare sia la rappresentazione ondulatoria sia quella corpuscolare nella descrizione di un dato esperimento. Che sia impossibile è garantito dal principio di incertezza, proposto da Heisenberg nel 1927, quando, dopo essere tornato a Copenaghen, era in stretto contatto con Bohr.

Gli storici ci dicono che la fortuna ha un ruolo importante nella scienza. Heisenberg fu doppiamente fortunato dato che, come protégé sia di Max Born sia di Niels Bohr, non era soltanto nel posto giusto al momento giusto, ma lo era due volte! Dal suo mentore Bohr fu ispirato ad abbandonare il realismo e a modellare l'atomo solo in funzione delle energie che scambia con i nostri dispositivi di misurazione e dal suo mentore Born ebbe gli strumenti matematici per esprimere quelle idee in modo preciso.

Naturalmente, Heisenberg era consapevole della sua fortuna e fu proprio lui a spingere per dare una forma precisa alla nuova teoria. Intorno a Bohr e a Born gravitavano altri giovani teorici, forse una mezza dozzina, che contribuirono ad alcune parti, come Pauli, o arrivarono a mezza strada, come Jordan, o erano in ritardo di qualche mese e quindi ebbero modo di dare una forma elegante alla nuova teoria, come il teorico inglese Paul Dirac. La storia completa dell'invenzione della forma matriciale della meccanica quantistica è molto più complessa di quanto io possa spiegare qui,

dato che riguarda uno sforzo collettivo molto dinamico di una variegata comunità di teorici, in stretta interazione.

Nel 1927, comunque, tutti gli studiosi di meccanica delle matrici, per quanto diversi, stavano elaborando la nuova teoria in termini della filosofia radicalmente antirealistica predicata da Bohr. Gli unici oppositori erano coloro che erano arrivati alla meccanica quantistica attraverso il dualismo onda-particella, cioè Einstein, de Broglie e Schrödinger, che restarono ostinatamente realisti. Appena si dimostrò che la meccanica ondulatoria di Schrödinger era equivalente alla meccanica delle matrici di Heisenberg, tuttavia, i realisti poterono essere respinti in quanto testardamente aggrappati a vecchie fantasie metafisiche, e ignorati.

L'essenza della filosofia di Bohr è la necessità di basare la scienza su descrizioni e linguaggi incompatibili. Heisenberg predicava una concezione che, pur essendo vagamente compatibile con quella di Bohr, ne differiva per ciò su cui poneva l'accento. Heisenberg sottolineava che la scienza si occupa soltanto di grandezze misurabili e non può fornire un quadro intuitivo di ciò che accade alle scale atomiche. Le grandezze osservabili rilevanti per interagire con un atomo comprendono le energie e i tempi di vita degli stati stazionari, ma non le posizioni o i movimenti degli elettroni in orbita intorno al nucleo. Pertanto la fisica quantistica deve rispondere a una domanda sulla posizione di un elettrone soltanto se la forziamo in un contesto in cui si misura quella posizione. Secondo Heisenberg, le grandezze osservabili sono generate soltanto dall'azione di misurarle. Quando un atomo non è esaminato da strumenti di misurazione, nessuna grandezza lo descrive.

Potremmo definirla una *prospettiva operazionalista*. È certamente antirealistica, dato che Heisenberg sottolineava che questa concezione è obbligatoria. A suo giudizio, non vi era nessuna possibilità di esplorare l'atomo più in profondità per discernere come si muovono gli elettroni nelle loro orbite. Il suo principio di incertezza lo escludeva.

Heisenberg spiegò che l'incertezza e la complementarità sono strettamente collegate.

Non è più possibile parlare del comportamento della particella, indipendentemente dal processo di osservazione. Questo ha come conseguenza che le leggi della natura, che noi formuliamo matematicamente nella

meccanica quantistica, non parlano piú delle particelle elementari in sé, ma della conoscenza che abbiamo di esse. Il problema se queste particelle «in sé» esistano nel tempo e nello spazio non può quindi piú essere posto in questa forma [...].

Se si può parlare di un'immagine della natura propria della scienza esatta del nostro tempo, non si tratta quindi piú propriamente di una immagine della natura, ma di *una immagine del nostro rapporto con la natura*. [...] La scienza non sta piú come spettatrice davanti alla natura, ma riconosce sé stessa come parte di quel mutuo interscambio tra uomo e natura. Il metodo scientifico che procede isolando, spiegando e ordinando i fenomeni diviene consapevole dei limiti che gli derivano dal fatto che il suo intervento modifica e trasforma il suo oggetto, dal fatto cioè che il metodo non può piú separarsi dall'oggetto. [...]

[...] le diverse immagini intuitive, con cui noi descriviamo sistemi atomici, sono sí adatte per certi esperimenti, ma si escludono reciprocamente. Così, per esempio, si può descrivere l'atomo di Bohr come un sistema planetario in piccolo: al centro un nucleo atomico attorno al quale ruotano gli elettroni. Per altri esperimenti, invece, può essere piú opportuno immaginare che il nucleo atomico sia circondato da un sistema di onde permanenti, dove la radiazione emessa dall'atomo dipende dalla frequenza delle onde. Infine si può anche considerare l'atomo come oggetto della chimica [...] Questi diversi modelli sono quindi giusti quando li si utilizzi al posto giusto, ma si contraddicono fra loro e si chiamano, perciò, reciprocamente complementari ⁴.

Il punto di vista di Bohr era ancora piú radicale:

[...] una realtà indipendente nel senso fisico ordinario non può venire ascritta né al fenomeno né allo strumento di osservazione.

[...] dobbiamo, in generale, essere preparati al fatto che una spiegazione completa di una stessa questione possa richiedere diversi punti di vista che non ammettono una descrizione unitaria. Infatti, strettamente parlando, l'analisi consapevole di un qualunque concetto si trova in relazione di esclusione con la sua applicazione immediata ⁵.

Altri luminari della fisica quantistica, come Wolfgang Pauli, un ragazzo prodigio che pubblicò un libro di testo sulla relatività generale all'età di ventun anni, e John von Neumann, un matematico ungherese che è famoso per le sue invenzioni in una gran varietà di campi, dall'architettura dei

computer alla matematica della teoria quantistica, insegnarono varianti di queste filosofie antirealistiche. Le loro concezioni mettevano in risalto punti diversi, ma qualsiasi loro pubblicazione venne classificata come facente parte dell'«interpretazione di Copenaghen» della meccanica quantistica. Questa denominazione era un riconoscimento della supremazia di Bohr – in quanto membro piú anziano del gruppo e mentore di molti di loro, oltre che creatore di niente di meno che un nuovo modo di parlare di scienza –, ma anche dell'istituto di Bohr, in quanto nodo centrale della rete dei fisici quantistici, dove tutti loro studiavano, lavoravano o si recavano in visita.

Una delle lezioni piú difficili da imparare nella vita accademica – e per me una delle piú sconcertanti – è la rapidità con cui una rivolta radicale può diventare l'ortodossia. Nell'arco di pochi anni, un successo iniziale porta alla cattedra una generazione di studenti che difendono una nuova idea pericolosa. Da queste posizioni influenti, essi formano una formidabile rete di mediatori del potere accademico che usano per garantire la continuazione della loro rivoluzione. Alla generazione dei rivoluzionari quantistici le cose andarono esattamente in questo modo. Nel 1920 Heisenberg era uno studente, cosí come Dirac, Pauli e Jordan. Nel 1925, erano giovani ricercatori che si dedicavano a tempo pieno all'invenzione della meccanica quantistica. Nel 1930, erano tutti professori ordinari e la rivoluzione era finita. Il fatto che restasse una manciata di disertori – Einstein e Schrödinger della generazione piú vecchia e de Broglie tra i loro coetanei – non sminuí affatto il loro trionfo, perché gli studenti sapevano da che parte spirava il vento e seguivano l'ortodossia dominante. Nei cinquant'anni successivi, l'antirealismo del gruppo dell'interpretazione di Copenaghen fu l'unica versione della teoria quantistica che venne insegnata.

- a. Per saperne di piú sull'appropriazione indebita dei metodi di Boltzmann da parte di Planck, si veda *Alle origini della fisica contemporanea. La teoria del corpo nero e la discontinuità quantica* di Thomas Kuhn, o la magnifica biografia di Paul Ehrenfest scritta da Martin Klein (entrambi i riferimenti sono elencati nelle *Lettere consigliate*, pp. 249 e 250).

- b. Sfortunatamente, tutto ciò avvenne troppo tardi per Boltzmann, il quale, depresso per non essere riuscito a convincere i colleghi della realtà degli atomi, si suicidò l'anno successivo. Come postilla alla postilla, aggiungo che un giovane studente di fisica viennese di nome Ludwig Wittgenstein fu talmente costernato dalla notizia del suicidio di Boltzmann da passare allo studio della filosofia.

Parte seconda
La rinascita del realismo

Capitolo settimo

La sfida del realismo: de Broglie e Einstein

Non è mai esistita un'unica interpretazione di Copenaghen. Bohr, Heisenberg e von Neumann raccontavano ognuno una storia un po' diversa. Sull'avvenuto superamento di una soglia da parte della scienza, però, erano tutti d'accordo. Sarebbe stato impossibile tornare a una versione realistica della fisica. Fornirono vari argomenti contro questa possibilità, che portavano tutti a concludere che la fisica quantistica era incompatibile con il realismo. Non potevano esistere versioni della fisica atomica che comprendessero elettroni con posizioni e traiettorie precise.

Tutti questi argomenti avrebbero potuto essere confutati, verrebbe da pensare, se qualcuno avesse proposto una teoria quantistica alternativa basata su idee realistiche.

Ciò che è davvero strano, ripensando al passato, è che in effetti una versione realistica della meccanica quantistica esisteva dal 1927. Questa versione si basa su un'idea di straordinaria semplicità. Forse vi è già venuta in mente. Consiste semplicemente nel presupporre che esistono *sia* le onde *sia* le particelle. La particella è ciò che viene creato e rilevato, ciò che viene contato. Nel frattempo, un'onda attraversa l'esperimento. L'onda *guida* la particella. Il risultato di questa guida è che la particella va dove l'onda è alta.

Di fronte alla scelta della parte da cui passare per aggirare un ostacolo, come nell'esperimento delle due fenditure, l'onda passa da entrambe le parti. La particella passa solo da una parte attraversando una sola fenditura, ma la traiettoria che segue dopo che è passata è guidata dall'onda e mostra l'influenza di entrambi i percorsi.

Quest'ovvia risposta alla sfida del dualismo onda-particella fu concepita da Louis de Broglie. La elaborò nei dettagli e la chiamò *teoria dell'onda pilota*. De Broglie la presentò a un famoso convegno che si tenne a Bruxelles nel 1927, il quinto congresso Solvay, chiamato così in onore del suo

sponsor, a cui partecipò la maggior parte dei rivoluzionari della nuova fisica quantistica.

Al centro della teoria dell'onda pilota vi era l'idea di de Broglie che in realtà l'elettrone consiste di due entità, una corpuscolare e una ondulatoria. La particella è sempre in una posizione particolare e segue sempre un percorso particolare. Nel frattempo, l'onda viaggia nello spazio, seguendo simultaneamente tutti i percorsi possibili durante l'esperimento. L'onda quindi indica alla particella dove deve andare e questa guida si baserà su alcune condizioni lungo tutti i percorsi. Anche se la particella deve prendere una via o un'altra, la scelta della via da prendere è influenzata dall'onda, che procede lungo tutte le vie.

Questa influenza di un'onda su una particella è la cosa nuova che è responsabile di gran parte di ciò che è strano nel mondo quantistico. Esistono due leggi, una per l'onda e una per la particella. La legge dell'onda è relativamente familiare; non è tanto diversa dalle leggi usate dai fisici per descrivere le onde sonore e le onde luminose. Le onde si diffondono e mentre viaggiano si diffrangono e interferiscono l'una con l'altra. Come l'acqua e il suono, queste onde quantistiche percorreranno tutti i canali disponibili. E quando onde provenienti da canali diversi si incontrano, interferiscono tra loro.

L'onda in questione è chiamata funzione d'onda e si propaga secondo la semplice equazione ideata da Schrödinger durante il suo romantico fine settimana in montagna. Questa è la Regola 1 ed è l'equazione fondamentale in tutti gli approcci alla fisica quantistica.

In questo contesto, non esiste una Regola 2. Esiste però una nuova legge, chiamata «equazione guida», che impone alla particella di seguire l'onda. Il sistema definito dalla funzione d'onda insieme alla particella si evolve deterministicamente, il che suggerisce che è completo.

In altri approcci alla meccanica quantistica, si presume semplicemente che la particella si troverà dove l'onda è ampia. Per essere più precisi, la probabilità di trovare la particella in una posizione particolare è proporzionale al quadrato della funzione d'onda in quel punto. Questa è ciò che in precedenza abbiamo chiamato regola di Born.

Anche nella teoria dell'onda pilota è più probabile che la particella si trovi dove l'onda è più alta. Ma non è un postulato. È invece una conseguenza della legge che porta la particella a seguire l'onda.

Se ponete una palla sul fianco di un pendio e la guardate rotolare giù, potrete osservare che la palla tende a seguire il percorso piú ripido verso il basso. È la cosiddetta legge della discesa piú ripida. Grosso modo, l'equazione guida di de Broglie fa il contrario, guidando la particella sul percorso piú ripido per «scalare» la funzione d'onda^a. Possiamo chiamarla legge della salita piú ripida. Un alpinista che la segue sceglierebbe in ogni momento della salita di procedere nella direzione del pendio piú ripido della montagna.

De Broglie riuscí a dimostrare che la legge di probabilità postulata da Max Born è una conseguenza del fatto che la particella segue il percorso di salita piú ripido. Per capire questo punto importante, immaginate di buttare un mucchio di particelle giù da un pendio che rappresenta la funzione d'onda. Da qualsiasi punto le gettiate, le particelle si disporranno rapidamente in modo tale che sarà piú probabile trovarle dove il quadrato della funzione d'onda è piú grande, il che riproduce la legge di Born.

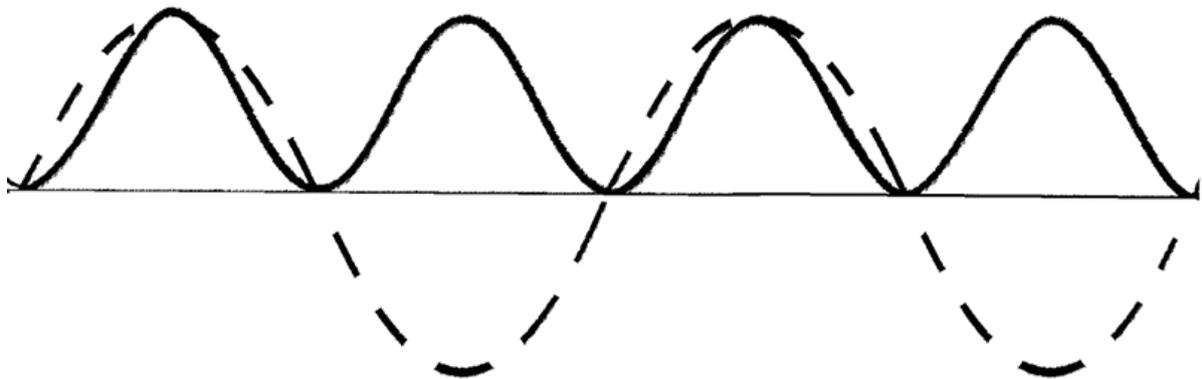


Figura 8.

Quadrato della funzione d'onda. La linea tratteggiata indica un'onda che viaggia verso destra lungo la linea orizzontale. Si noti che la quantità di tempo in cui assume valori negativi è uguale alla quantità di tempo in cui assume valori positivi. La linea continua è il quadrato dell'onda, che è sempre al di sopra dello zero.

La teoria dell'onda pilota prevede tutto ciò che è previsto dalla meccanica quantistica, ma spiega molto di piú. Il modo misterioso in cui l'ensemble sembra influenzare il singolo viene chiarito e spiegato in modo

semplice come influenza dell'onda sulla particella. Entrambe sono reali ed entrambe esistono per ogni singolo atomo. Tutto ciò che era sconcertante e misterioso nella meccanica quantistica risulta essere una conseguenza del fatto che quella teoria tralascia metà di ogni storia.

Nonostante ciò che affermano Bohr e Heisenberg, l'elettrone ha sempre una posizione e segue una traiettoria precisa, che è perfettamente prevedibile se si conosce la legge giusta. L'operazionalismo non è affatto necessario e non ha senso sprecare tempo per cercare di dare un senso alle oscure dichiarazioni di Bohr riguardo alla complementarità. Le onde e le particelle non si contraddicono; le une e le altre sono invece sempre presenti e contribuiscono a spiegare la fisica atomica. Ciò che è è e basta.

In uno scenario ucronico, tutti gli studenti più brillanti e ambiziosi si radunarono a Parigi negli anni Trenta per seguire de Broglie e scrissero libri di testo sulla teoria dell'onda pilota, mentre Bohr divenne una nota a piè di pagina, screditato a causa dell'oscurità della sua inutile filosofia. Non è andata così, ahimè. Ma perché trionfò la contorta filosofia della complementarità, mentre fu la teoria dell'onda pilota di de Broglie a diventare una nota a piè di pagina dimenticata, è una questione su cui riflettere.

La teoria dell'onda pilota in parte coincide con la meccanica quantistica, ma se ne differenzia in più punti. La Regola 1 è comune a entrambe. La teoria dell'onda pilota però differisce dalla meccanica quantistica perché non ha una Regola 2. Ha invece una legge che guida la particella. Le leggi della teoria dell'onda pilota sono deterministiche.

Senza una Regola 2, nella teoria dell'onda pilota lo stato quantistico non collassa mai. Questo fatto ha alcune strane conseguenze di cui i suoi sostenitori si resero conto solo dopo un po' di tempo e su cui torneremo nel capitolo seguente.

Al congresso Solvay le relazioni erano seguite da discussioni, che furono trascritte e pubblicate in un libro insieme alle relazioni. Non vi è molto che indichi che la presentazione di de Broglie fece cambiare idea a qualcuno, anche se fu discussa. Una persona che la capì e la commentò fu Einstein.

Anche se nella discussione trascritta non lo dice, Einstein aveva concepito egli stesso l'idea della teoria dell'onda pilota. Nel maggio 1927, aveva presentato all'Accademia prussiana delle scienze una versione piuttosto

complicata dell'idea dell'onda pilota. In seguito discusse l'idea per via epistolare con Heisenberg e altri e sottopose a una rivista un articolo basato su quella presentazione. Poco prima che l'articolo fosse pubblicato, però, Einstein lo ritirò^b. A quanto pare, si era reso conto che la sua versione della teoria dell'onda pilota aveva diversi problemi, alcuni dei quali le impedivano di riprodurre tutte le previsioni della meccanica quantistica. Per quanto ne sappiamo, non la citò mai più.

Al congresso Solvay era in programma che Einstein presentasse una relazione, probabilmente su quell'articolo. Si tirò indietro all'ultimo momento, scrivendo all'organizzatore del congresso: «Ho continuato a sperare di poter offrire un contributo di qualche valore a Bruxelles; ora ho abbandonato quella speranza [...] non avevo preso alla leggera questo compito, ma ho cercato con tutte le mie forze di realizzarlo»¹.

Ciò nonostante, Einstein partecipò al congresso e, naturalmente, contribuì alle discussioni sulla nuova teoria quantistica, tra cui le prime che si svolsero tra lui e Bohr, con Einstein che cercava di trovare contraddizioni nella nuova meccanica quantistica. Queste accese discussioni erano informali e purtroppo non vennero trascritte. Molto più tardi, però, Bohr pubblicò le sue reminiscenze di quelle discussioni, in un articolo che è una delle letture più avvincenti della storia della fisica e anche un capolavoro di propaganda accademica.

Durante gli intervalli per il pranzo e le pause del congresso, Einstein illustrò a Bohr diversi argomenti a sostegno dell'incoerenza della meccanica quantistica. Presumeva che per fornire una descrizione completa sarebbero state necessarie altre variabili, che nella descrizione della meccanica quantistica sono nascoste. Bohr non cita il fatto che questo era il risultato ottenuto da de Broglie con la sua teoria dell'onda pilota. Al contrario, ricorda che, dopo una notte insonne, riuscì a confutare l'obiezione di Einstein, senza minare la propria concezione riguardo alla coerenza e persino all'inevitabilità della complementarità.

Einstein reagì positivamente durante la discussione dell'intervento di de Broglie. Dopo aver descritto un'obiezione alla versione di Copenaghen, disse:

Secondo me, si può eliminare questa obiezione solo in un modo, vale a dire non descrivendo questo processo soltanto per mezzo dell'onda di

Schrödinger, ma localizzando allo stesso tempo la particella durante la propagazione. Credo che il signor de Broglie abbia ragione a cercare in questa direzione ².

Negli anni successivi, la teoria di de Broglie fu citata da pochi fisici quantistici. Benché de Broglie fosse giustamente ammirato per la sua intuizione di estendere il dualismo onda-particella alla materia, e avesse presentato la teoria dell'onda pilota al più importante congresso sulla fisica quantistica, di fronte a quasi tutte le figure importanti nel settore della fisica atomica, era come se de Broglie non avesse mai pubblicato o presentato la sua teoria. Per quanto ne so, per decenni nessun libro di testo la citò. Non è che alcuni libri di testo si basassero sull'interpretazione di Copenaghen e altri sulla teoria dell'onda pilota. Esistevano soltanto libri di testo basati sull'interpretazione di Copenaghen, che ignoravano i problemi fondamentali della teoria o affermavano con certezza che tutte le questioni importanti erano già state risolte da Bohr e Heisenberg.

Un motivo importante del trionfo dell'antirealismo fu una dimostrazione del matematico John von Neumann, pubblicata qualche anno dopo il congresso Solvay in un libro sulla struttura matematica della meccanica quantistica, che a suo dire indicava l'impossibilità di un'alternativa coerente alla meccanica quantistica. Era una tesi necessariamente sbagliata, infatti implicava che la teoria dell'onda pilota di de Broglie fosse incoerente, il che era falso. Probabilmente pensate che qualcuno lo fece notare.

A quanto pare, la dimostrazione sbagliata di von Neumann fu uno di quei casi che si verificano fin troppo spesso nella storia della scienza in cui un risultato sbagliato esercita una grande influenza. Von Neumann aveva una reputazione formidabile e davanti al suo teorema l'opposizione alla tesi che la meccanica quantistica fosse la teoria più completa venne meno. In particolare, de Broglie stesso capitolò di fronte alle critiche di von Neumann e di altri teorici, tra cui Wolfgang Pauli.

Non è del tutto vero che nessuno si accorse dell'errore contenuto nel teorema di von Neumann. Una giovane matematica di nome Grete Hermann si interessò alla meccanica quantistica e naturalmente decise di studiare il libro di von Neumann. Hermann, un'ottima matematica per i suoi propri meriti, era una dottoranda di Emmy Noether ^c e tra i suoi successi si trovano molti risultati che precedettero lo studio moderno degli algorit-

mi nell'informatica. Nutriva anche un profondo interesse per la filosofia e si preoccupava delle implicazioni della meccanica quantistica per la filosofia neokantiana allora popolare nel mondo accademico germanofono.

Grete Hermann notò subito un errore nella dimostrazione del teorema sull'impossibilità delle variabili nascoste nel libro di von Neumann. Uno degli assunti del teorema era equivalente alla struttura fondamentale della meccanica quantistica, quindi tutto ciò che il teorema dimostrava era che qualunque teoria equivalente alla meccanica quantistica si sarebbe rivelata equivalente alla meccanica quantistica.

Purtroppo, l'articolo che scrisse per rivelare l'errore nella dimostrazione di von Neumann non produsse alcun effetto³. Forse in parte fu perché lo pubblicò su una rivista sconosciuta, ma è difficile evitare di pensare che non fu presa sul serio come avrebbe potuto perché era una donna e perché il suo articolo distruggeva uno degli argomenti principali usati per stabilire l'inevitabilità della meccanica quantistica.

Passarono due lunghi decenni prima che qualcun altro si rendesse conto che la dimostrazione di von Neumann era necessariamente sbagliata, essendo incompatibile con la palese esistenza della teoria dell'onda pilota. Ad accorgersene fu David Bohm, che sarà il protagonista del capitolo seguente. Dieci anni dopo, John Bell isolò l'errore come assunto erroneo. Ecco come ne parlò:

[L]a dimostrazione di von Neumann, se la affrontate veramente, vi si sbriciola tra le mani! Non significa *nulla*. Non è soltanto sbagliata, è *stupida* [...] Se traduciamo [i suoi assunti] in termini di proprietà fisiche, risultano assurdi. Potete citare questa affermazione come mia: la dimostrazione di von Neumann non solo è falsa, è *ridicola!*⁴.

David Mermin, in una lucida rassegna di vari teoremi di impossibilità, si rammaricava del fatto che «molte generazioni di dottorandi che avrebbero potuto essere tentati di cercare di costruire teorie a variabili nascoste furono indotte a sottomettersi dall'affermazione che von Neumann [...] aveva dimostrato che non si poteva fare» e si domandava «se la dimostrazione fosse mai stata studiata dagli studenti o da quanti a essa facevano appello per salvarli da avventure speculative»⁵.

Considerando il passato dal nostro punto di osservazione, oggi che prosperano varie visioni contrastanti di come interpretare la teoria quantistica, è difficile rendersi conto dello stato d'animo delle prime generazioni di fisici quantistici. Dopo la nascita della meccanica quantistica nel 1925, nonostante il persistente e forte dissenso espresso da Einstein, de Broglie e Schrödinger, quanto meno per i primi cinquant'anni la filosofia antirealistica promossa da Bohr dominò tutte le discussioni sulla teoria quantistica.

Durante tutto quel periodo, se qualcuno prospettava la possibilità di una versione realistica della meccanica quantistica, la risposta era sempre, così mi hanno detto, una buona dose di discorsi nello stile di Copenaghen, che, se proprio non bastava a convincerlo, veniva coronata dalle parole: «von Neumann ha dimostrato che non esiste alternativa». L'articolo di Grete Hermann aveva dimostrato che no, von Neumann non aveva dimostrato proprio nulla. Si può immaginare che se fosse stato letto la situazione almeno in parte sarebbe cambiata. Ma le cose andarono diversamente.

- a. È una grossa semplificazione. La particella segue una parte della funzione d'onda, chiamata fase.
- b. Durante un discorso al mio matrimonio, Antony Valentini mi ha dato una copia di quell'articolo di Einstein, che ho immediatamente perso.
- c. Noether è stata una delle più grandi figure della matematica del Novecento; tra le sue numerose scoperte si trova un fondamentale teorema sulla simmetria nella fisica, su cui torneremo.

Capitolo ottavo

Bohm: il realismo ci riprova

Nel 1952, David Bohm risolse il piú grande di tutti i problemi della meccanica quantistica, il problema di fornire una spiegazione della meccanica quantistica [...]. Disgraziatamente, in generale è molto poco compreso. La soluzione di Bohm porta a qualcosa che spesso (prima del 1952 e persino dopo) è stato dichiarato impossibile: spiegare le regole della meccanica quantistica per mezzo di una descrizione coerente della realtà microscopica.

RODERICH TUMULKA ^I.

Nel 1930 de Broglie ormai si era arreso. Da quel momento in poi, l'interpretazione antirealistica di Copenaghen dominò l'insegnamento e l'applicazione della meccanica quantistica, oltre a gran parte delle discussioni sulle implicazioni della nuova teoria. Le uniche eccezioni di rilievo erano Einstein e Schrödinger, che continuavano a sfidare la scuola di Copenaghen e a insistere sulla necessità di una formulazione realistica della meccanica quantistica. Il loro dissenso ebbe però uno scarso impatto.

Questa era la situazione nei primi anni Cinquanta, quando il giovane teorico americano David Bohm si propose di scrivere un libro di testo sulla meccanica quantistica. Bohm era un personaggio interessante destinato ad avere una vita interessante. In quel periodo era professore assistente di fisica a Princeton, specializzato in fisica del plasma. Era arrivato a Princeton da Berkeley, dove era stato uno studente di Robert Oppenheimer. Come molti della cerchia di Oppenheimer, era stato un simpatizzante comunista e per un breve periodo prima della guerra membro del Partito comunista. Di conseguenza, l'esercito degli Stati Uniti aveva rifiutato la richiesta di Oppenheimer di portare con sé Bohm a lavorare alla bomba atomica a Los Alamos.

Nulla dimostra che Bohm sia mai stato una spia o un agente sovietico, ma, come altre persone integerrime, quando fu chiamato a testimoniare davanti alla Commissione per le attività antiamericane nel 1950, si appellò al Quinto Emendamento, evitando così di denunciare altri. Fu arrestato e accusato di oltraggio al Congresso, ma poi fu prosciolto. Princeton, vergognosamente, sospese e poi rifiutò di rinnovare il suo incarico.

Einstein propose di assumerlo all'Institute for Advanced Study, ma non riuscì a superare l'opposizione dei suoi amministratori. Proprio in quel momento, quando Bohm si ritrovò disoccupato e con poche probabilità di trovare un lavoro negli Stati Uniti, il suo libro di testo fu pubblicato e accolto con grandi lodi.

Non sono mancati i libri di testo sulla meccanica quantistica dopo la pubblicazione del primo da parte di Paul Dirac, uno degli inventori della teoria, nel 1930. Quello di Bohm è uno dei migliori. Nonostante i dubbi che nutriva da anni, quando discuteva dei problemi interpretativi Bohm si atteneva rigorosamente all'ortodossia di Copenaghen. Una sezione del libro era intitolata *Prova che la teoria quantistica è incompatibile con le variabili nascoste* e un'altra aveva come argomento l'«inverosimiglianza di leggi completamente deterministiche a un livello più profondo».

Einstein lo convocò. Gli espresse ammirazione per la lucidità della sua difesa della concezione di Copenaghen, ma gli chiese di dargli la possibilità di spiegare il proprio punto di vista e, forse, di fargli cambiare idea.

A quanto pare, ci riuscì. Dopo aver parlato con Einstein, Bohm iniziò a riflettere sulla possibilità che esistesse una teoria più profonda, che fosse realistica e deterministica. Forse fu il fascino del realismo per un materialista marxista, forse la chiarezza del pensiero di Einstein, ma di lì a poco Bohm elaborò un completamento realistico della meccanica quantistica. In sostanza, reinventò la dimenticata teoria dell'onda pilota di de Broglie.

Esiste una differenza, va detto, tra la teoria di de Broglie e quella di Bohm, dato che Bohm scelse una legge diversa come equazione guida, l'equazione che determina come l'onda guida la particella. Come ho spiegato in precedenza, l'equazione guida di de Broglie fa prendere alla particella il percorso di salita più ripido. Ciò determina la rapidità e la direzione del moto della particella.

Nella teoria di Bohm, la legge che guida la particella è una versione della legge del moto di Newton: descrive come accelera una particella in rispo-

sta all'azione di una forza. La novità è che vi è una forza che guida la particella a spostarsi dove la funzione d'onda è più alta. Inoltre Bohm deve presumere che sia soddisfatta un'altra condizione, ossia che nel momento iniziale le velocità delle particelle siano quelle date dall'equazione guida di de Broglie.

A parte questa differenza, la teoria di de Broglie e quella di Bohm sono due versioni della stessa idea, cioè che la funzione d'onda e le particelle sono reali, con le onde che guidano le particelle. Nelle presentazioni originarie sono equivalenti in quanto prevedono le stesse traiettorie per le particelle. Di conseguenza, entrambe le teorie prevedono che se inizialmente un ensemble di particelle è distribuito secondo la regola di Born, la regola continuerà a essere soddisfatta quando la funzione d'onda cambia e le particelle si spostano.

In poco tempo, Bohm scrisse due articoli di presentazione della sua nuova teoria². Li sottopose per la pubblicazione alla più prestigiosa rivista dell'epoca, la «Physical Review», e ne mandò le bozze a diverse persone, tra cui de Broglie, che pubblicò subito un breve articolo spiegando perché la teoria di Bohm, come la propria proposta precedente, era sbagliata.

Bohm aggiunse una frase molto interessante al suo manoscritto: «Dopo il completamento di questo articolo, l'attenzione dell'autore è stata richiamata su proposte simili di un'interpretazione alternativa della teoria quantistica presentate da de Broglie nel 1926, ma in seguito da lui ritirate».

Con queste parole, Bohm intende certamente dichiarare di non essere stato a conoscenza della teoria dell'onda pilota di de Broglie quando aveva inventato la propria versione. È una dichiarazione un po' scioccante, dato che de Broglie era un premio Nobel di fama mondiale, universalmente riconosciuto per aver proposto che gli elettroni e le altre particelle sono onde, eppure è scritta di suo pugno.

Bohm inoltre dedicò una sezione del suo secondo articolo a spiegare perché il teorema di von Neumann non si applica alla teoria proposta.

Il primo articolo di Bohm sulla teoria dell'onda pilota uscì nel gennaio 1952. All'epoca era titolare di una cattedra a San Paolo, in Brasile. Da quel luogo remoto, solo e pieno di disturbi dovuti al cibo locale, aspettò che le reazioni ai suoi articoli rivoluzionari gli arrivassero via mare per lettera.

Una persona dalla quale Bohm avrebbe potuto sperare di ricevere sostegno era Einstein. Il grande saggio, dopo tutto, aveva lodato la teoria dell'onda pilota quando era stata presentata per la prima volta da de Broglie. A quanto pare, però, quando Bohm pubblicò i suoi due articoli, venticinque anni dopo, Einstein aveva cambiato idea.

Einstein descrisse la propria reazione in una lettera a Max Born: «Hai notato che Bohm crede (come credeva de Broglie, venticinque anni fa) di essere in grado di interpretare la teoria quantistica in termini deterministici? Così mi pare troppo facile»³. Più avanti, aggiunge: «Questa via mi sembra troppo semplice.» È una «favoletta fisica, che ha indotto in errore Bohm e de Broglie»⁴.

Einstein spiegò il concetto in un articolo in onore di Max Born, ponendo un'obiezione. La teoria di Bohm prevede il moto della particella e una delle conseguenze è che, in uno stato stazionario di un atomo, prevede che un elettrone stia semplicemente fermo. Come spiegò Einstein, «la scomparsa della velocità non soddisfa il fondato requisito che nel caso di un macrosistema il moto dovrebbe coincidere approssimativamente con il moto previsto dalla meccanica classica»⁵. Ma non è così, perché secondo la meccanica classica l'elettrone dovrebbe orbitare intorno al nucleo e non dovrebbe stare fermo.

Avrebbe dovuto essere immediatamente evidente che l'obiezione di Einstein era sbagliata, perché gli atomi non sono «macrosistemi». Ciò nonostante, l'obiezione di Einstein mette in luce quanto sono diverse le particelle della teoria dell'onda pilota da quelle della fisica newtoniana. Come ho già sottolineato, de Broglie aveva capito sin dall'inizio che le sue particelle si muovevano in modi che violavano principi fondamentali della fisica newtoniana come il principio di inerzia e la conservazione della quantità di moto. Era necessario affinché i quanti di luce potessero piegare le proprie traiettorie per diffrangersi intorno agli ostacoli. Le equazioni guida di de Broglie e di Bohm fornivano traiettorie che si diffrangevano e si rifrangevano, ma c'era un prezzo da pagare, costituito dalle evidenti violazioni dei principi fondamentali. Anche le particelle che stavano ferme in un atomo, e non avevano bisogno di orbitare per non cadere sul nucleo, contraddicevano questi principi. Per Einstein, a quanto pare, il prezzo era troppo alto.

L'avversione di Einstein per la teoria dell'onda pilota non gli impedí di scrivere a Bohm per manifestargli la sua comprensione quando venne a sapere da un amico comune della sua «sensazione di angoscia per essere escluso e accerchiato allo stesso tempo. A colpirmi di piú è stata l'instabilità del vostro stomaco, una questione di cui ho io stesso un'ampia esperienza»⁶.

In verità, le altre risposte che Bohm ricevette o di cui sentí parlare probabilmente non aiutarono molto la sua digestione.

Heisenberg rispose che dal suo punto di vista operativo le traiettorie delle particelle nella teoria di Bohm costituivano una «sovrastuttura ideologica» estranea. Qualunque alternativa alla meccanica quantistica poteva avere solo due destini: o la nuova teoria formulava previsioni in disaccordo con quelle della meccanica quantistica, nel qual caso era quasi sicuramente sbagliata, oppure prevedeva gli stessi fenomeni, nel qual caso non aveva nulla di nuovo da offrire alla fisica. Heisenberg scrisse che «l'interpretazione di Bohm non può essere confutata per via sperimentale [...]. Dalla prospettiva fondamentale "positivistica" (forse sarebbe meglio dire "purementemente fisica"), siamo quindi interessati non a controproposte all'interpretazione di Copenaghen, ma alla sua esatta riproduzione in un linguaggio diverso»⁷.

Pauli pubblicò una critica simile, ma dopo aver studiato piú a fondo la questione ammise: «Non vedo piú la possibilità di qualche contraddizione logica a patto che i vostri risultati siano in accordo con quelli della meccanica ondulatoria ordinaria e a patto che non vi sia modo di misurare i valori dei vostri parametri nascosti»⁸.

In effetti, in alcune circostanze le previsioni della teoria dell'onda pilota non sono in accordo con quelle della meccanica quantistica, ma ci volle un po' di tempo prima che diventasse chiaro. Su questo punto torneremo tra poco.

Non tutti furono altrettanto gentili. Tornato a Princeton, Robert Oppenheimer evitò di leggere gli articoli di Bohm, giudicandoli uno spreco di tempo. Questo però non gli impedí di dichiarare che il lavoro di Bohm era frutto di «deviazionismo giovanile»⁹. Non sembra proprio il linguaggio che userebbe un marxista per condannarne un altro? L'ultimo commento di

Oppenheimer sull'argomento fu: «Se non possiamo confutare Bohm, dobbiamo convenire di ignorarlo»¹⁰.

Il matematico John Nash, oggi famoso per il suo teorema dell'equilibrio in economia, scrisse a Oppenheimer per lamentarsi degli atteggiamenti dogmatici che rilevava tra i fisici di Princeton, che trattavano chiunque «esprimesse qualsiasi tipo di atteggiamento dubbioso, o dichiarasse di credere in "parametri nascosti", come una persona stupida o tutt'al più molto ignorante». Ciò malgrado, Nash stava dalla parte dei perdenti, dato che confessò di voler «trovare una diversa e più soddisfacente descrizione fondamentale di una realtà non osservabile»¹¹.

Il completo rigetto del suo importante lavoro da parte di Oppenheimer, che era stato per lui un mentore e una figura paterna, senza dubbio lo ferì profondamente. Bohm era stato esiliato da Princeton, all'epoca il centro della fisica statunitense, per essersi ribellato nei confronti della filosofia di Copenaghen ed essersi al contempo rifiutato di arrendersi alla caccia alle streghe maccartista. Va ammirato il suo coraggio, senza dimenticare il prezzo che pagò. Bohm restò isolato in un luogo che doveva sembrargli in capo al mondo.

Gli amici di Bohm e il suo biografo suggeriscono che Oppenheimer aveva un buon motivo per prendere le distanze da qualcuno sospettato di essere comunista, essendo egli stesso in pericolo, sul punto di essere coinvolto nella stessa caccia alle streghe. A prescindere da questa considerazione, però, sarebbe ingenuo credere che, se non avesse subito la catastrofe politica e l'esilio e fosse rimasto a Princeton, Bohm sarebbe riuscito a suscitare più interesse nei confronti del suo sconvolgimento radicale della filosofia di Copenaghen.

In ogni caso, la risposta di Copenaghen sembrò altrettanto sprezzante. Secondo un resoconto del filosofo Paul Feyerabend, che visitò Copenaghen in quel periodo, Bohr restò almeno momentaneamente «sbalordito» dagli articoli di Bohm. Se è vero, tuttavia, non lo fu abbastanza da citarlo nei propri scritti né tanto meno da prendere carta e penna e rispondergli direttamente. Bohm ricevette invece una lettera da Léon Rosenfeld, un protégé di Bohr.

Ecco un esempio di prosa nello stile di Copenaghen, preso da quella lettera:

Non entrerò di certo in controversia con voi né con chiunque altro sull'argomento della complementarità, per la semplice ragione che non vi è al riguardo alcun punto minimamente controverso [...]. Non vi è nulla di vero nel vostro sospetto che ci siamo convinti della complementarità per una sorta di incantesimo magico. Sono incline a ribattere che è solo tra i vostri ammiratori parigini che noto segni inquietanti di una mentalità primitiva.

La difficoltà da voi citata di accostarsi alla complementarità è conseguenza dell'atteggiamento essenzialmente metafisico che viene inculcato nella maggior parte delle persone sin dall'infanzia dall'influenza dominante della religione o della filosofia idealistica nel settore dell'istruzione. Il rimedio per questa situazione non consiste di certo nell'evitare il problema, bensì nel liberarsi da questa metafisica e imparare a considerare le cose dialetticamente ¹².

Leggendo questa lettera tutto solo nel suo appartamento a San Paolo, Bohm deve essersi sentito «molto lontano dal Kansas», o, nel suo caso, dalla Pennsylvania.

Nonostante tutte le delusioni, nel periodo che trascorse in Brasile Bohm fu produttivo. Continuò a contribuire alla fisica del plasma mentre era concentrato sulla sua nuova teoria quantistica e iniziò una collaborazione con Jean-Pierre Vigier, uno studente e collega di de Broglie. In Brasile, però, non era felice e nel 1955 si trasferì in Israele, al Technion Institute, e qualche anno dopo in Inghilterra. Dopo un soggiorno a Bristol, terminò la sua odissea al Birkbeck College dell'Università di Londra, dove rimase per il resto dei suoi giorni.

A Londra, le sue simpatie per il comunismo si affievolirono; come molti altri che avevano concesso il beneficio del dubbio all'Unione Sovietica, restò scioccato quando il disgelo del potere sovietico sotto Nikita Chruščëv portò alla conferma che i gulag stalinisti erano stati feroci proprio come era stato riferito. In seguito il suo desiderio di una via verso la perfettibilità degli esseri umani si trasformò in misticismo e, dopo una breve immersione negli insegnamenti del mistico Gurdjieff, cadde sotto l'influenza del guru indiano Krishnamurti.

Nel frattempo, Bohm continuò la sua inarrestabile ricerca di un punto di vista più profondo sulla natura che lo portasse al di là della teoria quantistica. Questa ricerca lo portò a sviluppare una linea di pensiero molto ori-

ginale, apertamente speculativa e filosofica, che era collegata alla sua fisica ma al contempo la trascendeva. Scrisse diversi libri, grazie ai quali raggiunse un nuovo pubblico di artisti, filosofi e cercatori, mentre i suoi dialoghi con Krishnamurti divennero molto popolari in tutto il mondo.

Anche se le sue ricerche successive non vanno considerate per giudicare l'importanza del suo lavoro sulla teoria dell'onda pilota, sono convinto che sarebbe da irresponsabili e vigliacchi non cercare di ricapitolare il lavoro di tutta la vita di quest'uomo saggio, complesso e contraddittorio. Provo una sincera comprensione per David Bohm, che tanto si impegnò nella ricerca della trascendenza, prima per mezzo della visione marxista di una nuova psicologia umana derivante dal sogno di una società giusta ed equa e poi, quando quella fantasia risultò essere una crudele illusione, con il suo lavoro con i mistici^a. Da Oppenheimer e Krishnamurti, qualche punto debole di Bohm lo rese influenzabile da quel genere di figura dominante ed estremamente sicura di sé.

Tuttavia, per quanto Bohm sia criticabile per ciò che a posteriori sembra un ingenuo e insipiente allontanamento dal buon senso, i suoi anni di serio e risoluto impegno nella ricerca della scienza al di là dei quanti salvano il lavoro di tutta la sua vita e gli restituiscono integrità, serietà e prospettive future. Bohm era alla ricerca di una nuova forma trascendente di scienza, ispirata al contempo ai filoni più seri di ciò che è meglio chiamare pensiero religioso e ai problemi più intricati della fisica teorica. È un dominio che pochi fisici eminenti hanno esplorato; forse David Finkelstein è l'unico che si può citare. È facile dire che Bohm fallì, e che i risultati di gran lunga più importanti che ottenne furono i suoi primi contributi alla fisica quantistica. Allo stesso tempo, è vero che esplorò una via verso la quale pochi di noi hanno avuto il coraggio o la lungimiranza di fare un primo passo, nonostante il fatto ovvio che i più grandi pericoli che la nostra specie si trova ad affrontare possono essere collegati alla totale mancanza di coerenza della cultura umana, che ha le sue radici nell'incommensurabilità delle interpretazioni scientifiche e spirituali del mondo.

Alla luce di ciò che abbiamo imparato da Bohm, riassumiamo la questione. La teoria dell'onda pilota spiega tutto ciò che spiega la meccanica

quantistica ordinaria, senza l'impaccio della Regola 2. La funzione d'onda si evolve sempre secondo la Regola 1, quindi non salta e non collassa mai. La novità è che qui una particella si muove secondo una propria legge, guidata dalla funzione d'onda. Insieme, le due leggi forniscono una descrizione completamente realistica dei fenomeni quantistici.

In aggiunta, la teoria dell'onda pilota spiega ciò che la meccanica quantistica non spiega. Fornisce una descrizione completa di ciò che accade in ogni singolo processo. Spiega come e perché si muovono gli elettroni. Spiega che l'origine delle incertezze e delle probabilità è la nostra ignoranza riguardo alle posizioni di partenza delle particelle. E risolve il problema della misurazione perché non è necessario distinguere gli esperimenti da altri processi.

Nel secondo articolo sulla nuova teoria che scrisse nel 1952, Bohm studiò nei dettagli il processo di misurazione e mostrò che, nel caso di un atomo che interagisce con un rivelatore impostato per misurare qualche sua proprietà, il rivelatore finisce per essere correlato con l'atomo, per quanto riguarda dove si trovano le particelle e le funzioni d'onda. Pertanto le misurazioni funzionano nel modo corretto per entrambi gli aspetti della doppia ontologia.

Da un punto di vista realistico, la teoria dell'onda pilota è di gran lunga superiore all'interpretazione di Copenaghen. Per il solo fatto di esistere, la teoria confuta l'argomento di Bohr e Heisenberg secondo cui è impossibile ottenere una descrizione realistica della fisica quantistica. Si sarebbe potuto pensare che la comunità dei fisici si sarebbe affrettata a adottare la teoria dell'onda pilota, quando de Broglie la presentò per la prima volta al congresso Solvay nel 1927, oppure nel 1952, quando Bohm la ripropose. È chiaramente ciò che si aspettava Bohm, e anche noi possiamo condividere il disappunto che provò mentre era in attesa di risposte a San Paolo.

Alcuni storici hanno suggerito che l'adozione dell'antirealismo da parte della comunità dei fisici europei negli anni Venti era in linea con un più ampio movimento culturale che abbracciò l'irrazionalismo in risposta ai massacri nelle trincee che la loro generazione aveva subito di recente, ma ciò non spiega l'analogo rifiuto della teoria dell'onda pilota da parte della comunità dei fisici negli anni Cinquanta, che da poco tempo aveva finito per essere dominata dal trionfante, opportunistico e pragmatico spirito americano.

Un'altra ragione potrebbe essere il potere delle scuole di ricerca guidate da leader carismatici, in particolare da Niels Bohr, che ispirò e fu il mentore dei rivoluzionari quantistici giunti da ogni parte d'Europa e degli Stati Uniti per lavorare con lui. De Broglie, per contro, in tutta la sua lunga vita ebbe solo pochi studenti, che per quanto ne so erano tutti francesi. Il suo piccolo gruppo di accoliti era isolato persino nell'ambito della comunità dei fisici francesi.

Bohm ispirò lo sviluppo di una comunità di teorici in Brasile, il che non viene apprezzato al di fuori di quel paese. Dopo il Brasile, in Israele e a Londra, ebbe qualche studente in gamba, uno dei quali, Yakir Aharonov, divenne un teorico di primo piano con le proprie idee e i propri programmi, molto diversi da quelli di Bohm. Una manciata di studenti di Bohm si specializzò nello studio dei fondamenti della fisica quantistica, ma tutti indagarono idee diverse e non formarono una scuola di pensiero bohmiiana coerente. In più, non fu certamente d'aiuto il fatto che, quando si trasferì a Londra e fu di nuovo in una posizione da cui poteva esercitare influenza, gran parte della sua attenzione ormai era rivolta al misticismo.

Ciò nonostante, nel corso degli anni l'interesse per la teoria dell'onda pilota crebbe, lentamente ma in modo costante, perché fu ripresa e sviluppata da un piccolo numero di bravi ricercatori di tutto il mondo. Negli anni Novanta, la cosiddetta «meccanica bohmiiana» costituiva ormai una sottocultura piccola ma distinta e visibile della comunità di scienziati, matematici e filosofi che si dedicavano agli enigmi dei fondamenti quantistici.

Grazie al lavoro di questi «bohmiiani», si sono poste e risolte alcune questioni sottili riguardanti la teoria dell'onda pilota. Una delle più difficili è l'origine delle probabilità nella teoria dell'onda pilota. La teoria è deterministica. Data una funzione d'onda in un certo istante, possiamo usare la Regola 1 per determinare la funzione d'onda in un qualsiasi istante futuro. Anche l'equazione che descrive il modo in cui la funzione d'onda guida la particella è deterministica e, se specifichiamo dove si trova la particella in un istante iniziale, l'equazione ci indicherà esattamente come si muove la particella da quel momento in poi. Ciascuna particella ha una traiettoria ben precisa.

Da dove arrivano le probabilità, allora? Le probabilità entrano in gioco per la stessa ragione per cui possono farlo nella fisica newtoniana: a causa

della nostra ignoranza riguardo alle posizioni esatte delle particelle. Poiché non possiamo conoscere la posizione di partenza della particella, non sappiamo con certezza dove si troverà in futuro. Nella teoria dell'onda pilota le probabilità esprimono la nostra ignoranza delle posizioni iniziali delle particelle.

Per capire le probabilità nella teoria dell'onda pilota dobbiamo immaginare una collezione di sistemi con la stessa funzione d'onda, ma con diverse posizioni iniziali delle particelle. All'inizio le particelle sono distribuite secondo una funzione densità di probabilità, che ci dice quanto sono comuni nella collezione le diverse posizioni iniziali.

Siamo liberi di scegliere le posizioni iniziali delle particelle, di prendere la funzione densità di probabilità che vogliamo. Facciamo evolvere il sistema nel tempo, usando la Regola 1 per far evolvere la funzione d'onda e la legge guida per far muovere le particelle. Di conseguenza, anche la funzione densità di probabilità cambia nel tempo, rispecchiando il movimento delle particelle.

Nella meccanica quantistica, come abbiamo già visto, le probabilità di trovare le particelle in punti diversi sono date in base alla regola di Born dal quadrato della funzione d'onda. Nella meccanica quantistica è un postulato, fa parte della Regola 2. Nella teoria dell'onda pilota le particelle hanno una loro realtà e noi siamo liberi di scegliere la funzione densità di probabilità iniziale. Una scelta che possiamo fare è che questa funzione sia data dalla regola di Born, proprio come nella meccanica quantistica. A tal fine, distribuiamo le particelle in modo che quanto maggiore è il quadrato della funzione d'onda tanto maggiore è il numero delle particelle della collezione che si trovano lì.

Questa scelta, una volta fatta, si mantiene nel tempo: le particelle si muovono e la funzione d'onda cambia nel tempo, ma resta vero che il quadrato della funzione d'onda dà la probabilità di trovare una particella.

Nella formulazione di de Broglie, però, vi è di più. Supponiamo di far partire la collezione con una diversa densità di probabilità delle particelle, una che non sia data dal quadrato della funzione d'onda. Il sistema in questo caso si evolverà in modo da far coincidere la densità di probabilità effettiva con quella data dal quadrato della funzione d'onda, come ha dimo-

strato un importante risultato di Antony Valentini¹³, che in seguito è stato confermato da numerose simulazioni¹⁴.

Si può vedere un'analogia con il funzionamento della termodinamica. Quando un sistema di molte particelle è in equilibrio con l'ambiente, l'entropia è massima. Ciò è dovuto al fatto che l'entropia è una misura del disordine, che in generale cresce nel tempo. Se si fa iniziare il sistema in una configurazione diversa, più ordinata dell'equilibrio, molto probabilmente il disordine aumenterà finché il sistema non sarà in equilibrio.

Il caso della teoria dell'onda pilota di de Broglie è molto simile. Possiamo dire che un sistema quantistico è fuori dall'*equilibrio quantistico* se la distribuzione di probabilità delle posizioni in cui si può trovare la particella è diversa da quella data dal quadrato della sua funzione d'onda. Quando coincidono, il sistema è in equilibrio quantistico. Il teorema di Valentini ci dice che un sistema quantistico fuori dall'equilibrio quantistico molto probabilmente si evolve fino a raggiungere lo stato di equilibrio quantistico.

Una volta che il sistema è in equilibrio, le previsioni della teoria dell'onda pilota coincidono con quelle della meccanica quantistica tradizionale. Quindi è necessario portare in qualche modo un sistema fuori dall'equilibrio quantistico per creare una situazione in cui un esperimento possa distinguere la teoria dell'onda pilota dalla meccanica quantistica.

La fisica fuori dall'equilibrio quantistico riserva parecchie sorprese. Una è che diventa possibile inviare informazioni a una velocità superiore a quella della luce. Questa è una conseguenza di un altro risultato di Valentini, ossia che, mentre il sistema è fuori dall'equilibrio quantistico, le informazioni e l'energia possono essere inviate istantaneamente, in contraddizione con la relatività ristretta¹⁵. Com'è ovvio, se ciò venisse confermato sperimentalmente sarebbe di primaria importanza per la nostra comprensione della natura e forse anche per le tecnologie sognate dagli scrittori di fantascienza. Questo è uno dei modi in cui un esperimento potrebbe distinguere in maniera molto spettacolare la teoria dell'onda pilota dalla meccanica quantistica tradizionale. Sono stati realizzati alcuni tentativi di spingere sistemi quantistici fuori dall'equilibrio quantistico e di verificare queste previsioni, che però finora non sono riusciti né a scoprire un non equilibrio quantistico né a scartare la teoria dell'onda pilota.

Un posto dove andare a cercare la condizione di non equilibrio quantistico è l'universo primordiale. Valentini e i suoi collaboratori hanno ipotizzato che l'universo sia iniziato nel Big Bang fuori dall'equilibrio e che si sia equilibrato via via che si espandeva. Questo potrebbe aver lasciato tracce nel fondo cosmico a microonde, che oggi vengono cercate, ma di cui non si hanno ancora prove chiare¹⁶.

Torniamo all'esperimento del gatto di Schrödinger e vediamo come lo risolve la teoria dell'onda pilota.

La teoria dell'onda pilota afferma che la meccanica quantistica si applica universalmente. Esiste soltanto la Regola 1, che si applica a tutti i casi. Ciò significa che le misurazioni non sono diverse da altri processi.

Tutto – gli atomi, i fotoni, i contatori Geiger, i gatti e le persone – ha un'esistenza duale, come onda e come particella. Entrambi gli aspetti di questa esistenza duale sono complessi nel caso di oggetti grandi e complicati come i contatori Geiger o i gatti, che sono costituiti da molte particelle. Abbiamo bisogno di una parola per parlare di tutti i modi in cui le particelle che costituiscono un gatto possono essere disposte nello spazio e ne abbiamo una: la *configurazione* degli atomi. Se parliamo di dove si trovano gli uni rispetto agli altri tutti gli atomi di cui è composto il gatto, stiamo descrivendo la configurazione del gatto. Poiché gli atomi sono molto numerosi, per descrivere la configurazione del gatto è necessaria una gran quantità di informazioni.

Tutte queste informazioni devono essere codificate in un elenco di numeri. Quanti numeri ci vogliono per descrivere un gatto? Per un solo atomo sono necessari tre numeri, che indicano la posizione dell'atomo nello spazio tridimensionale. Per indicare la posizione degli atomi di un gatto sono perciò necessari tre numeri per ciascun atomo. Molto approssimativamente, un gatto è composto da 10^{25} atomi, quindi per descrivere la sua configurazione ci vogliono 3×10^{25} numeri.

L'aspetto importante della teoria dell'onda pilota è che gli atomi sono tutti reali e ciascuno di essi ha una posizione precisa nello spazio. Ciascun atomo ha una posizione, che è un punto nello spazio. Ciascun gatto ha una configurazione, il che equivale a dire che ciascuno dei suoi atomi ha una posizione precisa nello spazio.

Un atomo ha anche un'onda, che si propaga nello spazio tridimensionale. Anche ciascun gatto ha un'onda associata. La cosa strana è dove si trova quell'onda. Non sta nello spazio tridimensionale, ma in uno spazio a molte dimensioni, chiamato spazio delle configurazioni (fig. 9). Ciascun punto di questo spazio corrisponde a una configurazione del gatto.

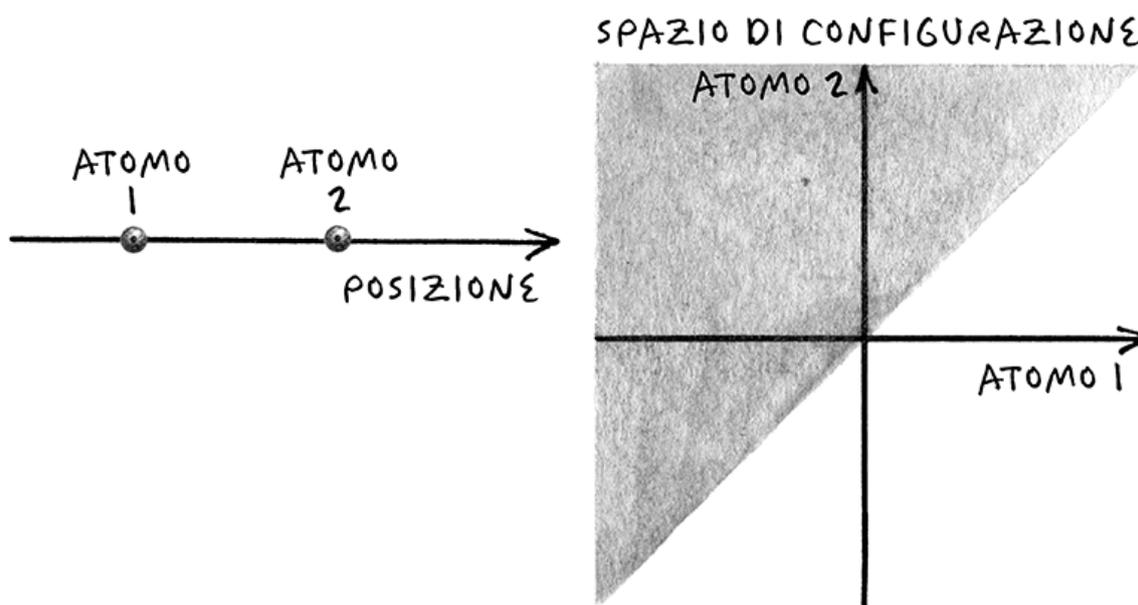


Figura 9.

Lo spazio delle configurazioni. Due atomi esistono su una retta, in una dimensione. La loro configurazione è misurata da due numeri, quindi lo spazio combinato delle loro configurazioni è un punto in un piano, in due dimensioni. I due atomi sono considerati identici, quindi l'atomo 2 indica sempre l'atomo più a destra.

È difficile, se non impossibile, visualizzare uno spazio a molte dimensioni. Una volta ho osservato pieno di ammirazione Roger Penrose svolgere alla lavagna un calcolo che richiedeva di far scivolare una superficie bidimensionale intorno a un ostacolo a 6 dimensioni in uno spazio a 8 dimensioni e ho provato l'emozione di seguire ogni singolo passo, ma questo è il limite della mia esperienza. La maggior parte dei matematici non ha simili capacità di visualizzazione, ma il ragionamento ci permette di orientarci in uno spazio a molte dimensioni. Quando disegno un oggetto tridimensio-

nale, in realtà disegno una sua proiezione bidimensionale. In maniera analoga, ciò che vedo mentalmente quando immagino uno spazio delle configurazioni come quello di un gatto, di circa 3×10^{25} dimensioni, è una proiezione tridimensionale, insieme al tacito ammonimento a essere prudente e a non trarre false conclusioni da questa visualizzazione totalmente inadeguata.

Un'onda nello spazio delle configurazioni contiene un'enorme quantità di informazioni. Consideriamo, per esempio, lo stato CONTRARIO, che descrive le correlazioni tra le risposte alle domande rivolte simultaneamente a due particelle, pur non rivelando alcunché riguardo alle singole particelle. Per codificare stati quantistici come questo, in generale ci occorre qualcosa di più di un'onda tridimensionale per ciascun atomo del gatto. Abbiamo bisogno di un'onda che si propaga nello spazio di tutte le possibili configurazioni del gatto.

Se si accetta l'esistenza di un'onda nello spazio di tutte le configurazioni di un gatto, ne seguono immediatamente le risoluzioni degli enigmi quantistici.

Vi è un solo gatto, che per tutto il tempo è in una data configurazione, in cui il gatto è vivo oppure è morto. La configurazione deve essere una delle due, ma non può essere entrambe. Quindi in ogni momento il gatto è vivo oppure è morto.

La funzione d'onda del gatto può essere la somma di due onde, dato che le onde si possono sempre sommare. Questo è ciò che fanno le onde, si sovrappongono, il che significa che si sommano. L'onda guida la configurazione, proprio come fa con un elettrone. La funzione d'onda può attraversare contemporaneamente configurazioni di un gatto vivo e configurazioni di un gatto morto. Così come un fiume può ramificarsi, e scorrere in entrambi i rami, anche una funzione d'onda può ramificarsi e seguire sia il ramo delle configurazioni vitali sia quello delle configurazioni mortali.

La funzione d'onda finisce per essere collegata alla probabilità di trovare configurazioni diverse. Quando il valore della funzione d'onda è grande in corrispondenza di qualche configurazione, la probabilità è alta. Quindi le probabilità di trovare il gatto in una configurazione vitale o in una configurazione mortale sono entrambi all'incirca pari al 50 per cento. Il gatto è

uno solo, però, e così come un elettrone può essere soltanto in un posto alla volta, l'unico gatto è o morto o vivo.

È strano che la funzione d'onda produca rami che vanno a finire dove non sono presenti particelle o configurazioni? Un po', ma deve essere così, dato che la particella può seguire un solo ramo. Un ramo vuoto, però, può avere conseguenze in un momento futuro. I diversi rami possono ricongiungersi in futuro, producendo figure di interferenza che influenzano la posizione che raggiungerà la particella.

Diciott'anni fa ho dovuto fare una scelta difficile. Ero attratto da due futuri diversi ed entrambi, in base a tutte le informazioni che avevo potuto raccogliere, mi sembravano invitanti. Naturalmente, non si hanno mai informazioni sufficienti per prendere decisioni simili, in cui è in gioco tutto del proprio futuro. La domanda era: in quale paese e in quale città andare a vivere? Chi avrei sposato, chi sarebbero stati i miei figli, quali lingue avrebbero potuto parlare e quanto a lungo avrei potuto vivere erano tutti aspetti che sarebbero stati influenzati da questa decisione.

Incapace di decidere, mi rivolsi ad alcuni amici di un laboratorio quantistico e lasciai che un atomo radioattivo decidesse per me. Se l'atomo fosse decaduto prima del tempo di dimezzamento, avrei colto la nuova opportunità in una nuova città e in nuovo paese; in caso contrario, sarei rimasto dov'ero. Bene, l'atomo decadde ed eccomi qui a Toronto, con la mia famiglia, i miei amici e i miei vicini, tutte persone che non avrei mai incontrato se quell'atomo avesse aspettato ancora un po' a decadere.

Non pensate che io abbia qualcosa di speciale. Tutti noi siamo fatti di particelle che sono state guidate verso il presente da una funzione d'onda nel vasto spazio delle configurazioni possibili.

La funzione d'onda sta intorno alla mia posizione attuale, ma ha anche altri rami dove potrei essere e non sono. Alcuni si dipartono da quell'esperimento e sviluppano la storia vuota che non ho vissuto, ma che avrei vissuto se l'atomo non fosse decaduto. La funzione d'onda vuota della particella scorre da lí, ancora oggi. Questo ramo vuoto della mia funzione d'onda continua a essere presente a Londra.

Non abbiamo provato tutti un po' di rammarico pensando alle vite che avremmo potuto avere, se avessimo preso una decisione leggermente diversa? Se la teoria dell'onda pilota è corretta, queste vite non vissute sono

tracciate da una funzione d'onda vuota, pronta a guidare i miei atomi, che tuttavia sono da un'altra parte.

Qualche anno prima, la mia funzione d'onda aveva già affrontato una biforcazione, da cui sono nati due rami molto diversi. Ne ho seguito uno, ma se avessi seguito l'altro sarei andato incontro a un destino molto diverso.

Avevo prenotato un volo della Swissair da New York a Vienna, dove intendevo partecipare a un congresso. La notte prima della partenza, gli organizzatori mi informarono che il mio intervento era programmato verso la fine e così, per puro capriccio, per una ragione che non ricordo più, chiamai l'agenzia di viaggio e spostai la prenotazione di un giorno. La sera dopo, mentre stavo andando a dormire sentii alla radio che l'aereo che non avevo preso era precipitato in mare nei pressi di Halifax. Se la teoria dell'onda pilota è corretta, in realtà un ramo della funzione d'onda degli atomi che all'epoca mi costituivano è ammucchiato ancora oggi al fondo della baia di St. Margarets, al largo del villaggio di Peggy's Cove, in Nuova Scozia.

Quel ramo è vuoto, come una miriade di altri. Se la teoria dell'onda pilota è corretta, però, sono tutti reali. L'unica differenza tra quei rami e l'unico ramo che mi guida ora è che solo un ramo coincide con, e guida, gli atomi di cui sono fatto. Gli innumerevoli altri rami continuano a scorrere, vuoti.

Mi importa di questi rami? Dovrebbe importarmi? Esiste sempre la possibilità che in un qualche momento futuro un ramo vuoto si ricombini con il mio ramo, causando interferenza, e cambi all'improvviso la mia vita.

La probabilità che ciò accada è straordinariamente piccola. Questa è una categoria di eventi possibili che sarebbero consentiti dalle leggi della fisica, ma che in pratica non si verificano mai. Gli atomi presenti nell'aria qui nella stanza in cui sto scrivendo potrebbero per caso mettersi tutti in fila e volare via dalla finestra, facendomi asfissiare. Però è straordinariamente improbabile, dato che gli atomi passano tutto il tempo a rimbalzare qua e là a caso.

Quindi sostanzialmente non vi è alcuna possibilità che i rami vuoti che rappresentano le vite che non abbiamo vissuto e le scelte che non abbiamo fatto abbiano qualche effetto sul nostro futuro. Se però fossimo semplici

atomi, vi sarebbero interferenze continue tra rami pieni e vuoti della funzione d'onda.

A tutti i fini pratici e morali, quindi, se la teoria dell'onda pilota è corretta, possiamo ignorare i rami vuoti. Siamo reali solo una volta, e viviamo la nostra vita su quell'unico ramo pieno. Dobbiamo interessarci, ed essere responsabili, soltanto di ciò che fa l'unica nostra versione reale.

- a. Se mi è consentita un'osservazione assolutamente personale, sono nipote di un marxista che fu membro del Partito comunista degli Stati Uniti per tutta la vita, anche molto dopo che il sogno era morto, e sono anche figlio di due cercatori che frequentarono per molti anni una scuola di Gurdjieff. In larga misura, gli errori dei miei genitori e dei miei nonni mi hanno vaccinato contro l'innamoramento per cercatori organizzati, che inseguono visioni di trascendenza. È facile per me criticare Bohm e altri della sua generazione per la stupefacente ingenuità che mostrarono di fronte alla particolare combinazione di autentica compassione per la sofferenza umana e disonestà e narcisismo straordinari che guru come Gurdjieff e Krishnamurti avevano in comune con i leader «rivoluzionari» dell'avanguardia della sinistra. Allo stesso tempo, però, credo che vi sia l'ombra di qualcosa di reale dietro agli insegnamenti di persone come Gurdjieff e Krishnamurti, che hanno portato agli occidentali distillati di pratiche spirituali orientali.

Capitolo nono

Collasso fisico dello stato quantistico

Gli esperimenti e il buon senso suggeriscono che non esistono sovrapposizioni di oggetti macroscopici, perché ogni corpo di grandi dimensioni è sempre in un posto particolare. La Regola 2 è stata inventata per integrare questo fatto, almeno per quanto riguarda il comportamento degli strumenti di misurazione e dei sistemi con cui entrano in contatto. Per evitare la sovrapposizione degli stati di uno strumento di misurazione, la Regola 2 impone che appena dopo una misurazione della posizione di una particella la sua funzione d'onda collassi immediatamente in uno stato corrispondente alla posizione che è stata misurata.

Appena prima della misurazione, la funzione d'onda di un certo atomo potrebbe essere diffusa su tutta la Terra e quindi in ogni punto del globo la probabilità di trovarvi l'atomo sarebbe identica. Quando però viene misurata la sua posizione e la misurazione segnala che l'atomo, poniamo, si trova da qualche parte a New York, nel momento stesso della segnalazione la funzione d'onda dell'atomo collassa nei cinque distretti della città.

Nella meccanica quantistica standard questo collasso della funzione d'onda avviene soltanto per effetto di una misurazione, il che pone un problema per il realismo, perché è solo il nostro uso e la nostra interpretazione del risultato a determinare se un'interazione con un corpo di grandi dimensioni è o no una misurazione.

Secondo una prospettiva realistica, uno strumento di misurazione è un sistema fisico, guarda caso grande, che ha una particolare capacità di amplificare minuscole differenze del comportamento di un atomo per poter registrare eventuali cambiamenti macroscopici in ciò che si è osservato. Essendo un sistema fisico, però, dovrebbe obbedire alle stesse leggi seguite dagli atomi di cui è composto. Se gli atomi possono essere in stati sovrapposti, la stessa cosa dovrebbe valere per le vaste collezioni di atomi che costituiscono lo strumento di misurazione. Come abbiamo visto nel capitolo

precedente, nella teoria dell'onda pilota una parte del prezzo che paghiamo per il realismo è un mondo pieno di rami vuoti delle funzioni d'onda, da tempo scollegati dagli oggetti che potrebbero guidare.

Ma se il collasso fosse un processo fisico reale che avviene ogni volta che un corpo di grandi dimensioni è coinvolto in un'interazione? Il collasso sarebbe innescato dalle dimensioni dell'oggetto, in termini di massa o di numero di atomi che lo costituiscono, indipendentemente dal fatto che viene utilizzato come strumento di misurazione. Collasserebbero le funzioni d'onda di tutti i corpi grandi, spazzando via le loro sovrapposizioni. Anche i sistemi di misurazione, fatti di miriadi di atomi, collasserebbero. Questo suggerisce una strategia per una versione realistica della fisica quantistica.

L'idea sarebbe quella di modificare la meccanica quantistica combinando la Regola 1 e la Regola 2 in un'unica regola, che specifica come si evolve nel tempo la funzione d'onda. Quando il sistema a cui viene applicata è microscopico, la vecchia Regola 1 è una buona approssimazione. Il collasso delle funzioni d'onda di atomi può avvenire, ma solo di rado. Quando il sistema è grande, però, il collasso avviene frequentemente, così sembra che il corpo sia sempre in un posto preciso.

Teorie di questo genere, chiamate *modelli di collasso fisico*, sono state elaborate a partire dagli anni Sessanta.

Il primo modello di collasso fisico fu inventato nel 1966 da Jeffrey Bub, uno studente di David Bohm, e poi sviluppato in collaborazione tra i due¹. Nello stesso anno, Frigyes Károlyházy pubblicò un articolo in cui sosteneva che fluttuazioni rumorose nella geometria dello spaziotempo possono far collassare la funzione d'onda. Come nel caso della teoria dell'onda pilota e del lavoro di Bell dello stesso periodo, la risposta a questi articoli pionieristici tardò ad arrivare. La prima persona che sviluppò una versione davvero precisa di una teoria di questo tipo fu Philip Pearle, un teorico americano che ottenne risultati molto importanti pur avendo trascorso l'intera carriera in un piccolo college. Pearle lavorò per quasi dieci anni per elaborare una teoria coerente del collasso fisico della funzione d'onda e la sua prima teoria che incorporava un collasso fisico della funzione d'onda fu pubblicata nel 1976².

La versione di Pearle di un modello di collasso aggiunge un elemento casuale e così è qualcosa di simile a un lancio di dadi a decidere quando e dove collassa una funzione d'onda. I lanci di dadi sono poco frequenti per le funzioni d'onda di atomi, quindi i sistemi piccoli, composti da pochi atomi, collassano raramente. Nel caso di sistemi macroscopici che contengono molti atomi, però, il collasso avviene spesso. Pearle chiamò la sua teoria *localizzazione spontanea continua*.

Per molti anni Pearle fu quasi l'unico ricercatore a studiare questo approccio al realismo. Poi, nel 1986, tre italiani che operavano a Trieste proposero una versione piuttosto elegante di questa idea, che da allora è nota come teoria GRW, dalle iniziali dei loro cognomi, Ghirardi, Rimini e Weber³. In seguito altri, tra cui Lajos Diósi, Lane Hughston e Nicolas Gisin, contribuirono a sviluppare questi modelli di collasso dinamico.

Queste teorie differiscono nei dettagli, ma hanno tutte in comune la caratteristica fondamentale che il comportamento di qualsiasi sistema quantistico è una mescolanza della Regola 1 e della Regola 2. Per la maggior parte del tempo, la funzione d'onda di un sistema atomico cambia in modo lento e graduale, seguendo la Regola 1, ma di tanto in tanto salta repentinamente in un determinato stato, seguendo una forma della Regola 2.

Uno dei difetti di questi modelli è che il tasso di collassi spontanei deve essere accuratamente specificato in modo che i collassi siano abbastanza rari da non alterare le figure di interferenza formate da delicate sovrapposizioni nei sistemi atomici. Ciò garantisce i successi della meccanica quantistica mantenendo la coerenza delle sovrapposizioni di sistemi microscopici, dove è necessaria. Ma la funzione d'onda di un corpo grande subirà un collasso molto più spesso, dato che consiste di molti atomi. Eventi che sono rari per un singolo atomo accadranno spesso a qualche atomo di una grande collezione. Quando un atomo collassa, però, devono farlo anche gli altri che fanno parte dello stesso corpo. Di conseguenza, il modello può essere regolato in maniera che le funzioni d'onda che descrivono sistemi macroscopici collassino molto più frequentemente, spiegando così il motivo per cui gli oggetti di grandi dimensioni sono sempre da qualche parte. In questo modo, il problema della misurazione è risolto.

Queste teorie non hanno bisogno di particelle, nel senso della teoria dell'onda pilota. Esistono solo onde, ma il risultato di un collasso sponta-

neo sarà un'onda molto concentrata intorno a un punto. È difficile distinguere un'onda così concentrata da una particella.

In assenza di particelle, i misteri del dualismo onda-particella svaniscono. Dobbiamo soltanto capire perché le onde si evolvono attraverso due processi molto diversi.

Queste teorie del collasso sono completamente realistiche. La funzione d'onda è il sistema e la sua interpretazione non è affatto misteriosa. Facendo collassare la funzione d'onda soltanto in ciò che è fisicamente significativo, la teoria del collasso evita la stravagante proliferazione di rami che appesantiscono la teoria dell'onda pilota. Il problema della misurazione non si pone, perché gli oggetti grandi, tra cui i dispositivi di misurazione, si trovano sempre in stati collassati. La coscienza, l'informazione e la misurazione non hanno un ruolo speciale. *What you see is what you get.*

Per definire una di queste teorie si deve decidere a quale delle domande incompatibili debba rispondere la funzione d'onda collassata. La risposta usuale è la posizione nello spazio. Le funzioni d'onda collassate hanno un picco da qualche parte nello spazio, il che le rende simili a particelle.

Una delle conseguenze è che l'energia non si conserva più in modo completo. Un blocco di metallo dovrebbe riscaldarsi lentamente per effetto di tutti i collassi a cui sono sottoposte le funzioni d'onda dei suoi atomi. Questa, secondo me, è la caratteristica meno attraente dei modelli di collasso spontaneo. Il lato positivo è che sono in programma alcuni esperimenti per cercare questo riscaldamento.

Come accade spesso con le teorie nuove, gli scienziati hanno molta libertà. Si è liberi di regolare la frequenza con cui si verificano i collassi, che si può far dipendere dalla massa o dall'energia degli atomi. Affinché l'ipotesi del collasso spontaneo possa essere plausibile, deve esistere un modo per regolare questo parametro in modo che le funzioni d'onda degli atomi e delle particelle elementari collassino raramente, ma che gli oggetti grandi collassino abbastanza spesso da essere sempre in un posto preciso. Occorre inoltre assicurarsi che tutte le conseguenze impreviste, come il riscaldamento della materia, siano impercettibili. Sorprendentemente, tutte queste condizioni possono essere soddisfatte, quindi queste teorie sono plausibili.

In alcuni di questi modelli, i collassi spontanei sono processi casuali. La teoria specifica soltanto la probabilità che avvenga il collasso. Ciò porta a

incertezze e probabilità, che sono incorporate sin dall'inizio. Anziché essere una conseguenza della nostra ignoranza o di ciò che crediamo, le probabilità sono codificate nelle leggi fondamentali. L'intrinseca casualità del processo di collasso spiega le incertezze nella fisica quantistica e lo fa senza distinguere le misurazioni. Le probabilità, quindi, vengono spiegate in un modo del tutto compatibile con il realismo. Questo è un grande vantaggio. (Ovviamente, per chi vorrebbe una teoria deterministica è uno svantaggio). Un fatto collegato è che le leggi fondamentali sono irreversibili e perciò la freccia o direzione del tempo è codificata al livello più basso. Qualcuno potrebbe considerarli difetti, ma secondo me sono caratteristiche molto positive dei modelli di collasso.

Un aspetto preoccupante di questi modelli è che il collasso della funzione d'onda si realizza istantaneamente. Poiché la funzione d'onda può essere diffusa nello spazio, il suo collasso definisce un momento di simultaneità in un'intera regione. Ciò pare contraddire la teoria della relatività, secondo cui non esiste un concetto fisicamente significativo di simultaneità in regioni dello spazio. Anche se in effetti questo sembra un problema per i modelli originari di collasso dinamico, sono state avanzate proposte per la creazione di modelli di collasso coerenti con la relatività ristretta ⁴.

La caratteristica più interessante di tutti i modelli di collasso è però la previsione di nuovi fenomeni, che possono essere sottoposti a verifica sperimentale. I collassi casuali introducono rumore in un sistema. Per alcuni valori dei parametri, l'effetto sarebbe sufficientemente grande per essere osservato. In diversi esperimenti recenti non si è rilevata la necessità di una tale fonte di rumore, il che esclude certi valori dei parametri, se non la teoria stessa. Questa è scienza vera e gli esperimenti continuano. Nulla sarebbe più meraviglioso della scoperta di un effetto che contraddice la meccanica quantistica e conferma una previsione delle sue alternative realistiche.

Uno dei punti deboli di alcuni di questi modelli di collasso è che non sfruttano in alcun modo né citano altre questioni fondamentali della fisica. Sarebbe più convincente se le modifiche che apportiamo alla meccanica quantistica fossero motivate da un problema diverso da quello della misurazione, come il problema della gravità quantistica. Questo ci porta al lavoro di Roger Penrose.

Se esiste oggi un teorico che per risultati, profondità di intuizione e influenza regge il confronto con i grandi saggi del Novecento, è Roger Penrose. In poche parole, nessuno è come lui.

Penrose segue una rotta tutta sua e, di conseguenza, ha spesso qualcosa di nuovo e sorprendente da dire sulla maggior parte dei problemi della fisica fondamentale, compresi i fondamenti quantistici e la gravità quantistica. Poiché tutto ciò che immagina è tenuto insieme da una coerenza spesso nascosta, il modo migliore per avvicinarsi alla sua proposta per la teoria quantistica consiste nel ripercorrere la storia dei suoi lavori fino ai primi anni Sessanta, quando il giovane matematico restò affascinato dalle basi della nostra comprensione dello spazio, del tempo e dei quanti.

Per quanto facile, sarebbe inadeguato descrivere Penrose come la persona che ha dato il contributo più importante alla relatività generale dopo Einstein. Nei primi anni Sessanta, Penrose inventò nuovi strumenti matematici rivoluzionari per descrivere la geometria dello spaziotempo, basati sulla causalità. Invece di parlare di quanto sono distanti due eventi, o di quanto tempo passa secondo un orologio, descrisse lo spaziotempo in funzione delle relazioni di causalità tra gli eventi. Questo lo spinse a formulare e dimostrare teoremi i quali mostrano che, se la relatività generale è corretta, al centro di un buco nero il campo gravitazionale diventa infinitamente intenso⁵. A quel punto, la teoria non è più valida, perché le sue equazioni non riescono più a prevedere il futuro. Questi punti, dove il tempo può iniziare o fermarsi, sono chiamati singolarità. In seguito, lavorando con Stephen Hawking, Penrose estese il suo metodo all'universo in espansione, arrivando a dimostrare che la relatività generale prevede che il tempo sia iniziato in un tempo finito nel passato, quando l'intero universo iniziò la sua espansione in uno stato di densità infinita⁶.

Le sue invenzioni però vanno al di là anche di questi contributi trasformativi alla relatività generale. Come Einstein, Penrose si preoccupa soprattutto della coerenza della nostra comprensione del mondo. Questa passione, proprio come avvenne nel caso di David Bohm e David Finkelstein, ha spinto Penrose a sviluppare una visione unica della fisica fondamentale, che è inconfondibilmente sua. In più, la sua visione lo ha portato, nei molti anni della sua carriera creativa, a inventare strutture matematiche che altri in seguito hanno utilizzato.

Dopo aver trasformato la pratica della relatività generale, Penrose rivolse la sua attenzione alla fisica fondamentale. Fu colpito da un'affinità tra l'entanglement quantistico e il principio di Mach – l'idea, che aveva ispirato l'invenzione di Einstein della relatività generale, che ciò che è reale nella relatività generale siano le relazioni. Entrambe le idee suggeriscono un'armonia globale che collega tutto il mondo.

Penrose è stato il primo a domandarsi se le relazioni che definiscono lo spazio e il tempo possano emergere dall'entanglement quantistico. Cercando di capire la questione, fu ispirato a inventare un semplice gioco basato su particolari diagrammi, le cui regole rappresentavano allo stesso tempo l'entanglement quantistico e alcuni aspetti della geometria fisica. Penrose chiamò questo gioco, la sua prima visione di una geometria quantistica finita e discreta, *rete di spin*.

La maggior parte dei fisici teorici mette a punto le proprie idee facendo calcoli nell'ambito di teorie esistenti. Penrose a volte invece procede inventando giochi. La loro semplicità coglie questioni profonde, che si possono indagare giocando. Com'è caratteristico di Penrose, il suo articolo principale sulle reti di spin non solo non fu pubblicato, ma non fu mai nemmeno battuto a macchina. Copie ciclostilate (oggi sarebbero fotocopie) dei suoi appunti scritti a mano circolarono tra i suoi studenti e passarono da un amico a un altro. Tutti trovavano entusiasmanti queste note, anche se terminavano nel bel mezzo della dimostrazione principale ^a.

Per decenni le reti di spin continuarono a essere una sorta di gioco di prestigio filosofico, diffuso per mezzo degli schizzi sui tovaglioli che i congressisti si scambiavano durante le cene al momento del dolce. Anni dopo, tuttavia, risultarono essere la struttura centrale in un approccio alla gravità quantistica chiamato *gravità quantistica a loop*. In quel contesto, le reti di spin incarnano un modo in cui i principi della teoria quantistica e della relatività generale possono coesistere.

Estendendo le reti di spin, Penrose scoprì la teoria dei *twistor*, che è una formulazione straordinariamente elegante della geometria alla base della propagazione di elettroni, fotoni e neutrini. Intrinseca ai twistor è una meravigliosa asimmetria della fisica dei neutrini, chiamata *parità*. Si dice che un sistema è simmetrico rispetto alla parità se in natura esiste la sua immagine speculare. Le nostre due mani, essendo l'una l'immagine speculare

dell'altra, sono simmetriche rispetto alla parità. Nel complesso, però, gli esseri umani non sono simmetrici rispetto alla parità, infatti il cuore e altri organi interni hanno una disposizione asimmetrica e tutti tendiamo ad avere una preferenza per una delle due mani. I neutrini esistono in stati la cui immagine speculare non esiste, quindi sono asimmetrici rispetto alla parità. La teoria dei twistor di Penrose esprime questa caratteristica dei neutrini, dato che utilizza strutture matematiche che non sono invarianti se osservate allo specchio.

Per molti anni Penrose e alcuni suoi studenti svilupparono la teoria dei twistor, lavorando in isolamento a Oxford. Alla fine degli anni Settanta, la teoria attirò l'attenzione di Edward Witten, che molti anni più tardi fece dei twistor la chiave di volta di una formidabile riformulazione della teoria quantistica dei campi, tuttora in via di sviluppo, che inventò insieme ad alcuni teorici più giovani.

Quel che trovo davvero notevole di Penrose è la sua narrazione interiore che collega tutto ciò che fa in una storia coerente. Non sorprende quindi che la sua ampia visione di una nuova fisica lo abbia portato a una reinvenzione della meccanica quantistica. Faceva parte di una più ampia strategia per combinare la teoria quantistica con la relatività generale, per sviluppare una teoria della gravità quantistica.

Secondo il suo caratteristico modo di procedere, Penrose iniziò il suo attacco alla gravità quantistica ignorando la strada ovvia seguita da quasi chiunque altro. Nel percorso usuale si costruisce una descrizione quantistica di un sistema. Questo processo, chiamato *quantizzazione*, inizia con una descrizione di un sistema nel linguaggio della fisica newtoniana, che poi viene «quantizzata» applicando un certo algoritmo. I dettagli qui non ci interessano, basterà dire che il risultato è una teoria quantistica assolutamente tradizionale.

In molti casi questa tecnica funziona e produce teorie quantistiche valide degli atomi, delle particelle elementari e della radiazione e può essere applicata alla gravità. In effetti, la gravità quantistica a loop è stata ottenuta «quantizzando» la relatività generale.

Penrose ha seguito una strada diversa. La teoria quantistica e la relatività generale sono in contrasto su alcuni punti importanti. Il punto più critico è che descrivono il tempo in modi profondamente diversi. La meccanica quantistica ha un unico tempo universale. La relatività generale ha molti

tempi – se per tempo intendiamo la durata misurata da orologi. L'inizio delle teorie della relatività di Einstein è una discussione sulla sincronizzazione di due orologi. All'inizio li sincronizziamo, ma in generale non restano sincronizzati e perdono lentamente il sincronismo a una velocità che dipende dalle posizioni e dai moti relativi dei due nel campo gravitazionale.

Un altro punto su cui le due teorie sono in contrasto è il principio di sovrapposizione. Come abbiamo visto, dati due stati di un sistema quantistico, sommandoli possiamo produrre nuovi stati. Un punto che non è stato necessario menzionare finora è che sovrapponendo gli stessi due stati possiamo produrre moltissimi stati diversi, facendo variare il contributo di ciascuno dei due alla sovrapposizione. Quindi possiamo sovrapporre GATTO e CANE (dal nostro esempio del capitolo II) in parti uguali come in

$$\text{STATO} = \text{GATTO} + \text{CANE}$$

o invece possiamo scegliere

$$\text{STATO} = 3 \text{ GATTO} + \text{CANE}$$

oppure

$$\text{STATO} = \text{GATTO} + 3 \text{ CANE}$$

Il numero per cui moltiplichiamo ciascuno stato si chiama *ampiezza*. Il suo quadrato è collegato alla probabilità. Quindi una persona nello stato GATTO + CANE ha la stessa probabilità di essere un amante dei gatti o un amante dei cani, mentre se qualcuno si trova nello stato 3 GATTO + CANE è tre volte più probabile che ami i gatti.

La relatività generale non ha un principio di sovrapposizione. Non si possono sommare due soluzioni delle equazioni della teoria e ottenere una nuova soluzione. Nel linguaggio matematico, si dice che la meccanica quantistica è lineare, mentre la relatività generale è non lineare.

Queste due differenze sono collegate. Il principio di sovrapposizione è possibile nella meccanica quantistica perché esiste un unico tempo universale che possiamo usare per cronometrare l'evoluzione degli stati. D'altra

parte, dato che orologi distanti perdono il sincronismo, non esiste un modo semplice per sommare o combinare due spazitempi per ottenere un nuovo spaziotempo.

Penrose considera la natura «a molte dita» [*many-fingered*] del tempo nella relatività generale e l'assenza di sovrapposizioni come verità spiacevoli. Egli sospetta che il principio di sovrapposizione venga necessariamente violato nel momento in cui i fenomeni quantistici sono descritti nel linguaggio della relatività generale. La semplicità e la linearità del principio di sovrapposizione, sospetta, sono vere soltanto approssimativamente, e valgono soltanto nella misura in cui il ruolo della gravità può essere ignorato.

Penrose perciò si oppone alla quantizzazione della gravità e suggerisce invece di cercare di «relativizzare i quanti», il che significa introdurre il concetto di tempo a molte dita nella teoria quantistica violando il principio di sovrapposizione e rendendo non lineari gli stati quantistici.

Penrose è un realista, però fa una mossa insolita per un realista in relazione alla teoria quantistica. Anziché attribuire realtà sia alle onde sia alle particelle, o inventare nuove «variabili nascoste», Penrose pensa che la realtà consista della sola funzione d'onda. Questo lo porta ad accogliere il suggerimento di Pearle e altri, secondo i quali il collasso della funzione d'onda durante una misurazione è un processo fisico reale. L'improvviso cambiamento della funzione d'onda non è dovuto, come ritengono alcuni, a un aggiornamento della nostra conoscenza della posizione della particella, ma è un autentico processo fisico.

Penrose, seguendo lavori precedenti di Pearle e di Ghirardi, Rimini e Weber, ha proposto di considerare il collasso della funzione d'onda come un processo fisico che avviene di tanto in tanto⁷, interrompendo i cambiamenti gradualmente imposti dalla Regola 1. Inoltre, accettando un suggerimento di Diósi e Károlyházy, ritiene che il processo di collasso abbia qualcosa a che fare con la gravità⁸. Quando una funzione d'onda collassa, le sovrapposizioni vengono eliminate. Il tasso di collassi della funzione d'onda dipende dalle dimensioni e dalla massa del sistema. Come abbiamo visto, questo tasso può essere specificato in modo che i sistemi atomici non collassino quasi mai, ma quelli macroscopici collassino spesso, di modo che le sovrapposizioni di oggetti grandi sono impossibili.

La caratteristica davvero entusiasmante dei lavori di Diósi, Károlyházy e Penrose è il fatto che hanno proposto un criterio per stabilire quando avvengono i collassi, che fa del collasso un effetto della gravità. In maniera approssimativa, si può dire che la sovrapposizione dello stato in cui l'atomo si trova qui e dello stato in cui si trova lì collassa in un'unica posizione nel momento in cui la posizione dell'atomo diventa misurabile per effetto della sua attrazione gravitazionale.

Tutto ciò è in relazione con il tempo a molte dita della relatività generale. Immaginate che la funzione d'onda sia una sovrapposizione dello stato in cui un atomo si trova in salotto e dello stato in cui si trova in cucina. Ovunque si trovi la particella, la sua massa ha un effetto gravitazionale che influisce sugli orologi. Una delle previsioni più sorprendenti della relatività generale è che un orologio posto in un campo gravitazionale più intenso sembra rallentare. È un effetto comprovato. Si è osservato che gli atomi sulla superficie del Sole vibrano più lentamente di quanto facciano gli stessi atomi sulla Terra. L'effetto si osserva anche confrontando il comportamento di due orologi atomici, posti uno nel sotterraneo di un edificio e l'altro sul tetto.

Il risultato è che gli orologi posti nella stanza in cui si trova l'atomo vanno più lentamente degli orologi posti nell'altra stanza. Ma che cosa si può dire dello stato che è una sovrapposizione dello stato «atomo in salotto» e dello stato «atomo in cucina»? Sembra implicare che il campo gravitazionale debba essere in una sovrapposizione di stati tale che ciascun orologio cammina più lentamente.

Ma uno stato simile non esiste, perché non si possono sommare geometrie dello spaziotempo per ottenere nuove geometrie dello spaziotempo. Pertanto la funzione d'onda deve collassare.

Penrose fornisce una previsione di quando la funzione d'onda collasserà e oggi si sta lavorando per costruire un esperimento per verificarla. Molto di recente, due gruppi di fisici sperimentali hanno dichiarato che potrebbero riuscire a costruire sovrapposizioni di diversi campi gravitazionali, contrariamente all'ipotesi di Penrose⁹. È fantastico, ma il fatto preoccupante è che Penrose non ha presentato una teoria dettagliata per unificare la gravità quantistica e la teoria quantistica da cui sia possibile derivare il suo modello euristico.

Quello proposto da Penrose è per lo meno un modello di come potrebbe funzionare tutto ciò, che combina la normale evoluzione dello stato quantistico, data dalla Regola 1, con il collasso della funzione d'onda, dato dalla Regola 2. Sono insieme in un'unica regola di evoluzione.

La teoria di Penrose non è la meccanica quantistica; è una nuova teoria che contiene la meccanica quantistica all'interno di un quadro di riferimento realistico, basato su una nuova legge evolutiva, chiamata legge di Schrödinger-Newton, che unifica la Regola 1 e la Regola 2 in un'unica legge dinamica.

Se ci concentriamo sul comportamento degli atomi e della radiazione, quest'unica legge evolutiva riproduce la meccanica quantistica. Il principio di sovrapposizione è soddisfatto con buona approssimazione. La funzione d'onda si comporta come un'onda e la Regola 1 è soddisfatta. Si recupera così per i sistemi atomici l'equazione di Schrödinger della funzione d'onda.

Se però facciamo un passo indietro per considerare il mondo macroscopico, il modello di Penrose descrive una funzione d'onda che è collassata e concentrata su singole configurazioni. Queste funzioni d'onda concentrate si comportano come particelle. Al livello macroscopico, quindi, si recuperano le leggi di Newton del moto delle particelle.

Nel regime microscopico, pertanto, questa teoria riproduce la meccanica quantistica, mentre nella situazione opposta prevede che gli oggetti macroscopici si comportino come particelle e obbediscano alle leggi di Newton.

Oggi i ricercatori continuano a sviluppare modelli di collasso fisico. Di recente Pearle ha compiuto dei progressi nella costruzione di un modello di collasso coerente con la relatività ristretta¹⁰. L'idea che la gravità sia responsabile di causare la perdita di coerenza dello stato quantistico, e quindi il collasso, è stata sviluppata da Rodolfo Gambini e Jorge Pullin, che chiamano la loro proposta interpretazione di Montevideo della meccanica quantistica¹¹. Steve Adler ha trovato un ruolo per il collasso spontaneo in un modello a variabili nascoste che sta sviluppando¹².

La teoria dell'onda pilota e i modelli di collasso hanno fornito alternative ai fisici quantistici che vogliono essere realisti. Le differenze sono evidenti, ma sono tali anche le somiglianze.

Un'alternativa è credere che esistano sia onde sia particelle e così si approda alla teoria dell'onda pilota. In questo modo si risolve facilmente il problema della misurazione, pagando però un prezzo. La teoria dell'onda pilota è doppiamente stravagante. Ha una doppia ontologia, ma una dinamica asimmetrica mediante la quale la funzione d'onda guida le particelle senza che vi siano azioni reciproche con cui le particelle influenzano l'onda. E dobbiamo vivere con un vasto mondo in cui la funzione d'onda ha un gran numero di rami fantasma, completamente vuoti.

I modelli di collasso sono immuni da tutte queste obiezioni. Esistono soltanto onde, quindi non vi è un'ontologia doppia né un problema di reciprocità, inoltre non esistono rami vuoti perché i collassi li eliminano. In questo modo si risolve pure il problema della misurazione, ma vi è di nuovo un prezzo da pagare, dato che la teoria ha nuovi parametri che devono essere regolati per tenere al sicuro la teoria.

I due approcci concordano in merito a due lezioni fondamentali: la funzione d'onda è un aspetto della realtà ed esiste un contrasto con la teoria della relatività. Sono due indizi vitali per il futuro della fisica.

- a. Che fu completata in una tesi di dottorato di uno studente di Penrose, John Moursouris, anch'essa mai pubblicata e passata di mano in mano.

Capitolo decimo

Realismo magico

Ogni transizione quantistica che avviene su una qualsiasi stella, in qualsiasi galassia, in ogni piú remoto angolo dell'universo, scinde il nostro mondo locale in miriadi di copie di sé stesso.

BRYCE S. DEWITT ¹.

Negli ultimi capitoli abbiamo visto che esistono alternative per i realisti, ma dobbiamo notare che tutte richiedono di modificare la teoria. Nei modelli di collasso spontaneo l'improvviso collasso della funzione d'onda fa parte della dinamica della teoria. Il collasso avviene che la misurazione sia o no effettuata e indipendentemente da ciò che sappiamo. Le teorie risultanti in generale sono in contrasto con la meccanica quantistica, tuttavia mantengono un dominio di accordo sufficiente per evitare che contraddicano i risultati degli esperimenti condotti finora.

La teoria dell'onda pilota è un'altra alternativa per i realisti. La Regola 2 è sospesa, perciò la funzione d'onda si evolve sempre secondo la Regola 1. Viene però aggiunto un altro elemento, le particelle, il cui movimento è guidato dalla funzione d'onda. Quindi anche questa teoria è diversa dalla meccanica quantistica. Quando le particelle sono in equilibrio quantistico, le previsioni delle due teorie coincidono, mentre nel caso contrario differiscono.

Sarebbe magnifico se un giorno gli esperimenti confermassero che la natura preferisce una di queste teorie realistiche alla meccanica quantistica. Supponiamo, però, che tra molti anni, o magari secoli, si constatasse che nessun risultato sperimentale richiede una modifica o un completamento della meccanica quantistica. In particolare, che cosa succederebbe se non si trovasse alcun limite per la grandezza o la complessità di un siste-

ma che può essere posto in una sovrapposizione? Ipotizziamo, in altre parole, che la meccanica quantistica nella sua forma originaria sembri essere completamente corretta. I realisti avrebbero ancora qualche alternativa?

La ragione per cui è difficile essere realisti e credere alla meccanica quantistica è la Regola 2, che attribuisce un ruolo speciale alla misurazione. La subitanità del collasso della funzione d'onda al momento della misurazione, imposta dalla Regola 2, significa che gli stati quantistici cambiano nel tempo in un modo che non tiene conto della località e dell'energia e sembra invece dipendere da ciò che sappiamo o crediamo. Poiché fa dipendere lo stato quantistico dalla nostra conoscenza, non può far parte di una teoria realistica.

Una tale teoria non potrebbe avere tra i suoi postulati la Regola 2, che sarebbe in contrasto con il realismo. Quindi dovremmo costruire la nostra teoria solo con la Regola 1. Anche questa è una modifica della teoria, ma è condivisa con la teoria dell'onda pilota, perciò forse è un cambiamento che vale la pena esplorare. In una tale teoria, inoltre, non si trovano ovvi riferimenti agli esperimenti e neppure un chiaro concetto di incertezza o probabilità, perché la Regola 1 è deterministica e non fa riferimento alla probabilità. Possiamo costruire questa teoria e restare coerenti con il realismo?

Un modo per farlo potrebbe essere derivare la Regola 2 da una teoria che non la postula. Il collasso della funzione d'onda si verificherebbe soltanto in certe circostanze particolari, come quando un atomo interagisce con uno strumento di misurazione grande come un essere umano. A tal fine, dobbiamo capire i ruoli dell'incertezza e della probabilità in un mondo descritto da una teoria in cui non compaiono.

Il lavoro di ricerca per comprendere la meccanica quantistica basata soltanto sulla Regola 1, e in modo che sia coerente con il realismo, ha una lunga storia. Fu iniziato nel 1957 da Hugh Everett III, un dottorando di John Wheeler, quindi può essere chiamata meccanica quantistica everettiana. L'espressione più usata per indicarla, tuttavia, è «interpretazione a molti mondi» della meccanica quantistica, perché secondo alcuni – ma è una tesi controversa – implica che il mondo di cui facciamo esperienza è soltanto uno di molti universi paralleli.

La proposta di Everett fu presentata nella sua tesi nel 1957 e pubblicata nello stesso anno². A dispetto del numero ridottissimo di pagine, quella tesi era destinata ad avere, dopo un po' di tempo, un grosso impatto.

Everett, come molti altri, abbandonò la scienza accademica subito dopo aver conseguito il dottorato e iniziò una carriera nell'industria della difesa, perciò la tesi fu il suo unico contributo alla fisica. Anche se passò parecchio tempo prima che fosse letta da molti, non mi viene in mente nessun'altra tesi di dottorato, a parte quella di de Broglie, che ebbe, nel tempo, un tale effetto dirompente o rivoluzionario (scegliete voi) sui fondamenti della fisica.

Una delle idee di Everett è certamente corretta e utile. Se non esiste una Regola 2, le funzioni d'onda non collassano, quindi dobbiamo descrivere ciò che accade in una misurazione usando soltanto la Regola 1. Come abbiamo visto nella discussione sul gatto di Schrödinger alla fine del capitolo IV, le interazioni, comprese le misurazioni, portano a stati correlati. L'esempio discusso era

$$\text{INTERMEDIO} = (\text{ECCITATO E NO E VIVO}) \text{ O} \\ (\text{FONDAMENTALE E SÍ E MORTO})$$

«O» indica una sovrapposizione di diverse situazioni possibili, in ciascuna delle quali l'atomo, il contatore Geiger e il gatto sono tutti correlati. Dato che sono in una sovrapposizione di stati, osservabili come la vitalità del gatto non hanno un valore preciso. Everett però fece notare che, ciò nonostante, possiamo considerare che questo stato sovrapposto ci fornisce due affermazioni condizionate sullo stato del sistema combinato dopo la misurazione. Queste affermazioni condizionate sono:

Se l'atomo è nello stato eccitato, il contatore indicherà NO e il gatto sarà vivo

e

Se l'atomo è nello stato fondamentale, il contatore indicherà SÍ e il gatto sarà morto.

Queste due affermazioni ci dicono che l'atomo, il contatore e il gatto sono diventati correlati a causa del possibile passaggio del fotone attraverso il rivelatore ^a.

Lo stato sovrapposto non indica quale risultato si osserverà, però ci dice che il risultato esprime una correlazione tra lo stato dell'atomo e gli stati del contatore e del gatto.

Questa parte della tesi di Everett è inattaccabile. È generalmente vero che le interazioni tra due sistemi quantistici creano una correlazione tra gli stati dei due sistemi e queste correlazioni possono essere interpretate come insiemi di affermazioni condizionate. È una conseguenza della Regola 1, applicata alle interazioni.

Si noti però che così non funziona. Non ci viene detto qual è il risultato che osserveremo. Le affermazioni condizionate possono essere utili perché forniscono informazioni precise sul sistema, ma non ci danno informazioni complete. Una teoria che fornisce soltanto affermazioni condizionate non può bastare a un realista.

Per andare avanti, quindi, Everett, al fine di rendere realistica la teoria con la sola Regola 1, propose di cambiare la nostra concezione della realtà e suggerì che uno stato che consiste di una sovrapposizione di stati di rivelatori descrive una realtà in cui si realizzano entrambi i risultati. In questa realtà allargata, saranno vere entrambe le affermazioni condizionate. In altre parole, Everett affermò che *una descrizione completa della realtà è la sovrapposizione dei due stati*. Una parte (ma solo una parte) di ciò che questo implica è che la seguente affermazione è vera:

L'atomo è nello stato eccitato, il contatore indica NO e il gatto è vivo e l'atomo è nello stato fondamentale, il contatore indica SÌ e il gatto è morto.

Sembrerebbe palesemente falso. Nel mondo in cui viviamo, il gatto ha soltanto una delle due esperienze. È per questo motivo che nel capitolo III abbiamo descritto la sovrapposizione come corrispondente a una disgiunzione. O il gatto sente di essere vivo, oppure è morto e non sente nulla. Nel nostro mondo, accade l'una o l'altra cosa.

Secondo la proposta di Everett, il mondo della nostra esperienza è soltanto una parte di tutta la realtà. Nel mondo allargato che a suo parere co-

stituisce l'intera realtà esistono versioni di noi stessi che vivono l'esperienza di ottenere ogni possibile risultato di ogni esperimento quantistico.

In altre parole, la disgiunzione «o» dell'esperienza ordinaria diventa, nella meccanica quantistica, una congiunzione «e». Diciamo che «il gatto è vivo o il gatto è morto» perché i due stati sono mutuamente esclusivi. In questa formulazione, però, può essere nondimeno vero che «il gatto è vivo e il gatto è morto».

L'idea è questa: ogni volta che si effettua un esperimento che può avere risultati diversi, l'universo si divide in mondi paralleli, uno per ciascuno dei risultati possibili. Insieme al mondo, ci dividiamo anche noi. L'esperimento crea un'altra versione di noi stessi per ogni risultato possibile. Da quel momento in poi tutte queste versioni vivono in un mondo descritto coerentemente da una delle affermazioni condizionate che possiamo ricavare dallo stato combinato.

In contrasto con la teoria dell'onda pilota, la meccanica quantistica everettiana non ha particelle, quindi nulla distingue un ramo dall'altro^b. Siamo pertanto invitati a considerare tutti i rami come altrettanto reali e a renderci conto delle conseguenze. Se Everett ha ragione, quindi, in questo momento sono a Toronto e sono a Londra e allo stesso tempo nella miriade di luoghi in cui la vita avrebbe potuto portarmi, compreso il fondo dell'oceano al largo di Peggy's Cove.

A volte questi rami vengono chiamati mondi ed è per questo motivo che la proposta di Everett ha finito per essere chiamata interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica.

Affinché la cosa funzioni, ciascuna versione di un osservatore non deve avere modo di comunicare con gli altri; i rami devono essere autonomi.

Ciò che ho descritto finora era la versione iniziale di Everett dell'interpretazione a molti mondi. Passata al setaccio, risultò essere un po' ingenua, dato che porta a diversi grossi problemi.

Il primo problema della formulazione di Everett è il suggerimento che la ramificazione avviene quando si effettua una misurazione. Ciò fa sembrare speciali le misurazioni, mentre secondo un principio basilare del realismo le misurazioni sono interazioni ordinarie da trattare come qualsiasi altra interazione.

In effetti, la Regola 1 non distingue in alcun modo gli esperimenti. Pertanto, se siete realisti^c, dovete insistere sul fatto che ciò che accade nel caso di una misurazione deve accadere piú in generale. A causare una divisione è principalmente un'interazione, che produce correlazioni tra i sistemi che hanno interagito. Queste correlazioni possono essere espresse, come abbiamo visto, come affermazioni condizionate che descrivono i diversi risultati possibili di quella interazione.

Per evitare di rendere speciali gli esperimenti, è necessario che l'universo si divida ogni volta che avviene un'interazione che ha piú di un risultato possibile. Ma è qualcosa che si verifica ogni momento – basta che collidano due atomi, il che accade miriadi di volte al secondo solo nell'aria contenuta in questa stanza.

Inoltre l'interazione che causa la divisione può avvenire in qualunque punto dell'universo. Mentre leggete questa frase, pertanto, vi dividete un numero enorme di volte, in un numero enorme di versioni di voi stessi^d.

Invitare qualcuno a crederci, in nome del realismo, è chiedere molto. Non stupisce che le idee di Everett abbiano impiegato un po' di tempo a prendere piede.

Un secondo problema è che la ramificazione, se deve sostituire la Regola 2, deve essere irreversibile, per riprodurre il fatto fondamentale che nella nostra esperienza di osservatori ogni esperimento ha un risultato preciso. In effetti, l'azione della Regola 2, che la ramificazione dovrebbe sostituire, è irreversibile. Everett, tuttavia, suppone che la ramificazione sia una conseguenza della Regola 1, che è reversibile.

Un terzo grosso problema, se si rinuncia alla Regola 2, ha a che fare con le probabilità – o, meglio, con la loro assenza.

Gli esperimenti misurano le probabilità di ottenere diversi risultati e confrontarle con le previsioni della teoria è una parte importante della verifica della meccanica quantistica. Va notata però una cosa importante: la Regola 1 non parla di probabilità. Ogni riferimento alle probabilità nella meccanica quantistica viene dalla Regola 2, che ci dava una formula per calcolare la probabilità di ciascun risultato possibile. Come sappiamo, quella formula è la regola di Born, che collega le probabilità al quadrato della funzione d'onda. Questa è l'unica parte della teoria quantistica che fa riferimento alle probabilità ed è una parte della Regola 2. Se eliminiamo la

Regola 2 dalla teoria quantistica, non vi rimane nulla che parli di probabilità.

Di conseguenza, la versione di Everett della meccanica quantistica ci dice soltanto che si realizzano tutti i risultati possibili. Non con una certa probabilità, ma con certezza.

In altre parole, per ogni possibile risultato di un esperimento, l'interpretazione a molti mondi afferma che esiste un ramo in cui si realizza quel risultato. In nessun senso un ramo è piú probabile di altri. Tutto ciò che può affermare la Regola 1 è che, in maniera certa, esisteranno tutti i rami. A quanto pare, quindi, abbiamo perso una parte importante della meccanica quantistica, la parte che prevede le probabilità dei diversi risultati.

Everett non era stupido; era consapevole di questo problema e cercò di affrontarlo. Nella sua tesi, presentò un modo per prevedere le probabilità usando soltanto la Regola 1. A tal fine, suggerí come derivare la relazione tra la probabilità e il quadrato della funzione d'onda – una relazione che la Regola 2 presuppone – direttamente dalla sola Regola 1.

Sulle prime, molti furono colpiti da questo risultato. Ricordo bene che capitò anche a me quando lessi per la prima volta l'articolo di Everett. In seguito però si scoprí che nella sua derivazione si nascondeva un errore. Come in molte dimostrazioni sbagliate, l'argomento dava per scontato ciò che doveva essere dimostrato. La relazione tra il quadrato della funzione d'onda e la probabilità era infilata dentro un passo apparentemente innocuo, che presumeva che i rami con funzioni d'onda piccole^e fossero poco probabili^f. Questo però equivaleva a presupporre una relazione tra la dimensione delle funzioni d'onda e le probabilità, perciò la derivazione dimostrava meno di quanto si pretendeva che facesse.

La dimostrazione di Everett, però, stabiliva una cosa importante: se si vogliono introdurre grandezze chiamate probabilità, sarebbe *coerente* presumere che seguano la regola di Born. Tuttavia non dimostrava che fosse *necessario* introdurre le probabilità né che queste probabilità dovessero essere collegate alla dimensione della funzione d'onda.

Un ulteriore problema della formulazione originaria di Everett dell'interpretazione a molti mondi è l'ambiguità della divisione in rami dello stato quantistico. Come ho spiegato, ciascun ramo è definito dal fatto che una grandezza ha un dato valore. Esiste un ramo in cui l'atomo è eccitato e

il gatto è vivo e un altro ramo in cui l'atomo è nello stato fondamentale e il gatto è morto. Ma perché queste e non altre grandezze? Lo stato fondamentale e quello eccitato sono stati con energie diverse, ma esistono anche altre grandezze incompatibili che potremmo usare per definire una divisione. Esisterà qualche sovrapposizione dello stato fondamentale e di uno stato eccitato che corrisponde al fatto che l'elettrone è alla sinistra dell'atomo, mentre una sovrapposizione diversa corrisponde al fatto che l'elettrone è alla destra dell'atomo.

Chiamiamo questi stati «destra» e «sinistra». Perché la divisione non potrebbe avvenire rispetto a questi? Gli stati del gatto a cui porterebbe sarebbero sovrapposizioni di vivo e morto. Il gatto non vivrebbe più in un mondo in cui gli esperimenti producono risultati precisi. Alla Regola 1, però, che cosa succede al gatto non interessa minimamente. Questo è il cosiddetto problema della divisione privilegiata.

A prima vista sembra che questo problema abbia una soluzione ovvia: dobbiamo dividere la funzione d'onda in modo che i diversi rami descrivano situazioni in cui gli osservatori macroscopici come il gatto vedono risultati precisi.

Questo però equivale a reintrodurre la Regola 2, perché dà un ruolo speciale a ciò che vedono gli osservatori macroscopici. Il misterioso motivo per cui gli osservatori macroscopici vedono risultati precisi non viene chiarito. Assegnando un ruolo speciale agli osservatori, inoltre, si rinuncia a ottenere un'interpretazione realistica, che si deve basare su ipotesi riguardo a ciò che è reale in assenza di osservatori.

- a. Si noti che le due affermazioni condizionate, che insieme esprimono il contenuto dello stato correlato INTERMEDIO, non richiedono né implicano che l'atomo sia decaduto, rilasciando un fotone che passa attraverso il rivelatore e lo fa scattare. Ogni volta, potrebbe essere già decaduto oppure non ancora decaduto. Ecco perché parlo del «possibile passaggio del fotone...»
- b. Possiamo pensare alla meccanica quantistica everettiana come alla teoria dell'onda pilota senza particelle. In entrambe le teorie non esiste una Regola 2; tutt'e due rendono universale la Regola 1. Quindi in entrambi i casi la funzione d'onda si ramifica di continuo, creando storie alternative, come quelle in cui restavo a Londra o morivo nel disastro aereo della Swissair al largo di Peggy's Cove. La differenza è

che la teoria dell'onda pilota ha particelle, che seguono soltanto uno dei rami alternativi.

- c. Esiste un'interpretazione operativa di Everett che considera la teoria soltanto come un metodo per produrre insiemi di affermazioni condizionate come quelle descritte poc'anzi, senza però affermare alcunché riguardo a ciò che è reale al di là di questo. Mi sembra un modo coerente di interpretare la tesi di Everett; si veda L. SMOLIN, *On quantum gravity and the many worlds interpretation of quantum mechanics*, in S. CHRISTENSEN e B. S. DEWITT (a cura di), *Quantum Theory of Gravity. Essays in Honor of the Sixtieth Birthday of Bryce S. DeWitt*, Adam Hilger, Bristol 1984.
- d. Nel capitolo seguente vedremo che alcuni esperti sostengono che la divisione richiede un processo macroscopico chiamato decoerenza. Questo processo è molto meno frequente; l'effetto è che il numero «enorme» che compare nella frase si riduce a un numero «molto grande».
- e. Cioè funzioni d'onda di piccola ampiezza.
- f. Per essere più precisi, mentre la *misura* di tutti i rami con dati statistici che non obbediscono alla regola di Born si azzera, quando il numero di eventi tende a infinito il *numero* di quei rami non si annulla.

Capitolo undicesimo

Realismo critico

Coloro che hanno esaminato la versione originaria dell'interpretazione a molti mondi, la versione presentata da Everett e difesa da Wheeler e DeWitt, sono quasi tutti d'accordo sul fatto che non rappresenta un approccio realistico alla teoria quantistica. O si rende speciale la misurazione e si rinuncia al realismo, oppure si devono affrontare i grossi problemi che ho sollevato nel capitolo precedente. I piú importanti sono il problema della divisione privilegiata e la questione di quale sia la parte della teoria che contiene le probabilità, e le relative incertezze, che i ricercatori misurano.

Allora, possiamo salvare o no il progetto di fornire una versione realistica della teoria quantistica, basata soltanto sulla funzione d'onda che si evolve rigorosamente in base alla Regola 1?

In anni recenti sono state offerte soluzioni piuttosto radicali ai due grossi enigmi – il problema della divisione privilegiata e la questione dell'origine delle probabilità. Molti ritengono che il primo sia stato risolto da un'idea chiamata *decoerenza*, che spiegherò poco piú avanti. Le idee sull'origine delle probabilità per la maggior parte sono nate a Oxford da un gruppo di profondi pensatori, concentrato nel dipartimento di filosofia. Il nuovo approccio alle probabilità è stato formulato da David Deutsch e ampiamente studiato e sviluppato dai suoi colleghi di Oxford ¹.

A Oxford esiste da tempo un formidabile gruppo di filosofi della scienza e molti di loro (tra cui Hilary Greaves, Wayne Myrvold, Simon Saunders e David Wallace) ^a si sono concentrati sulla comprensione delle idee di Everett. Insieme a Deutsch e a pochi altri, hanno proposto quella che a volte viene chiamata interpretazione di Oxford della meccanica quantistica ². Queste proposte e gli argomenti offerti a loro sostegno sono al contempo ingegnosi e sottili, ma tali sono anche le obiezioni sollevate da di-

versi fisici e filosofi. Dato l'altissimo livello dell'attenta riflessione che ha portato a questi sviluppi, penso che sia appropriato considerarlo un episodio di realismo critico.

Dopo molte discussioni animate e minuziose, il progetto di capire il significato di una teoria quantistica realistica basata soltanto sulla Regola 1 è ancora in corso. I problemi sono quanto mai intricati ed elusivi e finora gli esperti non hanno raggiunto un accordo sui risultati ottenuti. A complicare ulteriormente le cose, gli autori delle proposte sono in disaccordo tra loro, tanto che i cinque o sei principali ideatori di questa concezione difendono versioni diverse, che differiscono l'una dall'altra in modi sottili ma importanti. Di conseguenza, posso presentare soltanto un'introduzione appena abbozzata delle idee e delle questioni chiave alla base di questa nuova «interpretazione di Oxford».

L'idea di decoerenza parte dall'osservazione che un sistema macroscopico, come un rivelatore o un osservatore, non è mai isolato e vive invece in costante interazione con il suo ambiente. L'ambiente è costituito da un numero enorme di atomi che si muovono qua e là in maniera imprevedibile, il che introduce una grossa dose di casualità nel sistema. Questo elemento casuale influenza i movimenti degli atomi che costituiscono il rivelatore. In parole povere, ciò porta il rivelatore a perdere le sue delicate proprietà quantistiche e a comportarsi come se fosse descritto dalle leggi della fisica classica.

Consideriamo che cosa può imparare un osservatore guardando un rivelatore. Anche l'osservatore è un grosso oggetto composto da un numero enorme di atomi, tutti in contatto con un ambiente casuale. Se esaminiamo il comportamento dettagliato degli atomi che costituiscono il rivelatore e gli osservatori, vediamo il caos, perché il quadro è dominato dai movimenti casuali dei singoli atomi, tanto i nostri quanto quelli del rivelatore. Per vedere un comportamento coerente di qualche tipo, dobbiamo considerare i movimenti collettivi, a una scala grande, di pezzi relativamente grandi del rivelatore e quindi calcolare la media dei movimenti di miriadi di atomi. A emergere sono quantità che misurano grandezze macroscopiche come il colore di un pixel o la posizione della lancetta di un contatore Geiger. Solo queste si comportano in modo affidabile e prevedibile.

Di fatto, queste grandezze macroscopiche si comportano come se le leggi della fisica newtoniana fossero vere. È soltanto quando ci concentriamo su queste che possiamo percepire che è accaduto qualcosa di irreversibile, come la registrazione di un'immagine, in cui ciascun pixel comprende un numero enorme di atomi. In base a questa visione, possiamo dire che ha avuto luogo una misurazione solo quando è accaduto qualcosa di irreversibile.

Decoerenza è il nome che diamo al processo mediante il quale dalle medie del caos casuale della realtà atomica emergono cambiamenti irreversibili. La decoerenza è una caratteristica molto importante della teoria quantistica, essendo il motivo per cui le proprietà macroscopiche di oggetti di grandi dimensioni, come i movimenti irregolari di palloni da calcio, ponti girevoli, razzi spaziali, pianeti e così via sembrano avere valori ben definiti, che obbediscono alle leggi della fisica newtoniana.

La parola «decoerenza» si riferisce al fatto che questi grossi oggetti sembrano aver perduto le proprie proprietà ondulatorie e quindi si comportano come se fossero fatti soltanto di particelle. Secondo la meccanica quantistica tutto, compresi i gatti, i palloni da calcio e i pianeti, ha proprietà ondulatorie e proprietà corpuscolari. Nel caso di questi grossi oggetti, però, le proprietà ondulatorie sono state talmente casualizzate dalle interazioni con un ambiente caotico che nessun esperimento può rilevarle, quindi la metà ondulatoria della loro natura duale è stata resa muta e gli oggetti si comportano come particelle ordinarie.

A volte, però, il sistema può perdere coerenza in più di un modo. Un esempio perfetto è costituito dal gatto di Schrödinger. Il gatto può perdere coerenza e restare nello stato in cui è vivo oppure passare allo stato in cui è morto. A fare la differenza è una variabile quantistica: se l'atomo decade, il gatto perde coerenza e diventa un gatto morto, se l'atomo è eccitato, il gatto perde coerenza e resta vivo. Il rivelatore è quindi una specie di amplificatore, con un filtro che gli permette di registrare soltanto stati in cui l'atomo è certamente eccitato oppure decaduto.

Come ricorderete, l'enigma era questo: che cosa è accaduto al gatto mentre l'atomo era in una sovrapposizione degli stati eccitato e decaduto? La risposta è sempre la stessa (se guardiamo lo stato quantistico microscopicamente): è una sovrapposizione correlata di un atomo eccitato insieme a un gatto vivo e di un atomo decaduto insieme a un gatto morto.

Se però guardiamo soltanto le proprietà macroscopiche lasciando che la decoerenza possa fare il suo lavoro, la casualità trasforma la sovrapposizione in un cambiamento quasi irreversibile. Ora i risultati sono due – il gatto vivo e il gatto morto – ed emergono entrambi! È così, secondo la storia della decoerenza, che il mondo si divide in due.

I pensatori di Oxford sostengono che le ramificazioni e le divisioni della funzione d'onda sono definite dalla decoerenza^b. La divisione avviene in modo da separare risultati diversi che hanno valori diversi di proprietà macroscopiche, come la posizione della lancetta di un contatore Geiger.

La tesi principale è che solo riguardo a sottosistemi che perdono coerenza si può avere la certezza che siano associati a osservatori. Essendo interessati a ciò che vedono gli osservatori, dovremmo concentrarci su quei sottosistemi e buttare via tutti gli altri. Si apre così una via per arrivare a derivare le probabilità confrontando soltanto la verosimiglianza di ciò che verrebbe osservato sui rami che hanno perso coerenza.

Si potrebbe pensare che introducendo nella teoria un concetto di osservatori si indebolisca la sua pretesa di essere realistica. In questo modo, però, il ruolo degli osservatori emerge dalla dinamica della teoria, il che è senza dubbio preferibile rispetto a presumere sin dall'inizio che gli osservatori abbiano un ruolo speciale. Si potrebbe sostenere che le probabilità non sono intrinseche al mondo, ma sono soltanto aspetti di ciò che gli osservatori credono riguardo al mondo. Una descrizione simile potrebbe quindi essere coerente con il realismo perché esiste una caratterizzazione oggettiva di una proprietà che distingue gli osservatori da altri sottosistemi. Gli osservatori sono sottosistemi che perdono coerenza.

La decoerenza risolve il problema della divisione privilegiata perché si verifica soltanto rispetto a certe osservabili, che spesso sono posizioni di oggetti di grandi dimensioni.

Prima di procedere, devo accennare al fatto che, purtroppo, se si fa della decoerenza una parte necessaria dell'interpretazione della teoria, si presenta un problema, che fu fatto notare molto tempo fa da Abner Shimony, il mio docente di filosofia della scienza. È un problema molto semplice da descrivere. La Regola 1 è reversibile nel tempo, quindi ogni cambiamento subito da uno stato in base alla Regola 1 può essere annullato e in effetti lo sarà se aspettiamo abbastanza a lungo. La Regola 2, però, è irreversibile e il

modo in cui introduce le probabilità dei risultati delle misurazioni ha senso soltanto se le misurazioni sono irreversibili e non possono essere annullate. Quindi, come ha sostenuto Shimony, è impossibile che la Regola 2 sia derivabile dalla sola Regola 1.

Come l'ho descritta poc'anzi, la decoerenza è un processo irreversibile in cui la coerenza degli stati, necessaria per definire le sovrapposizioni, si perde nei processi casuali che si verificano nell'ambiente dello strumento di misurazione. Ma com'è possibile che la decoerenza emerga in una teoria basata solo sulla Regola 1, dato che tutti i cambiamenti imposti dalla Regola 1 sono reversibili?

La risposta è che la decoerenza è sempre un concetto approssimativo. La decoerenza completa è impossibile. In effetti, se aspettiamo molto a lungo, la decoerenza si invertirà sempre, perché le informazioni necessarie per definire le sovrapposizioni rientrano nel sistema dall'ambiente.

Ciò è dovuto a un teorema generale, chiamato teorema di ricorrenza di Poincaré³. In certe condizioni, che presumibilmente valgono per sistemi contenenti un sistema atomico più un rivelatore, esiste un intervallo di tempo entro cui lo stato quantistico del sistema tornerà a essere arbitrariamente vicino al suo stato iniziale. Questo intervallo, chiamato tempo di ricorrenza di Poincaré, può essere molto grande, ma è sempre finito. Le condizioni impongono anche che lo spettro di energie sia discreto, il che è senza dubbio ragionevole^c.

La decoerenza è un processo statistico, simile al movimento casuale di atomi che fa aumentare l'entropia, portando un sistema all'equilibrio. Questi processi sembrano irreversibili, ma in realtà sono reversibili, dato che ogni processo governato dalla Regola 1 è reversibile. Ciò è vero sia nella fisica newtoniana sia nella fisica quantistica: entrambe hanno un tempo di ricorrenza. In entrambi i casi la seconda legge della termodinamica, secondo cui l'entropia probabilmente aumenta, può valere soltanto per intervalli di tempo molto minori del tempo di ricorrenza di Poincaré. Se aspettiamo abbastanza a lungo, vedremo altrettanto spesso l'aumento e la diminuzione dell'entropia.

In maniera analoga, si potrebbe cercare di argomentare che, nel corso di intervalli di tempo più brevi, è poco probabile che la decoerenza si inverta, lasciando il posto al processo di ricorrenza.

Ora, fin tanto che siamo interessati soltanto a ciò che accade in intervalli di tempo molto minori di quello necessario per arrivare alla ricoerenza, e vogliamo soltanto una descrizione approssimativa, adatta a scopi pratici, di ciò che accade quando i sistemi atomici interagiscono con corpi di grandi dimensioni, la decoerenza fornisce un'utile descrizione approssimativa di ciò che accade durante una misurazione. Di fatto, la decoerenza è un concetto molto utile quando si analizzano sistemi quantistici reali; per esempio, gran parte del progetto di un computer quantistico è rivolto a contrastare la decoerenza. In linea di principio, però, quella descrizione è incompleta, perché trascurava i processi che, se aspettiamo abbastanza a lungo, subiranno un processo di ricoerenza.

Tuttavia, quando lo stato va incontro a ricoerenza, le misurazioni basate sulla decoerenza vengono annullate. Pertanto le misurazioni descritte dalla Regola 1 non possono essere il risultato della decoerenza, quanto meno come viene descritta in una teoria basata soltanto sulla Regola 1.

Sembra quindi che la decoerenza da sola non possa essere la chiave per capire l'origine delle probabilità nella teoria quantistica di Everett, dato che questa si basa soltanto sulla Regola 1.

Questa discussione chiarisce che la questione dell'origine delle probabilità è fondamentale per comprendere l'interpretazione a molti mondi. La chiave per capire l'approccio di Oxford è la comprensione di che cos'è una probabilità. Si tratta di una questione molto più difficile di quanto sembri. Tutti abbiamo un'idea intuitiva di ciò che significa dire che la probabilità di ottenere testa lanciando in aria una moneta è pari al 50 per cento. Le persone conoscono la differenza tra che cosa devono aspettarsi se le previsioni dicono che la probabilità di pioggia domani è pari al 10 o al 90 per cento, ma se esaminiamo a fondo che cosa intendiamo davvero quando parliamo di probabilità, scopriamo che il concetto diventa sorprendentemente sfuggente.

In parte, la ragione della scarsa chiarezza di questo concetto è che esistono almeno tre diversi tipi, o significati, di probabilità.

L'idea più semplice è che la probabilità sia una misura della nostra convinzione che accada qualcosa. Quando diciamo che c'è una possibilità del 50 per cento di ottenere testa al prossimo lancio della moneta, non è un'affermazione sulla moneta, bensì una descrizione di ciò che crediamo

riguardo al risultato che si otterrà lanciando la moneta. Queste si chiamano *probabilità bayesiane*.

Quando diciamo che la probabilità bayesiana che piova domani è pari allo 0 per cento, è solo un modo per dire che crediamo che non pioverà e, quando diciamo che questa probabilità è pari al 100 per cento, vuol dire che siamo certi che pioverà. Probabilità intermedie come il 20, il 50 o il 70 per cento indicano quanto crediamo che pioverà. In particolare, quando diciamo che qualcosa ha il 50 per cento di probabilità di accadere, in realtà stiamo confessando di non avere idea se accadrà o no.

Le probabilità bayesiane sono chiaramente soggettive. Il modo migliore di valutarle è in funzione del nostro comportamento. Quanto maggiore è la probabilità che piova, tanto più saremo portati a scommettere sulla pioggia, o per lo meno a portare con noi un ombrello.

Molte probabilità con cui abbiamo a che fare nella vita quotidiana si comprendono nel modo migliore così, come pronostici soggettivi. Le previsioni probabilistiche riguardo al mercato azionario o immobiliare sono senza dubbio di questo tipo. Di fatto, la maggior parte delle volte in cui parliamo della probabilità di un evento futuro, formuliamo una dichiarazione soggettiva di convinzione, usando le probabilità bayesiane.

Un secondo tipo di probabilità entra in gioco quando prendiamo nota degli esiti di un evento. Se lanciamo un gran numero di monete e registriamo quante volte viene testa, possiamo definire come probabilità la percentuale di questo risultato in quella sequenza di lanci. Questa è la *probabilità frequentistica*.

Molte statistiche sportive sono probabilità di questo tipo; nel baseball, per esempio, la media di battuta indica la percentuale di volte in cui un battitore ha raggiunto la base quando era in battuta.

A volte, anche le previsioni meteorologiche sono di questo tipo. Quando al mattino il sito del National Weather Service ci dice che la probabilità che piova nel pomeriggio è pari al 70 per cento, ciò che intende dire è che, in base al suo enorme archivio di dati, su 100 giorni in cui le condizioni erano come quelle di questa mattina in 70 è piovuto nel pomeriggio.

Ovviamente, queste probabilità non sono precise. Il problema è che, finché il numero dei giorni osservati è finito, le frequenze continueranno a variare. Tuttavia, quanto maggiore è il numero dei giorni di cui il servizio meteorologico ha registrato i dati tanto più attendibile sarà la previsione.

Se lanciamo in aria una moneta 100 volte, possiamo domandarci quante volte verrà testa. Questa percentuale, detta frequenza relativa, tenderà a essere pari a 50 su 100 e non ci stupiremo se per molte sequenze di lanci sarà pari a 48 o 53 su 100.

Per ogni numero finito di lanci, quindi, è raro che il numero di volte in cui viene testa sia esattamente la metà. L'idea chiave è che se fossimo in grado di fare un numero infinito di prove, le percentuali dei diversi risultati tenderebbero a certi valori precisi. Ciò definisce il concetto di probabilità come frequenza relativa.

Il problema è che nel mondo reale possiamo fare solo un numero finito di lanci. Se questo numero è finito, vi sono buone possibilità che venga testa un numero di volte diverso dalla metà esatta del numero di lanci. Una domanda a cui è sorprendentemente difficile rispondere è: come facciamo a mostrare che una previsione probabilistica è sbagliata, dato che possiamo fare solo un numero finito di prove? In effetti, spesso tutto ciò che possiamo dire è che la previsione è improbabile. Affinché questa affermazione sia sensata, però, dobbiamo definire che cosa intendiamo per «improbabile». Non possiamo presumere di sapere che cosa significa, dato che stiamo cercando di definirlo.

Supponiamo di lanciare in aria una moneta un milione di volte e ottenere testa 900 000 volte. È possibile che sia un caso rarissimo e che la nostra moneta sia normale, tuttavia possiamo concludere che è molto probabile – anche se non è certo – che la moneta sia truccata.

Per definizione, siamo noi a scegliere le nostre probabilità soggettive, però possiamo chiedere che ci sia una relazione tra le probabilità bayesiane soggettive che scegliamo e le frequenze oggettive ricavate dai dati del passato. Finché non abbiamo più informazioni, l'opzione migliore è attenersi alle frequenze basate sui dati disponibili. Qui per «opzione migliore» intendiamo la scelta che il più delle volte servirà i nostri interessi. Nel linguaggio economico, potremmo dire che questa è la «scelta più razionale».

Possiamo esprimere il concetto in questo modo:

Nelle situazioni in cui abbiamo una conoscenza limitata, la cosa più razionale è scegliere di allineare i nostri pronostici soggettivi alle frequenze osservate nei dati storici.

Questa è una versione del «principio principale» del filosofo David Lewis. Alla base di questo principio vi è l'assunto che, a parità di ogni altra cosa, il futuro somiglierà al passato, o perlomeno che, avendo informazioni incomplete, sia razionale scommettere sul fatto che il futuro somiglierà al passato. A volte questa scommessa vi porrà dalla parte sbagliata della storia, ma è comunque la scelta piú sicura che possiate fare ^d.

Supponiamo ora di porci il problema diverso di spiegare le frequenze osservate nei dati relativi a un particolare esperimento. Supponiamo che la frequenza osservata sia vicina al 50 per cento. Sarebbe naturale cercare di spiegare quel risultato applicando le leggi della fisica al particolare esperimento.

Una spiegazione di questo tipo potrebbe indicare le ragioni per cui testa e croce sarebbero risultati equiprobabili, tra cui l'ipotesi che la moneta non sia truccata, oltre a varie ipotesi sui lanci, sul comportamento della moneta quando colpisce una superficie, e cosí via. La nostra spiegazione potrebbe anche fare riferimento a risultati di altri esperimenti, che rafforzano la nostra credenza nella teoria.

Disponendo di una simile spiegazione, la useremmo per prevedere che un unico lancio ha la stessa possibilità di avere come risultato testa o croce. Questa previsione è una credenza e quindi una probabilità bayesiana soggettiva. Però si riferisce a un unico lancio. Questo lancio non fa necessariamente parte di un gran numero di prove, quindi non sono coinvolte frequenze relative. È quindi sensato dire che la particolare moneta ha, nel suo contesto, una *propensione* fisica a mostrare testa dopo un singolo lancio il 50 per cento delle volte.

La propensione è una proprietà intrinseca che la moneta ha in conseguenza delle leggi della fisica. Può essere espressa come una probabilità, ma non è una credenza. Piuttosto, essa giustifica una credenza. È un aspetto del mondo riguardo al quale possiamo avere una credenza. Come si è detto, una propensione non è nemmeno una frequenza, dato che è una proprietà della moneta, che vale in ogni singolo lancio. La propensione sembrerebbe quindi essere un terzo tipo di probabilità, diverso sia dalle credenze sia dalle frequenze.

Si noti che a differenza degli altri due tipi di probabilità, le propensioni sono conseguenze di teorie e ipotesi sulla natura. Però hanno relazioni di-

stinte con gli altri due tipi di probabilità. Possiamo avere credenze riguardo alle propensioni. A loro volta, le propensioni possono spiegare le frequenze relative e giustificare le credenze.

Nella meccanica quantistica ordinaria, le probabilità emergono dalla Regola 2, in particolare dalla regola di Born, che collega la probabilità di vedere una particella in una data posizione al quadrato dell'ampiezza dell'onda in quella posizione. Si presume che questa probabilità sia una proprietà intrinseca dello stato quantistico; è quindi una *probabilità intesa come propensione*. La meccanica quantistica afferma che non esiste una spiegazione più profonda per quella probabilità e per l'incertezza che ne deriva; è una proprietà intrinseca dello stato quantistico.

Quando Everett eliminò la Regola 2, il risultato fu una teoria senza alcun concetto di probabilità, intrinseca o di altro genere. Come ho descritto, provò senza successo a sostituirlo con un concetto frequentistico di probabilità.

Il problema che si trovarono ad affrontare i proponenti della formulazione everettiana della meccanica quantistica è che esistono rami in cui gli osservatori constatano la validità della regola di Born che collega le ampiezze alle frequenze e rami in cui gli osservatori vedono che la regola di Born è violata. Chiamiamoli rami benevoli e rami malevoli. I secondi possono avere funzioni d'onda più piccole dei primi, ma non possiamo usare questo fatto per sostenere che sono meno probabili, perché così facendo si imporrebbe alla teoria la relazione tra la dimensione della funzione d'onda e la probabilità. Ma questo è proprio ciò che i proponenti della formulazione di Everett cercano di derivare dalla Regola 1; presumerlo vuol dire far rientrare la Regola 2 dalla finestra.

La teoria di Everett è un'ipotesi sulla natura della realtà. Postula che tutto ciò che esiste è una funzione d'onda che si evolve in maniera deterministica. Dalla prospettiva immaginaria di un osservatore divino all'esterno dell'universo, le probabilità non esistono, perché la teoria è deterministica. Esistono tutti i rami della funzione d'onda; tutti sono altrettanto reali.

La teoria di Everett afferma che ciascuno di noi vive molte vite parallele, ciascuna definita da un ramo che ha perso coerenza. In base alla teoria, inoltre, ciascuno di questi rami esiste, in maniera certa. Se questa teoria è

corretta, quindi, dato che non esiste una Regola 2, non esistono probabilità soggettive. Chiamiamola ipotesi di Everett.

Noi, però, non siamo divini; siamo osservatori che vivono nell'universo e, per ipotesi, facciamo parte del mondo descritto dalla funzione d'onda, perciò quella descrizione esterna non ha rilevanza né per noi né per le nostre osservazioni.

Siamo quindi di fronte a un enigma. Dove troviamo, in questo mondo, le probabilità che la meccanica quantistica ordinaria sostiene di prevedere, che vanno confrontate con le frequenze rilevate dai fisici sperimentali? In mancanza di una Regola 2, queste probabilità non fanno parte del mondo come sarebbe in nostra assenza. Le frequenze sono conteggi di risultati precisi, ma queste cose non sono fatti unici né presenti soltanto nella teoria quantistica everettiana perché, dato ogni possibile conteggio di risultati di un esperimento ripetuto, esistono rami che hanno quel conteggio. In certi rami quei conteggi sono in accordo con le previsioni della meccanica quantistica (con la Regola 2) e in altri rami non lo sono. Non possiamo dire che i primi siano più probabili dei secondi, perché nella meccanica quantistica everettiana non esistono probabilità oggettive. Non possiamo nemmeno dire che i primi siano più numerosi dei secondi, perché nei casi realistici gli uni e gli altri saranno in numero infinito.

Avete letto bene: la meccanica quantistica everettiana prevede che un numero infinito di osservatori otterrà risultati sperimentali in contrasto con le previsioni della meccanica quantistica! Questo è il destino del numero infinito di osservatori la cui sfortuna li fa finire in rami malevoli. È altrettanto vero che un numero infinito di osservatori su rami benevoli vede risultati sperimentali compatibili con le previsioni della teoria quantistica. Questa però è una magra consolazione, dato che un ramo benevolo può diventare malevolo in qualsiasi momento.

Ciò che a quanto pare non possiamo dire, nella meccanica quantistica everettiana, è che la teoria quantistica prevede probabilità oggettive, che sono caratteristiche intrinseche della natura che esistono in nostra assenza. Inoltre, a meno di non trovare un altro modo per introdurre le probabilità, non possiamo dire che la teoria può essere verificata effettuando l'esperimento e contando i diversi risultati, per il motivo che il fallimento di qualsiasi test simile può essere respinto supponendo che ci troviamo su un ramo malevolo – e questi rami non sono meno probabili né meno nu-

merosi dei rami benevoli che confermano le previsioni probabilistiche della meccanica quantistica.

Per affrontare questa situazione, David Deutsch ha presentato una proposta interessante, suggerendo di domandarsi non se la teoria di Everett sia vera o falsa, ma su che cosa dovremmo scommettere noi, in quanto osservatori interni all'universo, se presumessimo che è vera. In particolare, la cosa piú importante su cui dobbiamo scommettere, presumendo che la storia di Everett corrisponda al vero, è se il ramo in cui viviamo è benevolo o malevolo. Qualunque altra scommessa possibile dipende da quell'unica scommessa. Se siamo su un ramo benevolo, vinceremo tutte le scommesse che facciamo basandoci sulla regola di Born. Se non siamo cosí fortunati, è impossibile scommettere, perché può succedere letteralmente qualsiasi cosa.

Non è una scommessa sull'universo, dato che l'universo contiene senz'altro osservatori che vivono su entrambi i tipi di rami. È invece una scommessa su dove ci troviamo noi nell'universo. La risposta giusta a questa domanda non esiste: se Everett ha ragione, infatti, esistono entrambi i tipi di osservatori e alcuni di noi saranno di un tipo e alcuni dell'altro.

Ciò nonostante, Deutsch suggerisce che sia piú razionale scommettere che siamo su un ramo benevolo. L'argomento è tecnico e si serve di una branca della teoria della probabilità chiamata *teoria delle decisioni*. Il risultato di Deutsch assume alcuni assiomi della teoria delle decisioni, che specificano che cosa significa decidere in modo razionale.

Alcuni esperti hanno criticato questo approccio, altri lo difendono e lo sviluppano, mentre altri ancora presentano argomenti alternativi per arrivare alla stessa conclusione. Poiché non sono uno specialista in questo campo, non mi spingerò a ipotizzare quali esperti abbiano ragione.

Si noti però che cosa non fa – e non potrebbe fare – un argomento di questo genere: non offre alcuna prova della verità dell'ipotesi di Everett, dato che Deutsch e i suoi colleghi partono dal presupposto che sia corretta. Procedendo, inoltre, assumono gli assiomi della teoria delle decisioni. Se non li si accetta, non si dimostra che le probabilità sono collegate alla dimensione della funzione d'onda. Tutto ciò che l'argomento potrebbe dimostrare è che, se si assumono gli assiomi della teoria delle decisioni, è coerente con l'ipotesi di Everett scommettere, e prendere altri tipi di decisioni, come se la regola di Born fosse corretta.

Va osservato che, anche dato l'assunto che l'ipotesi di Everett sia vera, gli osservatori modellati come facenti parte di un mondo di Everett non sanno di vivere in un mondo di Everett. Non si vede come potrebbero saperlo e, se nondimeno lo sapessero, non sarebbero modelli di noi esseri umani, in quanto osservatori in un universo il cui insieme completo di principi è ancora da scoprire. Per loro come per noi, l'ipotesi di Everett deve essere una delle molte ipotesi contrastanti sulla natura delle esseribili dell'universo quantistico.

Consideriamo ora quale sarebbe la nostra situazione di osservatori in un universo everettiano. I casi sono due, a seconda del tipo di ramo in cui viviamo. Supponiamo di essere fortunati e di vivere su un ramo benevolo, quindi le nostre scommesse basate sulla regola di Born sono vincenti. Allora, per definizione, non facciamo né meglio né peggio di coloro che credono in altre formulazioni e interpretazioni della meccanica quantistica, per ciò scommettono anch'essi basandosi sulla regola di Born. Ciò che manca agli altri approcci è una giustificazione basata sulla teoria delle decisioni. D'altra parte, la teoria dell'onda pilota e i modelli di collasso non hanno bisogno di una simile giustificazione, dal momento che si basano su concetti completamente oggettivi di probabilità emergenti dalla nostra ignoranza dei dettagli del singolo esperimento.

A causa delle condizioni poste, per cui non può affrontare ciò che è vero, ma può solo offrire consigli su come scommettere nel modo migliore, l'argomento di Deutsch implica che per osservatori in un mondo everettiano non credere in Everett non è più razionale rispetto a credere a Bohr, a de Broglie, a Bohm o a qualsiasi altra interpretazione. Pertanto nel caso migliore, anche presumendo che Everett abbia ragione, gli osservatori in un mondo everettiano non possono raccogliere prove per credere alle ipotesi di Everett e non a ipotesi alternative.

Che cosa possiamo dire delle nostre versioni che vivono in rami malevoli? Se scommettono basandosi sulla regola di Born perdono, dato che le frequenze che misurano non sono in accordo con quelle previste dalla regola. Allora, come appare la situazione dal punto di vista di questi sfortunati osservatori? Ricordate che per loro l'usuale formulazione della meccanica quantistica (come viene presentata nel libro di von Neumann, poniamo) deve essere un'ipotesi e quella di Everett è un'altra ipotesi, diversa e contrastante.

Gli osservatori in un ramo malevolo concludono che la prima ipotesi è semplicemente falsa, perché la regola di Born non prevede i risultati che osservano. La seconda ipotesi, quella di Everett, non viene confutata, perché prevede che alcuni osservatori vedano violata la regola di Born. La situazione è ancora peggiore, però.

Dato qualsiasi risultato di misurazioni ripetute, la storia di Everett prevede che alcuni osservatori, che vivono in un ramo malevolo, vedranno esattamente quei risultati. Quindi l'ipotesi di Everett non può essere confutata verificando qualche previsione probabilistica basata sulla regola di Born, perché non esistono risultati di misurazioni ripetute che non siano compatibili con un universo everettiano.

Sembra quindi che la mole di previsioni sperimentali che potrebbero confutare la meccanica quantistica ordinaria – quelle che confrontano le probabilità teoriche con le frequenze osservate sperimentalmente – non potrebbe valere come confutazione della meccanica quantistica everettiana. Pur essendo comunque falsificabile (dato che formula altri tipi di previsioni in cui le probabilità non sono coinvolte), la meccanica quantistica everettiana sembra essere molto meno soggetta a confutazione della meccanica quantistica ordinaria.

Questa è di per sé una buona ragione per preferire un approccio alternativo. Una teoria che è meno falsificabile è per definizione meno esplicativa.

D'altro canto, se accettiamo gli assunti di Deutsch e degli altri oxfordiani, dobbiamo ignorare il punto di vista dei rami malevoli, perché quei rami sono molto improbabili. In questo caso, alcuni lavori mostrano che se si trascurano i rami malevoli la teoria è verificabile.

Gli oxfordiani sottolineano che, se si presume che gli assiomi della teoria delle decisioni siano corretti, si è autorizzati a dedurre che è razionale argomentare come se la dimensione della funzione d'onda fosse collegata alle probabilità. Ne segue che è razionale ragionare come se avessimo una probabilità molto piccola di finire su un ramo malevolo, quindi quella possibilità può essere ignorata.

Stando così le cose, potrebbero anche sostenere che qualcosa di simile è sempre vero quando si ragiona probabilisticamente. Potremmo sempre essere tanto sfortunati da lanciare una moneta mille volte e ottenere sempre

testa. La differenza, però, è che in una vita finita, in un unico mondo finito, possiamo avere la certezza che eventi simili non si verificano quasi mai. In netto contrasto, la meccanica quantistica everettiana afferma invece che i corrispondenti rami malevoli non solo esistono, ma sono altrettanto numerosi dei rami benevoli. Anche se l'argomento di Deutsch parla di probabilità soggettive ricavate dagli osservatori nel mondo everettiano, resta il fatto che nel suo complesso la teoria è deterministica e che ciascuno dei rami esiste certamente.

Sembra, almeno da quanto sono riuscito a capire, che i tentativi di Deutsch e di altri^e di salvare il progetto di capire l'ipotesi di Everett per mezzo soltanto delle probabilità soggettive degli osservatori in un universo everettiano, introdotte attraverso la teoria delle decisioni, non riescano pienamente. Gli argomenti basati soltanto su concetti soggettivi di probabilità non riescono a spiegare perché possiamo tralasciare i rami malevoli – dato che, se Everett ha ragione, questi rami sono oggettivamente reali.

Ci vuole qualcosa di nuovo. Per salvare la situazione, Simon Saunders ha proposto di tagliare il nodo gordiano postulando che le dimensioni dei rami forniscano le probabilità oggettive (anziché soggettive) che un osservatore si ritrovi su un ramo che ha perso coerenza, in accordo con la regola di Born. A sostegno della proposta, Saunders osserva che in effetti le dimensioni dei rami hanno molte delle proprietà che vorremmo avessero le probabilità oggettive. La sua tesi è che hanno queste proprietà in conseguenza della Regola 1 – pertanto si tratta di una scoperta di una conseguenza delle leggi di evoluzione degli stati quantistici. Non è un ulteriore postulato, come è la Regola 2. Se la sua proposta venisse accolta, sarebbe una genuina derivazione della Regola 2 e della regola di Born dalla teoria basata soltanto sulla Regola 1.

In questo modo si evitano tutti i problemi posti dai rami malevoli, dato che, se Saunders ha ragione, non è molto probabile ritrovarsi in uno di questi rami. Saunders, però, sostiene che si otterrebbe dell'altro: sarebbe una genuina derivazione di come emergono le probabilità oggettive in natura e spiegherebbe perché dobbiamo allineare i nostri pronostici soggettivi alle probabilità oggettive.

Da quanto ho capito, oggi gli esperti di Oxford hanno opinioni diverse riguardo all'opportunità di accettare la proposta di Saunders. Uno dei problemi è che le dimensioni dei rami hanno alcune ma non tutte le proprietà delle probabilità oggettive. La discussione, quindi, si deve interrompere qui; dopo più di sessant'anni di studio, non si è ancora stabilito se sia possibile dare un senso alla sorprendente idea di Everett.

Riconoscendo che il progetto di capire l'ipotesi di Everett è ancora in corso, posso offrire una serie di osservazioni.

In base a tutto ciò che ho capito, l'ipotesi di Everett, se fosse accolta, spiegherebbe davvero troppo e al contempo troppo poco. Troppo, perché dobbiamo credere che l'intero mondo che abbiamo sempre considerato reale sia soltanto un ramo all'interno di una realtà molto più grande. Troppo poco, perché molto resta fuori da questo quadro della realtà. Ciò che caratterizza più di ogni altra cosa la realtà che conosciamo è il fatto che ogni processo che osserviamo ha un determinato risultato. L'aspetto più notevole della teoria quantistica è la sua capacità di formulare, usando la Regola 2, previsioni precise delle frequenze osservate di questi risultati. Ciò che voglio dal realismo è una spiegazione dettagliata del modo in cui queste probabilità emergono come frequenze relative, mediate su un insieme di ripetizioni dell'esperimento.

La realtà che cerchiamo noi realisti è il mondo così com'è, o sarebbe, in nostra assenza. Le probabilità soggettive che guidano i decisori nelle loro scommesse non fanno parte di quel mondo, poiché non esisterebbero in nostra assenza. La questione non è se i decisori siano reali, poiché noi siamo certamente reali. Non si tratta nemmeno di capire se possiamo cercare, qualora ci interessasse, una descrizione scientifica di che cosa costituisce un processo di decisione razionale. La questione è invece se possiamo realizzare l'ambizione della fisica di descrivere la luce e gli atomi in un modo completamente indipendente dalla nostra esistenza.

Desidero sottolineare che non si è ancora stabilito se l'approccio di Oxford riesca, alle condizioni poste dai suoi stessi autori, a comprendere l'interpretazione a molti mondi. È ancora possibile che si arrivi a dimostrare che l'ipotesi di Everett è incoerente. Oppure si potrebbe scoprire che è l'unico approccio realistico alla meccanica quantistica, in cui è sufficiente la Regola 1 per formulare la teoria. Secondo me, entrambi i risultati non

farebbero altro che rafforzare le ragioni per cui abbiamo bisogno di una nuova teoria.

Quando le verifiche sperimentali delle teorie falliscono, dobbiamo comunque decidere a quale teoria lavorare. Come ha sottolineato un certo numero di filosofi e di storici della scienza, prima di disporre di prove definitive, non si può fare a meno di introdurre fattori che possono sembrare non scientifici quando si valuta quale programma di ricerca e quale teoria meritino il nostro tempo e la nostra attenzione. È particolarmente vero perché in parte si tratta di decisioni individuali e, quando i criteri empirici non sono ancora decisivi, è nell'interesse dell'intera comunità scientifica incoraggiare la più ampia varietà di approcci compatibili con le prove a disposizione. Come spiega Paul Feyerabend in *Contro il metodo*, è la competizione tra punti di vista e programmi di ricerca diversi a guidare il progresso della scienza, specie nei periodi critici in cui le prove disponibili non sono sufficienti per stabilire quale approccio finirà per produrre le spiegazioni migliori.

Valutare un programma di ricerca sulla base di fattori non empirici in parte è una questione di gusti e opinioni personali^f. Dopo aver compiuto molti sforzi per comprendere il pensiero dei suoi proponenti, descriverò quella che mi sembra essere la situazione del programma di Everett. Mi aspetto, anzi sono certo, che altri che hanno riflettuto a fondo sull'argomento non siano d'accordo con me. Non ho paura di confessare che per me nessuna questione legata ai fondamenti quantistici è stata più impegnativa e più dolorosa della questione di Everett, rispetto alla quale mi trovo in disaccordo con amici e colleghi per i quali nel corso degli anni ho imparato ad avere grande rispetto.

Sappiamo che la forma originaria dell'interpretazione a molti mondi non funziona come approccio realistico perché presenta due grossi problemi, che sono il problema della divisione privilegiata e il problema che la teoria è deterministica e non ha probabilità. Dopo notevoli sforzi di sviluppare una versione più sofisticata basata sulla decoerenza e sulle probabilità soggettive, gli esperti continuano a non essere d'accordo su varie questioni tecniche. Anche se raggiungessero un accordo, tuttavia, ciò che verrebbe stabilito è che gli assiomi della teoria delle decisioni richiedono che

gli osservatori in un mondo di Everett scommettano come se la regola di Born fosse corretta. Questa non è comunque una ragione per credere che viviamo in un universo everettiano. Non sono inoltre a conoscenza di argomenti di natura empirica che ci impongano di preferire l'approccio di Everett ad altri. Benché alcuni sostengano provocatoriamente il contrario, non esistono risultati sperimentali che non si possano spiegare almeno altrettanto bene per mezzo degli altri approcci realistici. Chi sostiene che solo Everett può spiegare fenomeni come l'accelerazione della computazione quantistica è smentito dal fatto che i programmi realistici alternativi, come la teoria dell'onda pilota, forniscono resoconti di questi esperimenti che sono almeno altrettanto esplicativi.

Uno degli argomenti a favore di Everett parte dall'affermazione che esistono solo tre formulazioni realistiche della teoria quantistica e che le altre due, la teoria dell'onda pilota e la teoria del collasso, hanno punti di contrasto con la relatività e perciò hanno difficoltà a incorporare la teoria quantistica dei campi. Questo argomento quindi implica che l'ipotesi di Everett, supponendo di riuscire a capirla, deve essere corretta. Non sono d'accordo e ne traggio una forte motivazione a cercare di inventare altri approcci realistici, come descriverò nei capitoli conclusivi.

L'argomento scientifico si conclude qui. Consideriamo ora i fattori non empirici. Il filosofo Imre Lakatos raccomandava di investire in programmi di ricerca progressivi, intendendo con ciò programmi in rapido sviluppo e potenzialmente capaci di portare a una scoperta decisiva. Un programma di ricerca progressivo è aperto a sorprese e sviluppi futuri, in contrasto con i programmi che partono dal presupposto che i principî e i fenomeni fondamentali siano stati compresi. In relazione ai problemi dei fondamenti quantistici i criteri progressivi fanno preferire gli approcci realistici agli approcci antirealistici, dal momento che i secondi ci offrono soltanto la possibilità di sviluppare nuovi modi di parlare di fenomeni quantistici che presumono già conosciuti, mentre i primi capiscono che la meccanica quantistica è incompleta e perciò mirano a scoprire nuovi fenomeni e nuovi principî che permettano di inquadrali.

Nell'ambito degli approcci realistici, credo che si possa sostenere che l'ipotesi di Everett è la meno progressiva – benché esistano anche argomenti a favore della tesi contraria. Lo sviluppo della meccanica quantistica everettiana ha richiesto un impegno enorme, in gran parte di natura tecni-

ca e richiedente un'estrema abilità, ma la maggior parte di tutto questo lavoro è stata necessaria per affrontare problemi che emergono soltanto nell'interpretazione a molti mondi e non affliggono gli altri approcci. Potrei suggerire che il programma di Everett è, tra gli approcci realistici, il meno aperto alla possibilità che future scoperte ci portino a modificare i principi e il formalismo matematico della meccanica quantistica.

D'altro canto, va sottolineato che la teoria di Everett ha stimolato una grossa mole di lavoro sulla decoerenza, che era importante in generale per la comprensione della fisica quantistica. Inoltre ha ispirato, e continua a provocare, molti progressi nel settore della computazione quantistica. L'interpretazione a molti mondi ha avuto un ruolo nel lavoro pionieristico di David Deutsch. Tuttavia dobbiamo anche riconoscere alla teoria dell'onda pilota e ai modelli di collasso il merito di aver stimolato alcune proposte sperimentali, per esempio nel settore della fisica del non equilibrio nell'universo primordiale. Cercando di stabilire quale sia l'approccio realistico più progressivo, scopriamo quindi che sono tutti più o meno sullo stesso piano.

Un aspetto strano dell'approccio di Oxford è che, sebbene del mondo della nostra esperienza non dica nulla che già non sapessimo, o che non avremmo potuto dedurre in altre versioni della teoria quantistica, ha molto da dire su tutti i mondi di cui non facciamo e non possiamo fare esperienza e in particolare sulle nostre copie quasi identiche che li popolano. Dato che presumibilmente sono vive e coscienti proprio come noi, mi domando se dovremmo – tutti o solo chi crede abbastanza in Everett da considerarla una possibilità concreta – preoccuparci delle nostre copie e se abbiamo qualche responsabilità nei loro confronti.

Ammetto che indagare sulla qualità della vita delle nostre copie in altri rami può sembrare quasi un passatempo accademico, ma una delle cose che noi accademici siamo addestrati a fare è capire le conseguenze logiche di ipotesi e assunti. La conseguenza più provocatoria e, per me, sgradevole dell'ipotesi di Everett è che dobbiamo credere che ognuno di noi abbia un numero infinito di copie, ciascuna viva e cosciente esattamente come noi. Fa pensare alla fantascienza più che alla scienza, ma sembra proprio che sia una conseguenza diretta dell'ipotesi di Everett. Poiché si tratta di scienza e non di fede, non abbiamo la possibilità di dare un'interpretazione «libera»

all'ipotesi di Everett, scegliendo di credere in certi aspetti, come l'esistenza di una funzione d'onda dell'universo, e ignorarne altri.

Mi sembra quindi che Everett sollevi due complicati problemi etici. In primo luogo, condanna un numero enorme di esseri viventi e coscienti a sofferenze che i nostri sforzi non possono mitigare. Oltre a ciò, temo che il fatto che molti dei nostri scienziati piú esperti e di maggior talento credano che noi si viva in quell'universo infelice a lungo andare sia contrario all'interesse pubblico perché, cancellando la distinzione tra possibilità e fatti reali, riduce la motivazione a lavorare per migliorare il mondo.

Non potremmo commentare nello stesso modo l'aumento di entropia imposto dalla seconda legge della termodinamica, che in definitiva è la causa di morte della maggior parte delle creature viventi? La differenza è che sappiamo che quella legge è vera. Non possiamo scegliere se credere o no alla seconda legge della termodinamica, mentre esistono formulazioni alternative della teoria quantistica che non ci impongono l'esistenza di copie. Inoltre, è del tutto legittimo criticare gli scienziati e i filosofi che hanno tratto conclusioni ingiustificatamente pessimistiche sulla base di un quadro incompleto che trascurava gli effetti positivi dell'autoorganizzazione in sistemi lontani dall'equilibrio.

Al concetto di osservatori che «vivono» in un ramo malevolo ci si può opporre per il fatto che nessuna parte della biochimica da cui dipende la vita funzionerebbe bene in un mondo in cui la regola di Born fosse regolarmente violata. Per essere piú precisi, potremmo valutare i rami malevoli in base alla percentuale di eventi in cui la regola di Born non viene rispettata. Potremmo quindi catalogare i rami in base alla gravità di queste violazioni. Vivere in un ramo moderatamente malevolo sarebbe come essere esposti a una piccola dose di radiazione ionizzante, con conseguenze simili di peggioramento dello stato di salute.

Riguardo alla salute vi sarebbero differenze anche tra i rami benevoli. Domani un raggio gamma colpirà un filamento del mio DNA e una delle conseguenze sarà la divisione di tutti noi e del nostro mondo in un mucchio di mondi in decoerenza. A causa di quell'evento, alcune delle mie copie svilupperanno un tumore e altre no. Esistono versioni di me stesso in entrambi gli insiemi, perciò mi interessano le une e le altre. La versione estrema di questo argomento suggerisce che, in un futuro lontano, alcune

mie copie che avranno avuto l'enorme fortuna di schivare ogni pallottola e sopravvivere a ogni tumore saranno ancora vive.

Mi sembra che l'interpretazione a molti mondi ponga una grande sfida al nostro pensiero morale per il fatto che cancella la distinzione tra il possibile e il reale. Per me, la ragione per lottare per rendere migliore il mondo è che possiamo sperare di rendere il futuro reale migliore dei possibili futuri che ci erano stati dati in sorte. Se ogni situazione che ci siamo impegnati a eliminare – che si tratti della fame, della malattia o della tirannia – fosse reale da qualche altra parte nella funzione d'onda, i nostri sforzi non porterebbero a un miglioramento generale. Problemi come la guerra nucleare e il cambiamento climatico sono meno urgenti se esistono molteplici versioni della Terra e la specie umana ha più di una chance di sistemare le cose.

L'esistenza di tutte queste copie di noi stessi mi sembra quindi porre un problema di natura morale ed etica. Se, indipendentemente dalle scelte che faccio nella vita, ci sarà una mia versione che farà la scelta opposta, perché è importante che cosa scelgo? Il multiverso conterrà un ramo per ogni alternativa che avrei potuto scegliere. Esistono rami in cui divento malvagio come Stalin o Hitler e rami in cui sono considerato un successore di Gandhi. Potrei anche essere egoista e fare le scelte che vanno a mio vantaggio, considerando che a prescindere da che cosa sceglierò la scelta gentile e generosa sarà fatta da un numero infinito di copie che vivono in un numero infinito di altri rami.

Mi sembra che sia un problema etico dato che il semplice fatto di credere nell'esistenza di tutte queste copie fa diminuire il mio senso di responsabilità morale.

Un mio caro amico che lavora alla teoria quantistica everettiana sosterebbe che, ciò nonostante, il mondo potrebbe essere fatto in questo modo. Il nostro compito è cercare di capire com'è il mondo e non sta a noi imporre le nostre simpatie e antipatie. La mia risposta è che, finché non ci sarà un argomento decisivo per preferire Everett, sono libero di scommettere su un altro approccio. Gli altri sono liberi di fare diversamente, ma io scelgo di investire il mio tempo nello sviluppo di cosmologie che ci ispirano a cercare nuove particelle, nuovi fenomeni e una nuova fisica, piuttosto che nella contemplazione accademica delle vite di copie di noi stessi.

Aggiungerei inoltre, non ritenendo probabile che l'ipotesi di Everett o qualcosa di simile si riveli corretta, che il rischio di danno è limitato se al-

cuni filosofi brillanti scelgono di impegnarsi a valutare le conseguenze di un'ipotesi davvero sorprendente e difficile da capire. (Qualora l'idea finisse per influenzare lo *Zeitgeist*, sarebbe qualcos'altro di cui preoccuparsi). Anche se è sbagliata, è un'idea che prima o poi probabilmente sarebbe venuta fuori e quei filosofi hanno il genere giusto di mente analitica abile e addestrata in modo rigoroso che è adatta ad affrontare questo problema, a differenza chiaramente dalla mia. Speriamo quindi che riescano infine a risolvere la questione e a stabilire se una teoria realistica basata solo sulla Regola 1 possa o no avere senso.

Di recente, l'eminente fisico teorico delle particelle Steven Weinberg ha espresso la sua opinione riguardo al fallimento degli sforzi di dedurre le probabilità dalla meccanica quantistica.

Vi è un altro aspetto insoddisfacente dell'approccio realistico [dei molti mondi], al di là delle nostre meschine preferenze [per esempio, «non gradire» l'idea di avere copie]. In questo approccio, la funzione d'onda del multiverso si evolve deterministicamente. Possiamo ancora parlare di probabilità come frazioni di tempo in cui si trovano i vari risultati possibili quando si effettuano misurazioni molte volte in una qualsiasi storia; tuttavia le regole che governano quali probabilità si osservano dovrebbero seguire dall'evoluzione deterministica dell'intero multiverso [...]. Diversi tentativi basati sull'approccio realistico sono quasi arrivati a dedurre regole come la regola di Born [per le probabilità] che sono note per funzionare bene sperimentalmente, ma credo senza ottenere un successo definitivo ⁴.

Vi è un'ultima morale da trarre dalla storia della meccanica quantistica everettiana. Alcuni dei suoi proponenti sostengono che la meccanica quantistica everettiana è la meccanica quantistica e che ogni altra cosa è una sua modifica. Molto semplicemente, però, non è vero. La meccanica quantistica dei libri di testo normali – con ciò intendo la teoria insegnata nei libri di testo classici (di Dirac, Bohm, Baym, Shankar, Schiff ecc.) e quindi la teoria usata comunemente dai fisici reali – si basa sulla Regola 1 e sulla Regola 2. Quella teoria non ha un'interpretazione realistica.

Pertanto il realismo, in qualsiasi versione, ha un prezzo. La questione è soltanto quale prezzo dobbiamo pagare per avere una nuova teoria che sia perfettamente sensata e descriva la natura in modo corretto e completo.

- a. In seguito, Wallace e Myrvold si sono trasferiti altrove; nel momento in cui scrivo (2018) Deutsch, Greaves e Saunders sono ancora a Oxford.
- b. L'idea che sia la decoerenza a definire i rami nell'interpretazione a molti mondi era stata proposta in precedenza da altri, tra cui Heinz-Dieter Zeh, Wojciech Zurek, Murray Gell-Mann e James Hartle.
- c. Di fatto, il principio olografico (che è definito alle pp. 213-14), richiede che qualunque sistema che possa trovare posto in un contenitore con pareti di area finita ha un numero finito di stati. Ciò è certamente vero per ogni sistema del tipo che stiamo discutendo – un sistema atomico che interagisce con uno strumento di misurazione. Si potrebbe replicare che viviamo in un universo in continua espansione, il che potrebbe implicare che anche le dimensioni dello spazio degli stati sono in continua espansione, nel qual caso non si ha ricorrenza di Poincaré. Questa obiezione solleva molte questioni affascinanti, ma per il momento basta osservare che ciò equivale a sostenere che la meccanica quantistica ha senso soltanto quando la si applica all'universo nel suo insieme.
- d. Si noti che non si può pensare che questo principio ponga fine alla storia di cercare di capire le probabilità, dal momento che isola qualcosa che in realtà vorremmo capire basandoci sui principi fondamentali. Manca un argomento convincente che ci imponga di allineare le nostre probabilità soggettive alle possibilità oggettive.
- e. Tra cui Greaves, Myrvold e Wallace. Devo far notare che questi studiosi presentano linee argomentative che non abbiamo citato, sulle quali gli esperti hanno pareri discordanti, quindi la situazione è un po' più complicata della visione d'insieme presentata qui.
- f. La mia visione personale di come funziona la scienza e del ruolo delle opinioni personali nella formazione del consenso dell'intera comunità scientifica è descritta a grandi linee nel capitolo XVII del mio libro *L'universo senza stringhe*.

Parte terza
Al di là dei quanti

Capitolo dodicesimo

Alternative alla rivoluzione

Alla fine siamo spinti a cercare quella che speriamo risulti essere l'ontologia corretta del mondo. Dopo tutto, è il desiderio di capire che cos'è la realtà a bruciare in fondo all'anima di ogni vero fisico.

LUCIEN HARDY ¹.

Negli ultimi anni il settore dei fondamenti quantistici ha avuto una vivace ripresa. Dopo ottant'anni nell'ombra, è finalmente possibile avere una buona carriera come esperto di fondamenti quantistici. È positivo, però la maggior parte dei progressi, e dei giovani, si è avuta sul versante dell'anti-realismo. L'obiettivo della più parte dei nuovi lavori non è stato modificare o completare la teoria quantistica, ma soltanto offrire un nuovo modo di parlarne. Per spiegare il motivo di tutto ciò, devo ripercorrere una parte della storia del settore dei fondamenti quantistici.

La meccanica quantistica non è nata da un giorno all'altro, ma è stata il frutto di una lunga gestazione, che iniziò nel 1900 con la scoperta di Planck che l'energia trasportata dalla luce si presenta in pacchetti discreti e si concluse nel 1927, quando si stabilì la forma finale della meccanica quantistica. Seguì un periodo di dibattito tra i fondatori, durante il quale molti fisici quantistici erano preoccupati per i fondamenti della nuova teoria. Questo periodo di libera discussione, tuttavia, giunse presto al termine e, nonostante le obiezioni di Einstein, Schrödinger e de Broglie, culminò con il trionfo della concezione di Copenaghen.

Dai primi anni Trenta fino a metà degli anni Novanta, la maggior parte dei fisici considerò risolta la questione del significato della meccanica quantistica. Questo lungo periodo buio fu punteggiato dagli importanti lavori di Bohm, Bell, Everett e alcuni altri, ma nella comunità dei fisici i

piú prestarono poca attenzione a questi lavori e alle questioni fondazionali in generale, come indica il fatto che gli articoli cruciali di questi autori ebbero pochissime citazioni fino a metà degli anni Settanta, quando si iniziarono a realizzare i test sperimentali della restrizione di Bell. Persino oggi non è raro trovare fisici esperti che credono, erroneamente, che Bell abbia dimostrato che tutte le teorie a variabili nascoste sono necessariamente sbagliate^a. Fino a poco tempo fa, nei dipartimenti di fisica non vi era quasi nessuna posizione accademica per fisici concentrati sui fondamenti quantistici. La minuscola comunità di esperti di questo settore o si guadagnava una cattedra per altri lavori, come Bell, oppure, come Bohm, trovava un posto negli angoli piú remoti del mondo accademico. Alcuni fecero carriera nella filosofia o nella matematica, altri insegnando in piccoli college.

Fu la promessa della computazione quantistica a iniziare, poco prima della fine del secolo scorso, ad aprire le porte a coloro che volevano occuparsi di fondamenti quantistici. L'idea di poter usare la meccanica quantistica per costruire un nuovo tipo di computer fu introdotta da Richard Feynman in un discorso tenuto nel 1981². Né le parole di Feynman né le altre prime anticipazioni dell'idea sembrarono fare grande impressione fino a quando nel 1989 David Deutsch, che in origine era un esperto di gravità quantistica con una cattedra a Oxford, non propose un approccio alla computazione quantistica nel contesto di un articolo sui fondamenti della matematica e della logica³. In quell'articolo Deutsch introdusse l'idea di un computer quantistico universale, analogo a una macchina di Turing. Qualche anno dopo, Peter Shore, un informatico che lavorava in un laboratorio di ricerca dell'IBM, dimostrò che un computer quantistico può fattorizzare grandi numeri molto piú velocemente di un computer normale. A quel punto le persone iniziarono a prestare attenzione, perché una delle applicazioni della capacità di fattorizzare grandi numeri è la decifrazione di molti codici oggi in uso.

In tutto il mondo iniziarono a nascere gruppi di ricerca, che si riempirono rapidamente di giovani ricercatori brillanti, molti dei quali avevano una duplice strategia di ricerca: attaccavano i problemi dei fondamenti quantistici e contribuivano allo sviluppo della computazione quantistica. Uno dei risultati fu l'invenzione di un nuovo linguaggio per la fisica quantistica basato sulla teoria dell'informazione, che è uno strumento basilare

nell'informatica. Questo nuovo linguaggio, chiamato *teoria dell'informazione quantistica*, è un ibrido tra informatica e fisica quantistica particolarmente adatto per affrontare le difficoltà poste dalla costruzione dei computer quantistici. Il suo utilizzo ha permesso la creazione di un insieme di strumenti e concetti potenti che si sono dimostrati preziosi per affinare la nostra comprensione della fisica quantistica. La teoria dell'informazione quantistica è però un approccio puramente operativo adatto più che altro a descrivere la natura nel contesto degli esperimenti, in cui i sistemi vengono preparati e poi misurati. La natura che sta al di fuori del laboratorio quasi non compare e, quando lo fa, spesso viene considerata, non sorprendentemente, analoga a un computer quantistico.

L'attuale rinascita del settore dei fondamenti quantistici e dell'informazione quantistica è in massima parte una cosa positiva, non da ultimo perché in generale il lavoro teorico è ancorato a esperimenti reali. Gli sforzi in direzione della computazione quantistica hanno generato molti spin-off che chiariscono le questioni fondamentali, come il *teletrasporto quantistico*. Questa tecnologia permette di trasferire, senza misurarlo, lo stato quantistico di un atomo a un altro atomo distante. Pur non essendo all'altezza del teletrasporto della fantascienza, questa tecnologia è in uso e sta già avendo un ruolo. Per esempio, è usata per realizzare un nuovo tipo di codice che è indecifrabile.

Questi sviluppi ci hanno anche fatto apprezzare di più il modo in cui è strutturata la teoria quantistica. Per esempio, in un nuovo tipo di approccio, inaugurato da Lucien Hardy, si cerca il più piccolo ed elegante insieme di assiomi da cui sia possibile derivare il formalismo matematico della meccanica quantistica. Molti di questi assiomi non hanno nulla di notevole e fanno affermazioni che sono vere per ogni teoria, però in uno è stipata tutta la stranezza del mondo quantistico.

In parallelo, in un clima dominato dagli approcci operazionali, vi è poco spazio per realisti vecchio stile alla ricerca di un completamento della teoria quantistica che spieghi che cosa succede nei singoli eventi. Alcuni sono sostenitori dell'interpretazione a molti mondi, ma è ancora viva una piccola comunità di bohmiani. Un piccolo gruppo sviluppa teorie del collasso della funzione d'onda. Coloro che cercano di spingere la ricerca della realtà al di là di questi approcci conosciuti sono ancora meno numerosi. Molti di noi in questa categoria in origine erano esperti di altri settori, alcuni ai

massimi livelli, come Stephen Adler e Gerard 't Hooft. Non siamo perfettamente inseriti in quel vivace settore che è ormai quello dei fondamenti quantistici, specie perché i nostri interessi e le nostre ambizioni (e le teorie che sviluppiamo per realizzarle) non sono esprimibili nel linguaggio operativo la cui padronanza è ciò che distingue un professionista dell'informazione quantistica. Ciò nonostante, continuiamo la nostra ricerca di un quadro realistico e completo del mondo quantistico.

Sono convinto che molti fisici, come afferma Lucien Hardy nell'epigrafe di questo capitolo, preferirebbero il realismo all'operazionalismo e sarebbero interessati alla scoperta di un approccio realistico alla teoria quantistica che superasse i punti deboli degli approcci esistenti. L'attuale predominio degli approcci operazionali è dovuto anche alla mancanza di un'alternativa realistica che dia l'impressione di essere corretta.

Il resto di questo libro ha come argomento il futuro degli approcci realistici alla fisica quantistica. Prima di archiviare gli approcci non realistici, però, vediamo se possiamo imparare qualcosa dall'attenzione che è stata loro rivolta di recente.

Uno degli insegnamenti che ne ho tratto è che esistono molti modi diversi di esprimere come si differenzia il mondo quantistico dal mondo classico della fisica newtoniana. Se il punto di vista antirealistico vi soddisfa, avete una serie di alternative. Potete adottare la radicale negazione di Bohr che la scienza sia qualcosa di diverso da un ampliamento del linguaggio ordinario che usiamo per parlare dei risultati dei nostri esperimenti. Potete abbracciare un approccio chiamato *bayesianismo quantistico*, secondo cui la funzione d'onda non è altro che una rappresentazione simbolica delle nostre credenze e «previsione» è una parola ricercata per dire «scommessa». Un'altra possibilità è adottare una prospettiva puramente operativa, che permette di parlare soltanto di processi delineati da, e inseriti tra, preparazioni e misurazioni.

In tutti questi approcci il problema della misurazione viene schivato o, meglio, definito inesistente, dato che la possibilità che lo stato quantistico descriva gli osservatori e i loro strumenti di misura non può nemmeno essere proposta.

Il concetto centrale di molte di queste nuove proposte è che il mondo è fatto di informazione. John Wheeler lo ha sintetizzato con lo slogan «it from bit», cioè tutto è informazione, che poi è stato modernizzato in «it

from qubit», dove *qubit* è la minima unità di informazione quantistica, cioè una scelta binaria quantistica, come nella nostra storia sulle opinioni politiche e l'animale preferito. In termini pratici, in queste proposte si immagina che tutte le grandezze fisiche possano essere ridotte a un numero finito di domande quantistiche a risposta binaria e inoltre che l'evoluzione nel tempo secondo la Regola 1 possa essere interpretata come elaborazione di questa informazione quantistica, come da parte di un computer quantistico. Ciò significa che il cambiamento nel tempo si può esprimere come l'effetto di una sequenza di operazioni logiche applicate a uno o due qubit alla volta.

Per citare le parole dello stesso Wheeler:

«It from bit» simboleggia l'idea che ogni elemento del mondo fisico abbia al fondo – molto in profondità, nella maggior parte dei casi – una fonte e una spiegazione immateriali e che ciò che chiamiamo realtà emerga, in ultima analisi, dal porre domande sí/no e dal registrare le risposte provocate dai nostri strumenti; in breve, che tutte le cose fisiche siano in origine informazione e che questo sia un universo partecipativo ⁴.

Se è la prima volta che incontrate questa concezione, forse dubitate che Wheeler parli sul serio, ma è proprio così. Ecco un'altra citazione, più breve: «La fisica dà origine alla partecipazione dell'osservatore; la partecipazione dell'osservatore dà origine all'informazione; l'informazione dà origine alla fisica» ⁵.

Quando parla di un universo partecipativo, Wheeler intende che l'universo è fatto esistere dalle nostre osservazioni e percezioni. Sí, potreste replicare, ma prima di poter osservare o percepire qualsiasi cosa dobbiamo esistere e noi esistiamo all'interno dell'universo e grazie all'universo. Sí, risponde John. Sono vere entrambe le cose. È un problema?

Ne possiamo ricavare qualche intuizione? Alcuni sistemi con un numero finito di risultati possibili possono essere rappresentati in questo modo e farlo in effetti chiarisce la fisica: per esempio, si può porre in primo piano l'importanza dell'entanglement nella fisica quantistica. Tuttavia, altri sistemi che hanno un numero infinito di variabili fisiche, come il campo elettromagnetico, non si inseriscono con altrettanta facilità in questo programma. Ciò nonostante, questo approccio ai fondamenti quantistici basa-

to sull'informazione quantistica ha avuto un'influenza positiva su vari settori della fisica, dalla fisica dello stato solido a congetture sulla teoria delle stringhe e sui buchi neri quantistici.

Dobbiamo tuttavia fare attenzione a distinguere molte idee diverse riguardo al rapporto tra fisica e informazione: alcune sono utili ma anche banali, mentre altre sono radicali e avrebbero bisogno, a mio giudizio, di ricevere ulteriori giustificazioni.

Iniziamo definendo l'informazione. Una definizione utile è stata fornita da Claude Shannon, che può essere considerato il fondatore della teoria dell'informazione. La sua definizione fu ideata nel contesto della comunicazione e prevede un canale che trasmette un messaggio da un mittente a un destinatario. I due, si ipotizza, hanno un linguaggio comune, grazie al quale attribuiscono significato a una sequenza di simboli. La quantità di informazione contenuta nel messaggio è definita dal numero di risposte a un insieme di domande polari che il destinatario apprende dal mittente comprendendo ciò che dice il messaggio.

Se si esprime la definizione in questo modo, pochi sistemi fisici sono – o possono essere interpretati come – canali di informazione tra mittenti e destinatari che hanno un linguaggio comune. Nel suo insieme l'universo non è un canale di informazione di questo tipo. L'aspetto importante dell'idea di Shannon è che la misura dell'informazione trasmessa può essere separata dal contenuto semantico, cioè dal significato del messaggio. Il mittente e il destinatario hanno una semantica comune che dà significato al messaggio, ma non è necessario conoscerla per misurare la quantità di informazione trasmessa. Senza la semantica comune, tuttavia, il messaggio non trasmetterebbe alcuna informazione. In altre parole, per misurare quanta informazione trasmette un messaggio, sono necessarie alcune informazioni sul linguaggio, come le frequenze relative con cui diverse lettere, parole o frasi sono usate dalla comunità linguistica dei parlanti. Queste informazioni sul contesto non sono codificate in ogni messaggio. Se non si specifica il linguaggio, l'informazione di Shannon non è definita. Ciò significa, in particolare, che il messaggio deve essere in un linguaggio noto al mittente e al destinatario. Un insieme di simboli irregolari non trasmette informazioni. Pertanto, nei limiti in cui la misura di Shannon dell'informazione dipende dal linguaggio e da altri aspetti del contesto noti al mittente

e al destinatario e non codificati in ogni messaggio, non è puramente una grandezza fisica.

Uno dei problemi di difficile soluzione nella filosofia del linguaggio è capire come i parlanti manifestano intenzioni e trasmettono significato. Il fatto che questo sia un problema arduo non significa che le intenzioni e i significati non facciano parte del mondo. Sono però aspetti del mondo la cui esistenza dipende dall'esistenza di menti. L'informazione di Shannon è una misura di ciò che accade in questo mondo di intenzioni e significati. È ben definita anche se non abbiamo una buona conoscenza di come si inseriscono nel mondo naturale il significato e l'intenzione, che nondimeno fanno parte di quel mondo.

Vediamo un esempio che può chiarire questa distinzione. Dopo un temporale estivo, sento cadere ogni tanto delle gocce d'acqua da una grondaia che perde. Lo sgocciolamento sembra avere una configurazione irregolare, ma non trasmette alcun messaggio né a me né a chiunque altro. Non ha un mittente, e io non sono un destinatario, per cui lo sgocciolamento non contiene alcuna informazione, nel senso di Shannon. D'altro canto, qualcuno potrebbe usare il codice Morse per mandarmi un messaggio attraverso una sequenza di pause lunghe e brevi tra le gocce. Le due configurazioni mostrerebbero una differenza che riflette la presenza o assenza di un'intenzione di trasmettere significato. L'intento conta: l'informazione in questo senso richiede la presenza di creature che abbiano intenzione di trasmettere significato. Per un realista, che vuole conoscere che cos'è il mondo al di là di ciò che le persone fanno o comprendono, questa non è un'idea utile da applicare al mondo atomico^b.

Una definizione meno precisa di informazione è stata data da Gregory Bateson, un antropologo inglese, che vedeva l'informazione come «una differenza che fa la differenza». A volte per esprimere questa stessa idea si dice invece «una distinzione che fa la differenza». In questa forma, l'idea si può applicare direttamente alla fisica, dove possiamo tradurla così: «se valori diversi di un'osservabile fisica portano a futuri misurabilmente diversi di un sistema fisico, si può considerare che quell'osservabile costituisce informazione». Messa così, potenzialmente quasi tutte le osservabili fisiche trasmettono informazione. Questa definizione implicherebbe che è presente «informazione» ogni volta che i valori di due variabili fisiche sono

correlati. Non vi è però nulla di profondo in tutto ciò, a meno che non si tratti del riconoscimento dell'interdipendenza dei diversi componenti del mondo fisico. E disponiamo già di misure di correlazione. Possiamo rinominarle «informazione», ma è probabile che un cambiamento di nome che riduce la specificità di un'idea generi confusione più che portare a una rivoluzione della nostra visione del mondo.

I computer elaborano l'informazione nel senso di Shannon. Prendono in ingresso un segnale da un mittente e applicano un algoritmo, che lo trasforma in un segnale di uscita che sarà letto da un destinatario. Contesti simili sono molto particolari. La scelta di un algoritmo da incorporare è una parte cruciale della definizione di una computazione. Per la maggior parte, i sistemi fisici non sono computer e il processo mediante il quale i dati iniziali in un dato istante si evolvono nei dati in un istante successivo non sempre può essere spiegato in termini dell'applicazione di un algoritmo o di una sequenza di operazioni logiche.

Alcuni autori sembrano confondere e combinare le due definizioni di informazione, il che li induce a voler descrivere la natura come un computer e la relazione tra stati del mondo in momenti diversi come una computazione. Non sono convinto che un'ipotesi così radicale sia giustificata.

Ciò non significa che alcuni sistemi fisici non possano essere modellati con un certo grado di approssimazione da una computazione, il che è ancora una volta banalmente vero. Possiamo definire approssimazioni delle equazioni principali della fisica, come quelle della relatività generale o della meccanica quantistica, che possono essere codificati come algoritmi, che poi vengono fatti girare su un computer digitale. Spesso questo è un metodo molto utile per ottenere soluzioni approssimate delle equazioni. È sempre coinvolta un'approssimazione, tuttavia.

Il suono prodotto da un'orchestra sinfonica può essere riprodotto da una digitalizzazione, ma solo con un certo grado di approssimazione: questo processo comporta sempre un'approssimazione, che tronca la gamma delle frequenze. L'esperienza di ascoltare un'orchestra dal vivo non può mai essere trasmessa interamente ed è per questo che esiste ancora un pubblico che va ai concerti, come anche un mercato per i vinili, che sono registrazioni analogiche. La stessa considerazione vale per la fisica: una digitalizzazione delle equazioni di Einstein può essere molto utile, ma non riproduce mai tutto ciò che fanno le equazioni.

Anche se in generale la fisica non può essere interpretata come elaborazione dell'informazione, si può affermare che lo stato quantistico rappresenta non il sistema fisico, ma l'informazione che abbiamo riguardo al sistema. La Regola 2 fa di certo sembrare che sia vero, perché la funzione d'onda cambia repentinamente proprio quando otteniamo nuove informazioni sul sistema. Se però la funzione d'onda rappresenta l'informazione che abbiamo riguardo al sistema, le probabilità previste dalla meccanica quantistica devono essere considerate soggettive. Questo punto di vista può essere sviluppato interpretando la Regola 2 come una regola di aggiornamento che modifica le nostre probabilità soggettive di esperimenti futuri quando si effettua una misurazione. Questo è il cosiddetto bayesianismo quantistico ⁶.

Un altro approccio abbastanza elegante in cui si considera che lo stato quantistico trasmette informazioni che un sistema ha riguardo a un altro è la cosiddetta *teoria quantistica relazionale*. Secondo questa concezione, che sta tra l'operazionalismo e una forma di realismo, gli stati quantistici sono associati a divisioni dell'universo in due parti, osservatore e osservato, e rappresentano ciò che il primo può sapere del secondo. Questa idea ha radici nella gravità quantistica ed è nata dalle conversazioni avvenute tra Louis Crane, Carlo Rovelli e me nei primi anni Novanta.

A ispirarci è stato un insieme molto elegante di descrizioni matematiche di cosmologie assai semplificate, che erano state sviluppate da Crane e da altri matematici, chiamate *teorie topologiche dei campi*. In queste teorie non compare una descrizione quantistica dell'intero universo. Non esiste uno stato quantistico che descrive l'universo nel suo insieme. Ne esistono invece tanti quanti sono i modi di dividere l'universo in due sottosistemi. Possiamo pensare che contengano le informazioni che un osservatore da una parte della divisione potrebbe avere del sistema quantistico dall'altra parte.

Questo aspetto ci ricordò l'insistenza di Bohr sul fatto che la meccanica quantistica richiede una divisione del mondo in due parti, una classica e l'altra quantistica, e che qualsiasi divisione va bene. I modelli studiati da Crane e da altri matematici avevano fatto fare alla filosofia di Bohr un altro passo avanti, perché prevedevano due stati quantistici per ogni confine –

uno per ciascuna parte. Il motivo è che ciascuna divisione può essere interpretata in due modi. Se Alice vive da una parte e Bob dall'altra, Alice vedrà sé stessa come un osservatore classico, che misura un Bob quantistico, ma Bob vedrà la situazione opposta.

I modelli erano molto semplici, perciò l'unica domanda che ci si poteva porre era: quanto sono simili le due visioni? In altre parole, qual è la probabilità che la descrizione quantistica che Alice dà di Bob sia uguale alla descrizione quantistica che Bob dà di Alice? I matematici avevano costruito le teorie in modo che la risposta fosse identica comunque venisse diviso l'universo. In questo caso, la probabilità che la visione da una parte somigli alla visione dall'altra parte misura qualcosa di universale, che caratterizzerebbe come sono connesse le parti dell'universo, ossia ciò che i matematici chiamano topologia dell'universo (ecco perché si chiamano teorie topologiche dei campi).

Crane richiamò l'attenzione mia e di Rovelli su questi universi modello perché aveva capito che le strutture matematiche coinvolte potevano essere ampliate per comprendere la gravità quantistica a loop. Constatammo che aveva ragione, ma questa è un'altra storia. Crane suggerì anche che la nuova matematica offriva un modo per estendere la meccanica quantistica all'intero universo. Aveva ragione anche riguardo a questo e il risultato è stato la teoria quantistica relazionale.

Ciascuno di noi fu ispirato ad applicare questa idea alla teoria quantistica in generale e ne pubblicò una versione⁷. La formulazione di Rovelli era la più generale ed è diventata quella più nota, perciò è quella che descriverò.

Bohr ha insegnato che i fisici quantistici devono sempre parlare di due mondi. Noi osservatori viviamo in un mondo classico, ma gli atomi che studiamo vivono in un mondo quantistico. I due mondi obbediscono a regole diverse. In particolare, gli oggetti del mondo quantistico possono esistere in sovrapposizioni, ma le proprietà osservabili degli oggetti del mondo classico hanno sempre valori definiti e quindi non si possono avere sovrapposizioni. Secondo Bohr, entrambi i mondi sono necessari per la scienza.

Gli strumenti che usiamo per manipolare e misurare gli atomi vivono sul confine tra noi e loro, e in un certo senso lo definiscono. Bohr sottoli-

neava che questo confine viene stabilito in modo arbitrario e potrebbe essere tracciato in maniera diversa per scopi diversi, a patto che divida il mondo in due domini.

Pensiamo all'esperimento del gatto di Schrödinger. Un modo di tracciare il confine consiste nel considerare l'atomo e il fotone come parte del sistema quantistico, tenendo il contatore Geiger e il gatto nel mondo classico. In questa descrizione, l'atomo può essere in una sovrapposizione, ma il contatore Geiger mostrerà sempre uno stato preciso – SÌ, ha rilevato un fotone, oppure NO, non l'ha rilevato. Noi però possiamo tracciare un nuovo confine, includendo il rivelatore nel mondo quantistico. In questa descrizione, il gatto è sempre morto oppure vivo, ma il contatore Geiger può essere in una sovrapposizione entangled con l'atomo. Oppure, e questa era l'opinione di Schrödinger, possiamo tracciare il confine in modo che coincida con le pareti della scatola, quindi ora anche il gatto fa parte del sistema quantistico e può esistere in sovrapposizioni entangled con l'atomo e il contatore Geiger. Il mondo classico comprende anche una nostra amica, Sara, che apre il coperchio e guarda dentro la scatola. Sara, si presume, è macroscopica e classica e quindi possiamo trattarla considerando che sia sempre in uno stato determinato. Dal suo punto di vista, Sara percepisce sé stessa dalla parte classica del confine, perciò, a suo giudizio, lei vede sempre il gatto vivo o morto.

Eugene Wigner suggerì di far avanzare di un altro passo questa favola e considerare che il sistema quantistico comprende anche la nostra amica Sara, insieme alla scatola, al gatto e agli altri contenuti della scatola^c. Poiché resto al di là del confine, vedo Sara far parte di una sovrapposizione di stati entangled. In una parte della sovrapposizione il gatto è vivo e Sara vede che è vivo, mentre in un'altra il gatto è morto e Sara lo vede morto.

Abbiamo quindi cinque modi diversi di dividere il mondo in classico e quantistico, dove per quantistico intendiamo che può essere in una sovrapposizione, mentre classico significa che le grandezze fisiche hanno sempre valori definiti. Queste descrizioni diverse sembrano discordanti. Noi vediamo Sara in una sovrapposizione, mentre lei si vede sempre in uno stato definito.

La proposta di Rovelli è che sono tutte descrizioni parziali del mondo altrettanto corrette. Tutte fanno parte della verità. Ognuna dà una descri-

zione valida di una parte del mondo, definita da un confine. Sara è davvero in una sovrapposizione, oppure vede e sente un gatto certamente vivo? Rovelli vorrebbe non dover scegliere tra queste due alternative. Una descrizione di processi ed eventi fisici, sostiene, è sempre fatta rispetto a un particolare modo di tracciare il confine tra quantistico e classico. Il presupposto di Rovelli è che i diversi modi di tracciare il confine sono tutti altrettanto validi e fanno tutti parte della descrizione completa.

In parole povere, Rovelli direbbe che è vero, *dal punto di vista di Sara*, che il gatto è vivo ed è altresì vero, *dal mio punto di vista*, che Sara è in una sovrapposizione dello stato in cui vede il gatto morto e dello stato in cui vede il gatto vivo.

Esiste una verità che non sia condizionata da un punto di vista? Per quanto ne so, credo che Rovelli direbbe che non esiste. Nella storia che ho narrato, Sara e io siamo d'accordo sul fatto che ha aperto la scatola ed esaminato il gatto, anche se non siamo d'accordo sul risultato. Tuttavia, la decisione di Sara di aprire la scatola sarebbe potuta dipendere dall'esito di un evento quantistico, come il decadimento di un atomo instabile, nel qual caso per descrivere Sara potrei dire che è in una sovrapposizione dello stato in cui ha guardato dentro la scatola e dello stato in cui non vi ha guardato. Sara, però, avrà una sola delle due esperienze.

Va notato che qui si ha una forma debole di coerenza, in quanto la mia descrizione di Sara non impedisce la sua. Si noti anche – e questo è fondamentale – che tutti i modi di tracciare un confine dividono il mondo in due parti incomplete. Non abbiamo una visione di tutto l'universo, come se venisse osservato dall'esterno. Non abbiamo uno stato quantistico dell'intero universo.

Se la teoria quantistica relazionale avesse uno slogan, sarebbe «molti punti di vista parziali definiscono un unico universo».

Questa proposta può essere considerata da varie prospettive. Agli occhi di un operazionalista pragmatico, ciascun modo di dividere il mondo in due con un confine definisce un sistema che può essere trattato con la meccanica quantistica. Ciascuna scelta determina una descrizione, che contiene tutte le informazioni che può avere un osservatore dalla parte classica del confine riguardo al sistema quantistico dall'altra parte. Per l'operazionalista, l'insieme degli stati quantistici contiene le informazioni che un osservatore può avere a ciascun livello, definito da un confine che

lo contraddistingue. Ciascun osservatore usa uno stato quantistico per codificare le informazioni che ha sul sistema dall'altra parte del confine; questi stati diversi sono tali perché sono descrizioni di sottosistemi diversi.

Considerata dalla prospettiva operativa, la meccanica quantistica relazionale ha qualcosa in comune con l'originaria interpretazione dello stato relativo di Everett. Entrambe descrivono il mondo in termini di affermazioni condizionate che codificano correlazioni tra sottosistemi diversi, che si stabiliscono quando essi interagiscono.

Questo, però, non è il modo in cui Rovelli vede la meccanica quantistica relazionale. Rovelli vuole chiamare la sua concezione realismo, un realismo che però è qualcosa di diverso dal realismo ingenuo, nel senso in cui ho usato questa espressione finora. Per Rovelli, la realtà consiste della sequenza di eventi grazie ai quali un sistema da una parte del confine può acquisire informazioni sugli elementi del mondo dall'altra parte. Possiamo dire quindi che Rovelli è un realista nei confronti della causalità. Questa realtà dipende dalla scelta del confine, perché qualcosa che è un evento definito – un evento che per un osservatore è certamente accaduto – potrebbe far parte di una sovrapposizione per un altro. Il realismo di Rovelli è quindi diverso dal realismo ingenuo, secondo cui ciò che è reale consiste di eventi che secondo tutti gli osservatori hanno avuto luogo.

Rovelli nega che questo tipo di realismo ingenuo sia possibile nel nostro mondo quantistico, quindi ci propone di adottare la sua versione radicalmente diversa di realismo, secondo cui ciò che è reale è sempre definito in relazione a una divisione del mondo che definisce un osservatore. Rovelli usa parole molto diverse da quelle di Bohr, e ottiene una formulazione che è più precisa, ma i due seguono una logica simile, che nega la possibilità del realismo ingenuo nei confronti dei sistemi quantistici.

Un altro approccio che nega che il realismo ingenuo sia possibile consiste nell'elevare la categoria del possibile – le cose che potrebbero essere vere – al mondo del reale. Ingenuamente, quando diciamo che qualcosa è possibile, come il fatto che la lucertola di mio figlio resti incinta l'anno prossimo, intendiamo dire che è tra le cose che potrebbero accadere. Quando qualcosa che è possibile accade, entra a far parte della realtà; fino a quel momento, però, non è reale.

Il linguaggio e la logica riflettono la condizione molto diversa del possibile e lo distinguono dal reale. Il principio del terzo escluso afferma che qualcosa di reale non può allo stesso tempo avere una proprietà e non averla. Il coniglietto del mio vicino non può essere grigio e non grigio allo stesso tempo. Ma le situazioni possibili non hanno questo vincolo. Il coniglio che il mio amico comprerà la settimana prossima in un negozio di animali potrebbe essere nero e potrebbe anche essere bianco.

Nella vita reale, ciò che si realizza e ciò che è possibile hanno una relazione asimmetrica. L'esistenza reale della figlia del mio vicino fa di un coniglio un futuro animale possibile per la loro famiglia. Quindi ciò che è possibile influenza ciò che è reale. La conoscenza del possibile, tuttavia, benché utile, a rigor di termini non è necessaria per capire che cosa sarà reale; nella misura in cui le leggi della fisica newtoniana sono deterministiche, tutto ciò che occorre per prevedere il futuro effettivo è una descrizione completa del presente effettivo.

Diversi autori (tra cui Heisenberg, primo fra tutti, e Abner Shimony, il mio docente di filosofia della scienza) hanno proposto che il mondo del possibile deve essere considerato parte della realtà – dato che nella fisica quantistica il possibile influenza ciò che sarà reale in futuro. Questa concezione è stata sviluppata di recente dal mio amico Stuart Kauffman, in collaborazione con Ruth Kastner e Michael Epperson ⁸.

È impossibile descrivere questa concezione senza entrare in qualche modo in conflitto con l'uso normale del linguaggio; anche se cercherò di essere chiaro, raccomando ai lettori di mantenere una mente aperta. Partiamo dall'affermazione che una circostanza può essere reale in due modi diversi. Può essere effettivamente reale, nel senso che fa parte del mondo nello stesso modo in cui una particella newtoniana ha una posizione precisa. Qualcosa di reale, però, può anche essere «possibile» o «potenziale»; questa è la condizione che attribuiamo a proprietà che sono sovrapposte nella funzione d'onda, come il fatto che una persona di sinistra possa amare ugualmente i cani e i gatti, che una particella possa passare attraverso la fenditura di destra o di sinistra, o che un gatto di Schrödinger possa essere allo stesso tempo vivo e morto.

Le cose che sono reali nel senso che sono possibili non obbediscono al principio del terzo escluso, ma vanno considerate come una parte del reale perché possono influenzare ciò che si realizza. Da questa prospettiva, la differenza e la novità della fisica quantistica sono queste. Secondo Kauffman e i suoi coautori, gli esperimenti sono processi che trasformano potenzialità in condizioni reali. Pertanto il gatto di Schrödinger è potenzialmente vivo e potenzialmente morto, non nel senso di qualcosa che è l'una o l'altra cosa, ma di qualcosa che noi ignoriamo, e non nel senso di una situazione indeterminata, ma perché la sua realtà effettiva consiste di questa potenzialità per l'una o l'altra cosa che si realizzerà mediante un esperimento.

Il fatto che l'esperimento abbia un ruolo distinto nel trasformare il possibile in effettivo, con probabilità date dalla regola di Born, basta a dirci che questa non è una prospettiva improntata al realismo ingenuo, ossia una descrizione del mondo come sarebbe in nostra assenza, un mondo in cui l'esperimento non può avere alcun ruolo. Forse, però, è una direzione da sviluppare, se il realismo fallisce.

Ecco un modo in cui potremmo sviluppare l'idea che il possibile faccia parte del reale. Introduciamo il tempo e consideriamo reali e fondamentali il momento presente e il passare dei momenti^d. Una parte di ciò che intendo è che esiste una distinzione oggettiva tra il passato, il presente e il futuro. Da questa prospettiva, il presente è reale. Il presente consiste di eventi che sono accaduti, ma che devono ancora dare origine agli eventi futuri che li sostituiranno.

Il passato consiste di quegli eventi che un tempo erano presenti e reali. Non esistono più, anche se le loro proprietà possono essere rappresentate e ricordate in strutture attualmente esistenti.

Il futuro non è reale. In più, il futuro è leggermente aperto, nel senso che ogni tanto possono accadere rari eventi nuovi con nuove proprietà. (Si veda più avanti il mio *principio di precedenza*). Se però ignoriamo per un momento questa possibilità, allora nel presente esiste un insieme finito di possibili passi successivi, che sono gli eventi successivi e le loro proprietà.

Dato lo stato presente del mondo, non tutto può accadere al prossimo passo temporale. Kauffman chiama *adiacente possibile* l'insieme degli eventi che potrebbero essere prossimi. I possibili eventi dell'immediato futuro

che costituiscono l'adiacente possibile non sono ancora reali, però definiscono e vincolano ciò che potrebbe essere reale.

L'adiacente possibile del gatto di Schrödinger contiene un gatto vivo e un gatto morto. Non comprende un brontosauo o un cane alieno. Quindi gli elementi dell'adiacente possibile hanno proprietà, anche se non obbediscono al principio del terzo escluso. In quanto oggetti dotati di proprietà, esistono fatti reali che li riguardano. È in questo senso che possiamo dire che una piccola parte di ciò che è possibile può essere considerata reale.

Ora inizia ad avere senso. Non tutto ciò che è possibile è reale, però una piccola parte del possibile ha proprietà precise che giustificano la sua classificazione in una nuova categoria del reale e possibile.

Esistono sviluppi recenti anche sul versante del realismo magico. Negli anni Novanta, Julian Barbour propose una teoria quantistica della cosmologia con molti momenti invece di molti mondi⁹. L'idea è stata ripresa in una proposta recente di Henrique Gomes. Poiché non siamo interessati ai dettagli tecnici, descriverò l'approccio originario di Barbour, ma la maggior parte di ciò che dirò si applica anche alla versione di Gomes¹⁰ e a lavori più recenti di Barbour e dei suoi collaboratori¹¹.

Un momento, per loro, è una configurazione dell'intero universo. Queste configurazioni, secondo Barbour e Gomes, sono configurazioni relazionali, che codificano tutte le relazioni che possono essere colte in un momento, come distanze relative e dimensioni relative.

Nella nostra esperienza, il passare del tempo ci sembra un flusso regolare di momenti. Barbour sostiene che il passaggio del tempo è un'illusione e che la realtà consiste di null'altro che un'enorme pila di momenti, ciascuno dei quali è una configurazione dell'intero universo. Ora state vivendo un momento. E adesso un altro. Secondo Barbour, entrambi i momenti esistono eternamente e atemporalmente, nella pila di momenti. La realtà non è altro che questo insieme congelato di momenti al di fuori del tempo. Anche ogni esperienza di un momento esiste atemporalmente – come parte del proprio momento. L'aspetto fugace di un momento in realtà è soltanto un aspetto del momento, una caratteristica che ha in eterno.

Tutti i momenti coesistono e ciascuno è una configurazione dell'intero universo. Però possono presentare una differenza importante. La pila può

avere piú di una copia di una configurazione e il numero di copie può variare da molte a nessuna.

Barbour ipotizza che noi abbiamo la stessa probabilità di fare esperienza di qualunque momento nella pila. Tuttavia, poiché alcuni sono piú comuni di altri, la nostra esperienza ha una struttura, perché abbiamo una probabilità maggiore di fare esperienza dei momenti piú comuni.

La collezione di momenti è strutturata in modo tale che i momenti piú comuni sono quelle configurazioni che, con un certo grado di approssimazione, possono essere collegate come se fossero una storia dell'universo generata da una legge. Questo ci dà l'illusione che siano in azione delle leggi, mentre invece non esistono leggi che generino storie e di fatto non esiste nessuna storia. La realtà è semplicemente l'enorme collezione di momenti.

Barbour ipotizza che i momenti piú comuni contengano strutture, che ci parlano di altri momenti. Un libro, anche se congelato per sempre in un momento, può raccontare storie che sono comprensibili soltanto come una sequenza di eventi che si sono svolti nel corso del tempo. Un libro ha una data di pubblicazione, che fa riferimento a un lieto evento (quanto meno per il suo autore) accaduto nel passato. Ed è nato grazie a una tipografia, una casa editrice e una cartiera, ciascuna delle quali ha una storia, che evoca altre storie.

Gli oggetti come i libri, che contengono strutture momentanee eternamente congelate che sono puntatori ad altri momenti, sono chiamati *capsule temporali* da Barbour. Qualunque cosa contenga una registrazione, come un DVD o un file video, è una capsula temporale. Quindi può essere qualsiasi struttura costruita, qualsiasi manufatto. Di fatto, può essere qualsiasi essere vivente.

Per la maggior parte di noi, il fatto che il mondo naturale sia pieno zeppo di capsule temporali indica che il tempo è reale e fondamentale. Gli eventi sono ordinati nel tempo perché gli eventi del passato causano gli eventi del presente. Secondo Barbour, tuttavia, anche l'impressione che abbiamo di vivere in un flusso di momenti è un'illusione. Tutti i ricordi, le registrazioni e le reliquie che ci danno l'impressione che sia esistito un passato di fatto sono aspetti di un momento presente. Ciascun momento vive eternamente nella pila di momenti.

Una pila non ordinata di momenti, ossia tutto ciò che costituisce un universo barbouriano, potrebbe facilmente contenere solo pochi momenti

con capsule temporali. Allora perché quasi ogni momento del nostro universo è pieno di capsule temporali?

Per delucidare il nostro mondo, Barbour deve spiegare che cosa determina quali configurazioni sono comuni, quali meno comuni e quali del tutto assenti. A deciderlo è un'equazione, che è l'unica legge la cui azione struttura la pila, scegliendo quali configurazioni sono rappresentate nella pila e da quante copie. Questa è una versione dell'equazione di Schrödinger, che però non fa un riferimento esplicito al tempo. Si chiama equazione di Wheeler-DeWitt; possiamo chiamarla Regola 0. Questa equazione sceglie come soluzioni pile di momenti che sono popolate da quelli che possono essere collegati per permettere che emerga l'illusione della storia.

Se tutto ciò è vero, il passaggio del tempo è un'illusione, che è dovuta a un momento presente che contiene l'esperienza di ricordi del passato. Anche la causalità è un'illusione.

Queste teorie «a molti momenti» sono realistiche, in quanto prendono posizione su ciò che è reale, in questo caso la collezione atemporale di momenti, però vanno al di là del realismo ingenuo perché presuppongono un mondo reale enormemente diverso dal mondo collegato al tempo della nostra esperienza, in cui noi percepiamo una successione di momenti, uno alla volta.

La lezione che traggo da queste teorie è che per estendere la meccanica quantistica al fine di ottenere una teoria dell'intero universo, dobbiamo scegliere tra lo spazio e il tempo. Può essere fondamentale solo uno dei due. Se insistiamo a essere realisti nei confronti dello spazio, come fanno Barbour e Gomes, il tempo e la causalità sono illusioni, che emergono solo al livello di una grossolana approssimazione della vera descrizione atemporale. Oppure possiamo scegliere di essere realisti nei confronti del tempo e della causalità. Allora, come Rovelli, dobbiamo credere che sia un'illusione lo spazio.

Si potrebbe parlare molto più a lungo di queste recenti prospettive non realistiche e magico-realistiche, ma il punto essenziale è che se si ha un interesse di tipo pragmatico e si vuole usare la teoria quantistica per capire questioni diverse da quelle che emergono dai fondamenti quantistici, per formulare i calcoli e le spiegazioni che se ne traggono vanno tutte bene. Se invece si vuole risolvere il problema della misurazione in un modo che of-

fra una descrizione dettagliata di ciò che accade in un singolo processo fisico, andrà bene soltanto una descrizione realistica.

- a. Mentre invece vengono escluse soltanto le teorie locali a variabili nascoste.
- b. A questo punto devo fare una digressione, che i lettori non esperti possono saltare.

Un esperto potrebbe contestare la mia caratterizzazione dell'informazione di Shannon facendo notare che quella grandezza è uguale all'opposto dell'entropia del messaggio. L'entropia, sostiene, è una proprietà fisica, oggettiva, della natura, che è governata (quando il sistema è in equilibrio termodinamico) dalle leggi della termodinamica. Quindi, in virtù del suo rapporto con l'entropia, l'informazione di Shannon deve essere oggettiva e fisica.

La mia risposta si articolerebbe in tre punti. Innanzitutto, sono i cambiamenti dell'entropia termodinamica a entrare nelle leggi della termodinamica, non l'entropia stessa. In secondo luogo, come fece notare Karl Popper anni fa, la definizione statistica di entropia a cui è collegata l'informazione di Shannon non è una grandezza completamente oggettiva. Dipende dalla scelta della risoluzione, che ci fornisce una descrizione approssimata del sistema. L'entropia della descrizione precisa, data in funzione dello stato preciso, è sempre nulla. La necessità di specificare questa approssimazione inserisce un elemento di soggettività nella definizione di entropia, come si vede nella dipendenza dell'entropia di un sistema quantistico dalla divisione in due sottosistemi. Infine, l'attribuzione di entropia a un messaggio è una definizione, che definisce l'entropia in funzione dell'informazione di Shannon.

- c. Questo passo dell'argomento è chiamato «paradosso dell'amico di Wigner».
- d. Come sostengo ne *La rinascita del tempo* e, insieme a Roberto Mangabeira Unger, in *The Singular Universe and the Reality of Time*.

Capitolo tredicesimo

Lezioni

Il messaggio principale di questo libro è che il mondo quantistico, per quanto strano, non minaccia necessariamente la credenza nel realismo sensato. È possibile essere realisti pur vivendo in un mondo quantistico.

Affermare il realismo, tuttavia, non è sufficiente. Un realista vuole conoscere la vera spiegazione del funzionamento del mondo. Non avrebbe senso credere che il mondo abbia una spiegazione particolareggiata e non essere interessati a conoscerla. La prossima domanda da porsi è quindi se qualcuna delle versioni realistiche disponibili della fisica quantistica sia convincente come vera spiegazione del mondo. In altre parole, abbiamo finito o abbiamo altro lavoro da fare? Sfortunatamente, credo che la risposta sia che, finora, nessuna delle alternative ben sviluppate è convincente. Tutti gli approcci realistici studiati finora presentano gravi inconvenienti. Al fine di spiegarne il motivo, esaminerò le alternative disponibili, concentrandomi sui pregi e sui difetti di ciascuna.

Teoria dell'onda pilota.

La teoria dell'onda pilota completa la meccanica quantistica fornendo altri gradi di libertà che, insieme alla funzione d'onda, specificano totalmente ciò che accade in un singolo sistema fisico. Si tratta delle traiettorie delle particelle. Le abbiamo chiamate variabili nascoste, ma questo forse non è il modo migliore di parlare, perché le particelle, dopo tutto, sono ciò che si osserva. Un modo migliore di descrivere le alternative è usare il termine «esseribili», come suggerito da John Bell. I realisti vogliono che una teoria prenda posizione riguardo a ciò che esiste realmente, ossia le esseribili. Nella teoria dell'onda pilota sia le onde sia le particelle sono esseribili.

La teoria dell'onda pilota risolve il problema della misurazione, perché la particella esiste sempre ed è sempre da qualche parte. Quando un apparecchio sperimentale cerca la particella, la trova nella posizione in cui è.

Le equazioni della teoria dell'onda pilota sono deterministiche e reversibili, il che è un argomento a favore della completezza della teoria. La probabilità è spiegata dalla nostra ignoranza delle posizioni iniziali delle particelle, come in qualsiasi altra applicazione della probabilità alla fisica. La regola di Born, la relazione tra la probabilità e il quadrato della funzione d'onda, è spiegata dalla dimostrazione che questa è l'unica distribuzione di probabilità stabile, verso la quale si evolvono tutte le altre.

In aggiunta, la teoria dell'onda pilota è completa e non ambigua. Alcune altre modifiche della meccanica quantistica contengono nuovi parametri liberi, che possono essere regolati per nascondere varie difficoltà e proteggere la teoria da confutazioni sperimentali. La teoria dell'onda pilota non ha parametri extra e non permette alcuna scelta. Questo è un punto molto importante a suo favore.

Poiché fornisce una descrizione esplicita priva di ambiguità delle esseri quantistiche, la teoria dell'onda pilota continua a essere un'alternativa popolare nella piccola comunità dei fisici quantistici realisti. In parte, la ragione è che rimane molto da fare per sviluppare le applicazioni della teoria. Una cosa è dimostrare in generale che le previsioni della teoria dell'onda pilota sono spesso in accordo con quelle della meccanica quantistica tradizionale, tutt'altra cosa è capire in modo preciso come si produce questo accordo. Ai fisici piace avere problemi ben definiti da risolvere e la teoria dell'onda pilota non ne offre pochi.

La teoria dell'onda pilota ha diverse sfide da affrontare. Se deve sostituire la meccanica quantistica, deve farlo in tutti i contesti in cui la teoria usuale funziona, tra cui la teoria quantistica relativistica dei campi, che è la base del modello standard della fisica delle particelle. Su questo argomento è stato svolto un buon lavoro, tuttavia alcune questioni importanti restano irrisolte. Sono state realizzate anche interessanti esplorazioni della teoria dell'onda pilota applicata alla gravità quantistica e alla cosmologia, che però sono lungi dall'essere definitive.

L'obiettivo di ricerca più importante in questo ambito, però, deve essere scoprire e avviare settori in cui gli esperimenti permetteranno di distinguere la nuova teoria dalla vecchia. A questo proposito va citato l'entusias-

smante lavoro sugli effetti alla scala cosmologica che stanno conducendo Valentini e altri.

Allo stesso tempo, la teoria dell'onda pilota non è del tutto convincente come vera teoria della natura, per diversi motivi. Uno è dato dai rami fantasma vuoti, che sono parti della funzione d'onda finite lontano (nello spazio delle configurazioni) da dove si trova la particella, perciò probabilmente non avranno mai più un ruolo nel guidarla. Questi rami proliferano per effetto della Regola 1, ma non contribuiscono a spiegare nulla di ciò che si è effettivamente osservato in natura. Poiché la funzione d'onda non crolla mai, ci dobbiamo tenere un mondo pieno di rami fantasma. Esiste un ramo che si distingue da tutti gli altri, quello che guida la particella, che potremmo chiamare il ramo occupato. Ciò nonostante, anche i rami fantasma vuoti sono reali. La funzione d'onda di cui sono ramificazioni è un'esseribile.

I rami fantasma della teoria dell'onda pilota sono identici ai rami dell'interpretazione a molti mondi. In entrambi i casi, sono una conseguenza del fatto di avere soltanto la Regola 1. A differenza dell'interpretazione a molti mondi, la teoria dell'onda pilota non richiede bizzarre ontologie costituite da molti universi, o una divisione degli osservatori, perché vi è sempre un unico ramo occupato in cui risiede la particella. Quindi non si pongono né problemi di principio né il problema di definire che cosa intendiamo con probabilità. Se però si giudica inelegante che ogni possibile storia del mondo sia rappresentata come un fatto reale, questo è un peccato comune ai molti mondi e alla teoria dell'onda pilota.

I lettori perspicaci potrebbero essere turbati da questa somiglianza con l'interpretazione a molti mondi. Nell'ipotesi che i suoi sostenitori riescano a dare un'interpretazione fisica sensata alla meccanica quantistica everettiana per mezzo della decoerenza, delle probabilità soggettive e di tutto il resto, non potremmo applicare la stessa interpretazione alla funzione d'onda ramificata della teoria dell'onda pilota – e ignorare semplicemente le particelle? Sì, possiamo ignorare le particelle, ma così torniamo dritti dritti nel multiverso di Everett. Questo punto mette in luce un assunto nascosto, forse inconscio, dei sostenitori della teoria dell'onda pilota, ossia che la realtà che noi osservatori percepiamo e misuriamo sia composta di materia costituita dalle particelle della teoria dell'onda pilota.

Di per sé, il fatto che le particelle e le onde siano esseribili nella teoria dell'onda pilota non le rende equivalenti. Per capire la teoria dell'onda pilota dobbiamo privilegiare le particelle e postulare che il mondo che percepiamo consista di particelle. Le onde sono presenti nello sfondo, ma il loro ruolo è guidare le particelle – non sono percepite direttamente e influenzano le nostre osservazioni attraverso il loro ruolo di guide.

Per quanto riguarda la spiegazione o la previsione del mondo, i rami fantasma non hanno un gran ruolo nella teoria dell'onda pilota. La probabilità che un ramo fantasma di un sistema macroscopico interferisca con il ramo occupato, modificando il futuro di quel sistema, è davvero minuscola. Si è tentati quindi di introdurre un meccanismo per potare i rami fantasma. Il risultato sarebbe una combinazione della teoria dell'onda pilota e dei modelli di collasso spontaneo. Non sono a conoscenza di lavori in questa direzione, ma mi sembra una strada interessante da esplorare.

Questo ci porta a un altro problema della teoria dell'onda pilota, l'asimmetria delle cause. La funzione d'onda guida la particella, ma la particella a sua volta non influenza in alcun modo la funzione d'onda. Non è così che funzionano le cause nella fisica ordinaria. In natura, e quindi nella maggior parte della fisica, di solito le cause sono reciproche. Tutto ciò a cui diamo una spinta ci respinge. Ciò è dovuto alla terza legge di Newton, in base alla quale a ogni azione corrisponde una reazione uguale e opposta. È quindi molto strano che la particella non possa influenzare la funzione d'onda. L'assenza di un effetto reciproco è una forte indicazione del fatto che manca qualcosa.

È pur vero che i rami fantasma spesso possono essere ignorati, ma spesso non vuol dire sempre. Alcuni esperimenti ingegnosi hanno messo in luce come il ramo della funzione d'onda che la particella non segue può influenzare il futuro tanto quanto i rami occupati¹. Questi casi complicati riguardano due particelle quantistiche che interagiscono, come un atomo e un fotone.

Secondo la teoria dell'onda pilota, l'atomo è sia una particella sia un'onda. Chiamiamole la particella dell'atomo e l'onda dell'atomo. Anche il fotone è sia una particella sia un'onda, quindi parleremo della particella del fotone e dell'onda del fotone. In entrambi i casi, l'onda guida la rispettiva

particella. Supponiamo però di predisporre le cose in modo che il fotone collida con l'atomo. Quali entità interagiscono?

Potreste essere tentati di supporre che la particella dell'atomo collida con la particella del fotone, ma in realtà non è così. Le due particelle sono invisibili l'una all'altra e potranno facilmente attraversarsi a vicenda. Ciò che accade è invece l'interazione delle due onde, che si disperdono a vicenda. Quindi, mentre le onde indietreggiano dopo la collisione, l'onda dell'atomo trascina con sé la particella dell'atomo e allo stesso modo l'onda del fotone trascina con sé la particella del fotone.

Tuttavia che una funzione d'onda disperda o no un'altra funzione d'onda non dipende dal fatto che il ramo sia occupato o vuoto. Ciò ha alcune conseguenze piuttosto strane, che però sono altrettanto strane per la meccanica quantistica tradizionale e per la teoria dell'onda pilota. Per esempio, può sembrare che una particella rimbalzi sul ramo fantasma della funzione d'onda di un'altra particella.

Non è un punto a sfavore della teoria dell'onda pilota. In effetti, mostra che la teoria funziona anche in simili situazioni controintuitive e ciò dovrebbe rafforzare la nostra fiducia in essa. Ci insegna però che il prezzo da pagare è la rinuncia a comode descrizioni in cui le particelle rappresentano la storia principale e i rami fantasma vengono ignorati.

Il fatto che le particelle sono guidate dalle funzioni d'onda ha altre conseguenze strane, una delle quali è che i movimenti delle particelle in risposta alla guida della funzione d'onda non conservano la quantità di moto e l'energia. Le particelle si comportano come gli UFO dei film di fantascienza di bassa qualità – per esempio, possono restare ferme per ore, il che è ciò che fanno in stati di energia ben definita, e poi saltar su all'improvviso e fuggir via in risposta a cambiamenti della funzione d'onda che le guida.

Questo fatto non sconvolgeva de Broglie, e non turba i suoi seguaci moderni, come Antony Valentini, i quali capiscono che così dev'essere, perché una parte del compito dell'equazione guida è far passare i percorsi delle particelle intorno agli ostacoli e attraverso le fenditure, per riprodurre la diffrazione della luce, e una particella che modifica la propria direzione senza urtare un'altra particella è una particella che modifica la propria quantità di moto. Per Einstein, tuttavia, era un ostacolo insormontabile, così come, suppongo, lo è stato per altri.

Se di un sistema che è in equilibrio quantistico si considerano i valori medi rispetto a molte traiettorie possibili delle particelle, allora in media la quantità di moto e l'energia si conservano. Questa è una delle ragioni per cui ho finito per preferire le formulazioni in cui le probabilità si riferiscono a ensemble di particelle che esistono realmente (l'argomento sarà discusso nel capitolo seguente).

La teoria dell'onda pilota propone una descrizione magnifica in cui le particelle si muovono nello spazio, guidate delicatamente da un'onda, che viaggia anch'essa nello spazio. La realtà è un po' meno intuitiva. Nel caso di un sistema composto da molte particelle, la funzione d'onda non viaggia nello spazio, bensì nello spazio delle configurazioni, che è multidimensionale e difficile da visualizzare. Come ho già sottolineato, le particelle non sono sferette come si immaginava in passato – reagiscono a cose vicine e lontane, comprese improvvise influenze non locali trasmesse attraverso l'equazione guida. Comunque, se si vuole che la teoria dell'onda pilota riproduca i risultati della meccanica quantistica, le particelle non possono fare altro.

Un terzo problema di questa teoria è la forte tensione con la teoria della relatività. Il motivo è la non località. I test sperimentali della restrizione di Bell indicano che qualunque tentativo di andare al di là dei quanti, di fornire una descrizione di singoli eventi e processi, deve incorporare esplicitamente la non località.

È necessario che questa non località sia codificata in qualche modo nella teoria dell'onda pilota, dato che questa teoria è un completamento della meccanica quantistica e concorda con le sue previsioni. E in effetti la non località è proprio incorporata. Com'è possibile? Consideriamo un sistema di due particelle entangled, molto distanti l'una dall'altra. Il segreto è che la forza quantistica che agisce su una particella dipende dalla posizione dell'altra particella. Questa dipendenza resta anche se le due particelle sono molto lontane.

Di conseguenza, se potessimo seguire le traiettorie delle singole particelle quantistiche, potremmo vedere che le particelle entangled si influenzano a vicenda non localmente (cioè, a distanza). Poiché di solito misuriamo soltanto posizioni medie e movimenti medi, questa incessante influenza non locale è annullata dalla casualità dei movimenti quantistici. Essa è però esplicitamente presente nel modo in cui la funzione d'onda guida le

particelle e possiamo immaginare esperimenti che potrebbero riuscire a osservarla.

I lettori attenti potrebbero sentire un campanello d'allarme. Questa comunicazione non locale di forze a distanza ci impone di parlare oggettivamente di eventi che sono distinti uno dall'altro, ma ciò nonostante simultanei. Un tale effetto istantaneo a distanza contraddice direttamente la relatività ristretta, che nega l'esistenza di un concetto assoluto di simultaneità per eventi distanti. Questo è davvero un problema e di conseguenza la relatività ristretta e la teoria dell'onda pilota sono in conflitto.

In particolare, l'equazione guida, che è l'origine delle forze non locali, è incompatibile con la relatività, poiché richiede per la sua definizione un sistema di riferimento privilegiato, che definisce un concetto assoluto di simultaneità. In pratica, il conflitto è attenuato perché la casualità della fisica quantistica implica che, finché si rimane in equilibrio quantistico^a, non si possono osservare direttamente le correlazioni non locali in un esperimento. Né possiamo inviare informazioni a una velocità superiore a quella della luce. A patto di non esaminare troppo da vicino che cosa accade nei singoli sistemi, la teoria dell'onda pilota mantiene una precaria coesistenza con la relatività. Ma il punto, ancora una volta, è che la teoria dell'onda pilota ci permette un esame più ravvicinato.

Attualmente sono in corso diverse ricerche mirate a estendere la teoria dell'onda pilota alla teoria relativistica dei campi, quindi non posso dare un quadro definitivo di come si risolverà questa tensione tra la relatività e la teoria dell'onda pilota².

Collasso della funzione d'onda.

Anche l'ipotesi del collasso spontaneo è utile come descrizione realistica del mondo quantistico in termini di esseribili. In questo caso, non esistono particelle, esistono soltanto onde, che però di tanto in tanto interrompono la propria propagazione regolare per collassare improvvisamente in concentrazioni simili a particelle. Da lí, le onde viaggiano e tornano a diffondersi. Poiché l'onda ha questo comportamento particolare, imita le particelle quando è necessario e quindi è l'unica esseribile.

I modelli di collasso risolvono inoltre il problema della misurazione, dal momento che si suppone che il collasso della funzione d'onda sia un fenomeno reale. Nei sistemi atomici è un caso raro, però il tasso di collassi aumenta rapidamente insieme alle dimensioni e alla complessità del sistema, quindi le sovrapposizioni e gli entanglement hanno poche possibilità di sopravvivere nei sistemi macroscopici. Le sovrapposizioni e gli entanglement sono distrutti dai collassi e quindi sono confinati nel dominio atomico. Questo risolve il problema della misurazione, dato che le funzioni d'onda degli strumenti di misura collassano sempre in una posizione precisa, e in più elimina i rami fantasma.

La teoria dell'onda pilota e i modelli di collasso spontaneo non sono soltanto due diverse interpretazioni della meccanica quantistica. Sono due teorie distinte e ciascuna formula alcune previsioni che differiscono da quelle della meccanica quantistica. Per quanto riguarda il comportamento di atomi e molecole, tuttavia, sono in accordo tra loro e con la meccanica quantistica tradizionale, con un livello di precisione maggiore di quello rilevabile dagli esperimenti. Per il momento, quindi, non possono essere distinte per via sperimentale l'una dall'altra o dalla meccanica quantistica. La teoria dell'onda pilota, però, prevede che la sovrapposizione e l'entanglement siano universali e che in linea di principio siano rilevabili in qualsiasi sistema, per quanto grande o complesso. Si tratta di una verifica sperimentale difficile, perché si deve combattere la tendenza di un sistema composto da molte particelle a perdere coerenza, dato che le numerose interazioni con l'ambiente del sistema casualizzano le fasi^b della funzione d'onda. In linea di principio, tuttavia, è una verifica fattibile e in effetti i fisici sperimentali continuano a espandere il dominio dei fenomeni quantistici.

Se però la funzione d'onda subisce un collasso spontaneo, il gioco finisce immediatamente. Se i modelli di collasso spontaneo sono corretti, nessun ricercatore riuscirà mai a sovrapporre due funzioni d'onda di un grande sistema complesso.

Un'altra differenza tra i modelli di collasso spontaneo e la teoria dell'onda pilota sta nel loro atteggiamento nei confronti del tempo. Le leggi della teoria dell'onda pilota sono reversibili rispetto al tempo, come le leggi della dinamica newtoniana. Il collasso spontaneo è irreversibile, come le leggi della termodinamica.

Le teorie del collasso della funzione d'onda presentano alcuni degli stessi aspetti negativi della teoria dell'onda pilota. In particolare, il collasso è istantaneo, ma ha luogo dappertutto contemporaneamente, creando un grave conflitto con la relatività. Come nella teoria dell'onda pilota, la legge precisa richiede di specificare un sistema di riferimento privilegiato e perciò contraddice la teoria della relatività. Come in quel caso, inoltre, alcuni lavori indicano che il conflitto può essere gestito, di modo che nel dominio in cui la teoria è in accordo con la meccanica quantistica le violazioni della teoria della relatività sono molto piccole.

Un altro inconveniente di alcuni modelli di collasso è il fatto, già citato, che l'energia non si conserva. Un altro ancora è che questo difetto può essere minimizzato regolando un parametro libero. A mio modo di vedere, la capacità di regolare parametri per garantire l'accordo con un esperimento è un difetto, in quanto suggerisce che la teoria è fatta in modo tale da nascondere una tensione essenziale nella sua costruzione.

In realtà, esistono parecchie versioni di modelli di collasso e in una certa misura si è liberi di modificarli e regolare nuovi parametri. È per questo motivo che si chiamano modelli, mentre la teoria dell'onda pilota, che non offre la possibilità di regolare alcunché, è una teoria.

Tra i vari problemi che abbiamo discusso, colpisce il fatto che tutte le teorie a variabili nascoste che sono state proposte sono in conflitto con la relatività ristretta. La ragione è semplice. Se si vuole una descrizione completa di singoli processi, questa descrizione, a causa dei test sperimentali della restrizione di Bell, deve essere non locale e ciò richiede una simultaneità privilegiata. Considerando la media sui singoli casi si ottengono le probabilità e, dato che queste sono in accordo con le probabilità previste dalla meccanica quantistica, non risultano contraddizioni evidenti con la relatività ristretta, perché le informazioni non possono essere inviate a una velocità superiore a quella della luce. Ma per un realista il conflitto è nondimeno presente, poiché la realtà è fatta di singoli casi. Lo si vede chiaramente nella teoria dell'onda pilota e nei modelli di collasso spontaneo.

Inoltre non si può sfuggire a questo dilemma rinunciando all'ambizione di andare al di là della meccanica quantistica, dato che il conflitto è presente nella meccanica quantistica stessa. Quando la funzione d'onda collassa obbedendo alla Regola 2, lo fa dappertutto contemporaneamente.

Nessun problema della fisica mi ha fatto soffrire di piú, e mi ha tenuto sveglio piú notti, di questo conflitto tra il realismo di buon senso applicato al dominio atomico e i principi della relatività ristretta.

Secondo me, la ragione piú importante per essere scettici nei confronti sia della teoria dell'onda pilota sia dei modelli di collasso spontaneo è che presentano pochi collegamenti con le altre grandi questioni della fisica, come la gravità quantistica e l'unificazione.

Come minimo, entrambi gli approcci forniscono una verifica teorica del fatto che possiamo essere realisti nei confronti della meccanica quantistica. Nessuno dei due, tuttavia, ha l'aria di essere corretto. Abbiamo ancora lavoro da fare per scoprire un completamento realistico della meccanica quantistica che eviti le insidie delle teorie esistenti offrendo al contempo soluzioni ad altre questioni fondamentali della fisica, fornendoci in tal modo una piattaforma su cui ricostruire la fisica.

Di recente sono state presentate alcune nuove proposte di teorie quantistiche realistiche. Anche se nessuna di queste, a mio avviso, è completamente convincente, sono state presentate alcune idee interessanti.

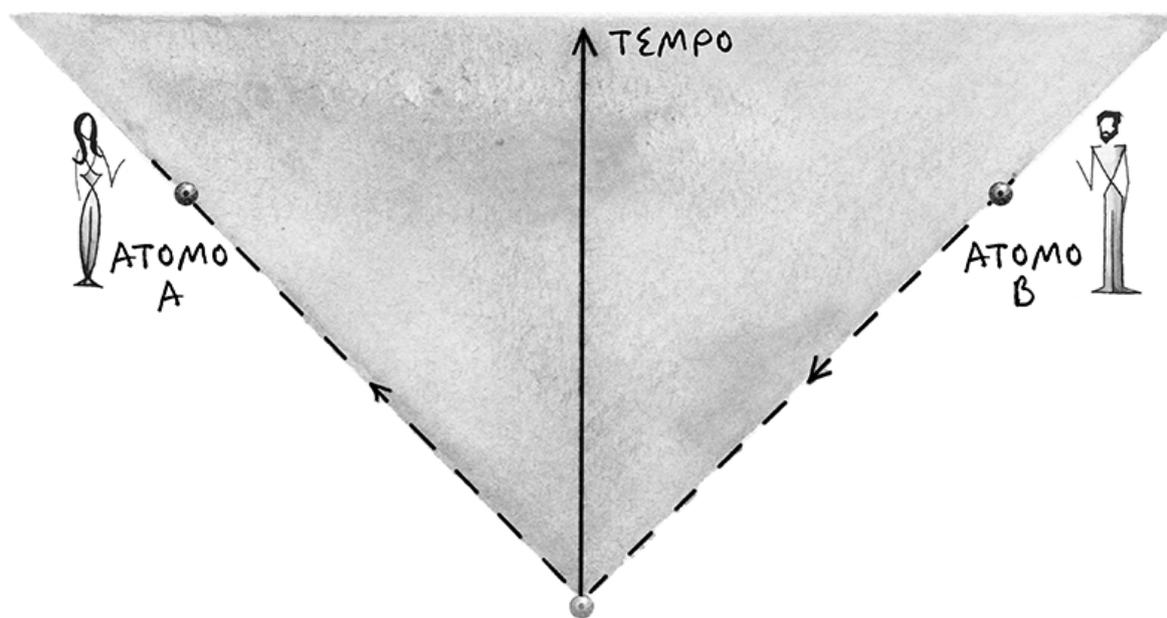


Figura 10.

Retrocausalità. I due atomi viaggiano verso il futuro, uno a sinistra e uno a destra. Ma un'influenza causale può viaggiare dalla posizione dell'atomo B indietro fino al punto del passato da cui hanno avuto origine gli atomi, e poi in avanti fino alla posizione dell'atomo A. In tal modo, l'effetto sembra essere contemporaneo alla sua causa.

Retrocausalità.

Un approccio realistico alla meccanica quantistica proposto di recente è la *retrocausalità*, in cui si suppone che gli effetti causali possano andare non solo in avanti nel tempo ma anche all'indietro. Di solito l'effetto viene dopo la causa, ma a volte invece, così sostengono i proponenti di questa concezione, la precede. Zigzagando avanti e indietro nel tempo, una catena causale può apparire non locale, come illustra la figura 10. Il trucco è semplice. Se possiamo tornare indietro nel tempo alla velocità della luce, e poi andare in avanti, possiamo finire in un evento contemporaneo alla nostra partenza, ma distante nello spazio. In una teoria in cui la causalità si estende sia nel futuro sia nel passato possiamo quindi aspirare a spiegare la non località e l'entanglement.

Questo tipo di approccio è stato difeso da Yakir Aharonov e Lev Vaidman³. Un'altra versione, chiamata interpretazione transazionale, è stata proposta da John Cramer e da Ruth Kastner⁴. Huw Price ha pubblicato un argomento secondo cui qualsiasi versione della meccanica quantistica simmetrica rispetto al tempo si deve basare sulla retrocausalità⁵.

Approcci basati su storie.

Secondo una vecchia idea, a essere fundamentalmente reali non sono le cose, ma i processi; non gli stati, ma le transizioni. Questa idea audace è alla base di numerosi approcci alla fisica quantistica, che derivano da una scoperta fatta da Richard Feynman quando era ancora un dottorando. Feynman formulò un modo alternativo di esprimere la meccanica quantistica evitando le descrizioni della natura in cui gli stati quantistici cambiano continuamente nel tempo e calcolando invece la probabilità che il sistema effettui una transizione tra una configurazione precedente e una suc-

cessiva. A tal fine, si considerano tutte le possibili storie che possono aver portato il sistema dall'una all'altra configurazione. La teoria assegna a ciascuna storia una fase quantistica ^c e, per trovare la funzione d'onda per la transizione, si sommano queste fasi per tutte le storie possibili. Poi si prende il quadrato per ottenere la probabilità, come nella regola di Born.

Così come lo propose Feynman, è soltanto uno schema per calcolare le probabilità nella meccanica quantistica. Rafael Sorkin, però, lo ha proposto come base di una teoria quantistica realistica, in cui le esseribili sono le storie. L'inghippo (che non manca mai, come ormai dovreste sapere) è che per parlare di ciò che hanno di reale queste storie si deve usare una logica quantistica non standard ⁶.

Delle storie fanno un uso molto diverso Murray Gell-Mann e James Hartle, che sostengono che la realtà di cui facciamo esperienza è soltanto una di molte storie altrettanto coerenti e altrettanto reali ⁷. L'idea è che se storie diverse perdono coerenza, non possono essere sovrapposte e perciò possono essere considerate storie alternative. Sulla base di questa idea Gell-Mann e Hartle, così come Robert Griffiths e Roland Omnès, hanno formulato *l'approccio delle storie coerenti* alla meccanica quantistica ⁸. Un risultato fondamentale di questo approccio è che una storia che obbedisce alle leggi di Newton della fisica classica farebbe parte di una famiglia che perde coerenza. Queste storie che vanno incontro a decoerenza possono essere trattate come se fossero storie reali alternative. Fay Dowker e Adrian Kent, tuttavia, hanno provato che non vale il contrario, dimostrando l'esistenza di molte classi di storie che perdono coerenza e non hanno a che vedere con la fisica newtoniana ⁹.

Nessuna di queste teorie basate sulle storie soddisfa il mio desiderio di avere una descrizione del mondo basata sul realismo ingenuo. Non ho nulla contro un realismo in cui a essere reali sono i processi anziché gli stati, le accadibili anziché le esseribili, ma negli approcci appena citati si finisce per calcolare non ciò che è accaduto, ma soltanto le probabilità di ciò che è accaduto. Inoltre, le relazioni tra le storie presupposte dalla teoria e le probabilità che osserviamo sono sempre collegate dalla regola di Born, il che suggerisce che quelle storie rappresentano possibilità e non fatti reali.

Molti mondi classici interagenti.

Consideriamo ora un'altra formulazione realistica contemporanea della fisica quantistica ¹⁰. Supponiamo che il nostro mondo sia classico, ma sia soltanto uno di moltissimi mondi classici, che esistono contemporaneamente. Questi mondi sono tutti simili, in quanto hanno lo stesso numero e gli stessi tipi di particelle, però differiscono quanto alle posizioni e alle traiettorie delle particelle.

Tutti questi mondi obbediscono alle leggi di Newton, con l'unica differenza che, oltre alle forze usuali tra le particelle di un mondo, è presente un nuovo tipo di forza, che comporta un'interazione tra particelle di mondi diversi.

Quando lanciate una palla, la palla risponde alla forza esercitata dal vostro braccio e all'attrazione gravitazionale della Terra. Contemporaneamente, anche un gran numero di vostre copie, ciascuna nel proprio mondo, lancia una palla. Ciascuna di queste palle ha un punto di partenza e una traiettoria leggermente diversi. Dai loro mondi separati, le diverse palle entrano in contatto e interagiscono l'una con l'altra. Queste nuove forze tra i mondi sono minuscole, ma il risultato è che ciascuna palla riceve qualche colpetto mentre viaggia. Voi osservate la palla soltanto nel vostro universo, perciò non potete spiegare nei dettagli i colpetti che riceve. Sembra quindi che vi sia una fluttuazione casuale che perturba leggermente il volo della vostra palla. Il risultato è che dovete introdurre un elemento casuale probabilistico in qualunque previsione del movimento della palla. Questa descrizione probabilistica è la meccanica quantistica.

Questa è la cosiddetta *teoria dei molti mondi interagenti*. Per farla funzionare nei minimi dettagli, occorre scegliere la forza tra i mondi con grande attenzione. Per far emergere la meccanica quantistica, dev'essere una forza diversa da tutte quelle conosciute. Deve coinvolgere triplette di mondi, per cui un colpetto ricevuto dalla vostra palla dipende da dove si trovano altre due palle, ciascuna nel proprio mondo.

Un grande vantaggio di questa formulazione è che si è dimostrata estremamente utile come base per programmi di calcolo dettagliati e molto precisi nell'ambito della chimica molecolare ¹¹.

Non intendo suggerire di considerarla una proposta seria riguardo alla natura, però è un altro esempio di una versione realistica della fisica quantistica.

Superdeterminismo.

Non tutti coloro che si occupano dei fondamenti quantistici accettano la conclusione del teorema di Bell, ossia che in natura la località viene violata. Sono state immaginate molte vie d'uscita, che per la maggior parte sono state scartate dagli esperimenti. Una scappatoia che non è facile da escludere si basa sull'idea di *superdeterminismo*. Torniamo all'esperimento di Aspect che ha smentito la località di Bell, come abbiamo visto nel capitolo IV. Due osservatori distanti scelgono ciascuno una direzione lungo la quale misurare la polarizzazione del fotone. La prova della violazione della località si basa sull'assunto che le due scelte siano fatte in maniera indipendente.

A rigor di termini, però, i due eventi in cui vengono fatte queste scelte sono entrambi nel futuro causale di alcuni eventi del loro passato. Dobbiamo soltanto tornare indietro nel tempo finché non troviamo eventi i cui futuri causali comprendono entrambi gli eventi in cui sono state scelte le polarizzazioni da misurare. Potremmo quindi includere questi eventi del passato – gli eventi il cui futuro causale comprende l'intero esperimento – come parti necessarie dell'esperimento. Potremmo poi immaginare che le inclinazioni scelte siano state entrambe specificate da qualcuno che ha stabilito con cura le condizioni iniziali nel passato di entrambi. Secondo la filosofia del superdeterminismo, l'universo si evolve deterministicamente e tali correlazioni sono state stabilite molto tempo fa, nel Big Bang.

Diversi fisici hanno suggerito che, se si presume che lo stato iniziale dell'universo sia stato scelto con cura (qualunque sia l'agente che si ritiene responsabile delle condizioni iniziali), tutte le coppie entangled che sono state misurate si potrebbero considerare impostate in modo tale da imitare i risultati di solito interpretati come conferme della non località. Quei risultati dovrebbero quindi essere letti come conferme del superdeterminismo anziché della non località. Siamo pertanto liberi di proporre una varia-

bile nascosta locale per spiegare la meccanica quantistica. Proposte simili sono state avanzate, tra gli altri, da Gerard 't Hooft ¹².

Gerard 't Hooft è davvero un grande scienziato, che quando non aveva ancora trent'anni è stato il solo responsabile di buona parte dei risultati fondamentali su cui si è basata la costruzione del modello standard. Ho avuto la fortuna di seguire un suo corso durante il dottorato e l'ho sempre ammirato personalmente. Da molti anni sostiene di aver elaborato una teoria deterministica a variabili nascoste locali, basata su un automa cellulare, che è un modello di un computer. Se ho capito bene, funziona in casi particolari, anche se 't Hooft, facendo appello al superdeterminismo, sostiene che la teoria ha una validità più generale. Comunque, lasciando perdere i dettagli, tra non località e superdeterminismo sono disposto a scommettere che sarà lo studio della prima a portarci più vicino alla verità. Lo dico con un certo rammarico, perché esistono pochi teorici della sua generazione che ammiro più di Gerard 't Hooft.

Andare al di là della teoria dell'onda pilota e dei modelli di collasso.

La mia conclusione è che nessuna delle proposte per una teoria quantistica realistica che ho presentato finora è del tutto convincente. Alcune sono affascinanti, ma nessuna ha il sostegno sperimentale né quel tipo di eleganza o completezza che può sostituire, per qualche tempo, un esperimento decisivo. Quindi, se volete unirvi a Einstein, de Broglie, Schrödinger, Bohm e Bell e andare al di là della descrizione statistica della teoria quantistica per arrivare a una descrizione delle esseribili che indichi che cosa accade esattamente in ciascun singolo processo quantistico, restate con noi, perché non abbiamo ancora finito.

Abbiamo qualche lezione da tenere a mente cercando di superare la teoria dell'onda pilota e i modelli di collasso? Senza dubbio. L'insegnamento più importante che possiamo trarre dai successi di questi approcci è che la funzione d'onda rappresenta un elemento della realtà fisica. Vediamo come si arriva a questa conclusione.

La teoria dell'onda pilota afferma che tutto nell'universo ha un'esistenza duale – come particella e come onda. Ciò risolve il problema della misura-

zione perché mantiene le particelle, e il modo in cui lo fa incorpora la sovrapposizione, l'entanglement e tutte le loro bizzarre conseguenze perché mantiene l'onda. Ma è corretta? Ho sostenuto che, per quanto notevole, presenta gravi difetti. Questo ci porta alla successiva possibilità: superare la teoria dell'onda pilota per inventare una nuova teoria delle esseribili.

La teoria dell'onda pilota ha successo perché postula la realtà sia delle particelle sia delle onde. Ma è davvero necessario? Potrebbe esistere una teoria che produce gli stessi risultati senza richiedere la doppia ontologia? Se esistesse, risolverebbe anche la questione della mancanza di reciprocità nella teoria.

Sarebbe estremamente interessante se fosse possibile riprodurre i successi della teoria dell'onda pilota con una sola classe di esseribili anziché due. Onde o particelle, ma non le une e le altre. Oppure qualcosa di completamente diverso.

Come primo tentativo, possiamo domandarci che cosa succede se partiamo dalla teoria dell'onda pilota e rinunciamo alle onde o alle particelle.

Se escludiamo le particelle, non risolviamo più il problema della misurazione – a meno di non modificare radicalmente il comportamento dell'onda ipotizzando il collasso spontaneo. Quindi rinunciare alle particelle riporta o ai modelli di collasso o all'interpretazione a molti mondi.

Proviamo quindi a rinunciare alla funzione d'onda, mantenendo le particelle. Che cosa sarà a guidare le particelle? Come potremo spiegare l'interferenza se abbiamo solo particelle? Potremmo, per esempio, recuperare la guida della funzione d'onda attribuendo nuove proprietà strane alle particelle?

Diversi fisici e matematici hanno cercato di inventare una teoria delle esseribili con le sole particelle, ma nessuno ci è riuscito. È una lunga storia, con alcuni retroscena avvincenti, ma la conclusione è semplice: la funzione d'onda sembra cogliere un aspetto essenziale della realtà¹³. Che io sappia, i risultati migliori sono stati ottenuti da un approccio del matematico Edward Nelson chiamato *meccanica quantistica stocastica*. Per molti anni ho pensato che questo fosse il modo giusto, ma poi ho capito che richiede una gran quantità di regolazioni fini per evitare le instabilità.

Questa conclusione è confermata da un'analisi recente di tre esperti di teoria dell'informazione quantistica, Matthew Pusey, Jonathan Barrett e

Terry Rudolph, che hanno presentato un argomento nuovo secondo cui lo stato quantistico non può essere soltanto una rappresentazione delle informazioni che un osservatore ha riguardo a un sistema. Deve essere fisicamente reale, o rappresentare qualcosa di reale¹⁴. A quanto pare, quindi, abbiamo solo due possibilità: tenere la funzione d'onda stessa come un'esseribile, come nella teoria dell'onda pilota e nei modelli di collasso, oppure trovare un'altra esseribile che esprima, in una forma diversa, la realtà fisica rappresentata dalla funzione d'onda.

- a. L'equilibrio quantistico è stato definito nel capitolo VIII.
- b. Le fasi di una funzione d'onda indicano le posizioni delle creste e dei ventri e le configurazioni che formano.
- c. Ossia un numero complesso.

Capitolo quattordicesimo

Partire dai principî

Ho intrapreso la carriera di fisico sperando di contribuire a risolvere i due grandi problemi posti da Einstein nelle sue note autobiografiche: combinare la fisica quantistica con lo spaziotempo e capire la fisica quantistica.

Da allora, nonostante gli sforzi di molte menti brillanti per piú di mezzo secolo, questi due problemi restano irrisolti. È opportuno prenderci del tempo per capire perché.

Negli ultimi tempi mi domando spesso se non siamo andati avanti a cercare di completare le due rivoluzioni gemelle di Einstein procedendo in modo del tutto sbagliato. Inventiamo teorie, come la gravità quantistica a loop, la teoria delle stringhe, la teoria dell'onda pilota e altre, ma queste teorie non vanno abbastanza in profondità: sono modelli, che incorporano le nostre idee sulla natura, però non sono le espressioni piú profonde o piú pure di queste idee.

I modelli esemplificano le idee, spesso però in una forma molto semplice, che permette alle caratteristiche e alle implicazioni essenziali delle idee di trasparire. Il gioco Monopoli è un modello del capitalismo. I non scienziati spesso non si rendono conto di quanto possano essere utili i modelli – proprio perché sono incompleti e tralasciano alcune cose – quando si è nella fase di esplorazione delle implicazioni di un'idea.

Le idee sulla natura si esprimono nel modo piú puro o come ipotesi o come principî. Un'ipotesi è una semplice affermazione riguardo alla natura, che è falsa o vera. «La materia non è divisibile all'infinito perché è fatta di atomi» è un'ipotesi, come «la luce è un'onda che viaggia nei campi elettrici e magnetici». Queste due ipotesi si sono rivelate entrambe vere, ma la storia della scienza è ricca di ipotesi che si sono dimostrate false.

Un principio è una condizione generale che limita la forma che può assumere una legge di natura. «È impossibile realizzare un esperimento che

possa determinare un senso assoluto di quiete, o misurare una velocità assoluta» è un principio.

Einstein sapeva il fatto suo quando introdusse la relatività ristretta: iniziò il suo articolo del 1905 con due principi e ne dedusse direttamente le conseguenze. Va notato che l'idea di unificare spazio e tempo in un'unica entità chiamata spaziotempo non faceva parte della concezione originaria di relatività di Einstein. L'idea di spaziotempo fu introdotta due anni dopo come modello che esemplificava i principi di Einstein da Hermann Minkowski, che era stato suo insegnante.

Il problema, se saltiamo la fase dei principi e delle ipotesi e andiamo direttamente ai modelli, è che possiamo perderci. Quando cerchiamo di mettere a punto i dettagli di un modello, restiamo facilmente intrappolati in un orizzonte microscopico. Come mi disse una volta Feynman: «Fai di ogni domanda che ti poni nella ricerca una domanda sulla natura. Altrimenti puoi sprecare la vita per capire le minuzie di teorie che molto probabilmente non avranno mai nulla a che fare con la natura». O, peggio ancora, veniamo coinvolti in piccole competizioni e dispute accademiche per il controllo del territorio tra i sostenitori di modelli diversi.

Einstein espresse questo concetto esortando insistentemente a distinguere due tipi di teorie. Le *teorie dei principi* sono quelle che incorporano i principi generali. Limitano il campo del possibile, ma non sono sufficienti per i dettagli. A fornirli sono le teorie del secondo tipo, chiamate da Einstein *teorie costruttive*, che descrivono particelle particolari o forze specifiche che la natura può o no contenere. La relatività ristretta e la termodinamica sono teorie dei principi. La teoria dell'elettrone di Dirac e la teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell sono teorie costruttive.

La mia conclusione è quindi che dobbiamo lasciar perdere i nostri modelli, rimandare le congetture sui costituenti e ricominciare parlando dei principi.

La nostra strategia consisterà quindi nel procedere verso l'obiettivo di inventare una nuova teoria fondamentale in quattro passi: primo, i principi; secondo, le ipotesi (che devono soddisfare i principi); terzo, i modelli (che illustrano una parte delle implicazioni dei principi e delle ipotesi); da ultimo, le teorie complete. Anteporre i principi alle teorie solleva una domanda interessante: dove troviamo un linguaggio per affermare i principi e un contesto per motivarli e criticarli? Non vogliamo usare il linguaggio del-

le teorie esistenti perché lo scopo dell'esercizio è superarle. Einstein non avrebbe mai inventato la relatività generale se si fosse limitato a ragionare nel linguaggio della fisica newtoniana.

A volte la matematica può fornire nuove idee e strutture, quindi spesso è d'aiuto. Ma la nuova matematica di solito non basta per creare la nuova fisica, altrimenti sarebbero stati Bernhard Riemann o William Kingdon Clifford a inventare la relatività generale. Qui una certa conoscenza della filosofia può essere l'elemento essenziale, perché una persona con una formazione filosofica ha tra i suoi strumenti una grande abbondanza di idee e metodi provenienti dall'intera storia dei tentativi umani di riflettere sui fondamenti della nostra descrizione del mondo. Riguardo a questioni essenziali come la natura dello spazio e del tempo, quella storia è ricca di argomenti e strategie utili da sperimentare. Quindi Einstein non era solo quando affrontò la necessità di nuovi concetti di spazio e tempo. Era come se avesse sempre in tasca Galileo, Newton, Leibniz, Kant e Mach e fosse in grado di conversare con loro e beneficiare delle loro intuizioni. Allo stesso modo, una buona conoscenza di Platone, Kant e altri fornì a Heisenberg un linguaggio per andare al di là delle particelle newtoniane.

Il Novecento ha visto una fioritura della filosofia nella fisica, che ha ulteriormente arricchito il magazzino di idee e argomenti utili. In effetti la filosofia è una tradizione vivente e se un tempo i filosofi della fisica avevano una scarsa padronanza tecnica della fisica, quell'epoca è finita da un pezzo. Non intendo quindi scusarmi per essermi rivolto sia ai saggi del passato sia ai filosofi contemporanei per trovare un linguaggio, i contesti e le idee per impostare la mia ricerca di nuovi principi della fisica.

Iniziare dai principi ha come conseguenza immediata che ci rendiamo conto che la gravità quantistica e i fondamenti quantistici sono aspetti diversi di un unico problema. Quando i fisici cercano di risolvere la gravità quantistica senza tenere conto delle questioni relative ai fondamenti quantistici, e viceversa, adottano l'approccio sbagliato. I due problemi sono profondamente legati. Una delle ragioni è che, a causa della non località quantistica, andare al di là della meccanica quantistica vuol dire andare al di là dello spaziotempo.

Procederò quindi proponendo principi che combinano i fenomeni quantistici con lo spaziotempo. Una volta ottenuto un buon insieme di

principî, il passo successivo consisterà nel formulare ipotesi su come realizzarli.

Il nostro obiettivo è unire la fisica quantistica e lo spaziotempo al livello dei principî fondamentali. Ora presenterò quelli che credo essere i principî giusti per dar forma a questa unificazione.

Principî per la fisica fondamentale.

1. Indipendenza dal background.

Una teoria fisica non dovrebbe dipendere da strutture fisse che non si evolvono dinamicamente interagendo con altre grandezze. Questo è un concetto fondamentale, che ha bisogno di qualche spiegazione.

Tutte le teorie fisiche concepite finora dipendono da strutture che sono fisse nel tempo e non hanno nulla che le giustifichi; sono semplicemente date per scontate e imposte. Un esempio è la geometria dello spazio, in tutte le teorie anteriori alla relatività generale. Nella fisica newtoniana, si presume che la geometria dello spazio sia la geometria euclidea tridimensionale. È arbitraria, non cambia nel tempo e nulla la può influenzare. Pertanto non è soggetta a una legge dinamica.

Ai tempi di Newton, la geometria euclidea era l'unica conosciuta, perciò egli non aveva alternative e non doveva cercare una giustificazione per la sua scelta. Nell'Ottocento, però, Gauss, Lobačevskij e Riemann scoprirono un'infinità di geometrie alternative. Qualsiasi teoria fondamentale posteriore ai loro lavori deve giustificare la propria scelta della geometria dello spazio. Il principio dell'indipendenza dal background richiede che la scelta non sia fatta dal teorico, bensì dalla teoria, dinamicamente, nella risoluzione delle equazioni delle leggi fisiche.

Le strutture fisse, non dinamiche, definiscono un background congelato, il contesto immutabile in cui si evolve il sistema a cui siamo interessati. Direi che queste strutture congelate rappresentano oggetti al di fuori del sistema che modelliamo, che influenzano il sistema senza mai cambiare essi stessi (o che sono soggetti a cambiamenti troppo lenti per essere notati). Pertanto queste strutture di background fisse sono la prova che la teoria in questione è incompleta.

Ne segue che qualsiasi teoria con strutture esterne fisse può essere migliorata se gli elementi esterni possono essere scongelati, resi dinamici, e portati all'interno del cerchio dei gradi fisici di libertà interagenti. Fu questa strategia a portare Einstein alla relatività generale. La geometria dello spazio e del tempo è congelata nella fisica newtoniana ed è tale anche nella relatività ristretta. In queste teorie, la geometria dello spaziotempo fornisce un background fisso e assoluto che permette di definire le misure. La relatività generale scongela la geometria, rendendola dinamica.

Questo processo si sta rivelando composto da più stadi, perché le nostre teorie sono strati di elementi congelati, che si sono formati, come strati sedimentari, nel corso della storia lunga e complessa di questo argomento. La relatività generale scongela alcuni aspetti della geometria, ma le strutture più profonde, come le dimensioni e le strutture necessarie per definire i numeri continui o un tasso di cambiamento, restano congelate. Quindi la relatività generale, per quanto bellissima, non può essere la fine della ricerca e richiederà un completamento.

Ogni passo estende la portata della teoria. Ne segue che l'unica teoria completa della fisica deve essere una teoria cosmologica, perché l'universo è l'unico sistema che non ha nulla al suo esterno. Una teoria dell'intero universo deve quindi essere molto diversa dalle teorie di parti dell'universo. Non deve avere nessun elemento fisso, congelato, atemporale, perché questi si riferirebbero a oggetti esterni al sistema descritto dalla teoria. Deve essere completamente indipendente dal background. Il fatto che una teoria cosmologica non può essere ottenuta con una semplice estensione delle teorie esistenti, ma deve essere una teoria di un tipo radicalmente nuovo, è l'insegnamento più importante che abbiamo ricavato finora nella ricerca di un completamento delle due rivoluzioni gemelle di Einstein ^a.

Ne segue che la meccanica quantistica non può essere una teoria dell'intero universo perché anch'essa ha troppi elementi fissi, che comprendono le osservabili del sistema e le loro varie relazioni, oltre alla struttura che dà origine alle probabilità ^b.

Ciò implica che non esiste una funzione d'onda dell'universo, perché non esistono osservatori al di fuori dell'universo che potrebbero misurarla. Lo stato quantistico è, e deve continuare a essere, una descrizione di una parte dell'universo.

Quindi cerchiamo di completare la teoria quantistica eliminando le strutture di background. A tal fine, mettiamo in luce il background per poi scongelarlo e dargli una dinamica. In altre parole, anziché quantizzare la gravità cerchiamo di «gravitizzare» i quanti. Con ciò si intende il processo di individuazione e scongelamento degli aspetti della teoria quantistica che sono arbitrari e fissi, per renderli soggetti a leggi dinamiche. Invertendo il punto di vista, speriamo di capire le caratteristiche più difficili della fisica quantistica come conseguenze della separazione dell'universo in due parti: il sistema che osserviamo e tutto il resto, contenente gli osservatori e i loro strumenti di misura.

Un'altra idea strettamente legata all'indipendenza dal background è che *le osservabili delle teorie fisiche dovrebbero descrivere relazioni.*

Leibniz, Mach e Einstein ci hanno insegnato a distinguere i concetti assoluti di spazio e tempo dai concetti relazionali. Si dice che una posizione nello spazio è assoluta se il luogo in cui si trova qualcosa ha un significato fisso. Una posizione relativa è definita facendo riferimento a qualcos'altro. Tre isolati a sud del supermarket è una posizione relativa. In maniera analoga, un tempo assoluto ha un significato che non fa riferimento a niente altro, mentre il tempo relazionale è sempre definito dalla sua relazione con un altro evento o insieme di eventi.

Questo ci porta al secondo principio.

2. Lo spazio e il tempo sono relazionali.

Un'osservabile, o proprietà, relazionale descrive una relazione tra due entità. In una teoria senza strutture di background, tutte le proprietà che si riferiscono alla posizione nello spazio o al tempo dovrebbero essere relazionali. Le teorie indipendenti dal background ci parlano della natura attraverso osservabili relazionali.

Il terzo principio afferma che nulla è escluso.

3. Principio di completezza causale.

Se una teoria è completa, tutto ciò che accade nell'universo ha una causa, costituita da uno o più eventi precedenti. Non accade mai che la catena

di cause risalga a qualcosa di esterno all'universo.

Il principio seguente fu introdotto da Einstein, nei suoi articoli sulla relatività generale.

4. *Principio di reciprocità.*

Se un oggetto A agisce su un altro oggetto B, anche B a sua volta deve agire su A.

L'ultimo principio è sottile ma potente.

5. *Principio dell'identità degli indiscernibili.*

Secondo questo principio, due oggetti che hanno esattamente le stesse proprietà in realtà sono lo stesso oggetto.

Abbiamo quindi cinque principi strettamente legati:

1. il principio dell'indipendenza dal background
2. il principio che lo spazio e il tempo sono relazionali
3. il principio di completezza causale
4. il principio di reciprocità
5. il principio dell'identità degli indiscernibili.

Questi sono tutti aspetti di quest'unico principio, che Leibniz chiamò *principio di ragion sufficiente*: ogni volta che individuiamo qualche aspetto dell'universo che apparentemente potrebbe essere diverso, dopo un esame più approfondito scopriremo una ragione razionale del motivo per cui è così e non altrimenti.

Per esempio, date le conoscenze attuali, sembra che lo spazio possa avere più o meno di tre dimensioni. (Con ciò intendo le tre grandi dimensioni che vediamo intorno a noi; non conto le ipotetiche minuscole dimensioni «arrotolate» discernibili soltanto a una scala subatomica). Il motivo è che tutte le teorie attuali, compresa la relatività generale e la meccanica quantistica, avrebbero senso anche in un mondo con un numero diverso di dimensioni spaziali. Il principio di ragion sufficiente di Leibniz ci avvisa che deve essere così perché le nostre teorie attuali sono incomplete. Dobbia-

mo cercare di completare le nostre teorie e un segno di successo sarà la scoperta del motivo per cui il numero delle grandi dimensioni spaziali è tre^c.

Leibniz era convinto della possibilità di scoprire una spiegazione razionale per ogni scelta che Dio può sembrare aver fatto nella creazione dell'universo e parlava dello stato in cui si sarebbe raggiunta questa comprensione come dello stato di «ragion sufficiente». Secondo il suo principio di ragion sufficiente, l'universo può essere compreso completamente.

Ciascuno dei principî che ho elencato esprime questa idea. Per esempio, potremmo domandarci perché l'universo sia nato dove è nato e non dieci metri a sinistra, ma tutto sarebbe andato esattamente nello stesso modo, perciò questa non è una domanda sensata. Pertanto la posizione assoluta è priva di significato; soltanto la posizione relativa è significativa. Uno scienziato che aspira a essere razionale deve essere un relazionista.

Le nostre teorie esprimono questi principî in maniera incompleta, ma nel corso del tempo hanno mostrato una chiara tendenza a spiegare di piú. Ogni volta che spieghiamo una caratteristica del mondo in un modo che limita le possibilità di scelta che un creatore avrebbe potuto avere, eliminiamo una parte dell'arbitrarietà che percepiamo in precedenza nel progetto del mondo. Via via che cresce la nostra comprensione del mondo, esso ci appare piú razionale. Ciò accade ogni volta che scopriamo un'unità nascosta. Un buon esempio è la scoperta di Maxwell che la luce, l'elettricità e il magnetismo non sono fenomeni distinti, bensí aspetti diversi di un'unica forza. Questa scoperta ci mostra che non potrebbe esistere un mondo con il magnetismo ma senza forze elettriche e ci fa capire che in qualunque mondo con l'elettricità e il magnetismo deve esistere anche la luce.

Non so se raggiungeremo mai una comprensione completa della natura, però credo che il nostro obiettivo dovrebbe essere un continuo progresso verso una comprensione piú completa, il che significa che cerchiamo costantemente meno arbitrarietà e piú razionalità. Pertanto proporrei di cercare una *ragione sempre piú sufficiente*.

Sono convinto che il progresso della scienza si misuri in base a tali aumenti della nostra comprensione della natura.

La relatività ristretta è un miglioramento rispetto alla fisica newtoniana e la relatività generale, grazie all'adozione di una geometria dello spazio-tempo puramente relazionale, è un miglioramento rispetto a entrambe. Possiamo anche dire che la meccanica quantistica soddisfa il principio di reciprocità meglio della meccanica newtoniana, ma che la teoria dell'onda pilota si avvicina ancora di più alla ragion sufficiente perché spiega cose che la meccanica quantistica lascia senza spiegazione, come il motivo per cui singoli eventi hanno luogo dove e quando hanno luogo.

Tuttavia, come ho già detto, la teoria dell'onda pilota non soddisfa un altro principio, il principio di reciprocità di Einstein. L'onda pilota guida la particella, ma la particella non produce alcun effetto sull'onda. Quindi abbiamo ancora un po' di strada da fare.

Il principio di ragion sufficiente ci avvisa che possiamo fare di meglio.

Come potremo considerare lo spazio e il tempo in questo nuovo mondo di relazioni? Nel capitolo XII, da un esame degli approcci ai fondamenti quantistici ho tratto l'insegnamento che *lo spazio e il tempo non possono essere entrambi fondamentali*. Solo uno dei due può essere presente al livello di comprensione più profondo; l'altro deve essere emergente e contingente. In definitiva, sembra che questo ci venga imposto dalla non località dell'entanglement, che porta a un contrasto fra gli approcci realistici alla meccanica quantistica e la relatività ristretta. Quest'ultima unifica lo spazio e il tempo nello spaziotempo, che secondo ciò che indicano i test sperimentali della restrizione di Bell è trasceso nei singoli processi quantistici. Vorrei quindi suggerire che la tensione si risolve considerando fondamentale un elemento della coppia *spazio/tempo*, mentre l'altro è una descrizione emergente e approssimativa, in ultima analisi una specie di illusione. Per molte ragioni, alcune descritte qui e altre discusse in libri precedenti¹, scelgo di concentrarmi sull'ipotesi che il tempo sia fondamentale e lo spazio emergente.

I principî ci portano fin qui. Il passo successivo consiste nel formulare ipotesi. Propongo tre ipotesi riguardo a ciò che sta al di là dello spaziotempo e al di là dei quanti.

Il tempo, nel senso della causalità, è fondamentale. Ciò significa che il processo che produce gli eventi futuri a partire dagli eventi presenti, chiamato causalità, è fondamentale.

Il tempo è irreversibile. Il processo che dagli eventi presenti crea gli eventi futuri non può procedere all'indietro. Una volta che un evento è accaduto, non si può far sí che non sia accaduto ^d.

Lo spazio è emergente. Fondamentalmente, lo spazio non esiste. Esistono eventi, che causano altri eventi, quindi esistono relazioni causali. Questi eventi formano una rete di relazioni. Lo spazio emerge come descrizione approssimativa e a grana grossa della rete di relazioni tra gli eventi.

Ciò significa che la località è emergente. Quindi deve essere emergente anche la non località.

Se la località non è assoluta, se è il risultato contingente della dinamica, presenterà difetti ed eccezioni. In effetti, sembra proprio che sia così: in quale altro modo dovremmo interpretare la non località quantistica, in particolare l'entanglement non locale? La mia ipotesi è che siano resti delle relazioni atemporalmente inerenti allo stadio primordiale, prima dell'emergere dello spazio. In questo modo, postulando che lo spazio sia emergente, abbiamo la possibilità di spiegare la non località quantistica come conseguenza dei difetti che si presentano con l'emergere dello spazio ².

La combinazione di un tempo fondamentale e di uno spazio emergente implica che potrebbe esistere una simultaneità fondamentale. A un livello più profondo, in cui lo spazio scompare ma il tempo persiste, si può dare un significato universale al concetto di *adesso*. Se il tempo è più fondamentale dello spazio, allora durante lo stadio primordiale, in cui lo spazio è dissolto in una rete di relazioni, il tempo è globale e universale. Il relazionalismo, nella forma in cui il tempo è reale e lo spazio è emergente, è la risoluzione del conflitto tra realismo e relatività.

Diamo un nome a questa versione del relazionalismo, che mette in risalto la realtà e l'irreversibilità del tempo e la natura fondamentale dello scorrere dei momenti presenti. Chiamiamolo *relazionalismo temporale*. Il *relazionalismo eternalista*, per contro, indaga l'ipotesi che lo spazio sia fondamentale, ma il tempo sia emergente.

Variabili nascoste relazionali.

Ciò che cerchiamo è quindi un completamento della meccanica quantistica che sia indipendente dal background e relazionale, e che sia formulato in un mondo in cui il tempo è fondamentale e lo spazio emergente. Se contiene variabili nascoste, queste devono esprimere relazioni tra particelle. Pertanto le variabili nascoste non ci danno una descrizione più completa di un singolo elettrone; devono esprimere relazioni che valgono fra un elettrone e altri elettroni. Possiamo chiamarle *variabili nascoste relazionali*.

Esiste qualcosa di più relazionale del mistero quantistico più profondo e inafferrabile, ossia l'entanglement? Una formulazione relazionale della fisica quantistica inizierà inserendo per prima cosa l'entanglement. Se, come abbiamo ipotizzato, lo spazio è emergente, la distanza nello spazio deve derivare da relazioni più fondamentali. Forse questa relazione più fondamentale, da cui emerge lo spazio, è l'entanglement^e.

Le variabili nascoste della teoria dell'onda pilota sono le traiettorie delle particelle. Non sono relazionali; in realtà non fanno altro che darci più informazioni su ciascuna delle particelle, singolarmente. Va detto, però, che la teoria dell'onda pilota contiene già un'ampia dose di relazionalismo. Ciò è inerente al fatto che la funzione d'onda, nel caso di un sistema composto da più di una particella, non vive nello spazio ordinario, ma nello spazio delle configurazioni dell'intero sistema, che è formato da molte particelle. Come ho spiegato nel capitolo VIII, ciò è necessario per incorporare l'entanglement.

Formulai per la prima volta il concetto di variabili nascoste relazionali, compresa l'ipotesi che lo spazio derivi da relazioni più fondamentali, in particolare dall'entanglement, all'inizio della mia carriera. Nel 1983 scrissi un preprint sulla formulazione di una teoria a variabili nascoste relazionali³ e quello fu il primo dei miei sforzi in tal senso⁴.

La mia teoria del 1983 si basava su un'idea semplice. Supponiamo di avere un sistema di particelle nello spazio. In una descrizione assoluta, inseriamo la codifica della posizione di ogni singola particella fornendo le coordinate spaziali. Queste coordinate sono assolute; si riferiscono a un osservatore esterno al sistema – per Newton, era Dio stesso. In una descrizione relazionale, potremmo usare soltanto le distanze relative tra ciascuna coppia di particelle. Queste non dipendono più da qualche riferimento a un osservatore esterno al sistema.

Abbiamo una distanza relativa per ogni coppia di particelle, quindi possiamo rappresentarle tutte mediante una tabella di numeri. L'elemento che si trova all'incrocio tra la decima riga e la quarantasettesima colonna indica la distanza tra la decima particella e la quarantasettesima. Una simile tabella si può chiamare anche matrice. La mia teoria del 1983 utilizzava una grande matrice di numeri complessi per descrivere un sistema di molte particelle in uno spazio a due dimensioni. Nel caso di un numero alto di particelle, le probabilità dei movimenti delle particelle erano descritte approssimativamente dall'equazione di Schrödinger.

Da allora sono state presentate diverse proposte che vanno al di là dei quanti partendo dalla teoria dell'onda pilota e sostituendo la funzione d'onda con una struttura più profonda descritta in termini di matrici. Alcune teorie a variabili nascoste relazionali sono state proposte anche da Stephen Adler⁵ e Artem Starodubtsev⁶.

Una matrice assegna un numero a ogni coppia di particelle. Un'altra struttura che svolge questa funzione è un grafo, che è una struttura semplice fatta di punti collegati da linee. Ciascuna coppia di punti può essere o no collegata da una linea. Possiamo assegnare un 1 alla coppia se i due punti sono collegati e uno 0 se non sono collegati e in questo modo otteniamo una matrice che rappresenta la stessa struttura.

I grafi e le matrici sono due modi di esprimere l'ipotesi che le esseribili fondamentali alla base della fisica siano una rete di relazioni. Queste relazioni possono esprimere l'entanglement quantistico e la non località.

$$\begin{bmatrix} 6 & 8 & 1 & 5 \\ 1 & 10 & 16 & 3 \\ 21 & 0 & 9 & 61 \\ 4 & 15 & 201 & 7 \end{bmatrix}$$

Figura II.

Una matrice è una tabella di numeri, composta di righe e colonne.

Non esistono modelli di un sistema di relazioni piú puri di un grafo o di una rete. È interessante notare che le reti sono sempre presenti negli approcci alla gravità quantistica che sono in accordo con il principio dell'indipendenza dal background, come la gravità quantistica a loop, gli insiemi causali e le relazioni dinamiche causali. Ciò suggerisce due interessanti approfondimenti delle nostre ipotesi: lo spazio emerge dalla rete fondamentale e la fisica quantistica nasce dalle interazioni non locali rimaste quando emerge lo spazio.

Tuttavia le reti non si inseriscono facilmente nello spazio, se «vicino» nello spazio emergente deve corrispondere a «vicino» nella rete. La ragione è semplice. Consideriamo due punti nel grafo, ciascuno corrispondente a un punto nello spazio emergente. Supponiamo che siano distanti tra loro nello spazio e distanti anche nel grafo. Ora però aggiungiamo al grafo un collegamento che li unisce direttamente. Tutt'a un tratto, i due punti sono vicini nel grafo, ma continuano a essere lontani se considerati in relazione allo spazio emergente.

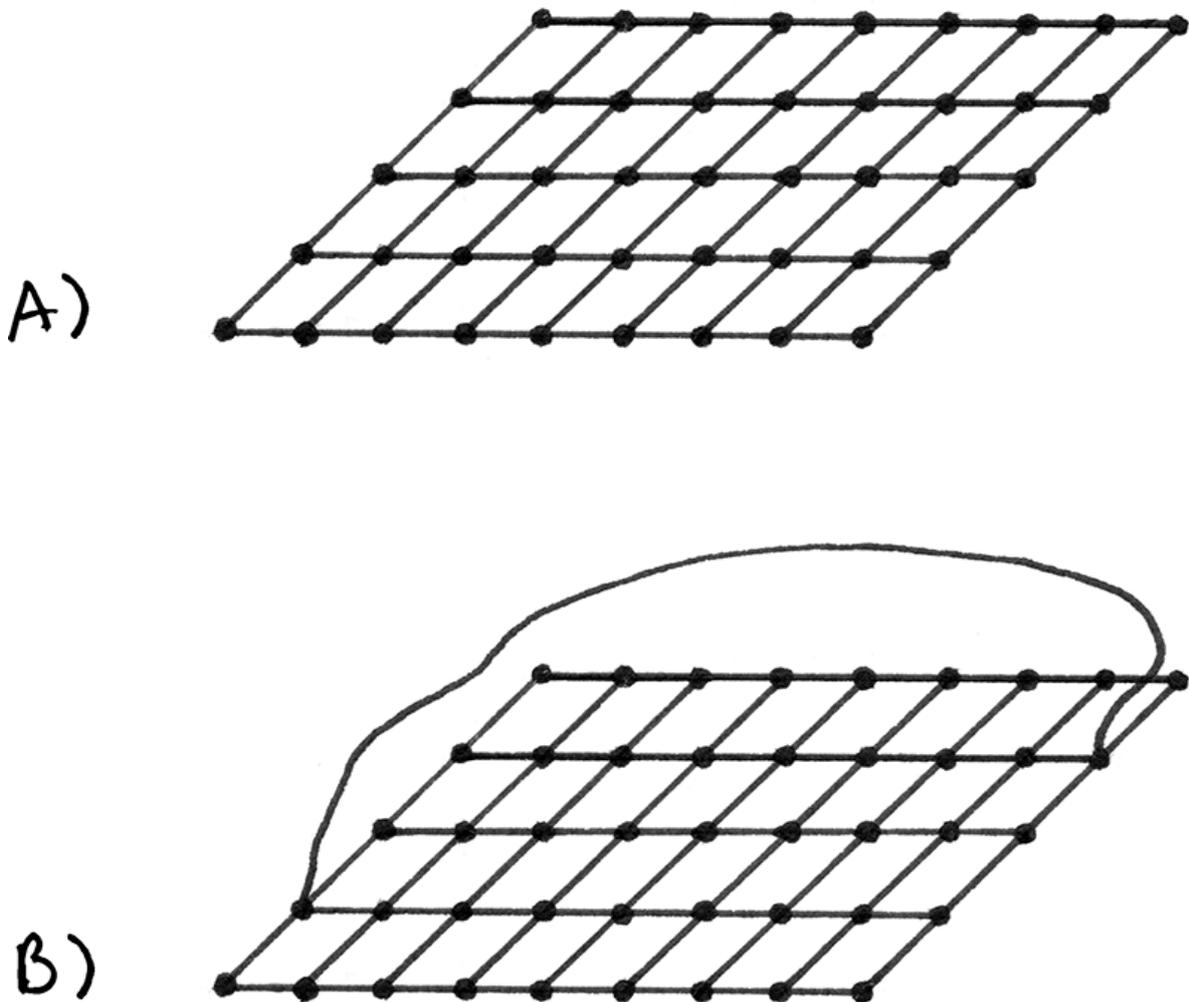


Figura 12.

Località disordinata. A) Un reticolo di punti, immerso nello spazio, che chiamiamo locale perché punti che sono distanti in termini di passi sul reticolo sono distanti an-

che nello spazio in cui è immerso. B) L'aggiunta di un nuovo collegamento tra due punti distanti distrugge la località perché i punti collegati sono ancora lontani nello spazio, ma distano solo un passo sul reticolo.

Nel lavoro realizzato insieme a Fotini Markopoulou, abbiamo chiamato questi collegamenti *difetti di località*. Hanno l'aspetto di minuscoli cunicoli spaziotemporali. Abbiamo mostrato che nella gravità quantistica a loop sarebbero comuni⁷. Questo risultato ci ha portati a scrivere un altro articolo, in cui abbiamo derivato la meccanica quantistica considerando la media delle interazioni non locali che potrebbero emergere da questi difetti di località⁸. Un po' ironicamente, l'abbiamo intitolato *Quantum theory from quantum gravity* (teoria quantistica derivata dalla gravità quantistica)^f.

Ho incontrato Richard Feynman solo poche volte, ma in due occasioni egli fu così gentile da domandarmi del mio lavoro. Mi rispose nello stesso modo entrambe le volte: dopo avermi ascoltato con attenzione, suggerì che l'idea che gli avevo descritto non era abbastanza folle da avere la possibilità di funzionare. Credo che con ciò intendesse dire che la mia idea non andava abbastanza in profondità. In ogni caso, questo è ciò che penso dei miei primi tentativi di formulare una teoria a variabili nascoste relazionali basata su matrici e reti. Risolvono il problema di fornire un completamento della meccanica quantistica a un livello tecnico, ma per altri aspetti non sono all'altezza del compito. Si può dire, per esempio, che l'equazione di Schrödinger viene fuori come previsione della teoria soltanto se si limano le imperfezioni e si fa una regolazione fine delle equazioni.

Per approfondire l'idea relazionale, possiamo cercare ispirazione tornando a Leibniz. In un piccolo libro scritto nel 1714, *La monadologia*, Leibniz descrisse a grandi linee una concezione puramente relazionale dell'universo⁹. Poiché vogliamo soltanto farci ispirare da Leibniz, non ci interessa riprodurre fedelmente la sua concezione. Dato che siamo liberi di interpretare in modo creativo il suo libro, ne proporrò una lettura molto libera.

Chiameremo *nadi* gli elementi del modello relazionale dell'universo perché corrispondono solo in parte agli elementi di Leibniz, da lui chiamati *monadi*. Le nadi hanno due tipi di proprietà: proprietà intrinseche, che ap-

partengono a ciascuna singola nade, e proprietà relazionali, che dipendono da un certo numero di nadi. Un universo nadico può essere rappresentato da un grafo, con le proprietà relazionali rappresentate da etichette sui collegamenti che uniscono coppie di nadi.

Non è una coincidenza se finora questo quadro è in accordo con la descrizione del mondo fornita nella gravità quantistica a loop, in cui uno stato del mondo è descritto da un grafo etichettato.

Ciascuna nade ha una *visione dell'universo*, che riassume le sue relazioni con il resto. Uno dei modi in cui si può parlare di queste visioni è in termini di intorni (o zone) del grafo. Esaminiamo la visione di una nade chiamata Sara. Consideriamo le nadi che distano un passo da Sara; queste sono le vicine prime, ossia le vicine piú vicine. Il primo intorno è composto da Sara e dalle sue vicine piú vicine, insieme alle loro relazioni, che sono indicate sui collegamenti che le uniscono.

Per costruire il secondo intorno di Sara, aggiungiamo le nadi che sono a due passi di distanza da lei, piú tutte le loro relazioni reciproche e con le loro vicine a un passo di distanza (anch'esse comprese), e cosí via. Questi intorni costituiscono le visioni di Sara del suo universo.

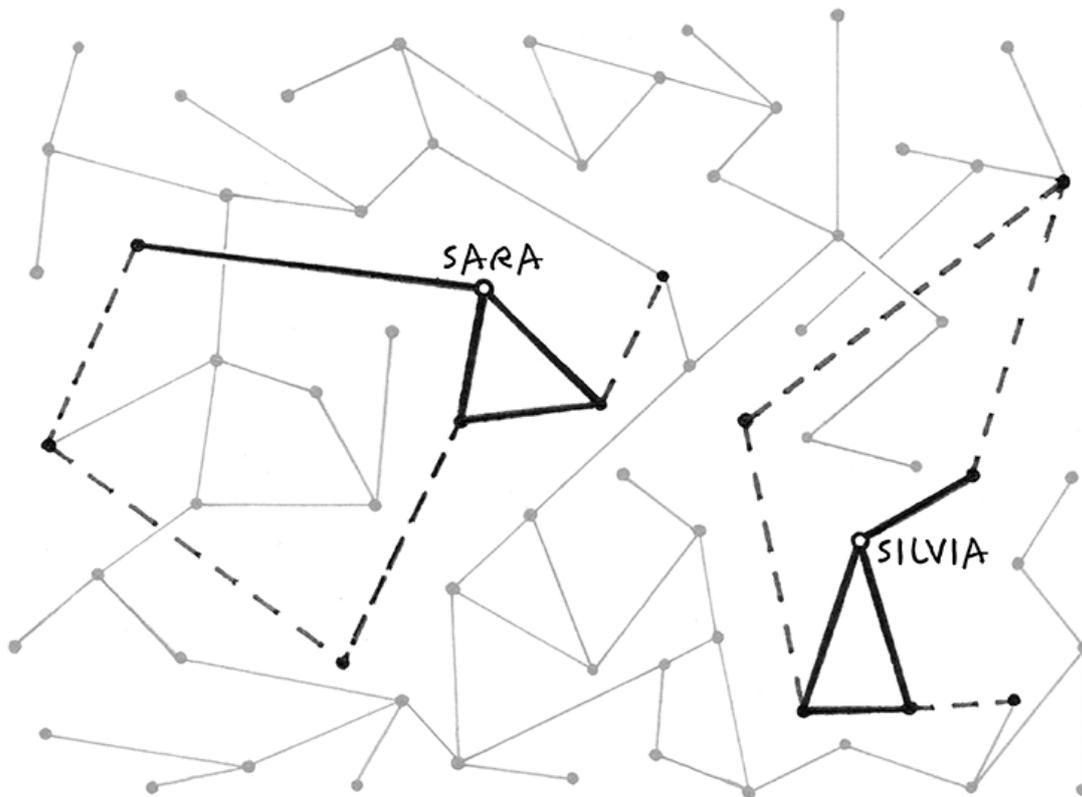


Figura 13.

I primi e i secondi intorni di Sara e Silvia, definiti dalle connessioni del grafo di cui fanno parte, sono identici, ma a partire dal terzo grado i loro intorni permettono di distinguerle.

Possiamo confrontare le visioni di Sara con quelle di un'altra nade; chiamiamola Silvia. Sara e Silvia hanno primi intorni e secondi intorni identici, il che vuol dire che se non potessimo spingere lo sguardo piú in là non potremmo distinguerle.

Supponiamo però che il nostro universo relazionale nadico obbedisca al principio dell'identità degli indiscernibili di Leibniz. Allora gli intorni di Sara e di Silvia in qualche punto devono differire, altrimenti le due avrebbero visioni identiche, il che è proibito da quel principio. Ciò implica che deve esistere un numero di passi per cui i due intorni differiscono. Questo numero è chiamato *distinzione* di Sara e Silvia.

Leibniz presuppone che l'universo reale si distingua da molti universi possibili «avendo la massima perfezione possibile». Se eliminiamo il significato poetico o allegorico, il presupposto di Leibniz è che esista qualche grandezza osservabile che nell'universo reale è piú grande che in tutti gli altri universi possibili. È un concetto incredibilmente moderno, che anticipa un metodo per formulare le leggi della natura che fu sviluppato piú tardi e perfezionato soltanto nel Novecento. La grandezza che viene massimizzata, che Leibniz chiamava «perfezione», oggi è chiamata *azione*.

Feynman amava sottolineare che una bellissima caratteristica delle leggi della fisica è che possono essere formulate in molti modi diversi. A prima vista, sembra che siano molto diversi, ma quando li conosciamo meglio arriviamo a capire che sono tutti equivalenti. Un esempio di questo concetto è dato dalle leggi del moto e della gravità di Newton, che descrivono i movimenti dei pianeti, delle lune e di altri corpi del sistema solare. Un modo di descrivere le leggi è specificare come cambiano nel tempo le posizioni di questi corpi. A tal fine, di solito si pongono le loro accelerazioni uguali alla somma delle forze gravitazionali esercitate da altri corpi, divisa per le masse.

Per specificare queste stesse leggi, però, possiamo anche delineare un insieme di grandezze che sono fisse e non cambiano mentre i pianeti si spostano, come la loro energia totale. Un terzo modo, equivalente ai primi due, consiste nel dire che i pianeti si muovono in modo tale da rendere quanto piú grande possibile una certa grandezza. Noi la chiamiamo azione⁸; Leibniz la chiamava perfezione.

Leibniz spiega in che cosa consiste la «perfezione»: definisce un mondo con «la massima perfezione possibile» come un mondo che ha «la piú grande varietà possibile, ma con il massimo ordine possibile».

Che cosa intende qui Leibniz per «varietà»? Credo che intendesse che le visioni delle diverse monadi dovrebbero essere quanto piú possibile diverse. Leibniz vuol dire quindi che per massimizzare la perfezione si deve massimizzare la varietà delle diverse visioni.

Ispirati da questo concetto, Julian Barbour e io abbiamo elaborato misure numeriche della varietà inerente a un sistema di relazioni¹⁰. Abbiamo constatato che, via via che la varietà aumenta, per individuare ciascuna visione e distinguerla dalle altre sono necessarie sempre meno informazioni.

In altre parole, a parità di ogni altra cosa, preferiamo i mondi in cui qualunque coppia di nadi ha intorno che differiscono dopo un piccolo numero di passi.

Per Leibniz, la ragion sufficiente si doveva basare su un concetto di massima perfezione.

E questa ragione [sufficiente] non può che trovarsi nella convenienza, nei gradi di perfezione che quei mondi contengono [...] Dunque questo legame, o vogliamo dire accordo di tutte le cose create rispetto a ciascuna, e di ciascuna rispetto a tutte le altre, fa che ogni sostanza semplice abbia delle relazioni, che esprimono tutte le altre, e che ella sia per conseguenza uno specchio vivente perpetuo dell'universo ¹¹.

Subito dopo, per illustrare questo concetto, Leibniz propone la metafora dei diversi punti di osservazione di una città.

E siccome una medesima città riguardata da differenti lati pare tutt'altra, ed è come moltiplicata prospettivamente, avviene in egual modo che per la moltitudine infinita delle sostanze semplici vi abbia come altrettanti differenti universi, che tuttavia non sono che le prospettive d'un solo, secondo i differenti punti di vista di ciascuna monade ¹².

Questa è una metafora che Jane Jacobs avrebbe certamente apprezzato, perché descrive il concetto di diversità urbana da lei difeso e in seguito adottato da filosofi ed esperti di studi urbani, come Richard Florida.

Questa metafora urbana ispira un'ipotesi sulla dissoluzione dello spazio e della località. Se voi e io siamo vicini e ci guardiamo attorno, a causa della nostra vicinanza abbiamo visioni simili del resto dell'universo. Non possono essere identiche, dal momento che noi due non possiamo coincidere, in virtù del principio di esclusione di Pauli e dell'identità degli indiscernibili. Quanto più vicini siamo, però, tanto più simili sono le nostre visioni.

Essendo vicini, possiamo interagire facilmente e infatti più siamo vicini più è probabile una nostra interazione attraverso uno scambio di quanti, per esempio fotoni. In sostanza, è questo ciò che intendiamo quando diciamo che le interazioni fisiche sono locali.

Ora, però, immaginiamo che funzioni al contrario. Se fosse invece che interagiamo con una probabilità maggiore proprio perché le nostre visioni sono simili? Supponiamo che la probabilità della nostra interazione aumenti insieme alla somiglianza delle nostre visioni e diminuisca se queste iniziano a differire.

Se ciò fosse vero, la relazione fondamentale che determina la frequenza delle nostre interazioni sarebbe la somiglianza tra le nostre visioni – a cui è legata la distanza nello spazio.

Per oggetti delle nostre dimensioni, composti da un numero enorme di atomi, questo è tutto. Consideriamo, tuttavia, in quali condizioni gli atomi hanno visioni simili. Gli atomi hanno un numero molto minore di gradi di libertà, quindi meno proprietà relazionali. Pertanto atomi che sono distanti nello spazio possono comunque avere intorni simili, dato che i loro intorni locali possono assumere un numero di configurazioni enormemente più piccolo. Ciò suggerisce che forse atomi simili, con gli stessi costituenti e dintorni simili, interagiscono solo perché hanno visioni simili.

Queste interazioni sarebbero molto, molto non locali. In lavori recenti, però, ho mostrato che questa potrebbe essere la base della fisica quantistica¹³.

Consideriamo un atomo di idrogeno in una molecola d'acqua che danza nell'aria davanti a me. Il suo primo intorno consiste di un atomo di ossigeno e il secondo dell'intera molecola. Ciò è vero per ogni atomo di idrogeno in una molecola d'acqua in tutto l'universo. Mi fiderò quindi del mio istinto riguardo alle relazioni e farò il folle passo di postulare che tutti questi atomi interagiscano tra loro, solo perché hanno visioni simili. Più specificamente, postulerò che le interazioni fanno aumentare le differenze tra le visioni degli atomi. Questo processo andrà avanti finché il sistema non avrà massimizzato la varietà di visioni che gli atomi hanno dell'universo.

In un articolo recente, ho mostrato che l'ipotesi della massima varietà porta all'equazione di Schrödinger e quindi alla meccanica quantistica. Ciò è dovuto a una somiglianza matematica tra la varietà e la forza quantistica di Bohm. Di conseguenza, la forza quantistica di Bohm fa aumentare la varietà di un sistema. Produce questo effetto rendendo gli intorni di tutte le diverse particelle quanto più possibile diversi l'uno dall'altro.

In questo approccio, le probabilità della meccanica quantistica si riferiscono a un ensemble che esiste realmente, l'ensemble di tutti i sistemi con visioni simili. È un ensemble reale, in quanto gli elementi non stanno nella nostra immaginazione; dal primo all'ultimo, fanno tutti parte del mondo naturale, il che è in accordo con i principi della completezza causale e della reciprocità.

Questa era la base di una teoria a variabili nascoste relazionali che ho proposto, con il nome di *formulazione della meccanica quantistica basata su ensemble reali*. Partendo da questa base, sono riuscito a derivare la formulazione di Schrödinger della meccanica quantistica da un principio che massimizza le varietà presenti in ensemble reali di sistemi con visioni simili dell'universo.

Dal punto di vista tecnico, questa teoria prende spunto dalla teoria a molti universi classici interagenti descritta nel capitolo precedente, a parte il fatto che l'ensemble di sistemi simili non proviene da altri universi paralleli al nostro; si tratta invece di sistemi simili molto lontani in regioni distanti del nostro, e unico, universo.

In questa teoria, i fenomeni della fisica quantistica derivano da una continua interazione tra i sistemi simili che formano un ensemble. I partner di un atomo nel mio bicchiere d'acqua sono sparsi per tutto l'universo. L'indeterminismo e le incertezze della fisica quantistica derivano dal fatto che non possiamo controllare né osservare questi sistemi diversi. In questa descrizione, un atomo è quantistico perché ha molte copie identiche, sparse nell'universo.

Un atomo con i suoi intorni ha molte copie perché è vicino alla più piccola scala possibile. È semplice da descrivere, avendo pochi gradi di libertà. In un grande universo avrà molte copie quasi identiche.

I grandi insiemi macroscopici come i gatti, i veicoli e noi stessi, per contro, hanno un'enorme complessità, che ha bisogno di moltissime informazioni per essere descritta. Anche in un universo molto grande, sistemi simili non hanno copie identiche o quasi. Pertanto i gatti, i veicoli, voi e io non facciamo parte di un ensemble. Siamo elementi unici, non abbiamo nulla di abbastanza simile che ci permetta di avere interazioni non locali. Perciò non facciamo esperienza della casualità quantistica. Questa è una soluzione del problema della misurazione.

Questa teoria è nuova ed è molto probabile, com'è il caso per qualsiasi teoria nuova, che sia sbagliata. Un suo aspetto positivo è che quasi sicuramente sarà possibile verificarla per via sperimentale. L'idea alla base di questa teoria è che i sistemi con un gran numero di copie nell'universo si comportano in accordo con la meccanica quantistica, perché sono continuamente casualizzati da interazioni non locali con le loro copie.

Ho affermato che i grandi sistemi complessi non hanno copie e pertanto non sono soggetti alla casualità quantistica. Ma possiamo produrre sistemi microscopici, composti da pochi atomi, privi anch'essi di copie in qualsiasi parte dell'universo? Tali sistemi, pur essendo microscopici, non obbedirebbero alla meccanica quantistica.

È un risultato che possiamo ottenere usando gli strumenti della teoria dell'informazione quantistica. Di fatto, un computer quantistico sufficientemente potente dovrebbe essere in grado di produrre stati che coinvolgono un numero di qubit entangled tale da rendere molto improbabile che abbiano qualche copia naturale da qualche parte nell'universo osservabile. Ciò indica che la teoria degli ensemble reali può essere confutata costruendo un grande computer quantistico che funzioni esattamente come previsto dalla meccanica quantistica.

La scienza progredisce quando inventiamo teorie falsificabili, anche se il risultato è la dimostrazione della loro falsità. È quando i teorici inventano teorie non falsificabili che la scienza si blocca.

Che cosa si può dire dei sistemi con un piccolo numero di copie? Questi sistemi non si comportano in modo deterministico né quantomeccanico. Dovrebbero esibire un nuovo tipo di comportamento che non è né classico né quantistico, il che ci offrirà altre opportunità di verificare questa nuova teoria^h.

Il principio di precedenza.

La teoria degli ensemble reali dipende dal fatto che un sistema sia capace di riconoscere e interagire con altri sistemi che sono simili, nel senso che hanno una visione simile dell'universo di relazioni, indipendentemente dalla loro posizione nell'universo. Secondo questa ipotesi, la somiglianza o

la differenza delle visioni è piú fondamentale dello spazio; lo spazio emerge per descrivere l'ordine approssimativo creato dalla somiglianza delle visioni. Due sistemi possono interagire se le loro visioni sono sufficientemente simili. Spesso ciò riflette il fatto che sono vicini nello spazio e nel tempo, non sempre però, e quelli sono i casi alla base dei fenomeni quantistici.

Che cosa succede se applichiamo questo punto di vista a sistemi esistenti in momenti diversi? Un sistema potrebbe interagire con sistemi del passato che hanno visioni simili? Se fosse possibile, potremmo usare l'influenza del passato sul presente per trovare una nuova interpretazione delle leggi della natura. Ne scaturisce un'idea nuova, che chiamo *principio di precedenza*¹⁴.

Per spiegarlo in termini semplici, è utile usare la terminologia operativa, in cui un processo quantistico è definito in tre passi. Il primo è la sua preparazione, che seleziona lo stato iniziale. Poi abbiamo un'evoluzione, durante la quale il sistema cambia nel tempo secondo la Regola 1. Alla fine abbiamo una misurazione, che è governata dalla Regola 2. Abbiamo diverse scelte riguardo a che cosa misurare, ma qualunque cosa scegliamo sono possibili molti risultati diversi. La meccanica quantistica prevede che le probabilità di questi risultati dipende dalla preparazione, dall'evoluzione e dalla scelta di cosa misurare. Se conosciamo le forze che agiscono sul sistema durante l'evoluzione, possiamo usare la Regola 1 e la Regola 2 per prevedere le probabilità dei diversi risultati.

Si crede comunemente che, una volta fissato l'ambiente del sistema, la Regola 1 faccia evolvere il sistema come prescritto dalle leggi fondamentali. Si presume che queste leggi non cambino nel tempo. Di conseguenza, possiamo affermare che, per ogni sistema quantistico che stiamo studiando, definito da una preparazione, un'evoluzione e una misurazione specifiche, sarà esistita una collezione di sistemi simili nel passato. Questi sistemi sono simili nel senso che hanno avuto una preparazione, un'evoluzione e una misurazione identiche a quelle del nostro sistema presente. Ora, il fatto che le leggi non cambiano implica che non cambiano nemmeno le probabilità dei diversi risultati.

Di conseguenza, possiamo dire:

Le probabilità che l'esperimento presente produca i diversi risultati sono uguali a quelle che si otterrebbero scegliendo a caso i risultati dalla collezione dei casi simili del passatoⁱ.

Possiamo chiamarla *legge dei precedenti*.

Ora vorrei presentare una proposta semplice, ma radicale. La legge dei precedenti di solito viene interpretata come una conseguenza dell'esistenza di leggi immutabili. In realtà, però, questa legge dei precedenti è l'unica di cui abbiamo bisogno. Possiamo presupporre che non esista altra legge. Ora quindi postuliamo che:

Le probabilità che l'esperimento presente produca i diversi risultati si ottengono scegliendo a caso risultati dalla collezione dei casi simili del passato.

Con ciò postulo che un sistema fisico abbia accesso ai risultati di sistemi che hanno avuto una preparazione, un'evoluzione e una misurazione simili nel suo passato (per brevità, li chiamiamo «sistemi simili»). Quindi la nostra ipotesi è:

Un sistema fisico, di fronte alla scelta dei risultati di una misurazione, sceglierà un risultato a caso dalla collezione di sistemi simili nel passato.

La legge dei precedenti garantisce che il più delle volte il presente somiglierà al passato, in quanto le probabilità dei vari risultati possibili dello stesso esperimento saranno invariate.

Se ciò è vero, l'apparenza che gli atomi siano governati da leggi immutabili è un'illusione creata dal fatto che l'universo è talmente grande e vecchio che la maggior parte delle situazioni in cui si può trovare un atomo ha numerosi precedenti.

E se non esistono precedenti? Che cosa succederebbe se preparassimo uno stato quantistico che non è mai esistito prima nella storia dell'universo? Se procedessimo a una misurazione, come ne determineremo il risultato, se non esistono casi simili del passato a cui fare riferimento?

Non conosco la risposta a questa domanda. Potrebbe essere, e spero sarà, una domanda a cui risponderà la fisica sperimentale. La comune cre-

denza in una legge fondamentale atemporale non impedisce di formulare una previsione, applicando le leggi note alla nuova situazione. Se gli esperimenti confermassero sempre quella risposta, ne potremmo dedurre che il principio di precedenza è sbagliato. Tuttavia, se la precedenza è la chiave dell'esistenza delle leggi, la risposta a una situazione nuova, uno stato quantistico nuovo, sarà una risposta nuova.

Dopo molte ripetizioni, i precedenti si accumulano e non si hanno più sorprese. La transizione tra novità e precedenza, tuttavia, dovrebbe essere soggetta a indagini sperimentali.

Anche in questo caso, è probabile che le sedi adatte a simili indagini siano i laboratori in cui i ricercatori preparano stati entangled di molti atomi: in poco tempo, questi stati diventerebbero tanto complessi che si potrebbe ragionevolmente dedurre che non hanno precedenti nella storia dell'universo. Tra non molto dovremmo quindi avere la possibilità di verificare il principio di precedenza per via sperimentale e forse di scoprire attraverso quale processo si costruisce la precedenza.

- a. Per approfondire questo punto, si vedano i miei due libri citati nella nota 1.
- b. In termini tecnici, l'algebra delle osservabili e il prodotto interno.
- c. La teoria delle stringhe non segue questa raccomandazione e invece fissa il numero totale di dimensioni, comprese eventuali dimensioni microscopiche. Potrebbe essere una buona cosa, se non producesse infinite alternative per la geometria e il numero delle dimensioni minuscole ipotizzate.
- d. Un evento può essere seguito da un secondo evento che annulla l'azione del primo, ma in quel caso si hanno due eventi, il che non è equivalente a uno spaziotempo in cui nessuno dei due eventi è accaduto.
- e. Non è un'idea nuova: come ho osservato nel capitolo IX, Roger Penrose la citò come motivazione delle sue reti di spin nei primi anni Sessanta.
- f. In seguito, Juan Maldacena e Leonard Susskind hanno presentato una versione di questa idea che hanno chiamato ER = EPR, dove ER sta per ponte di Einstein-Rosen, un cunicolo spaziotemporale che collega due punti distanti nello spazio (arXiv:1306.0533).
- g. Più precisamente, è l'azione cambiata di segno.
- h. In questa formulazione basata su ensemble reali, l'informazione contenuta in una funzione d'onda di un sistema quantistico è diffusa in tutto l'universo, codificata nelle configurazioni delle copie. Una domanda cruciale è quante copie debba avere

un sistema affinché l'informazione codificata nelle copie sia sufficiente per riprodurre l'informazione nella funzione d'onda. Questa aumenta esponenzialmente con il numero di particelle del sistema quantistico. Tuttavia il numero di copie di un sistema probabilmente contenute nell'universo diminuisce rapidamente con il numero di particelle che costituiscono il sistema. Esiste quindi una dimensione del sistema oltre la quale l'informazione nelle copie non è sufficiente e la conseguenza è o che la meccanica quantistica smette di valere o che questo approccio è sbagliato. Sospetto che computer quantistici anche modesti supereranno questa soglia.

i. Ossia quelli con una preparazione, un'evoluzione e una misurazione identiche.

Capitolo quindicesimo

Una teoria causale delle visioni

Ciascuno di noi teorici ha le proprie convinzioni, ossia le congetture sulla natura su cui è disposto a scommettere la propria carriera. Personalmente, sono un realista, un relazionista e, senza dubbio, un relazionista temporale. Credo che la meccanica quantistica sia incompleta e miro a costruire una teoria realistica secondo i principi del relazionalismo temporale, che può essere allo stesso tempo un completamento della meccanica quantistica e della relatività. Spero che questa teoria non solo risolva gli enigmi dei fondamenti della teoria quantistica, ma porti anche alla scoperta della teoria quantistica corretta della gravità, oltre ad affrontare i misteri della cosmologia e della fisica delle particelle derivanti dall'apparente libertà dell'universo di scegliere sia le leggi sia le condizioni iniziali.

In questo capitolo conclusivo vorrei descrivere una via che potremmo seguire per raggiungere tale obiettivo e citare alcuni lavori molto recenti che ci fanno fare qualche passo in questa direzione.

Questa è una teoria delle nadi, del tipo descritto nel capitolo precedente, con due idee in più. In primo luogo, prendiamo sul serio l'idea di Leibniz che, in una descrizione puramente relazionale del mondo, a essere reali sono le visioni che ciascuna nade ha del resto dell'universo. Le visioni non rappresentano ciò che è reale; sono le entità reali. Significa che le visioni stesse sono i gradi di libertà dinamici, i protagonisti della nostra storia. Questo in effetti avvicina le nostre nadi a quelle che Leibniz chiamava monadi (anche se vi sono comunque alcune differenze).

Ma nel mondo che conosciamo a cosa corrispondono esattamente le nadi e in cosa consistono le loro visioni?

Se vogliamo una corrispondenza con la relatività generale, è naturale presumere che le nadi siano eventi. Nella teoria della relatività, gli eventi sono cose che accadono in un unico luogo in un unico momento. Sono fondamentali per la descrizione del mondo fornita dalla relatività generale.

Possiamo considerarli come momenti in cui qualcosa cambia in un luogo: per esempio, due particelle che collidono costituiscono un evento. Un mondo fatto di eventi è un mondo in cui «diventare» è piú fondamentale di «essere».

Se le nadi sono eventi, che cosa descrivono le loro relazioni? In breve, la risposta è la causalità. Gli eventi causano altri eventi.

Ciascun evento è intessuto nella storia dell'universo attraverso relazioni con gli altri eventi, che esprimono i rapporti di causalità tra eventi. Queste *relazioni causali* tracciano la storia di processi di cambiamento.

Possiamo derivare dalla relatività generale come funzionano queste relazioni. Dato che le cause si possono propagare al massimo alla velocità della luce, diciamo che un evento B è nel *passato causale* di un altro evento A se una causa fisica può aver viaggiato al massimo alla velocità della luce da B ad A. Se vale questa relazione, alcune condizioni nell'evento B potrebbero aver contribuito a causare condizioni nell'evento A.

A parità di situazione, diciamo anche che A è nel *futuro causale* di B.

Dati due eventi qualsiasi A e B, in base alla relatività generale di solito si richiede che sia vera soltanto una di queste tre cose: o A è nel futuro causale di B, o B è nel futuro causale di A, oppure A e B non sono causalmente correlati perché nessun segnale avrebbe potuto viaggiare dall'uno all'altro a una velocità minore o uguale a quella della luce. In tal modo, si escludono i circuiti causali chiusi in cui A è sia nel futuro causale sia nel passato causale di B. Le storie bizzarre con circuiti causali chiusi sono qualcosa su cui è divertente formulare congetture, però sollevano problemi e paradossi. Non vedo ragioni per presumere che i circuiti causali chiusi facciano parte della natura, in particolare perché voglio presumere che la causalità sia fondamentale e fondamentalmente irreversibile ^a.

Se specifichiamo quali sono le relazioni causali tra ciascuna coppia di eventi, descriviamo l'universo in termini della sua *struttura causale*.

Secondo la relatività generale, lo spaziotempo consiste di un'infinità continua di eventi. Per quanto mi riguarda, invece, seguo alcuni pionieri della gravità quantistica che ipotizzano che le nadi siano un insieme discreto di eventi fondamentali (discreto significa che possono essere contate, che il conteggio sia finito o infinito). Anche se il loro numero totale è infinito, porremo l'ulteriore condizione che in qualsiasi volume finito di spa-

zio e intervallo finito di tempo ne esista un numero finito. Ciò semplifica notevolmente le cose.

Come minimo, vogliamo attribuire relazioni causali alle nadi. Il loro funzionamento è identico a quello delle relazioni causali nella relatività generale. Date due nadi qualsiasi, A e B, o A è nel futuro causale di B, o B è nel futuro causale di A, oppure A e B non sono causalmente correlate. Un insieme di nadi con le loro relazioni causali è un modello di come potrebbe essere uno spaziotempo discreto o quantistico.

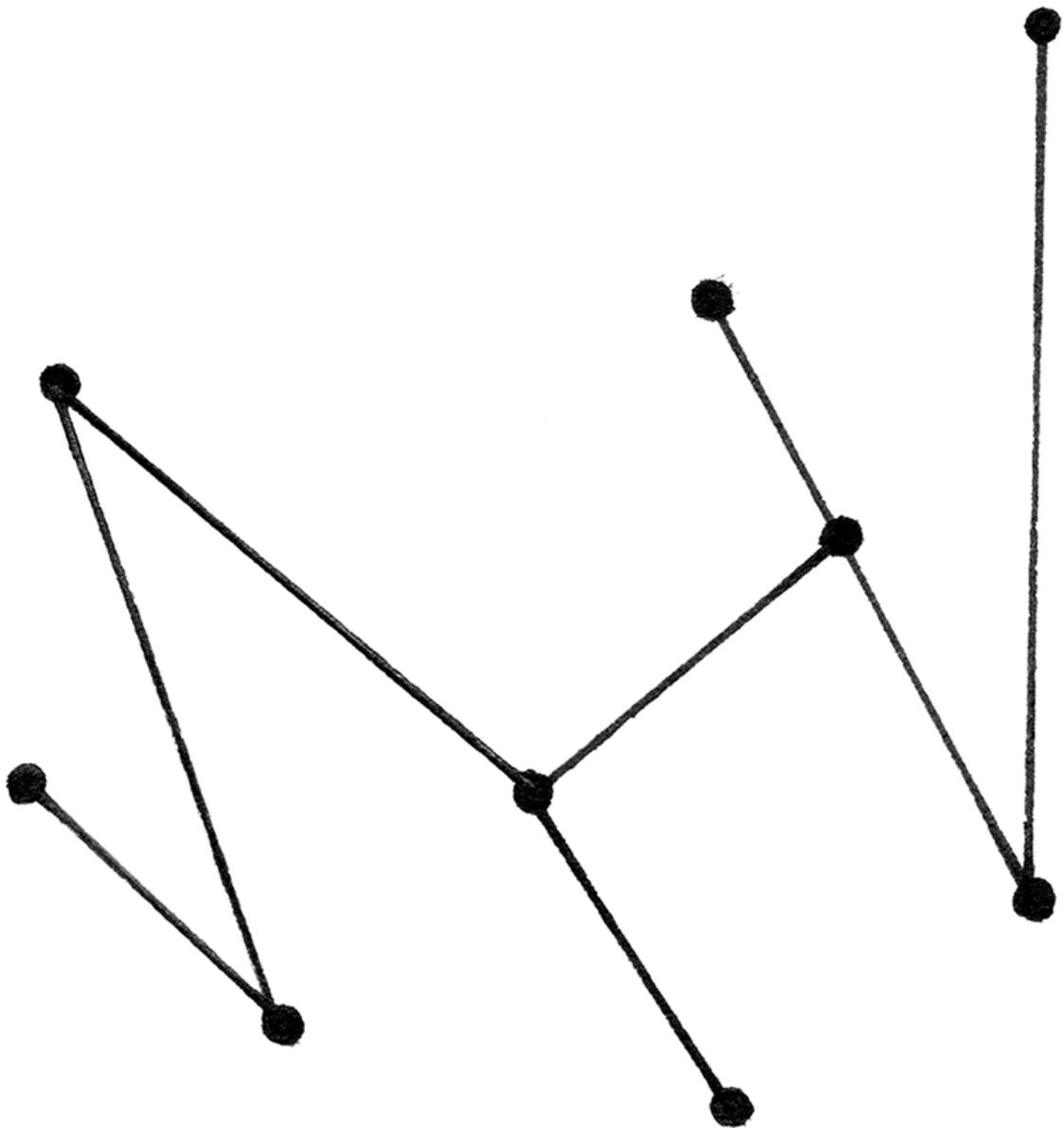


Figura 14.

Un insieme di eventi discreti, uniti da collegamenti causali.

Poiché le nadi costituiscono un insieme discreto, anche le loro relazioni causali sono discrete. Possiamo contare in avanti e all'indietro in passi causali discreti. Ciascuna nade ha il proprio passato causale immediato, che consiste di tutte le nadi a un passo di distanza nel passato.

È quindi naturale pensare alle nadi in termini di una metafora di discendenza. La nade C può aver avuto due genitori, A e B; possiamo quindi considerare C come l'evento definito dall'incontro di due cause, una derivante da A e una da B. Risalendo a tutti gli antenati di C a partire da A e B e dai loro genitori, otteniamo una rete di cause che si estende nel lontano passato. A sua volta, C potrebbe avere due discendenti, D ed E, su cui esercita la sua influenza.

A questo punto, abbiamo di fronte a noi una possibilità straordinariamente semplice. Possiamo supporre che gli eventi che formano la storia del mondo abbiano fondamentalmente soltanto queste relazioni causali. Tutte le altre entità e tutte le altre proprietà devono essere derivate da un insieme grande ma finito di eventi la cui unica proprietà è essere la causa di un altro evento. Questa proposta radicale è stata suggerita da Rafael Sorokin¹ e sviluppata in stretta collaborazione con un gruppo di amici e appassionati. L'hanno chiamata *teoria degli insiemi causali*.

Un insieme causale è semplicemente un insieme discreto su cui sono definite soltanto relazioni causali, che soddisfano la condizione che un evento non è mai la propria causa. Si richiede inoltre che, dati due eventi qualsiasi A e B, esista soltanto un numero finito di eventi che sono sia nel futuro causale di B sia nel passato causale di A.

Ammiro l'ambizione e la purezza radicale della teoria degli insiemi causali. È una descrizione totalmente relazionale dello spaziotempo, in cui ciascun evento è definito in modo completo in termini della sua posizione nella rete di relazioni causali.

Una caratteristica eccellente è che la geometria dello spaziotempo può essere rappresentata, in buona approssimazione, da un insieme causale. Il metodo che si usa a tal fine è analogo a quello utilizzato nei sondaggi delle opinioni politiche dei cittadini in cui, anziché domandare le opinioni di

tutti, si interroga soltanto un piccolo campione scelto a caso. In maniera analoga, si può scegliere un campione casuale di eventi in uno spaziotempo e registrarne le relazioni causali. Si perdono molte informazioni, ma se si sceglie un evento per ogni volume di spazio e unità di tempo prefissati, si ottiene una rappresentazione delle relazioni causali accurata per quella scala.

In ogni caso, Sorkin e i suoi collaboratori ipotizzano che sia vero anche il contrario. Credono che la storia dell'universo sia, al livello piú fondamentale, un insieme causale discreto, da cui emerge, a una scala sufficientemente grande, l'illusione di uno spaziotempo continuo. Cosí come un liquido ci sembra continuo ma in realtà è composto da atomi discreti, gli eventi dell'insieme causale costituirebbero gli atomi dello spaziotempo.

Un grande successo della teoria degli insiemi causali è aver previsto il valore approssimato della costante cosmologica. Sorkin ha derivato questa previsione prima che la costante cosmologica venisse misurata². Nessun altro approccio alla gravità quantistica ha ottenuto questo risultato.

L'ipotesi degli insiemi causali è una delle numerose ipotesi rivali sulle proprietà degli atomi dello spaziotempo. Rispetto alle altre, come i modelli a schiuma di spin, presenta il grande vantaggio della sua estrema semplicità, dovuta al fatto che le uniche proprietà degli eventi sono le loro relazioni causali. Ciò riduce notevolmente le possibili forme che potrebbe assumere una legge fondamentale degli atomi dello spaziotempo.

Questa radicale semplicità è anche alla base di un formidabile ostacolo che questo approccio deve affrontare, il cosiddetto *problema inverso*. Come ho già detto, dato uno spaziotempo continuo, possiamo facilmente campionare i suoi eventi per trovare un insieme causale. Il contrario, però, non è quasi mai vero. Nel mondo dei possibili insiemi causali, quasi nessuno fornisce una descrizione approssimativa di uno spaziotempo, con tre dimensioni spaziali. Sembrerebbe quindi che per caratterizzare uno spaziotempo non basti una descrizione grossolana di una rete di relazioni causali.

La gravità quantistica, o il problema della comprensione dello spaziotempo nell'ambito di una teoria quantistica, ha certamente dimostrato di essere una sfida formidabile. È utile mettere nella giusta prospettiva il problema di scoprire gli atomi dello spaziotempo considerando per confronto la storia dell'ipotesi atomica della materia.

Nel caso della materia, la sfida affrontata dagli atomisti nell'Ottocento e all'inizio del Novecento era duplice. Innanzitutto, dovevano scoprire le leggi fondamentali che governano gli atomi. In secondo luogo, dovevano dedurre da queste leggi fondamentali le proprietà approssimative che attribuiamo alla materia. Dovevano capire come emergono le illusioni dei solidi, dei liquidi e dei gas in conseguenza delle leggi atomiche, più fondamentali. I teorici della gravità quantistica affrontano le stesse due sfide.

Non dovremmo dimenticare due insegnamenti della storia dell'ipotesi atomica originaria. Il primo è che in relazione alla sfida di scoprire le leggi della fisica atomica il progresso iniziò soltanto quando si realizzarono esperimenti che poterono verificare l'effettiva esistenza degli atomi e rivelare alcune loro proprietà.

La storia inoltre insegna che la seconda sfida – derivare le proprietà globali delle varie fasi della materia – si rivelò più facile da affrontare della prima. Mezzo secolo prima che si iniziasse ad avanzare realmente verso la scoperta delle leggi della fisica atomica, alcuni pionieri che si occupavano della seconda sfida avevano già compiuto progressi sostanziali. La ragione è che il comportamento di grandi quantità di materia dipende in scarsa misura dai dettagli della fisica atomica. Ciò che occorre sapere era soltanto che gli atomi esistono e interagiscono attraverso forze a corto raggio (ossia che possono agire soltanto a breve distanza).

Questa lezione è tenuta in gran conto da alcuni teorici della gravità quantistica che cercano di derivare la legge che governa lo spaziotempo a una scala macroscopica, cioè la relatività generale, da semplici ipotesi sugli atomi dello spaziotempo. Questa direzione di ricerca, inaugurata a metà degli anni Novanta da Ted Jacobson³, ha ottenuto un successo significativo, quindi è probabile che le leggi fisiche conosciute, che agiscono a scale che possiamo osservare (molto più grandi della scala fondamentale di Planck), non dipendano in grande misura dalle leggi che governano gli atomi dello spaziotempo.

Non è una buona cosa, perché significa che le leggi note forniscono pochi indizi che potrebbero aiutarci a scoprire le leggi davvero fondamentali. In effetti, a quanto pare, ne forniscono solo due. Il primo ha a che fare con il modo in cui l'informazione viaggia nello spaziotempo ed è questo: per derivare la relatività generale dalle proprietà di ipotetici atomi dello spa-

ziotempo, è necessario postulare che esista una velocità massima a cui l'informazione può viaggiare attraverso una superficie nello spazio. Questa velocità non può essere maggiore dell'area della superficie, contata in unità fondamentali di Planck^b. Questa è la cosiddetta *ipotesi olografica*^c (debole)⁴.

Se questo principio olografico è fondamentale, deve essere sensato parlare di un flusso di informazione fino alle scale minuscole a cui opera la gravità quantistica. Ma l'informazione è influenza, come attesta la sua definizione di «distinzione che fa la differenza». Pertanto un flusso di informazione definisce (o dipende da) una struttura causale. Quindi il principio olografico richiede l'esistenza di una struttura causale per guidare, o esprimere, i flussi di informazioni. Questa è una delle ragioni per credere che la struttura causale sia fondamentale.

Il secondo indizio è che per derivare la relatività generale seguendo la direzione indicata da Jacobson, dobbiamo tenere traccia dei flussi di energia attraverso le stesse superfici. Ciò suggerisce che l'energia è una grandezza fondamentale che ha senso fino al livello degli eventi fondamentali. La grande intuizione di Jacobson è quindi aver capito che, essenzialmente, le equazioni della relatività generale codificano un rapporto tra flussi di energia e flussi di informazione, gli uni e gli altri guidati dalla struttura causale.

A motivo del primo indizio, preferisco l'ipotesi che la storia dell'universo contenga un insieme di eventi e di relazioni causali, ossia che l'universo sia un insieme causale. A motivo del problema inverso, tuttavia, non credo all'ipotesi radicale che le uniche proprietà possedute dagli eventi siano le relazioni causali. Sono disposto a credere che queste siano le uniche proprietà relazionali necessarie, però sono convinto che debbano esistere anche altre proprietà, che sono intrinseche agli eventi. Il secondo indizio mi porta a presumere che una di queste proprietà intrinseche possedute dagli eventi sia l'energia, che fluisce tra loro, seguendo le relazioni causali.

Proporrei quindi di considerare che ciascun evento ha una certa quantità di energia, che si trasmette da eventi passati a eventi futuri lungo le relazioni causali. L'energia di un evento è la somma delle energie che ha ricevuto dagli eventi nel suo passato causale immediato. Questa energia viene suddivisa e trasmessa agli eventi nel suo futuro causale immediato. In que-

sto modo la legge della conservazione dell'energia, secondo cui l'energia non è mai creata o distrutta, è rispettata.

La relatività ristretta ci dice che l'energia è legata alla quantità di moto, perciò anche la quantità di moto dovrebbe propagarsi dagli eventi passati a quelli futuri. In collaborazione con Marina Cortês, ho elaborato un modello di insieme causale che incorpora flussi di energia e quantità di moto, che chiamiamo *insieme causale energetico* ⁵.

La storia dell'universo, secondo un modello di insieme causale energetico, consiste di eventi che sono ciascuno la causa di eventi futuri, a cui trasferiscono una parte di energia e di quantità di moto. Fondamentalmente, però, lo spaziotempo non esiste; esiste solo l'insieme discreto di eventi collegati da relazioni causali, dove gli eventi e le relazioni sono dotati di energia e di quantità di moto.

Uno dei primi successi di questo approccio è stato una soluzione del problema inverso. Quanto meno in casi semplici in cui lo spazio e il tempo hanno entrambi una dimensione, siamo riusciti a derivare l'emergere dello spaziotempo direttamente dai modelli di insieme causale energetico.

È giunto il momento di parlare di energia.

Tutte le teorie fisiche principali, dalla fisica newtoniana alla relatività generale e alla teoria quantistica dei campi, hanno equazioni del moto che descrivono come cambia nel tempo una certa entità. Per Newton, quell'entità è la posizione di una particella, mentre per la teoria quantistica dei campi è il valore di un campo in ciascun punto dello spazio. È molto significativo che tutte queste equazioni del moto abbiano una struttura comune, cioè una variabile di configurazione (le posizioni delle particelle o i valori dei campi) e poi alcune grandezze dinamiche, così chiamate perché compaiono nelle leggi che indicano come si muovono le particelle o come oscillano i campi, tra cui le più importanti sono la quantità di moto e l'energia.

Ciascuna particella ha una certa energia e una certa quantità di moto. Quando due particelle interagiscono, si scambiano una parte della loro energia e della loro quantità di moto. Può accadere che una ci guadagni un po' e l'altra ci perda, a patto che l'energia totale e la quantità di moto totale si conservino.

La struttura di queste teorie è sempre la stessa. Le equazioni fondamentali sono due. La prima indica come cambiano nel tempo le posizioni delle particelle, in un modo che dipende dalla loro quantità di moto^d. La seconda indica come cambia nel tempo la quantità di moto, che dipende dalle posizioni delle particelle. Le due grandezze, posizione e quantità di moto, sono quindi intrecciate; il cambiamento dell'una dipende dall'altra. Due grandezze collegate in questo modo sono dette duali. La posizione e la quantità di moto sono duali. Anche il campo elettrico e il campo magnetico sono duali.

Credo che il fatto che questa forma di equazioni duali sia universale nella fisica sia una proprietà profonda della natura. Accade solo nella fisica. Altre scienze che descrivono sistemi che cambiano nel tempo, come computer, ecosistemi, organismi o mercati, hanno ciascuna le proprie equazioni, che però non hanno mai questa struttura duale composta da variabili di configurazione, quantità di moto ed energia, con le quantità totali delle ultime due che si conservano. Questa è una delle ragioni per cui non ritengo che sia molto utile immaginare che l'universo fisico sia un computer.

La conservazione della quantità di moto è importante per un'altra ragione: spiega il principio di inerzia, che è il principio della fisica più profondo che sia stato postulato finora.

Perché esiste questa dualità che coinvolge variabili di configurazione e di quantità di moto? Perché il mondo è tale che l'energia e la quantità di moto si conservano? Molto tempo fa, a queste domande è stata data una risposta, basata su un teorema profondo che Emmy Noether dimostrò nel 1915. Centrale è il concetto di simmetria, cioè una trasformazione che cambia un sistema in un modo che non cambia le leggi del moto. Le rotazioni sono simmetrie, come pure le traslazioni nello spazio e nel tempo; a condizione che l'intero sistema venga ruotato o traslato tutto insieme, le leggi del moto non vengono alterate. Il teorema di Noether afferma che *per ogni simmetria naturale basata su una trasformazione che varia in modo continuo, esiste una grandezza che si conserva*. Nello spazio, la simmetria implica che si conserva la quantità di moto. Nel tempo, la simmetria spiega la conservazione dell'energia^e.

Ciò suggerisce che lo spazio è fondamentale, mentre l'energia e la quantità di moto sono proprietà emergenti dello spazio, che riflettono le sue

simmetrie. Questa è una concezione usuale, ma credo che si avvicini di più alla verità il contrario.

Anche se il teorema di Noether riflette un'intuizione vera, non si può applicare a una teoria fondamentale. Il motivo è che uno dei requisiti della teoria fondamentale è che soddisfi il principio di identità degli indiscernibili. Da questo principio, però, discende che in natura non esistono simmetrie. Pensate a un corpo che è invariante rispetto a una rotazione, come una sfera o un cilindro. Il fatto che è simmetrico significa che una rotazione non lo modifica. In altre parole, un osservatore non può distinguere se è stato ruotato o no. Ma questo è vero perché il corpo è composto da cerchi di punti, che sono tutti identici. In maniera simile, una linea retta infinita è invariante rispetto a una traslazione nella direzione della retta, che sposta ciascun punto su un altro punto con proprietà identiche.

Le simmetrie sono proprietà dei background fissi e se una teoria presenta una simmetria è un chiaro segno che non è indipendente dal background. Una simmetria è un'operazione che trasla o ruota il sistema in esame rispetto al background, che resta invariato. Le simmetrie caratterizzano un sistema che è stato isolato da un universo più grande ed emergono da ciò che viene ignorato in quell'isolamento.

Abbiamo postulato che la teoria fondamentale sia indipendente dal background, quindi la presenza di simmetrie è esclusa. Ciò a sua volta vuol dire che non possiamo considerare emergenti dalle proprietà dello spazio l'energia e la quantità di moto né la loro conservazione. Però dobbiamo ancora spiegare perché l'energia e la quantità di moto hanno sempre un ruolo nella struttura delle equazioni della fisica.

Inoltre abbiamo ipotizzato che lo spazio non sia presente al livello fondamentale in natura, ma sia emergente, perciò se vogliamo che l'energia e la quantità di moto abbiano un ruolo nella fisica, sembra che non si possa fare altro che inserirle sin dall'inizio.

Ciò che vogliamo è un inverso del teorema di Noether, che parta dal presupposto che l'energia, la quantità di moto e la loro conservazione sono fondamentali e indichi le condizioni in cui, come descrizione approssimativa di sottosistemi dell'insieme globale, può emergere lo spazio.

Ricapitolando, in questo scenario sono fondamentali le relazioni causali, l'energia e la quantità di moto. Gli insiemi causali energetici sono uno sviluppo di questo scenario.

I modelli di insieme causale energetico realizzano i principî e le ipotesi di relazionalismo temporale presentati nel capitolo precedente nell'ambito di un quadro concreto. In questi principî, il tempo, nel senso del continuo divenire del momento presente, è fondamentale in natura. In verità, la nostra esperienza del passaggio del tempo è l'unica cosa del mondo da noi percepita direttamente che è davvero fondamentale. Tutto il resto, compresa l'impressione che esistano leggi immutabili, è approssimato ed emergente. Questa concezione, insieme alle argomentazioni a suo sostegno, è stata sviluppata nel corso di una lunga collaborazione con Roberto Mangabeira Unger. Una conseguenza importante è che le leggi della natura, anziché essere atemporali, si evolvono nel tempo. Tra i fisici è comune la credenza che il tempo non sia presente nelle leggi piú fondamentali e invece emerga da quelle leggi. Al contrario, noi sosteniamo che il tempo, nel senso del momento presente e del suo passaggio, è fondamentale, mentre le leggi sono emergenti e soggette a cambiamento.

Un punto su cui insisteva Marina Cortês era che al livello piú fondamentale le leggi devono essere irreversibili, in due sensi. In primo luogo, le leggi non restano identiche se si inverte la direzione del tempo. Se filmate un processo che obbedisce alle leggi fisiche, riproducendo il filmato al contrario non ottenete un altro processo permesso dalle leggi. Questo contraddice direttamente la credenza molto diffusa che l'inversione della direzione del tempo lasci invariate le leggi della natura.

Ma tutte le leggi fondamentali note, comprese la meccanica quantistica, la relatività generale e il modello standard, sono invarianti rispetto all'inversione del tempo^f. Devono esistere leggi piú fondamentali, che non sono reversibili. I problemi che ne derivano sono due. Primo, siamo in grado di inventare leggi che possano essere la legge fondamentale irreversibile? Secondo, le leggi reversibili potrebbero emergere come approssimazioni di leggi irreversibili piú fondamentali? I modelli di insieme causale energetico sono stati ideati per affrontare questi problemi.

Cortês insisteva anche sul fatto che una teoria che considera primari gli eventi è irreversibile in un senso piú profondo. Un evento è qualcosa che accade. Come già detto, una volta che qualcosa è accaduto, è impossibile far sí che non sia accaduto. L'effetto di un evento, tuttavia, può essere annullato. Un evento che cambia A in B può essere seguito da un evento che

cambia B in A. Così, però, si ha una storia con due eventi. Una volta accaduto, un evento è nel passato e questo fatto non può essere cancellato da un evento futuro, nemmeno se annulla l'effetto dell'evento originario.

Tutto ciò ci ha spinti a considerare il passaggio del tempo come un processo di continua creazione di nuovi eventi a partire dagli eventi presenti. Anche se possiamo dare significati diversi alla parola «tempo», abbiamo postulato che il passaggio del tempo esprima un processo attivo di creazione e che questa «attività del tempo» sia la creazione di eventi nuovi, uno dopo l'altro.

Piú specificamente, abbiamo inventato diversi modelli, allo scopo di realizzare in modo concreto i nostri principî e le nostre ipotesi. In uno dei modelli studiati, ciascun evento è creato da due eventi «genitori» e poi diventa a sua volta genitore di due eventi «figli».

In ciascuna fase del processo esiste un'avanguardia di eventi, che sono stati creati, ma non hanno ancora avuto tutti i loro figli. Questi eventi costituiscono ciò che chiamiamo «il presente», poiché sono gli eventi che potranno ancora influenzare il futuro.

Questo processo del continuo divenire di eventi crea una storia.

Una volta che un evento ha avuto entrambi i figli, non può piú avere un ruolo diretto nella creazione del futuro, quindi diciamo che è nel passato. Ciascun evento passato ha un passato causale, formato da quegli eventi precedenti che lo hanno influenzato in modo diretto o indiretto. Il suo futuro causale è l'insieme sempre crescente di eventi che influenza in modo diretto o indiretto. Il passato, quindi, ha la struttura di un insieme causale.

Al passo successivo, abbiamo aggiunto l'energia e la quantità di moto, facendo diventare il nostro modello di un futuro crescente un insieme causale energetico. Ciascun evento ha un'energia totale e una quantità di moto totale, che sono la somma di quelle dei propri genitori. Entrambe vengono suddivise e passate ai propri figli.

Per completare questo modello, dobbiamo rispondere a due domande. Il processo che crea nuovi eventi dagli eventi presenti, da noi chiamato attività del tempo, come sceglie i due eventi presenti che saranno i genitori del prossimo nuovo evento? In che modo gli eventi distribuiscono l'energia e la quantità di moto ai loro figli? Per rispondere a queste domande, dobbiamo indicare una regola per la creazione di nuovi eventi.

Per la scelta di questa regola siamo stati guidati da due dei principi enunciati nel capitolo precedente. La teoria dovrebbe essere indipendente dal background, il che in questo contesto significa che i diversi eventi dovrebbero essere etichettati o distinti soltanto da strutture create dinamicamente. In aggiunta, queste strutture non dovrebbero fare riferimento all'ordine in cui gli eventi sono stati creati. Questi requisiti sono soddisfatti se gli eventi sono etichettati o descritti soltanto dalla struttura del proprio passato causale.

Ciò rende naturale fare appello all'identità degli indiscernibili come secondo principio. Se gli eventi si distinguono in base al loro passato causale, ciascun evento deve avere un passato causale unico. La regola di creazione degli eventi dovrebbe quindi garantire che ciascun evento creato abbia un passato causale diverso rispetto a tutti gli altri eventi creati fino a quel momento.

Nei modelli che ho studiato insieme a Cortès, abbiamo rilevato due risultati molto interessanti. Il primo, già citato, è che il problema inverso sembra essere risolto, dato che emerge uno spaziotempo in cui possono essere mappati gli eventi e le loro relazioni causali. Abbiamo anche constatato che i sistemi iniziano in una fase molto disordinata e asimmetrica rispetto al tempo, che poi si evolve in una fase ordinata e approssimativamente simmetrica rispetto al tempo ⁸.

Dai modelli di insieme causale energetico abbiamo quindi tratto una lezione importante, ossia che da leggi irreversibili più fondamentali possono emergere leggi reversibili rispetto al tempo, in contraddizione con il modo in cui la maggior parte dei fisici considera l'irreversibilità.

Abbiamo iniziato il capitolo precedente con cinque principi, che sono tutti modi di esprimere il principio di ragion sufficiente di Leibniz, e tre ipotesi, che esprimono il carattere fondamentale e irreversibile del tempo e la contrastante natura emergente e contingente dello spazio. La teoria che cerchiamo, per completare le due rivoluzioni gemelle di Einstein, potrebbe essere, credo, l'espressione coerente di questi principi e di queste ipotesi. Prima che ci addentrassimo nell'argomento, però, sono stati presentati diversi modelli, che non intendono essere la teoria completa, quan-

to piuttosto esplorazioni di alcuni aspetti che questa potrebbe avere applicando soltanto un sottoinsieme di principi.

La formulazione basata su ensemble reali è una teoria a variabili nascoste relazionale. Non è un'applicazione completa dei principi, essendo situata in un background fisso di tempo e spazio, ma a parte questo prende estremamente sul serio il principio di identità degli indiscernibili postulando che due eventi che hanno la stessa visione dell'universo debbano essere considerati identici. Ho quindi postulato che la ragione per cui due corpi interagiscono più fortemente quando sono più vicini nello spazio stia nel fatto che le loro visioni del resto dell'universo sono simili. In altre parole, propongo di spiegare il principio di località come emergente da un principio più profondo di somiglianza delle visioni. Per garantire l'identità degli indiscernibili, introduciamo una forza tra sottosistemi che cerca di aumentarne la distintività, o massimizzarne la varietà complessiva. Questo, come descritto in precedenza, porta a una derivazione della meccanica quantistica.

Gli insiemi causali energetici sono modelli di universi discreti o quantistici che esplorano le ipotesi che abbiamo formulato sullo spazio e sul tempo. In particolare, realizzano l'idea che non esistono né spazio né spaziotempo di background. Considerano invece fondamentale un concetto attivo irreversibile di tempo e causalità, oltre all'energia e alla quantità di moto. Lo spaziotempo, e lo spazio, sono emergenti e contingenti.

Il passo successivo consiste nell'unire questi due modelli, ottenendo una teoria a variabili nascoste relazionale che è anche indipendente dal background e che realizza l'ipotesi che lo spazio e la località siano emergenti.

Questi due modelli sono partiti come programmi di ricerca distinti, ma avevano in comune il tema del ruolo centrale delle somiglianze e delle differenze tra eventi. Entrambi i modelli le considerano fondamentali, mentre la località è retrocessa ad aspetto accidentale ed emergente della natura. Un poco alla volta, mi resi conto che erano prospettive diverse di uno stesso quadro generale e così un giorno d'estate mi sedetti e presi un bloc-notes nuovo per vedere se potevo raccontare tutta la storia.

Mi fu immediatamente chiaro che il protagonista di questa nuova storia è la visione. In altre parole, le variabili essenziali non sono altro che le visioni dell'universo da parte di ciascun evento. Iniziai quindi a elaborare un

approccio alla fisica in cui queste visioni, anziché essere derivate da una struttura piú basilare, sono fondamentali. Da questa nuova prospettiva, le leggi fondamentali coinvolgono direttamente soltanto le visioni e le loro differenze. L'ho chiamata *teoria causale delle visioni* ⁶.

La visione di un evento non è altro che l'insieme delle informazioni che l'evento ottiene dal proprio passato causale. La visione del passato che ha un evento è come il cielo per noi: è ciò che vediamo guardandoci intorno. Poiché la velocità della luce è finita, guardarsi intorno significa guardare all'indietro, nel nostro passato.

La visione di un evento, nell'accezione usata qui, è completamente reale e non ha nulla a che fare con l'opinione ^h. Nella teoria che sto descrivendo ciò che è reale e oggettivo nel mondo è l'informazione a disposizione di ciascun evento che compone la storia del mondo, che gli arriva dal proprio passato causale.

Guardate in alto! La vostra visione del mondo è come un film proiettato su una sfera bidimensionale, che chiamiamo cielo. La visione di un evento in un modello con tre dimensioni spaziali (emergenti) sarà quindi rappresentata come una sfera bidimensionale che chiamiamo cielo dell'evento. Ciò che un evento vede nel suo cielo è l'insieme degli eventi nel suo passato causale. Piú precisamente, l'evento vede l'energia e la quantità di moto che arrivano da ciascuno dei suoi eventi genitori. Ciascun genitore si manifesta come un punto colorato nel cielo dell'evento. Ciascuno di questi punti rappresenta un quanto di energia e quantità di moto che è arrivato da un evento passato. La posizione di ciascun punto nel cielo registra la direzione della quantità di moto, mentre il colore indica la quantità dell'energia ricevuta.

Il passo successivo è semplice: ipotizzare che l'universo consista soltanto di questi cieli – ciascuno dei quali è la visione di un particolare evento. Invece di costruire le visioni dalle relazioni causali, si procede in direzione opposta e si derivano le relazioni causali e ogni altra cosa dalle visioni. Può funzionare perché le informazioni contenute nella totalità delle visioni sono sufficienti per ricostruire le relazioni causali e quindi l'intera storia.

Come nella teoria degli ensemble reali, le leggi comprendono il requisito che la varietà di tutte queste visioni sia massimizzata. Questo produce

un effetto simile e porta alla forza quantistica. È possibile quindi derivare la meccanica quantistica come approssimazione della teoria.

Ecco come si può riassumere questa teoria in una sola frase: l'universo consiste soltanto di visioni dell'universo, ciascuna da parte di un evento che fa parte della sua storia e le leggi agiscono per rendere quanto più possibile diverse le visioni.

Da questo punto in avanti la storia si sviluppa in maniera molto simile a quella della teoria degli ensemble reali. Le visioni simili interagiscono, a causa del mandato di evolversi in direzione di una varietà sempre crescente. Ciò porta all'emergere dello spazio e della località in quello spazio. Anche la non località emerge nella forma di interazioni che sono distanti nello spazio emergente ma vicine in termini di somiglianza di visioni. Infine, come nella formulazione basata su ensemble reali, la meccanica quantistica emerge da queste interazioni non locali come descrizione approssimativa della dinamica delle visioni.

La teoria causale delle visioni è quindi una via per arrivare a un completamento della meccanica quantistica. È un completamento realistico, dato che è una teoria delle esseribili, che sono le visioni stesse. Il punto più importante è che dimostra che un'unica teoria fondamentale può essere allo stesso tempo un completamento della meccanica quantistica e un modello atomico dello spaziotempo. Può spiegare l'emergere sia della località sia della non località, sia dello spaziotempo sia della meccanica quantistica.

Questa teoria è ancora solo una parte della storia e abbiamo ancora molto da imparare, ma il mondo potrebbe essere proprio così.

Per noi realisti, la meccanica quantistica non può essere l'ultimo capitolo. Abbiamo ancora molto da scoprire. Ciò nonostante, continuo ad avere fiducia nella comprensibilità della natura. Sono ottimista riguardo al fatto che la capacità universale di ragionare di ciascuno di noi, insieme al nostro grande potere d'immaginazione e alla nostra abilità di inventare nuove idee, saranno sufficienti per comprendere l'universo. Sono particolarmente speranzoso in un futuro in cui i poteri individuali saranno combinati e disciplinati dalla nostra partecipazione alla comunità scientifica. Anche se alle volte sono profondamente frustrato dalla mancanza di chiari progressi della fisica fondamentale negli ultimi cinquant'anni, sono ottimista riguar-

do alle prospettive a lungo termine. Sono fiducioso che in futuro i nostri discendenti conosceranno la natura molto piú di noi.

Sono anche sicuro che le risposte alle domande che ci tormentano da quasi un secolo saranno semplici, ed espresse in termini di ipotesi e principi eleganti simili a quelli presentati qui. Sarebbe davvero una gran fortuna se nella nostra biblioteca di idee avessimo già la soluzione per completare le due rivoluzioni gemelle di Einstein. Se non è così, comunque, non ho dubbi che i nostri discendenti ci riusciranno, a patto che non si faccia morire la grande avventura della scienza.

- a. Alcuni relativisti fanno notare l'esistenza di soluzioni delle equazioni di Einstein che hanno circuiti causali chiusi. Non credo che sia un argomento valido perché l'universo è descritto al piú da una soluzione della relatività generale e quella soluzione non deve necessariamente avere tutti i comportamenti strani di altre soluzioni. Un argomento definitivo è che le soluzioni che hanno circuiti causali chiusi (compresa quella proposta dal grande logico Kurt Gödel) sono molto particolari perché hanno un grado elevato di simmetria. Se si impone il principio di identità degli indiscernibili, le soluzioni con simmetrie sono escluse. Inoltre queste soluzioni sono instabili e collassano in una singolarità al minimo accenno di perturbazione.
- b. Queste unità fondamentali di area sono uguali al prodotto della costante gravitazionale di Newton per la costante di Planck.
- c. Per un approfondimento dell'ipotesi olografica, si veda L. SMOLIN, *Three Roads to Quantum Gravity*, Weidenfeld & Nicolson, London 2000.
- d. Nel caso newtoniano, la quantità di moto di una particella è proporzionale alla sua velocità. La costante di proporzionalità è la massa.
- e. E la simmetria rotazionale implica la conservazione del momento angolare.
- f. Per gli esperti, una trasformazione CPT.
- g. Qualche anno dopo abbiamo capito questo comportamento a due fasi in termini della dinamica di una classe generale di sistemi dinamici deterministici, con un numero finito di stati possibili. Questi sistemi si evolvono in cicli e le due fasi sono la fase di convergenza verso un ciclo seguita da comportamento ciclico. Un ciclo però è reversibile, poiché ogni evento ha un unico figlio e un unico genitore.
- h. Devo avvertire il lettore di non lasciarsi fuorviare dall'interpretazione colloquiale di «visione» come opinione soggettiva di una persona.

Epilogo/Rivoluzioni
Nota a me stesso

La verità è là fuori.

X-Files.

Mai, mai, mai, mai... Mai arrendersi.

DAVID GROSS ¹.

Come disse Einstein, noi scienziati siamo opportunisti disposti a infrangere le regole e a piegare il metodo scientifico pur di realizzare il nostro obiettivo di scoprire come funziona la natura. Ogni scienziato è come un imprenditore, che ha un certo capitale da investire; per un fisico teorico, il capitale consiste soprattutto di tempo e attenzione. Le decisioni più importanti che dobbiamo prendere sono a quali problemi lavorare e quali approcci seguire. Quale nuovo articolo studiamo, a quali congressi andiamo e quali relazioni ascoltiamo? Le ricompense arrivano in forme diverse: l'eccitazione della scoperta, l'ammirazione dei colleghi e degli studenti e inoltre la carriera, le opportunità di lavoro e lo stipendio.

Per chi è interessato soltanto ad applicare le leggi della fisica conosciute per ampliare la nostra comprensione del funzionamento della natura, questo è un gran periodo per essere un fisico. Scoperte meravigliose indicano la via nel settore della teoria della materia condensata e l'astronomia procede usando le onde gravitazionali per vedere l'universo. Questi paradigmi funzionano. Il costante progresso della matematica guida i passi avanti della fisica matematica, con persone davvero capaci che aprono la strada verso una maggiore comprensione delle strutture matematiche delle teorie consolidate e di quelle nascenti. I progressi della tecnica sperimentale sono

altrettanto notevoli, con la legge di Moore che si manifesta nell'aumento esponenziale dell'estensione e della precisione delle osservazioni astronomiche. Tutto bene, se non fosse che ben poco di tutto ciò affronta i grandi enigmi fondazionali. È solo quando cerchiamo di far avanzare il progetto di scoprire le leggi e i principî fondamentali che sembriamo perdere tempo inutilmente.

In questo momento, nella fisica fondamentale e nella cosmologia le scommesse possibili sono sostanzialmente due. O scommettiamo che tutti i principî fondamentali sono già noti oppure scommettiamo che mancano alcuni principî e idee basilari. I programmi di ricerca piú importanti, come l'inflazione, la teoria delle stringhe e la gravità quantistica a loop, sono tutti modi di scommettere che conosciamo i principî basilari della fisica fondamentale. Con alcune eccezioni notevoli, gli scienziati che lavorano in questi campi danno per scontato che i principî basilari della teoria quantistica e della relatività sono validi e si applicano alle nuove teorie. Molti di coloro che lavorano ad altri programmi lo fanno perché scommettono che vi è ancora molto da scoprire. Le persone come me, che fanno l'una e l'altra cosa, scommettono pro e contro.

Riguardo alla meccanica quantistica ci troviamo ad affrontare la stessa scelta. O scommettiamo di disporre già della teoria completa e di doverla soltanto capire meglio o scommettiamo che la teoria è incompleta in modi importanti. L'interpretazione di Copenaghen, le interpretazioni operazionali, la meccanica quantistica di Everett e altro ancora sono tutti modi di scommettere che conosciamo tutti gli aspetti importanti dei fenomeni quantistici. Chiunque si concentri esclusivamente su una delle proposte realistiche come la teoria dell'onda pilota o il collasso spontaneo scommette che la propria teoria preferita risulterà essere il completamento corretto della meccanica quantistica. In entrambi i casi, la scommessa si basa sul presupposto che conosciamo tutti i principî necessari per comprendere la natura.

Che dire di quanti tra noi sono convinti che un completamento sia necessario, ma credono che nessuno dei modelli studiati possa essere quello giusto? Su che cosa dobbiamo scommettere?

Finora ho scommesso su entrambi i fronti di queste contrapposizioni. Le mie scommesse di maggiore successo utilizzavano idee e strumenti tecnici della fisica delle particelle per risolvere problemi nell'ambito della gra-

vità quantistica. È stata una delle strade che ha portato alla gravità quantistica a loop. Di tanto in tanto, però, ho scritto articoli in cui ho descritto i miei sforzi di inventare teorie a variabili nascoste. E il migliore dei miei primi articoli era un tentativo di collegare il principio di inerzia ai fondamenti quantistici. Con il passare degli anni ho ampliato i miei sforzi nell'ambito dei fondamenti quantistici per affrontare il problema del paesaggio, il che mi ha portato al lavoro sulla natura del tempo. Ma la mia attività principale continua a riguardare la gravità quantistica, sia la fenomenologia della teoria sia la gravità quantistica a loop.

Il progetto di un libro è una specie di terapia mentale, che ti obbliga a esaminare i tuoi pensieri confusi e a svilupparli fino alle loro conclusioni logiche. Ora che ho scritto un libro che sostiene che è necessaria una teoria radicalmente nuova per risolvere i problemi fondazionali della fisica e della cosmologia, che cosa ho intenzione di fare? Continuerò a seguire lo stesso programma sicuro e limitato, o concentrerò i miei sforzi su un tentativo di risolvere i problemi reali?

Per scommettere che la verità richiede qualcosa che non è ancora stato scoperto, dobbiamo impiegare il nostro tempo a cercare quel completamento sconosciuto. Non possiamo semplicemente navigare lungo una costa e poi lungo un'altra. Ci dirigiamo a ovest e arriviamo dove non si vede più la costa, seguendo la nostra bussola, o il miglior facsimile di una bussola che riusciamo a mettere insieme dagli indizi che prendiamo sul serio.

Scommettere che la nostra attuale conoscenza è incompleta è ragionevole, anzi, non esiste scommessa più ragionevole. In ogni epoca passata la nostra conoscenza era incompleta; perché la nostra epoca dovrebbe essere diversa? Gli enigmi che affrontiamo oggi non sono di certo meno formidabili di quelli del passato. Quasi nessuno, però, scommette in questo modo. Mi sconcerta.

Ho il sospetto che per molti fisici sia arduo immaginare che non siamo vicini alla fine della nostra ricerca delle leggi definitive della natura. Siamo cresciuti in una cultura in cui tutto sta nell'avere la risposta giusta e dobbiamo la nostra carriera al fatto di essere stati gli scienziati che avevano la risposta giusta. Ma ho sempre immaginato che in futuro le persone ne sapranno molto di più e allora le nostre pretese di conoscenza sembreranno alquanto sciocche. Questa convinzione probabilmente mi ha fatto difendere in modo meno efficace le mie idee.

Che fare allora delle invenzioni che hanno avuto un successo parziale, come la gravità quantistica a loop? All'inizio, la scoperta di una nuova direzione possibile, incompleta e senza conferme sperimentali (in altre parole, estremamente criticabile, com'è alla nascita la maggior parte delle nuove teorie), merita senza dubbio il nostro tempo e la nostra attenzione. Il fatto che una teoria X, benché formulata in modo incompleto, sia qualcosa che potrebbe essere vero, o far parte della verità, anche in mancanza di elementi di prova, va senz'altro indagato per una decina d'anni. Ma dopo un terzo di secolo o più, in cui i tentativi compiuti da molti per tutta la loro carriera non sono riusciti a smuovere *potrebbe essere vera* avvicinandola a *deve essere vera*, non sarebbe ora di andare avanti? Forse vi sembra che stia ripetendo la polemica della guerra delle stringhe, ma invece sto pensando, con grande affetto, a tutti coloro che hanno lavorato sodo per anni senza riuscire a produrre le scoperte decisive di cui avevano fantasticato. Penso anche a me; anzi, in particolare a me.

Perché scriviamo un articolo dopo l'altro su approcci le cui insufficienze sono ovvie da decenni e quasi nessun articolo che proponga nuovi complementi della meccanica quantistica? Non è certo per mancanza di interesse, infatti tutte le persone di mia conoscenza che lavorano ai fondamenti quantistici hanno scelto quella strada rischiosa perché sono profondamente interessate a capire come la natura risolve il problema della misurazione e altri enigmi.

Per quanto mi riguarda, sono stanco di discutere sui pro e i contro, sui meriti relativi degli approcci esistenti e sugli astuti rimedi inventati per salvare un'idea che sta chiaramente per crollare a causa delle sue carenze. Devo quindi prendere una decisione: o resto su questa strada, che finisce in cima a quella collinetta appena al di là del paese più vicino, oppure mi dirigo verso la palude per trovare sentieri sconosciuti alla ricerca di montagne inesplorate. Se prendo la pista della palude, quasi certamente fallirò, però spero di inviare rapporti che possano interessare e ispirare quei pochi altri che intuiscono il costo della nostra ignoranza, il costo di abbandonare la ricerca troppo presto.

Anche se sono convinto che è necessario qualcosa di straordinariamente nuovo, non so bene come cercare la verità scientifica se non basandomi su un programma di ricerca esistente, usando una metodologia e un insieme di strumenti perfezionati. È così che la ricerca viene insegnata, ricono-

sciuta, finanziata e ricompensata dalla comunità accademica. Una comunità, va detto, di cui dobbiamo essere parte attiva affinché il nostro lavoro sia preso sul serio da chi ne sa abbastanza per poterlo valutare. Che cosa dovrei mettere nelle mie proposte di ricerca, se le mie idee non possono essere espresse nel linguaggio di un programma di ricerca già esistente e molto seguito? Quali problemi assegno ai miei dottorandi, se non devono calcolare qualcosa usando strumenti sviluppati in un dato ambito? Che cosa dico ai miei studenti? Di alzarsi al mattino, preparare il caffè, aprire un quaderno nuovo e fissarlo finché non arriva un angelo che offre loro una rivelazione? È ciò che dovrei fare io stesso? Quanti giorni, settimane, mesi, anni, quante pagine sconclusionate devo tollerare prima di arrendermi?

Non è soltanto che cercare di inventare una fisica nuova è rischioso per la mia carriera e dannoso per la mia stabilità emotiva, è che non so neanche da dove cominciare. Quasi nessuno tra i vivi l'ha fatto, come fecero i rivoluzionari di un secolo fa. Nella mia esperienza, poche cose sono terrificanti come mettere da parte i principî basilari alla base della comprensione del nostro posto nella natura – non è per questo che è confortante conoscerli?

È senza dubbio piú facile lavorare nell'ambito di un modello esistente, verificare i limiti di ciò che sappiamo dall'interno, per cosí dire. Possiamo farlo tenendo la mente aperta nei confronti dei principî basilari e andando alla ricerca di opportunità di modificarli e persino di introdurne di nuovi. Ancora piú importante è cercare sempre nuove opportunità di verificare le teorie mettendole a confronto con esperimenti e osservazioni. Questo è ciò che ho fatto per la maggior parte della mia carriera e mi azzardo a dire che cosí hanno fatto anche molti che operano seguendo gli approcci principali, come la teoria delle stringhe e la gravità quantistica a loop. Ciò che dobbiamo mostrare a tal fine è una collezione di magnifici risultati, che possono condurre o no alla vera storia, e, cosa particolarmente preziosa, alcune proposte di nuovi principî, tra cui il principio olografico e il principio di località relativa. Però, con il dovuto rispetto per chi tra noi ha investito la maggior parte del proprio tempo in approcci ragionevoli allo sviluppo di teorie ragionevoli, non sembra che sia stato abbastanza, questa volta.

Mi sono detto che avrei corso questi rischi dopo il dottorato, dopo aver ottenuto un assegno di ricerca, dopo un incarico a tempo indeterminato,

dopo la cattedra. Ma anche i cattedratici famosi devono presentare richieste di finanziamenti e poi c'è sempre quel fantastico premio che corona una carriera, o quella cattedra comoda e prestigiosa. Quindi aspettiamo finché non andiamo in pensione. A quel punto saremo liberi di correre grossi rischi. Bene, essendo vicino a quel momento, posso dire che, mentre i cinquant'anni e i sessant'anni corrono via veloci, con un fitto programma quotidiano di seminari, consigli di facoltà, lavoro con gli studenti, lezioni, commissioni di valutazione, aeroplani, alberghi e interventi a congressi, imparate che l'unica cosa certa è che non siete immortali.

Forse quindi tutto dipende da uno studente brillante da qualche parte nel mondo, incredibilmente arrogante, come il giovane Einstein, ma di straordinario talento, tanto da assimilare gli elementi essenziali di tutto ciò che abbiamo fatto per poi metterli da parte e ricominciare da capo fiduciosamente.

Una volta un amico mi disse che il mondo accademico è stato modellato sui monasteri, che avevano lo scopo di perpetuare il sapere antico e contrastare il nuovo. Anche dopo decenni dentro al sistema, sono stupito di come funziona la sua meccanica fine. È del tutto impossibile contrastare la logica della fama accademica, che ricompensa ogni successo scientifico con distrazioni che rendono più difficile continuare a fare scienza, mettendo in atto al contempo enormi disincentivi a smettere di rifinire il proprio lascito per affrontare nuove sfide.

Il mondo accademico è molto adatto a sostenere quella che Thomas Kuhn chiama scienza normale. È un'ottima cosa finché non è arrivato da tempo il momento di completare una rivoluzione.

Per quanto ne so, pochi si sono imbattuti per caso in una scoperta importante; la maggior parte delle svolte importanti sono state prodotte dopo anni e anni di duro lavoro non gratificante. Feynman disse che per scoprire qualcosa di nuovo ci si deve prendere il tempo per commettere ogni errore possibile lungo il percorso. E lui di certo sapeva farlo.

Non ho pertanto una soluzione migliore rispetto a fissare il quaderno vuoto. Non ci mancano i modelli da seguire. Einstein fece così. Bohr fece così. Lo fecero anche de Broglie, Schrödinger e Heisenberg, come Bohm e Bell. Tutti trovarono una via dalla pagina bianca a una scoperta fondamentale che ampliò la nostra conoscenza del funzionamento della natura. Iniziate annotando tutto ciò che a vostro giudizio sappiamo con certezza.

Domandatevi quali dei principî fondamentali del canone attuale devono sopravvivere all'imminente rivoluzione. Questa è la prima pagina. Poi passate di nuovo a una pagina bianca e iniziate a pensare.

Note

Prefazione

1. J. S. BELL, *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*, in «Physics», I (novembre 1964), n. 3, pp. 195-200.

I. *La natura ama nascondersi*

1. A. EINSTEIN, *Replica alle osservazioni dei vari autori*, in P. A. SCHILPP (a cura di), *Albert Einstein scienziato e filosofo*, Boringhieri, Torino 1958.
2. A. EINSTEIN, M. BORN e H. BORN, *Briefwechsel, 1916-1955*, Nymphenburger Verlag, München 1969 [trad. it. *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1981].

II. *I quanti*

1. T. STOPPARD, *Arcadia*, Atto I, Scena I, Farrar, Straus and Giroux, New York 2008 [trad. it. *Arcadia*, Einaudi, Torino 2003].
2. In italiano *uncertainty principle* viene tradizionalmente tradotto con «principio di indeterminazione», mentre la dizione «principio di incertezza», benché utilizzata, compare molto raramente. Per agevolare la lettura, qui si è preferito usare sempre «principio di incertezza», piú adatto al taglio particolare del libro e piú fedele alle intenzioni dell'Autore [N.d.T.].

IV. *Stati condivisi*

1. J. A. WHEELER e W. H. ZUREK (a cura di), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, p. 194.
2. A. EINSTEIN, B. PODOLSKY e N. ROSEN, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in «Physical Review», XLVII (15 maggio 1935), n. 10, pp. 777-80.

3. A. ASPECT, P. GRANGIER e G. ROGER, *Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem*, in «Physical Review Letters», XLVII (agosto 1981), n. 7, pp. 460-63; A. ASPECT, J. DALIBARD e G. ROGER, *Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, ivi, XLIX (dicembre 1982), n. 25, pp. 1804-807.
4. N. BOHR, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in «Physical Review», XLVIII (ottobre 1935), n. 8, pp. 696-702.
5. S. KOCHEN e E. P. SPECKER, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, in «Journal of Mathematics and Mechanics», XVII (luglio 1967), n. 1, pp. 59-87; J. S. BELL, *On the problem of hidden variables in quantum mechanics*, in «Reviews of Modern Physics», XXXVIII (luglio 1966), n. 3, pp. 447-52.

VI. Il trionfo dell'antirealismo

1. C. A. FUCHS e A. PERES, *Quantum theory needs no "interpretation"*, in «Physics Today», LIII (marzo 2000), n. 3, pp. 70-71, <https://doi.org/10.1063/1.883004>.
2. J. J. O'CONNOR e E. F. ROBERTSON, *Louis Victor Pierre Raymond duc de Broglie*, <http://www.history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Broglie.html>.
3. Intervista a Louis de Broglie, condotta da T. S. Kuhn, A. George e T. Kahan, 7 gennaio 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD, <https://repository.aip.org/islandora/object/nbla:272502>.
4. W. HEISENBERG, *Das Naturbild der Heutigen Physik*, Rowohlt, Hamburg 1955, pp. 15, 29 [trad. it. *Natura e fisica moderna*, Garzanti, Milano 1957, pp. 12, 24].
5. Niels Bohr citato in M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, John Wiley and Sons, New York 1974, p. 102 [trad. it. *Il quanto d'azione e la descrizione della natura*, in N. BOHR, *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, Boringhieri, Torino 1961, p. 324, e ID., *Il postulato dei quanti e il recente sviluppo della teoria atomica*, *ibid.*, p. 357].

VII. La sfida del realismo: de Broglie e Einstein

1. G. BACCIAGALUPPI e A. VALENTINI, *Quantum Theory at the Crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge University Press, Cambridge 2009, p. 235.
2. *Ibid.*, p. 487.
3. G. HERMANN, *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*, in «Die Naturwissenschaften», XXIII (ottobre 1935), n. 42, pp. 718-21, doi:10.1007/BF01491142 [trad. ingl. *The foundations of quantum mechanics in the philosophy of nature*, in «The Harvard Review of Philosophy», VII (1999), n. 1, pp. 35-44].

4. J. Bell in *Interview: John Bell*, intervista condotta da Charles Mann e Robert Crease, in «Omni», X (maggio 1988), n. 8, p. 88.
5. N. D. MERMIN, *Hidden variables and the two theorems of John Bell*, in «Reviews of Modern Physics», LXV (luglio 1993), n. 3, pp. 805-6.

VIII. Bohm: il realismo ci riprova

1. R. TUMULKA, *On bohmian mechanics, particle creation, and relativistic space-time: Happy 100th birthday, David Bohm!*, in «Entropy», XX (giugno 2018), n. 6, p. 462, arXiv:1804.08853v3.
2. D. BOHM, *A suggested interpretation of quantum theory in terms of "hidden" variables, Part I and II*, in «Physical Review», LXXXV (gennaio 1952), n. 2, pp. 166-93.
3. W. MYRVOLD, *On some early objections to Bohm's theory*, in «International Studies in the Philosophy of Science», XVII (marzo 2003), n. 1, pp. 7-24.
4. E. D. PEAT, *Infinite Potential. The Life and Times of David Bohm*, Basic Books, New York 1997, p. 132.
5. A. EINSTEIN, *Elementäre Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik*, in AA.VV., *Scientific Papers Presented to Max Born*, Hafner, New York 1953, pp. 33-40; si veda anche MYRVOLD, *On some early objections* cit.
6. B. COHEN, *Four things Einstein said to cheer up his sad friend*, in «From the Grapevine», 13 giugno 2017, <https://www.fromthegrapevine.com/lifestyle/einstein-bohm-letters-winner-auction-israel>.
7. MYRVOLD, *On some early objections* cit.
8. O. FREIRE JR, *Science and exile: David Bohm, the hot times of the Cold War, and his struggle for a new interpretation of quantum mechanics*, in «Historical Studies on the Physical and Biological Sciences», XXXVI (settembre 2005), n. 1, pp. 1-34, <https://arxiv.org/pdf/physics/0508184.pdf>.
9. I commenti di Robert Oppenheimer a Max Dresden sono riportati in M. DRESDEN, *H. A. Kramers. Between Tradition and Revolution*, Springer-Verlag, New York 1987, p. 133. Sono citati anche in PEAT, *Infinite Potential* cit., dove però sono presentati come commenti di Dresden «dall'aula all'American Physical Society Meeting di Washington del maggio 1989. Dresden ha confermato questa versione in un'intervista con l'autore [Peat] subito dopo quella sessione e in una lettera all'autore» (la citazione è a p. 133 e la nota a p. 334).
10. DRESDEN, *H. A. Kramers* cit.
11. Lettera di John Nash a Robert Oppenheimer, 10 luglio 1957, Institute for Advanced Study, Shelby White and Leon Levy Archives Center, <https://www.ias.edu/ideas/2015/john-forbes-nash-jr>.
12. Lettera di Léon Rosenfeld a David Bohm, 30 maggio 1952, citata in L. GILDER, *The Age of Entanglement. When Quantum Physics Was Reborn*, Alfred A. Knopf, New

York 2008, pp. 216-17.

13. A. VALENTINI, *Signal-locality, uncertainty, and the sub-quantum H-theorem, Part 1*, in «Physics Letters A», CLVI (giugno 1991), n. 1-2, pp. 5-11; *Part 2*, ivi, CLVIII (agosto 1991), n. 1-2, pp. 1-8.
14. A. VALENTINI e H. WESTMAN, *Dynamical origin of quantum probabilities*, in «Proceedings of the Royal Society of London A», CDLXI (gennaio 2005), n. 2053, pp. 253-72, arXiv:quant-ph/0403034; E. ABRAHAM, S. COLIN e A. VALENTINI, *Long-time relaxation in pilot-wave theory*, in «Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical», XLVII (settembre 2014), n. 39, p. 5306, arXiv:1310.1899.
15. A. VALENTINI, *Signal-locality in hidden variables theories*, in «Physics Letters A», CCXCVII (maggio 2002), n. 5-6, pp. 273-78.
16. Cfr. N. G. UNDERWOOD e A. VALENTINI, *Anomalous spectral lines and relic quantum nonequilibrium* (2016), arXiv:1609.04576; S. COLIN e A. VALENTINI, *Robust predictions for the large-scale cosmological power deficit from primordial quantum nonequilibrium*, in «International Journal of Modern Physics D25», n. 6 (aprile 2016), 1650068, arXiv:1510.03508.

IX. *Collasso fisico dello stato quantistico*

1. D. BOHM e J. BUB, *A proposed solution of the measurement problem in quantum mechanics by a hidden variable theory*, in «Reviews of Modern Physics», XXXVIII (luglio 1966), n. 3, pp. 453-69.
2. P. PEARLE, *Reduction of the state vector by a nonlinear Schrödinger equation*, in «Physical Review D», XIII (febbraio 1976), n. 4, pp. 857-68.
3. G. GHIRARDI, A. RIMINI e T. WEBER, *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, ivi, XXXIV (luglio 1986), n. 2, pp. 470-91.
4. Cfr. R. TUMULKA, *A relativistic version of the Ghirardi-Rimini-Weber model*, in «Journal of Statistical Physics», CXXV (novembre 2006), n. 4, pp. 821-40.
5. R. PENROSE, *Gravitational collapse and space-time singularities*, in «Physical Review Letters», XIV (gennaio 1965), n. 3, pp. 57-59.
6. S. W. HAWKING e R. PENROSE, *The singularities of gravitational collapse and cosmology*, in «Proceedings of the Royal Society A», CCCXIV (gennaio 1970), n. 1519, pp. 529-48.
7. R. PENROSE, *Time-asymmetry and quantum gravity*, in C. J. ISHAM, R. PENROSE e D. W. SCIAMA (a cura di), *Quantum Gravity 2. A Second Oxford Symposium*, Clarendon Press, Oxford 1981, p. 244; ID., *Gravity and state vector reduction*, in R. PENROSE e C. J. ISHAM (a cura di), *Quantum Concepts in Space and Time*, Clarendon Press, Oxford 1986, p. 129; ID., *Non-locality and objectivity in quantum state reduction*, in J. S. ANANDAN e J. L. SAFKO (a cura di), *Quantum Coherence and Reality. In Celebration of the 60th Birthday of Yakir Aharonov*, World Scientific, Singapore 1995, p. 238; ID.,

Shadows of the Mind. A Search for the Missing Science of Consciousness, Oxford University Press, Oxford - New York 1994 [trad. it. *Ombre della mente*, Rizzoli, Milano 1996]; ID., *On gravity's role in quantum state reduction*, in «General Relativity and Gravitation», XXVIII (maggio 1996), n. 5, pp. 581-600; I. FUENTES e R. PENROSE, *Quantum state reduction via gravity, and possible tests using Bose-Einstein condensates*, in S. GAO (a cura di), *Collapse of the Wave Function. Models, Ontology, Origin, and Implications*, Cambridge University Press, Cambridge 2018, p. 187.

8. L. DIÓSI, *Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations*, in «Physical Review A», XL (agosto 1989), n. 3, pp. 1165-74; F. KÁROLYHÁZY, *Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies*, in «Il Nuovo Cimento A», XLII (marzo 1966), n. 2, pp. 390-402; F. KÁROLYHÁZY, A. FRENKEL e B. LUKÁCS, *On the possible role of gravity in the reduction of the wave function*, in PENROSE e ISHAM (a cura di), *Quantum Concepts cit.*, pp. 109-28.
9. S. BOSE, A. MAZUMDAR, G. W. MORLEY, H. ULBRICHT, M. TOROS, M. PATERNOSTRO, A. A. GERACI, P. F. BARKER, M. S. KIM e G. MILBURN, *Spin entanglement witness for quantum gravity*, in «Physical Review Letters», CXIX (dicembre 2017), n. 24, 240401, arXiv:1707.06050; C. MARLETTO e V. VEDRAL, *Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity*, ivi, 240402, arXiv:1804.11315.
10. P. PEARLE, *A relativistic dynamical collapse model*, in «Physical Review D», XCI (maggio 2015), n. 10, 105012, arXiv:1412.6723.
11. R. GAMBINI e J. PULLIN, *The Montevideo interpretation of quantum mechanics. A short review*, in «Entropy», XX (febbraio 2015), n. 6, p. 413, arXiv:1502.03410.
12. S. L. ADLER, *Gravitation and the noise needed in objective reduction modes*, in M. BELL e S. GAO (a cura di), *Quantum Nonlocality and Reality. 50 Years of Bell's Theorem*, Cambridge University Press, Cambridge 2016, pp. 390-99.

X. *Realismo magico*

1. B. S. DEWITT, *Quantum mechanics and reality: Could the solution to the dilemma of indeterminism be a universe in which all possible outcomes of an experiment actually occur?*, in «Physics Today», XXIII (settembre 1970), n. 9, pp. 155-65.
2. H. EVERETT III, *"Relative state" formulation of quantum mechanics*, in «Reviews of Modern Physics», XXIX (luglio 1957), n. 3, pp. 454-62.

XI. *Realismo critico*

1. D. DEUTSCH, *Quantum theory of probability and decisions*, in «Proceedings of the Royal Society A», CDLV (agosto 1999), n. 1988, pp. 3129-37, arXiv:quant

ph/9906015.

2. D. WALLACE, *Quantum probability and decision theory, revisited*, 2002, arXiv:quant-ph/0211104; ID., *Everettian rationality: Defending Deutsch's approach to probability in the Everett interpretation*, in «Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics», XXXIV (settembre 2003), n. 3, pp. 415-39, arXiv:quant-ph/0303050; ID., *Quantum probability from subjective likelihood: Improving on Deutsch's proof of the probability rule*, ivi, XXXVIII (giugno 2007), n. 2, pp. 311-32, arXiv:quant-ph/0312157; ID., *A formal proof of the Born rule from decision-theoretic assumptions* (2009), arXiv:quant-ph/0906.2718; S. SAUNDERS, *Derivation of the Born rule from operational assumptions*, in «Proceedings of the Royal Society A», CDLX (giugno 2004), n. 2046, pp. 1771-88, arXiv:quant-ph/0211138.
3. Cfr. L. S. SCHULMAN, *Note on the quantum recurrence theorem*, in «Physical Review A», XVIII (novembre 1978), n. 5, pp. 2379-80, doi:10.1103/PhysRevA.18.2379.
4. S. WEINBERG, *The trouble with quantum mechanics*, in «The New York Review of Books», 19 gennaio 2017, <https://www.nybooks.com/articles/2017/01/19/trouble-with-quantum-mechanics/>.

XII. *Alternative alla rivoluzione*

1. L. HARDY, *Reformulating and reconstructing quantum theory* (2011), arXiv:1104.2066.
2. R. FEYNMAN, *Simulating physics with computers* (discorso di apertura della Physics of Computation Conference tenuto al MIT nel 1981), in «International Journal of Theoretical Physics», XXI (giugno 1982), n. 6-7, pp. 467-88.
3. D. DEUTSCH, *Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer*, in «Proceedings of the Royal Society A», CD (luglio 1985), n. 1818, pp. 97-117.
4. J. A. WHEELER, *Information, physics, quantum: The search for links*, in S. KOBAYASHI e altri (a cura di), *Proceedings of the 3rd International Symposium. Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, Tokyo, 1989*, Physical Society of Japan, Tokyo 1990, pp. 354-58.
5. Questa frase di Wheeler è citata in P. DAVIES, *The Goldilocks Enigma* (intitolato anche *Cosmic Jackpot*), Houghton Mifflin, Boston - New York 2006, p. 281 [trad. it. *Una fortuna cosmica*, Mondadori, Milano 2007, p. 315].
6. Cfr. C. E. FUCHS e B. C. STACEY, *QBism: Quantum theory as a hero's handbook* (2016), arXiv:1612.07308.
7. L. CRANE, *Clock and category: Is quantum gravity algebraic?*, in «Journal of Mathematical Physics», XXXVI (maggio 1995), n. 11, pp. 6180-93, arXiv:gr-qc/9504038; C. ROVELLI, *Relational quantum mechanics*, in «International Journal of Theoretical Physics», XXXV (agosto 1996), n. 8, pp. 1637-78, arXiv:quant-ph/9609002; L.

- SMOLIN, *The Bekenstein bound, topological quantum field theory and pluralistic quantum cosmology* (1995), arXiv:gr-qc/9508064.
8. R. E. KASTNER, S. KAUFFMAN e M. EPPERSON, *Taking Heisenberg's potentia seriously* (2017), arXiv:1709.03595.
 9. J. BARBOUR, *The End of Time. The Next Revolution in Physics*, Oxford University Press, Oxford 1999 [trad. it. *La fine del tempo. La rivoluzione fisica prossima ventura*, Einaudi, Torino 2003].
 10. H. DE A. GOMES, *Back to Parmenides* (2016, 2018), arXiv:1603.01574.
 11. *Ibid.*

XIII. Lezioni

1. Sono grato a Avshalom Elitzur e a Eli Cohen per le numerose discussioni sui casi di questo tipo.
2. Per una rassegna recente, si veda R. TUMULKA, *Bohmian mechanics*, in E. KNOX e A. WILSON (a cura di), *The Routledge Companion to the Philosophy of Physics*, Routledge, New York 2018, arXiv:1704.08017.
3. Y. AHARONOV e L. VAIDMAN, *The two-state vector formalism of quantum mechanics: An updated review*, in J. G. MUGA, R. SALA MAYATO e Í. EGUSQUIZA (a cura di), *Time in Quantum Mechanics* («Lecture Notes in Physics, 734»), vol. I, Springer, Berlin-Heidelberg 2008², pp. 399-447, arXiv:quant-ph/0105101v2.
4. J. G. CRAMER, *The transactional interpretation of quantum mechanics*, in «Reviews of Modern Physics», LVIII (luglio 1986), n. 3, pp. 647-87; ID., *The Quantum Handshake. Entanglement, Nonlocality and Transactions*, Springer International, Cham 2016; R. E. KASTNER, *The possibilist transactional interpretation and relativity*, in «Foundations of Physics», XLII (agosto 2012), n. 8, pp. 1094-113.
5. H. PRICE, *Does time-symmetry imply retrocausality? How the quantum world says "Maybe"*, in «Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics», XLIII (maggio 2012), n. 2, pp. 75-83, arXiv:1002.0906.
6. R. D. SORKIN, *Quantum measure theory and its interpretation*, in B.-L. HU e D. H. FENG (a cura di), *Quantum Classical Correspondence. Proceedings of the 4th Drexel Symposium on Quantum Nonintegrability, Drexel University, Philadelphia, USA, September 8-11, 1994*, International Press, Cambridge Mass. 1997, pp. 229-51, arXiv:gr-qc/9507057.
7. M. GELL-MANN e J. B. HARTLE, *Quantum mechanics in the light of quantum cosmology*, in *Proceedings of the 3rd International Symposium cit.*, pp. 321-43; ID., *Alternative decohering histories in quantum mechanics*, in K. K. PHUA e Y. YAMAGUCHI (a cura di), *Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics, 2-8 August*

- 1990, Singapore, vol. I, South East Asia Theoretical Physics Association and Physical Society of Japan, dist. World Scientific, Singapore-Tokyo 1990, pp. 1303-10; ID., *Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology*, in J. HALLIWELL, J. PÉREZ-MERCADER e W. ZUREK (a cura di), *Proceedings of the NATO Workshop on the Physical Origins of Time Asymmetry, Mazagón, Spain, September 30 - October 4, 1991*, Cambridge University Press, Cambridge 1992, arXiv:gr-qc/9304023; ID., *Classical equations for quantum systems*, in «Physical Review D», XLVII (aprile 1993), n. 8, pp. 3345-82, arXiv:gr-qc/9210010.
8. R. B. GRIFFITHS, *Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics*, in «Journal of Statistical Physics», XXXVI (luglio 1984), nn. 1-2, pp. 219-72; ID., *The consistency of consistent histories: A reply to d'Espagnat*, in «Foundations of Physics», XXIII (dicembre 1993), n. 12, pp. 1601-10; R. OMNÈS, *Logical reformulation of quantum mechanics, 1: Foundations*, in «Journal of Statistical Physics», LIII (novembre 1988), nn. 3-4, pp. 893-932; ID., *Logical reformulation of quantum mechanics, 2: Interferences and the Einstein-Podolsky-Rosen experiment*, ivi, pp. 933-55; ID., *Logical reformulation of quantum mechanics, 3: Classical limit and irreversibility*, ivi, pp. 957-75; ID., *Logical reformulation of quantum mechanics, 4: Projectors in semiclassical physics*, ivi, LVII (ottobre 1989), nn. 1-2, pp. 357-82; ID., *Consistent interpretations of quantum mechanics*, in «Reviews of Modern Physics», LXIV (aprile 1992), n. 2, pp. 339-82.
 9. F. DOWKER e A. KENT, *On the consistent histories approach to quantum mechanics*, in «Journal of Statistical Physics», LXXXII (marzo 1996), n. 5-6, pp. 1575-646, arXiv:gr-qc/9412067.
 10. Cfr. M. J. W. HALL, D.-A. DECKERT e H. M. WISEMAN, *Quantum phenomena modeled by interactions between many classical worlds*, in «Physical Review X», IV (ottobre 2014), n. 4, 041013, arXiv:1402.6144.
 11. Cfr. B. YANG, W. CHEN e B. POIRIER, *Rovibrational bound states of neon trimer: Quantum dynamical calculation of all eigenstate energy levels and wavefunctions*, in «Journal of Chemical Physics», CXXXV (settembre 2011), n. 9, 094306; G. PARLANT, Y.-C. OU, K. PARK e B. POIRIER, *Classical-like trajectory simulations for accurate computation of quantum reactive scattering probabilities*, contributo richiesto e articolo principale in «Computational and Theoretical Chemistry», numero speciale in onore di Jean-Claude Rayez, n. 990 (giugno 2012), p. 317.
 12. G. 'T HOOFT, *Time, the arrow of time, and quantum mechanics*, in «Frontiers in Physics», VI (2018), id. 81, arXiv:1804.01383.
 13. Cfr. L. SMOLIN, *Could quantum mechanics be an approximation to another theory?* (2006), arXiv:quant-ph/0609109.
 14. M. F. PUSEY, J. BARRETT e T. RUDOLPH, *On the reality of the quantum state*, in «Nature Physics», VIII (giugno 2012), n. 6, pp. 475-78, arXiv:1111.3328.

1. L. SMOLIN, *Time Reborn*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston - New York 2013 [trad. it. *La rinascita del tempo*, Einaudi, Torino 2014], e R. MANGABEIRA UNGER e L. SMOLIN, *The Singular Universe and the Reality of Time*, Cambridge University Press, Cambridge 2015. Si veda anche L. SMOLIN, *Temporal naturalism, invited contribution to special issue on Cosmology and Time*, in «Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics», LII (novembre 2015), n. 1, pp. 86-102, arXiv:1310.8539.
2. Cfr. F. MARKOPOULOU e L. SMOLIN, *Disordered locality in loop quantum gravity states*, in «Classical and Quantum Gravity», XXIV (luglio 2007), n. 15, pp. 3813-24, arXiv:gr-qc/0702044.
3. L. SMOLIN, *Derivation of quantum mechanics from a deterministic non-local hidden variable theory, I. The two-dimensional theory*, IAS preprint PRINT 83 0802, Institute for Advanced Study, Princeton, agosto 1983; ID., *Stochastic mechanics, hidden variables and gravity*, in PENROSE e ISHAM (a cura di), *Quantum Concepts* cit.
4. ID., *Matrix models as non-local hidden variables theories*, in A. C. ELITZUR, S. DOLEV e N. KOLENDA (a cura di), *Quo Vadis Quantum Mechanics?*, The Frontiers Collection, Springer, Berlin-Heidelberg 2005, pp. 121-52; ID., *Non-local beables*, in «International Journal of Quantum Foundations», I (aprile 2015), n. 2, pp. 100-6, arXiv:1507.08576.
5. S. L. ADLER, *Quantum Theory as an Emergent Phenomenon. The Statistical Mechanics of Matrix Models as the Precursor of Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, Cambridge 2004; ID., *Statistical dynamics of global unitary invariant matrix models as pre-quantum mechanics*, versione preliminare di un libro, 2002, arXiv:hep-th/0206120.
6. A. STARODUBTSEV, *A note on quantization of matrix models*, in «Nuclear Physics B», DCLXXIV (dicembre 2003), n. 3, pp. 533-52, arXiv:hep-th/0206097.
7. MARKOPOULOU e SMOLIN, *Disordered Locality* cit.
8. ID., *Quantum theory from quantum gravity*, in «Physical Review D», LXX (dicembre 2004), n. 12, 124029, arXiv:gr-qc/0311059.
9. G. W. LEIBNIZ, *La monadologie*, 1714 [trad. it. *La monadologia*, Tipografia di Federico Bencini, Firenze 1856; Laterza, Bari 1971].
10. J. BARBOUR e L. SMOLIN, *Extremal variety as the foundation of a cosmological quantum theory* (1992), arXiv:hep-th/9203041.
11. LEIBNIZ, *La monadologie* cit., §§ 54, 56.
12. *Ibid.*, § 57.
13. L. SMOLIN, *The dynamics of difference*, in «Foundations of Physics», XLVIII (febbraio 2018), n. 2, pp. 121-34, arXiv:1712.04799; ID., *Quantum mechanics and the principle of maximal variety*, ivi, XLVI (giugno 2016), n. 6, pp. 736-58, arXiv:1506.02938; ID., *A real ensemble interpretation of quantum mechanics*, ivi, XLII (ottobre 2012), n. 10, pp. 1239-61, arXiv:1104.2822.
14. ID., *Precedence and freedom in quantum physics* (2012), arXiv:1205.3707.

XV. Una teoria causale delle visioni

1. L. BOMBELLI, J. LEE, D. MEYER e R. D. SORKIN, *Space-time as a causal set*, in «Physical Review Letters», LIX (agosto 1987), n. 5, pp. 521-24; R. D. SORKIN, *Spacetime and causal sets*, in J. C. D'OLIVO e altri (a cura di), *Relativity and Gravitation. Classical and Quantum (Proceedings of the SILARG VII Conference, held in Cocoyoc, Mexico, December 1990)*, World Scientific, Singapore 1991, pp. 150-73.
2. M. AHMED, S. DODELSON, P. B. GREENE e R. SORKIN, *Everpresent Lambda*, in «Physical Review D», LXIX (maggio 2004), n. 10, 103523, arXiv:astro-ph/0209274.
3. T. JACOBSON, *Thermodynamics of spacetime: The Einstein equation of state*, in «Physical Review Letters», LXXV (agosto 1995), n. 7, pp. 1260-63, arXiv:gr-qc/9504004.
4. Cfr. F. MARKOPOULOU e L. SMOLIN, *Holography in a quantum spacetime* (ottobre 1999), arXiv:hep-th/9910146; L. SMOLIN, *The strong and weak holographic principles*, in «Nuclear Physics B», DCI (maggio 2001), n. 1-2, pp. 209-47, arXiv:hep-th/0003056.
5. M. CORTÈS e L. SMOLIN, *The universe as a process of unique events*, in «Physical Review D», XC (ottobre 2014), n. 8, 084007, arXiv:1307.6167 (gr-qc); ID., *Energetic causal sets*, ivi, n. 4 (agosto 2014), 044035, arXiv:1308.2206 (gr-qc); ID., *Spin foam models as energetic causal sets*, ivi, XCIII (giugno 2014), n. 8, 084039, arXiv:1407.0032; ID., *Reversing the irreversible: From limit cycles to emergent time symmetry*, ivi, XCVII (gennaio 2018), n. 2, 026004, arXiv:1703.09696.
6. L. SMOLIN, *The dynamics of difference*, in «Foundations of Physics», XLVIII (2018), n. 2, pp. 121-34, arXiv:1712.04799.

Epilogo/Rivoluzioni *Nota a me stesso*

1. D. GROSS, *Closing remarks*, Strings 2003 Conference, Kyoto, Japan, July 6-11, 2003, slide 17, <https://member.ipmu.jp/yuji.tachikawa/stringsmirrors/2003/gross.pdf>.

Glossario

Accelerazione Il tasso di cambiamento della velocità.

Antirealismo Una corrente filosofica secondo cui o non esiste una realtà oggettiva universale o, se esiste, gli esseri umani non possono averne una conoscenza completa.

Approccio delle storie coerenti Un'interpretazione della meccanica quantistica basata sull'assegnazione di probabilità a insiemi di storie che si separano perdendo coerenza.

Atomo L'unità fondamentale della materia, composta da un nucleo, che contiene protoni e neutroni, circondato da elettroni.

Background Un modello scientifico o una teoria scientifica spesso descrivono solo una parte dell'universo. Alcune caratteristiche del resto dell'universo possono essere incluse perché necessarie per definire le proprietà della parte di universo studiata. Queste caratteristiche sono chiamate collettivamente background. Per esempio, nella fisica newtoniana lo spazio e il tempo fanno parte del background poiché sono intesi come assoluti.

Bayesianismo quantistico Un approccio ai problemi dei fondamenti quantistici secondo cui tutte le probabilità usate nella meccanica quantistica sono soggettive, sono pronostici.

Campo Un sistema fisico diffuso nello spazio con uno o più gradi di libertà per ogni punto dello spaziotempo. Due esempi sono il campo elettrico e il campo magnetico.

Causalità Il principio che gli eventi sono influenzati da quelli avvenuti nel loro passato. Nella teoria della relatività un evento può avere un'influenza causale su un altro solo se l'energia o l'informazione inviate dal primo raggiungono il secondo.

Collasso della funzione d'onda Il postulato che un sistema quantistico, appena un osservatore esegue una misurazione che rivela un valore preciso per qualche osservabile, assume lo stato quantistico associato a quel valore.

Cosmologia quantistica La teoria che cerca di descrivere l'intero universo nel linguaggio della teoria quantistica.

Costante di Planck La quantità fondamentale che specifica la scala a cui gli effetti della fisica quantistica si discostano da quelli della fisica newtoniana (di solito indicata con h). Compare nella relazione tra l'energia di un quanto e la frequenza dell'onda associata.

Decoerenza Il processo per cui i sistemi quantistici di grandi dimensioni, contenenti molti gradi di libertà, in contatto con un ambiente che introduce fluttuazioni casuali perdono le proprie proprietà ondulatorie, a causa della randomizzazione delle fasi delle onde, e quindi emergono come particelle.

Determinismo La concezione filosofica secondo cui lo stato futuro di un sistema fisico è completamente determinato dalle leggi della fisica che agiscono sullo stato presente.

Dipendente dal background Una teoria, come la fisica newtoniana, che fa uso di un background.

Discretezza La proprietà di alcune osservabili dei sistemi quantistici, come l'energia di un atomo, di assumere solo valori appartenenti a un insieme discreto.

Dualismo onda-particella Un principio della teoria quantistica secondo cui possiamo descrivere le particelle elementari sia come particelle sia come onde, a seconda del contesto.

Energia Una grandezza fisica che dà una misura dell'attività di un sistema, il cui valore si conserva nel tempo. L'energia assume varie forme e si può convertire da una forma all'altra, con il valore totale che resta sempre invariato.

Energia di Planck Un'unità di energia costruita moltiplicando la costante di Planck h , la costante gravitazionale di Newton G e la velocità della luce c nella giusta combinazione per ottenere un'energia. È uguale all'energia contenuta in un centomillesimo di grammo.

Entanglement Una proprietà di uno stato quantistico di due o più sistemi, dove lo stato indica una proprietà condivisa da questi sistemi che non è semplicemente la somma delle proprietà possedute dalle singole particelle. Lo stato EPR o stato contrario è un esempio di stato entangled.

Entropia Una misura del disordine di un sistema fisico, che è in relazione con l'informazione intrappolata nei valori esatti dei suoi microscopici gradi di libertà.

Equazione di Schrödinger Vedi Regola 1.

Equilibrio quantistico In una teoria a variabili nascoste come la teoria dell'onda pilota, la distribuzione statistica delle particelle in un ensemble di sistemi è arbitraria. Quando è uguale al quadrato della funzione d'onda, come specifica la regola di Born, si dice che il sistema è in equilibrio quantistico.

Esperimento del gatto di Schrödinger Un esperimento mentale in cui la Regola 1 implica che un gatto sia in una sovrapposizione di due stati macroscopici distinti: vivo e morto.

Evento Nella teoria della relatività, qualcosa che avviene in un punto dello spazio e in un istante del tempo particolari.

Fisica classica La parte della fisica da Galileo alla relatività generale, prima della teoria quantistica.

Fisica newtoniana Un modello per descrivere e spiegare il movimento, inventato da Isaac Newton e presentato nei *Principia mathematica* (1687), che si basa su tre leggi del moto.

Forza Nella fisica newtoniana, il cambiamento della quantità di moto in una collisione. È uguale anche al prodotto dell'accelerazione di un corpo per la sua massa.

Fotone Un quanto del campo elettromagnetico, che trasporta una quantità di energia proporzionale alla frequenza del campo.

Funzione d'onda Una rappresentazione dello stato quantistico di un sistema.

Futuro (o futuro causale) Il futuro di un evento consiste di tutti quegli eventi che può influenzare inviando loro energia o informazioni.

Grado di libertà Una quantità variabile, che descrive un modo in cui può cambiare un sistema fisico.

Grandezza conservata Una proprietà di un sistema fisico il cui valore totale resta invariato nel tempo mentre il sistema si evolve. Alcuni esempi sono l'energia, la quantità di moto e il momento angolare.

Gravità quantistica La teoria che combina la relatività generale e la fisica quantistica.

Gravità quantistica a loop Un approccio alla gravità quantistica basato su una quantizzazione della teoria della relatività generale di Einstein.

Indipendente dal background Una teoria che non fa uso di una divisione dell'universo in una parte che è modellata e in tutto il resto, che viene considerato parte del background. La relatività generale è indipendente dal background poiché la geometria dello spazio e del tempo non è fissa, ma si evolve nel tempo come ogni altro campo, come quello elettromagnetico.

Informazione Una misura dell'organizzazione di un segnale. È uguale al numero di domande polari le cui risposte potrebbero essere codificate nel segnale.

Interpretazione a molti momenti L'ipotesi che ciò che esiste realmente sia una vasta collezione di momenti, contenenti tutto ciò che potrebbe essere accaduto nella storia dell'universo.

Interpretazione a molti mondi Un'interpretazione della teoria quantistica secondo cui i diversi risultati possibili di un'osservazione di un sistema quantistico risiedono in universi differenti, tutti in qualche modo coesistenti.

Località In fisica, il principio che i sistemi sono influenzati direttamente solo da ciò che è vicino nello spazio e nel tempo.

Lunghezza di Planck L'unità di lunghezza costruita in funzione della costante di Planck h , della costante gravitazionale di Newton G e della velocità della luce c ; è circa 10^{20} volte minore del diametro di un nucleo atomico.

Massa Nella fisica newtoniana, la massa inerziale è una misura della quantità di materia, che, moltiplicata per la velocità, dà una grandezza conservata chiamata quantità di moto.

Massa di Planck L'unità di massa costruita in funzione della costante di Planck h , della costante gravitazionale di Newton G e della velocità della luce c ; è all'incirca uguale a un centomillesimo di grammo.

Matrice Una tabella di numeri organizzata in file e colonne.

Meccanica bohmiiana Altra denominazione della teoria dell'onda pilota.

Meccanica delle matrici Un approccio alla meccanica quantistica in cui le osservabili sono rappresentate da matrici.

Meccanica ondulatoria Una forma di meccanica quantistica inventata da Erwin Schrödinger nel 1926. In seguito, si è dimostrato che è equivalente alla meccanica delle matrici.

Meccanica quantistica La teoria degli atomi e della luce sviluppata negli anni Venti del secolo scorso.

Modello standard della fisica delle particelle Una teoria quantistica dei campi che è il nostro modello migliore delle particelle elementari e delle loro interazioni, eccetto la gravità.

Momento angolare Una grandezza conservata che misura la quantità di rotazione o moto angolare.

Non locale Qualsiasi fenomeno che comporta influenze trasmesse da sistemi separati nello spazio e quindi non soddisfa il principio di località.

Operazionalismo Un approccio allo strumentalismo in cui per un sistema fisico si specifica un insieme di operazioni che comprendono il modo in cui deve essere preparato e il modo in cui deve essere misurato.

Passato (o passato causale) Il passato di un dato evento è costituito da tutti quegli eventi che avrebbero potuto influenzarlo con l'invio di energia o informazioni.

Principio di complementarità Il principio proposto da Bohr che i sistemi quantistici ammettono descrizioni diverse, come particella e onda, che sarebbero contraddittorie se dovessero essere imposte simultaneamente. Comunque, ogni esperimento può essere descritto usando l'una o l'altra.

Principio di esclusione Il principio, ideato da Wolfgang Pauli, che due fermioni non possono essere nello stesso stato quantistico.

Principio di incertezza (o indeterminazione) Un principio della teoria quantistica secondo cui è impossibile misurare allo stesso tempo la posizione e la quantità di moto (o velocità) di una particella.

Principio olografico Un principio ipotizzato che limita la quantità di informazione che attraversa una superficie all'area della superficie in unità di Planck.

Probabilità bayesiana Una probabilità soggettiva che misura quanto una persona crede a qualcosa.

Quanti L'aspetto particellare del dualismo onda-particella.

Quantità di moto Una grandezza definita per particelle in movimento, che viene scambiata nelle collisioni in modo da conservare il totale. Nella fisica newtoniana è uguale al prodotto della massa per la velocità.

Quantizzare Applicare un algoritmo che riceve in ingresso una teoria classica o newtoniana e produce una corrispondente teoria quantistica. È nota la non unicità degli algoritmi di questo tipo.

Rapidità Il tasso di cambiamento della distanza nel tempo.

Realismo La convinzione che esista un mondo fisico oggettivo le cui proprietà sono indipendenti da ciò che gli esseri umani conoscono e da quali esperimenti scelgono di effettuare. I realisti credono anche che in linea di principio non vi siano ostacoli che impediscono di acquisire una conoscenza completa di questo mondo.

Regola o L'equazione dinamica fondamentale della gravità quantistica, che esprime l'assenza di un tempo universale. È chiamata anche equazione di Wheeler

DeWitt.

Regola 1 L'equazione dinamica fondamentale della meccanica quantistica che descrive come si evolve lo stato quantistico rispetto al tempo misurato da orologi situati al di fuori del sistema quantistico. È chiamata anche equazione di Schrödinger. La Regola 1 spiega che, dato lo stato quantistico di un sistema isolato in un dato istante, esiste una legge capace di prevedere lo stato quantistico preciso di quel sistema in qualunque altro istante.

Regola 2 La legge che prescrive il modo in cui uno stato quantistico reagisce a una misurazione, cioè con l'immediato collasso in uno stato in cui la grandezza misurata ha un valore preciso, il valore prodotto dalla misurazione. La Regola 2 spiega che il risultato di una misurazione può essere previsto solo probabilisticamente. Successivamente, però, la misurazione modifica lo stato quantistico del sistema misurato, che viene portato nello stato corrispondente al risultato della misurazione. Questo è il cosiddetto collasso della funzione d'onda.

Relatività, teoria generale della La teoria della gravitazione di Einstein (1915), in cui la forza gravitazionale è sostituita dalla dinamica della geometria dello spaziotempo.

Relatività, teoria ristretta della La teoria del movimento e della luce in assenza di gravità di Einstein (1905).

Relazionalismo La concezione filosofica secondo cui tutte le proprietà degli oggetti o eventi elementari emergono da interazioni tra coppie o insiemi più numerosi di tali oggetti o eventi e quindi misurano proprietà condivise.

Rete di spin Un grafo i cui spigoli sono etichettati da numeri che rappresentano spin. Nella gravità quantistica a loop ciascuno stato quantistico della geometria dello spazio è rappresentato da una rete di spin.

Retrocausalità Negli ipotetici processi retrocausali, l'ordine delle cause procede all'indietro rispetto alla direzione globale del tempo.

Seconda legge della termodinamica La legge che afferma che l'entropia di un sistema isolato molto probabilmente aumenterà.

Simmetria Un'operazione grazie alla quale un sistema fisico può essere trasformato senza modificare il fatto che il suo stato è uno stato possibile del sistema. Due stati collegati da una simmetria hanno la stessa energia.

Spin Il momento angolare di una particella elementare, che è una sua proprietà intrinseca, indipendente dal suo movimento.

Stato In qualsiasi teoria fisica, la configurazione di un sistema in uno specifico istante.

Stato contrario Vedi Stato di Einstein-Podolsky-Rosen.

Stato di Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Uno stato congiunto di due particelle che non contiene alcuna informazione sulle singole particelle, ma indica che, se si effettua una qualsiasi misurazione su entrambe, si otterranno risultati opposti. È chiamato anche stato contrario.

Stato quantistico Una descrizione completa di un singolo sistema secondo la meccanica quantistica.

Strumentalismo Un approccio alla scienza in cui il ruolo della teoria è solamente fornire una descrizione di un sistema fisico in termini delle sue risposte a forze imposte dall'esterno trasmesse dagli strumenti di misura.

Struttura causale Poiché esiste una velocità massima a cui possono essere trasmesse l'energia e l'informazione, gli eventi nella storia dell'universo possono essere organizzati in termini delle loro possibili relazioni causali. A tal fine si indica, per ogni coppia di eventi, se il primo è nel futuro causale del secondo o viceversa, o se tra loro non è possibile alcuna relazione causale poiché nessun segnale avrebbe potuto viaggiare dall'uno all'altro. Una tale descrizione completa definisce la struttura causale dell'universo.

Teorema di Bell (chiamato anche restrizione di Bell) Il teorema afferma che in un mondo che è locale, nel senso che le misurazioni effettuate su un sistema non influenzano mai le probabilità dei risultati delle misurazioni effettuate su un sistema distante, certe correlazioni tra le misurazioni sono limitate da una disuguaglianza. Questa disuguaglianza viene violata sperimentalmente.

Teorema di Kochen-Specker Un teorema che mostra che la meccanica quantistica è contestuale, il che significa che il valore di un'osservabile può dipendere dalla scelta di quali altre misurazioni vengono effettuate contemporaneamente.

Teoria degli insiemi causali Un approccio allo spaziotempo quantistico basato sull'ipotesi che la storia del mondo sia costituita da un insieme discreto di eventi fondamentali e di relazioni causali tra essi.

Teoria dei campi Una teoria fisica che descrive l'evoluzione nel tempo di uno o molti campi. Un esempio è dato dall'elettrodinamica, in cui le leggi del moto dei campi sono chiamate equazioni di Maxwell.

Teoria del collasso dinamico Una proposta secondo cui il collasso della funzione d'onda è un processo fisico reale.

Teoria delle stringhe Un approccio alla gravità quantistica basato sull'ipotesi che le entità fondamentali del mondo siano unidimensionali.

Teoria dell'onda pilota Il primo approccio realistico alla meccanica quantistica, inventato da Louis de Broglie nel 1927 e reinventato da David Bohm nel 1952. Una descri-

zione completa di un singolo sistema è data sia da un'onda sia da una particella, dove la particella è guidata dall'onda.

Teoria di de Broglie - Bohm Altra denominazione della teoria dell'onda pilota.

Teoria quantistica dei campi Una teoria quantistica di campi come quello elettrico o magnetico. Sono teorie impegnative perché devono incorporare la relatività ristretta e anche perché hanno un numero infinito di gradi di libertà.

Teoria quantistica relazionale Un'interpretazione della teoria quantistica secondo cui lo stato quantistico di una particella, o di qualsiasi sottosistema dell'universo, non è definito in termini assoluti, ma solo in un contesto creato dalla presenza di un osservatore e da una divisione dell'universo in una parte contenente l'osservatore e in una parte che contiene quel sottoinsieme dell'universo da cui l'osservatore può ricevere informazioni. La cosmologia quantistica relazionale è un approccio alla cosmologia quantistica che afferma che non esiste un unico stato quantistico dell'universo, ma esistono tanti stati quanti sono quei contesti.

Variabile nascosta Una proprietà o un grado di libertà di un sistema quantistico che non sono descritti dalla meccanica quantistica, ma sono necessari per completare la descrizione di un singolo sistema.

Velocità Il tasso di cambiamento della posizione nel tempo.

Lecture consigliate

Libri divulgativi degli inventori della meccanica quantistica.

- Bell, John Stewart, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Collected Papers on Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 2004² [trad. it. *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi, Milano 2010].
- Bohm, David, *Wholeness and the Implicate Order*, Routledge and Kegan Paul, London 1980; nuova ed. Ark/Routledge, London 2002 [trad. it. *Universo, mente, materia*, Red, Como 1996].
- Bohr, Niels, *Atomic Theory and the Description of Nature. Four Essays with an Introductory Survey*, Cambridge University Press, Cambridge 1934, 1961; nuova ed. 2011.
- *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics* (1949), in Schilpp, Paul Arthur (a cura di), *Albert Einstein. Philosopher-Scientist* («Library of Living Philosophers», n. 7), Open Court, La Salle Ill. 1988³ [trad. it. *Albert Einstein scienziato e filosofo*, Boringhieri, Torino 1958].
- *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, New York 1961; nuova ed. Dover, Mineola N.Y. 2010 [trad. it. *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, Boringhieri, Torino 1961].
- Einstein, Albert, *Ideas and Opinions* (1954), Broadway Books, New York 1995 [trad. it. *Idee e opinioni*, Newton & Compton, Roma 2015].
- *Autobiographical Notes*, Centennial ed., Open Court, La Salle Ill. 1999 [trad. it. *Autobiografia scientifica*, Bollati Boringhieri, Torino 2014].
- Heisenberg, Werner, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, S. Hirzel, Leipzig 1930 [trad. it. *I principi fisici della teoria dei quanti*, Bollati Boringhieri, Torino 2016].

– *Philosophical Problems of Quantum Physics*, Ox Bow Press, Woodbridge Conn. 1979².

Schrödinger, Erwin, *What Is Life? With Mind and Matter and Autobiographical Sketches*, Canto - Cambridge University Press, Cambridge 1992 [trad. it. *Che cos'è la vita? La cellula vivente dal punto di vista fisico*, Adelphi, Milano 2010].

Libri di autori contemporanei.

Barbour, Julian, *The End of Time. The Next Revolution in Our Understanding of the Universe*, Oxford University Press, New York 1999 [trad. it. *La fine del tempo. La rivoluzione fisica prossima ventura*, Einaudi, Torino 2015].

Carroll, Sean, *The Big Picture. On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*, Dutton, New York 2016.

Deutsch, David, *The Fabric of Reality. The Science of Parallel Universes - and Its Implications*, Penguin Press, New York 1997 [trad. it. *La trama della realtà*, Einaudi, Torino 1997].

– *The Beginning of Infinity. Explanations that Transform the World*, Viking, New York 2011 [trad. it. *L'inizio dell'infinito. Spiegazioni che trasformano il mondo*, Einaudi, Torino 2013].

Greene, Brian, *The Hidden Reality. Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*, Alfred A. Knopf, New York 2011 [trad. it. *La realtà nascosta. Universi paralleli e leggi profonde del cosmo*, Einaudi, Torino 2012].

Penrose, Roger, *The Emperor's New Mind. Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics* (1989), nuova ed. con una nuova prefazione dell'autore, Oxford University Press, Oxford - New York 1999 [trad. it. *La mente nuova dell'imperatore*, Rizzoli, Milano 1992].

– *Shadows of the Mind. A Search for the Missing Science of Consciousness*, Oxford University Press, Oxford - New York 1994 [trad. it. *Ombre della mente*, Rizzoli, Milano 1996].

Rovelli, Carlo, *La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose*, Raffaello Cortina, Milano 2014.

– *Sette brevi lezioni di fisica*, Adelphi, Milano 2014.

– *L'ordine del tempo*, Adelphi, Milano 2017.

Tegmark, Max, *Our Mathematical Universe. My Quest for the Ultimate Nature of Reality*, Alfred A. Knopf, New York 2014 [trad. it. *L'universo matematico. La ricerca della natura ultima della realtà*, Bollati Boringhieri, Torino 2014].

Biografie di figure chiave.

Byrne, Peter, *The Many Worlds of Hugh Everett III. Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family*, Oxford University Press, Oxford - New York 2010.

Farmelo, Graham, *The Strangest Man. The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom*, Basic Books, New York 2009 [trad. it. *Luomo piú strano del mondo. Vita segreta di Paul Dirac, il genio dei quanti*, Raffaello Cortina, Milano 2013].

Gribbin, John, *Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution*, John Wiley and Sons, Hoboken N.J. 2013 [trad. it. *Erwin Schrödinger. La vita, gli amori e la rivoluzione quantistica*, Dedalo, Bari 2013].

Hoffmann, Banesh, con la collaborazione di Helen Dukas, *Albert Einstein. Creator and Rebel*, Viking Press, New York 1973 [trad. it. *Albert Einstein, il lato umano. Nuovi spunti per un ritratto*, Einaudi, Torino 1980].

Klein, Martin Jesse, *Paul Ehrenfest*, vol. I, *The Making of a Theoretical Physicist*, American Elsevier, New York 1970.

Overbye, Dennis, *Einstein in Love. A Scientific Romance*, Penguin, New York 2000 [trad. it. *Einstein innamorato. La vita di un genio tra scoperte scientifiche e passione romantica*, Bompiani, Milano 2002].

Pais, Abraham, *Subtle is the Lord. The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford - New York 1982; nuova ed. con una nuova prefazione di Roger Penrose, 2005 [trad. it. *Sottile è il Signore*, La Biblioteca di Repubblica, Roma 2006].

– *Niels Bohr's Times. In Physics, Philosophy, and Polity*, Clarendon Press - Oxford University Press, Oxford - New York 1991.

Peat, David, *Infinite Potential. The Life and Times of David Bohm*, Addison-Wesley, Reading Mass. 1997.

Storie della fisica quantistica.

- Bacciagaluppi, Guido, e Valentini, Antony, *Quantum Theory at the Crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge University Press, Cambridge - New York 2009.
- Baggott, Jim, *Beyond Measure. Modern Physics, Philosophy, and the Meaning of Quantum Theory*, Oxford University Press, Oxford - New York 2004.
- *The Quantum Story. A History in 40 Moments*, Oxford University Press, Oxford - New York 2011.
- Forman, Paul, *Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918-1927. Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment*, in *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. III (1971), pp. 1-115. Forman ha sviluppato il suo argomento originario in *Kausalität, Anschaulichkeit, und Individualität, or How Cultural Values Prescribed the Character and the Lessons Ascribed to Quantum Mechanics*, in Stehr, Nico, e Meja, Volker (a cura di), *Society and Knowledge. Contemporary Perspectives in the Sociology of Knowledge and Science*, Transaction Books, New Brunswick N.J. 1984, pp. 333-47.
- Gefer, Amanda, *Trespassing on Einstein's Lawn. A Father, a Daughter, the Meaning of Nothing, and the Beginning of Everything*, Bantam Books, New York 2014 [trad. it. *Due intrusi nel mondo di Einstein. Un padre, sua figlia, il significato del nulla e l'inizio di tutto*, Raffaello Cortina, Milano 2015].
- Gilder, Louisa, *The Age of Entanglement. When Quantum Physics Was Reborn*, Alfred A. Knopf, New York 2008.
- Gribbin, John, *In Search of Schrödinger's Cat. Quantum Physics and Reality*, Bantam Books, New York 1984.
- Jammer, Max, *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, John Wiley and Sons, New York 1974.
- Kaiser, David, *How the Hippies Saved Physics. Science, Counterculture, and the Quantum Revival*, W. W. Norton, New York 2011 [trad. it. *Come gli hippie hanno salvato la fisica*, Castelvechi, Roma 2012].
- Kragh, Helge, *Quantum Generations. A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton University Press, Princeton 1999, 2002.
- Kuhn, Thomas Samuel, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, University of Chicago Press, Chicago 1987 [trad. it. *Alle origi-*

ni della fisica contemporanea. La teoria del corpo nero e la discontinuità quantica, il Mulino, Bologna 1981].

Stone, A. Douglas, *Einstein and the Quantum. The Quest of the Valiant Swabian*, Princeton University Press, Princeton 2013.

Raccolte di articoli.

DeWitt, Bryce Seligman, e Graham, Neill (a cura di), *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton Series in Physics, Princeton University Press, Princeton 1973; nuova ed. Princeton Legacy Library, 2015.

Saunders, Simon, Barrett, Jonathan, Kent, Adrian e Wallace, David (a cura di), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*, Oxford University Press, Oxford 2010.

Ringraziamenti.

Questo libro rappresenta una vita passata a combattere con gli enigmi dei fondamenti quantistici e, prima di tutti, devo ringraziare Herbert Bernstein, per il suo rivoluzionario corso di meccanica quantistica del primo anno, per avermi nominato *grader* del corso con l'obiettivo di accertarsi che avessi imparato a risolvere i problemi e per i molti anni di amicizia a partire da allora. Negli anni del dottorato ebbi la fortuna di poter studiare con Abner Shimony, che è stato un modello per tutti noi che desideravamo portare il rigore e la profondità della filosofia nell'esame dei problemi fondazionali della fisica. Per questo devo ringraziare Hilary Putnam, che mi disse che Abner sarebbe stato in grado di rispondere alle mie domande sulla teoria quantistica a cui lui non sapeva rispondere.

Durante il dottorato e negli anni successivi ho avuto la fortuna di conoscere e conversare con alcuni dei pensatori davvero profondi che ancora oggi ci ispirano: Steve Adler, Yakir Aharonov, Bryce DeWitt, Cécile DeWitt-Morette, Freeman Dyson, Paul Feyerabend, Richard Feynman, Jim Hartle, Gerard 't Hooft, Chris Isham, Edward Nelson, Roger Penrose, Leonard Susskind, John Archibald Wheeler ed Eugene Wigner.

Poco dopo aver conseguito il dottorato, incontrai Julian Barbour, che mi fece conoscere Leibniz e Mach ed è stato da allora il mio mentore e la mia guida alla filosofia relazionale. La mia formazione filosofica è continuata grazie a conversazioni con David Albert, Harvey Brown, Jim Brown, Jeremy Butterfield, Jenann Ismael, Steve Weinstein e molti altri. Henrique Gomes, Simon Saunders, Roderich Tumulka, Antony Valentini e David Wallace mi sono stati particolarmente utili leggendo e commentando le bozze e spiegandomi con grande pazienza ciò che non avevo capito. La responsabilità degli errori ancora presenti, comunque, è mia.

Desidero inoltre ringraziare tutti coloro che sono diventati miei amici grazie al lavoro comune su problemi fondazionali: Stephon Alexander, Giovanni Amelino-Camelia, Abhay Ashtekar, Eli Cohen, Marina Cortês, Louis Crane, John Dell, Avshalom Elitzur, Laurent Freidel, Ted Jacobson, Stuart Kauffman, Jurek Kowalski-Glikman, Andrew Liddle, Renate Loll, João Magueijo, Roberto Mangabeira Unger, Fotini Markopoulou e Carlo Rovelli.

Il libro è stato migliorato in grande misura dalle reazioni e osservazioni di Krista Blake, Saint Clair Cemin, Dina Graser, Jaron Lanier e Donna Moylan. Ringrazio an-

che Kaća Bradonjić per le illustrazioni e per i numerosi suggerimenti saggi e utili riguardo al testo.

Per le utili comunicazioni e conversazioni su argomenti specifici, devo ringraziare Jim Baggott, Julian Barbour, Freeman Dyson, Olival Freire, Stuart Kauffman, Michael Nielsen, Philip Pearle, Bill Poirier, Carlo Rovelli e John Stachel. Alexander Blum e Jürgen Renn mi hanno aiutato a narrare una storia vera dello sviluppo della meccanica quantistica.

Sono estremamente grato di fare parte di una vivace comunità concentrata sulla fisica fondamentale al Perimeter Institute for Theoretical Physics, il che mi dà una sede e un contesto per il mio lavoro. Oltre alle persone che ho già citato, nel corso degli anni ho imparato moltissimo da Gemma De las Cuevas, Bianca Dittrich, Fay Dowker, Chris Fuchs, Lucien Hardy, Adrian Kent, Rafael Sorkin, Rob Spekkens e molti altri. Desidero ringraziare Mike Lazaridis, Howard Burton e Neil Turok per avermi fatto partecipare a questa avventura straordinaria ed esprimere la mia gratitudine a Michael Duschenes e a tutto il personale del Perimeter Institute per il loro lavoro intelligente e coscienzioso.

Sono grato a diverse classi di studenti, a partire da quella del corso «Nature Loves to Hide» all'Hampshire College, che hanno seguito varie versioni di un corso di fisica quantistica per poeti, durante il quale ho saggiato le strategie pedagogiche che uso in questo libro. Più recentemente, Camilla Singh ha acconsentito a fare da cavia in un esperimento di insegnamento della meccanica quantistica agli artisti.

John Brockman, Katinka Matson e Max Brockman sono stati miei agenti letterari e amici nei molti anni in cui ho scritto libri. Scott Moyers, Christopher Richards e Thomas Penn sono stati ottimi editor e sono loro particolarmente grato per aver insistito sulla mia possibilità di scrivere un libro migliore di quanto pensassi. Sono orgoglioso di essere uno dei molti scrittori che hanno beneficiato dell'occhio critico di Louise Dennys.

Infine, devo tutto a Dina Graser e Kai Smolin, che mi hanno sostenuto durante gli alti e i bassi di questo progetto.

Indice analitico

accademici umanisti.
accelerazione.
acqua.
adesso, concetto di.
adiacente possibile.
Aharonov, Yakir.
amico di Wigner.
ampiezza.
antirealismo:
 definizione di;
 di Bohr;
 elettroni e;
 fisica e;
 meccanica quantistica e;
 natura e.
approccio delle storie coerenti.
approssimazioni.
Arcadia (Stoppard).
Aspect, Alain.
assunti.
astronomia.
atomi:
 acqua e;
 comportamento degli;
 comunicazione tra;
 copie di;
 decadimento degli;
 definizione di;
 densità degli;
 elettroni e;
 energia e;
 ensemble di;

entanglement di;
fotoni e;
gravità e;
leggi degli;
libertà e;
localizzazione degli;
luce e;
materia e;
meccanica quantistica e;
misurazione degli;
molecole e;
nucleo degli;
osservabili degli;
proprietà chimiche degli;
proprietà degli;
punto di vista di Bohr sugli;
punto di vista di Heisenberg sugli;
radiazione e;
realismo e;
retrocausalità;
sistema solare e;
sovrapposizione di;
spazio delle configurazioni degli;
spaziotempo;
spettro degli;
stati degli;
stati quantistici degli;
stati stazionari degli;
teletrasporto quantistico;
teoria dell'onda pilota e;
vera teoria degli.
atomi di idrogeno.
attrezzature sperimentali, elettroni e.
autoreferenzialità.

background:
definizione di;
dipendenza dal;
principio di indipendenza, spaziotempo e;
simmetria e.
Barbour, Julian.

Bateson, Gregory.

bayesianismo quantistico.

Bell, John:

teorema di;

variabili nascoste e.

Bernstein, Herbert.

Big Bang.

biochimica.

biologia, meccanica quantistica e.

Bohm, David:

Bohr e;

comunismo e;

Einstein e;

equazione guida e;

Oppenheimer e;

Princeton e;

processo di misurazione;

teoria dell'onda pilota e;

teoria di;

von Neumann e.

Bohr, Niels:

antirealismo di;

Bohm e;

come leader e ispiratore;

complementarità e;

divisione;

Einstein e;

elettroni e π , EPR e;

famiglia e ambiente di;

Heisenberg e;

istruzione di;

punto di vista sugli atomi;

teoria dell'onda pilota e;

teorie quantistiche e.

Boltzmann, Ludwig.

bomba all'idrogeno.

bomba atomica.

Born, Max.

Brogie, Louis-Victor Pierre Raymond de:

dualismo onda-particella e;

Einstein e;

Schrödinger e;
studenti di;
teoria dell'onda pilota di;
tesi di dottorato di.
Broglie, Maurice de.
Bub, Jeffrey.
buchi neri.
buchi neri quantistici.

Cabala.
cambiamento climatico.
campi magnetici.
campo.
campo elettrico.
campo elettromagnetico.
casualità.
causalità.
Chruščëv, Nikita.
cicli.
circuiti causali.
codici.
collassi spontanei.
collasso; *vedi anche* collasso della funzione d'onda:
della funzione d'onda;
gravità e;
modelli, al di là del;
relatività ristretta e.
collasso della funzione d'onda:
definizione di;
inconvenienti del;
insegnamenti del;
problema della misurazione e;
rami fantasma e;
Regola 2 e.
collegamenti causali.
collisioni.
Commissione per le attività antiamericane.
commutatività.
complementarità:
Bohr e;
coerenza della;

definizione di;
principio di incertezza e;
teoria dell'onda pilota e.
computazione, definizione di.
computer.
computer quantistici.
computer quantistico universale.
comunicazione.
comunismo.
comunità accademica.
confini e divisioni.
congresso Solvay.
conoscenza.
conservazione della quantità di moto.
contatore Geiger.
contestualità.
Contro il metodo (Feyerabend).
copie ciclostilate.
Cortês, Marina.
coscienza.
cosmologia.
cosmologia quantistica.
costante di Planck.
Crane, Louis.
credenze.
cunicoli spaziotemporali.

Dalibard, Jean.

Davisson, Clinton.

Debye, Peter.

decadimento.

decoerenza:

casualità e;

definizione di;

dualismo onda-particella e;

gatto di Schrödinger e;

interpretazione a molti mondi;

misurazione e;

osservazione e;

problema della divisione e;

realismo e;

Regola 1 e;
rivelatori e;
storie e;
teoria quantistica e.

densità.

determinismo.

Deutsch, David.

deviazione standard.

DeWitt, Bryce.

difetti di località.

diffrazione.

dimensioni.

dimensioni arrotondate.

Dio.

Dirac, Paul.

discretezza.

distinzione.

divisione:
Bohr e;
problema della;
processo di -, nell'interpretazione a molti mondi.

dualismo onda-particella:
de Broglie, L., e;
decoerenza e;
definizione del;
Einstein e;
elettroni e;
esperimento delle due fenditure e;
luce e;
problema della misurazione e;
realismo e;
Schrödinger e;
teoria dell'onda pilota e.

effetto fotoelettrico.

Einstein, Albert; *vedi anche* stato di Einstein-Podolsky-Rosen:
a proposito della realtà;
articoli di;
Bohm e;
Bohr e;
de Broglie, L., e;

dualismo onda-particella e;
lettera a Born;
località e;
luce e;
Maxwell e;
meccanica quantistica e;
note autobiografiche di;
premio Nobel di;
realismo e;
relatività, teoria della;
relatività generale e;
relatività ristretta e;
rivoluzione quantistica di;
spaziotempo e;
stati contrari e;
teoria dell'onda pilota e;
teorie quantistiche di.
elettricità.
elettromagnetismo.
elettroni:
antirealismo e;
atomi e;
attrezzature sperimentali e;
Bohr e;
come onde;
come particelle;
definire gli;
diffrazione e;
di materia;
dualismo onda-particella e;
fotoni e;
meccanica quantistica e;
orbite degli;
percezione degli;
posizione degli;
proprietà chimiche degli;
proprietà degli;
punto di vista di Heisenberg sugli;
quantità di moto degli;
sovrapposizione di;
stati degli;

teoria dell'onda pilota.
Elsasser, Walter.
energia:
 atomi e;
 definizione di;
 della luce;
 fotoni e;
 frequenza e;
 informazione e;
 insiemi causali e;
 legge di conservazione dell';
 posizione e;
 quantità di moto e;
 relatività ristretta e;
 relazioni causali e;
 spettro di.
energia di Planck.
ensemble di atomi.
ensemble di sistemi simili.
entanglement:
 computer quantistico e;
 definizione di;
 di atomi;
 di fotoni;
 località e;
 nei sistemi quantistici;
 non locale;
 particelle elementari e;
 per la crittografia;
 principio di Mach e;
 reti di spin e;
 retrocausalità e;
 sovrapposizione e;
 spazio e;
 spaziotempo e;
 tecnologia;
 teoria dell'onda pilota e.
entanglement non locale.
entropia.
epistemologia.
epistemologi quantistici.

Epperson, Michael.
EPR, *vedi* stato di Einstein-Podolsky-Rosen.
equazione di Wheeler-DeWitt.
equazione guida.
equilibrio quantistico.
errori.
esperimento delle due fenditure.
esseribili.
Euclide.
eventi.
Everett, Hugh:
 dimostrazioni di;
 ipotesi di;
 meccanica quantistica di;
 particelle e;
 problemi etici sollevati da;
 realtà e;
 Regola 2 e;
 teoria dell'onda pilota e.
evoluzione.

fame.
fantasia, realtà e.
fatti.
fatti reali, possibilità e.
fenomeni quantistici.
Feyerabend, Paul.
Feynman, Richard.
filosofia.
Finkelstein, David.
fisica:
 antirealismo e;
 assunti sulla località e;
 dipartimenti, fondamenti quantistici e;
 filosofia e;
 informazione e;
 località e;
 nell'universo primordiale;
 obiettivo della;
 Penrose e;
 punto di vista di Heisenberg sulla;

realtà e.
fisica classica.
fisica dei neutrini.
fisica del plasma.
fisica fondamentale, *vedi* principi per la fisica fondamentale.
fisica newtoniana.
fisica nucleare.
fisica quantistica.
fisica sperimentale.
fondamenti quantistici.
Forman, Paul.
formulazione basata su ensemble reali.
fortuna, scienza e.
forza.
forza quantistica.
fotoni:
 atomi e;
 come onde;
 come particelle;
 definizione dei;
 elettroni e;
 energia e;
 entanglement di;
 località e;
 polarizzazione di;
 relatività ristretta e γ , misurazioni spettrografiche di;
 sovrapposizione di;
 stati contrari di;
 stati correlati e.
frequenza:
 delle onde;
 energia e;
 luce e;
 probabilità;
 risonante;
 stati quantistici e.
Fuchs, Chris.
fullereni sferici.
funzione d'onda:
 collassi spontanei e;
 definizione di;

esseribili e;
fasi della n;
informazione;
particelle e;
probabilità e;
quadrato della;
Regola I e;
sistemi atomici;
sovrapposizione e;
spaziotempo e;
teoria dell'onda pilota e;
teoria della relatività e;
universo e.
futuro:
causale;
prevedere il.

Gambini, Rodolfo.
gas, proprietà dei.
geometria.
geometria dello spaziotempo relazionale, relatività ristretta e.
geometrie alternative.
Germer, Lester.
Ghirardi, Rimini e Weber (GRW).
Gomes, Henrique.
grado di libertà.
Grangier, Philippe.
gravità.
gravità quantistica:
a loop;
definizione di;
nodi e;
reti e;
sfide per la.
gravità quantistica a loop.
Gross, David.
GRW, *vedi* Ghirardi, Rimini e Weber.
guerra nucleare.
Gurdjieff, Georges Ivanovič.
Hardy, Lucien.

Heisenberg, Werner.

Hermann, Grete.

illusione, tempo come.

indagine sperimentale.

indeterminismo.

inerzia.

informatica, fisica quantistica e.

informazione:

come comunicazione;

computer e;

contesto dell';

definizione di;

energia e;

entropia;

fisica e;

flusso di;

funzione d'onda e -, strumentalismo;

linguaggio e;

misurazione dell';

particelle;

semantica e;

significato dell';

spaziotempo e;

struttura causale e;

teoria quantistica relazionale e;

universo e;

velocità della luce e.

insiemi causali.

interazioni fisiche.

interazioni non locali.

interferenza.

interpretazione a molti mondi:

decoerenza;

definizione dell';

Deutsch e;

misurazione e;

moralità e;

multiverso e;

probabilità e;

problemi della;

processo di divisione nell';
realismo e;
risultati di esperimenti nell';
stati quantistici e;
teoria dei molti mondi interagenti;
teoria dell'onda pilota e.
interpretazione di Copenaghen.
interpretazione di Oxford della meccanica quantistica.
interpretazione transazionale.
intorni.
ipotesi olografica.
irrazionalità.
irreversibilità.

Jacobson, Ted.
Jordan, Pascual.

Károlyházy, Frigyes.
Kastner, Ruth.
Kauffman, Stuart.
Kochen, Simon.
Krishnamurti.
Kuhn, Thomas.

Lakatos, Imre.
La monadologia (Leibniz).
lavorare nell'ambito di un modello esistente.
legge di Schrödinger-Newton.
legge unitaria.
leggi, *vedi anche* Regola 0; Regola 1; Regola 2; termodinamica:
 applicazione delle – ai sistemi fisici;
 degli atomi;
 dei precedenti;
 della fisica;
 della natura;
 delle particelle fondamentali;
 del terzo escluso;
 di conservazione dell'energia;
 probabilità e.
leggi atomiche.
leggi di Newton.

leggi fondamentali.

leggi matematiche.

Leibniz, Gottfried Wilhelm von.

Lewis, David.

libertà, atomi e.

linguaggio, informazione e.

località:

assunti sulla fisica e;

come proprietà emergente;

definizione di;

dei sistemi fisici;

difetti della;

disordinata;

Einstein e;

entanglement e;

fisica e;

fotoni e;

meccanica quantistica e;

natura e;

spazio e.

località disordinata.

localizzazione spontanea continua.

luce; *vedi anche* fotoni:

atomi e;

colore della;

dualismo onda-particella e;

Einstein e;

energia della;

esperimento delle due fenditure;

figura di interferenza della;

frequenza e;

natura della;

natura ondulatoria della;

natura particellare della;

Newton e;

proprietà della;

realismo e;

viaggia in linea retta.

lunghezza di Planck.

lunghezza d'onda.

macchina di Turing.

magnetismo.

Markopoulou, Fotini.

massa.

massa di Planck.

matematica.

materia:

- atomi e;

- come onde;

- comportamento della;

- definire la;

- elettroni di;

- forme di.

matrice.

Maxwell, James Clerk.

meccanica bohmiiana, *vedi* teoria dell'onda pilota.

meccanica classica.

meccanica newtoniana.

meccanica ondulatoria.

meccanica quantistica:

- antirealismo e;

- atomi e;

- biologia e;

- collassi spontanei e;

- completamento della;

- computer quantistico e;

- confutazione della;

- definizione di;

- determinismo e;

- di Everett;

- discussione sulla;

- Einstein e;

- elementi fondamentali della;

- elettroni e;

- enigmi della;

- fisica quantistica e;

- forma matriciale della;

- formulazione basata su ensemble reali della;

- incompletezza della;

- interpretazione di Oxford della;

- località e;

meccanica classica e;
misteri della;
misurazione e;
natura e;
origine della;
periodo di gestazione della;
polarizzazione e;
previsioni della;
principio essenziale della;
probabilità nella;
problemi concettuali della;
proprietà spiegate dalla;
realismo e;
realtà e;
restrizione e;
retrocausalità e;
rifiuto della;
sovrapposizione e;
spaziotempo e;
storia della;
struttura della;
struttura matematica della;
successo della;
tempo e;
teoria causale delle visioni e;
teoria dell'onda pilota e;
tradizionale;
universo.

meccanica quantistica stocastica.
medie.
mentalità scientifica.
Mermin, David.
metafisica.
metodo scientifico.
Minkowski, Hermann.
miracoli.
misticismo.
misurazione:
 casualità nella;
 contestualità e;
 decoerenza e;

della quantità di moto;
dell'informazione;
di atomi;
di particelle;
dispositivi di;
EPR e;
interpretazione a molti mondi e;
meccanica quantistica e;
non località e;
posizione e;
probabilità e;
processo di;
realismo e;
realtà e;
Regola 1 e;
Regola 2 e;
sovrapposizione e;
stati correlati e;
stati quantistici e;
strumenti di;
teoria quantistica e.
misurazioni spettrografiche di fotoni.
modelli.
modelli di collasso fisico.
modello relazionale dell'universo.
modello standard della fisica delle particelle.
molecole.
momenti.
momento angolare.
mondi classici.
moralità.
moto.
moto browniano delle molecole.
moto circolare.
Moussouris, John.
multiverso.

nadi.
Nash, John.
natura:
antirealismo e;

caratteristiche della;
come computer;
comportamento della;
comprensione della;
conoscenza della;
contestualità della;
località e;
meccanica quantistica e;
metafisica e;
oggettività e;
proprietà della;
rapporto con la;
realismo e;
religione e;
scienza e;
stati quantistici e;
tempo e.

natura duale della realtà.

Nelson, Edward.

Newton, Isaac.

Noether, Emmy.

non località:

come proprietà emergente;
definizione di;
emergere della;
misurazione e;
particelle e;
relatività ristretta e;
retrocausalità e;
velocità della luce e.

nucleo.

nuova legge evolutiva.

oggetti.

oggetti macroscopici.

oggettività.

onde:

altezza delle;
elettroni come;
fotoni come;
frequenza delle;

luce come;
materia come;
nel campo elettrico;
particelle e;
somma di.
onde sonore.
ontologia.
operazionalismo.
operazionalisti.
Oppenheimer, Julius Robert.
osservabili.
osservatore.
osservazione.

parità.
partecipazione, osservazione e.
particelle; *vedi anche* dualismo onda-particella; onde:
combinazioni di;
comportamento delle;
determinismo e;
elettroni come;
entanglement e;
equazione guida e;
Everett e;
fondamentali, leggi delle;
fotoni come;
funzione d'onda e;
influenze non locali sulle;
informazione;
meccanica newtoniana e;
misurazione di;
moto di;
natura particellare della luce;
non località e;
onde e;
posizione delle;
probabilità e;
quantità di moto delle;
sistemi fisici e;
sovrapposizione di;
teoria dei molti mondi interagenti;

teoria dell'onda pilota e;
traiettoria delle;
velocità delle.

Partito comunista degli Stati Uniti.

passato.

passato causale.

Pauli, Wolfgang.

Pearle, Philip.

Penrose, Roger.

percezione.

Peres, Asher.

perfezione.

pianeti.

Planck, Max.

Podolsky, Boris; *vedi anche* stato di Einstein-Podolsky-Rosen.

Poincaré, *vedi* teorema di ricorrenza di Poincaré.

polarizzazione.

ponte di Einstein-Rosen.

Popper, Karl.

posizione:

- degli elettroni;
- delle particelle;
- determinata;
- energia e;
- indefinita;
- misurazione e;
- principio di incertezza e;
- probabilità e;
- quantità di moto e.

possibilità, *vedi* fatti reali, possibilità e.

precedenza.

preparazione.

presente.

pressione.

prima guerra mondiale.

prima legge del moto.

principio del sottosistema.

principio di completezza causale.

principio di esclusione.

principio di identità degli indiscernibili.

principio di incertezza.

principio di località relativa.
principio di Mach.
principio di non commutatività.
principio di precedenza.
principio di ragion sufficiente.
principio di sovrapposizione.
principio olografico.
principio principale.
principi per la fisica fondamentale.

probabilità:

- ampiezza e;
- bayesiane;
- credenze e;
- Deutsch e;
- frequenza;
- funzione d'onda e;
- funzione di distribuzione;
- interpretazione a molti mondi e;
- leggi e;
- misurazione e;
- nella meccanica quantistica;
- nella teoria dell'onda pilota;
- oggettività e;
- particelle e;
- posizione e;
- principio principale;
- propensione;
- realismo e;
- Regola 2 e;
- regola di Born e;
- risultati e;
- significato delle;
- soggettive;
- stati quantistici e;
- storie e.

probabilità bayesiane.

probabilità soggettive.

problema della misurazione:

- collasso della funzione d'onda e;
- dualismo onda-particella e;
- stati quantistici e;

teoria del collasso e;
teoria dell'onda pilota e.
problema inverso.
problemi etici sollevati da Everett.
propensione.
proteine.
Pullin, Jorge.

quanti.
quantità di moto:
collisioni e;
conservazione della;
definizione della;
di elettroni;
di particelle;
energia e;
lunghezza d'onda e;
misurazione della;
momento angolare;
posizione e;
principio di incertezza e;
relatività ristretta e;
scambio di;
simmetria e;
tempo e;
velocità e.
quantizzazione.
qubit.

radiazione.
radiazione cosmica di fondo.
radiazione del corpo nero.
radiazione elettromagnetica.
raggi X.
rami fantasma:
collasso della funzione d'onda e;
della teoria dell'onda pilota.
rapidità.
razionalità.
realismo; *vedi anche* antirealismo; realismo critico:
abbandono del;

atomi e;
credenze e;
decoerenza e;
definizione del;
dualismo onda-particella e;
Einstein e;
fallimento del;
fisica quantistica e;
Heisenberg e;
ingenuo;
interpretazione a molti mondi e;
luce e;
meccanica quantistica e;
misurazione e;
molti momenti e;
mondo naturale e;
oggettività e;
ontologia e;
operazionalismo e;
Penrose e;
probabilità e;
Regola 1 e;
relatività e;
relatività ristretta e;
Rovelli e;
teoria dell'onda pilota e;
teoria quantistica e.
realismo critico.
realismo ingenuo.
realismo magico.
realtà:
concezione antiquata della;
conoscenza e;
elementi della;
Everett e;
fantasia e;
fisica e;
fondamentale;
meccanica quantistica e;
misurazione e;
momenti e;

nadi e;
natura duale della;
oggettività e;
parallele;
possibilità e;
punto di vista di Einstein sulla;
sovrapposizione e;
storie e.
reciprocità.
Regola 0.
Regola 1:
 assenza della;
 decoerenza e;
 definizione della;
 funzione d'onda e;
 misurazione e;
 realismo e;
 Regola 2 e;
 regola di Born e;
 reversibilità della;
 teoria dell'informazione quantistica e;
 teoria dell'onda pilota e;
 teoria quantistica e;
 universale.
Regola 2:
 collasso della funzione d'onda e;
 definizione della;
 Everett e;
 invenzione della;
 irreversibilità della;
 misurazione e;
 probabilità e;
 Regola 1 e;
 risultati e;
 teoria dell'onda pilota e;
 teoria quantistica e.
regola di Born:
 definizione della;
 probabilità e;
 Regola 1 e;
 teoria delle decisioni e.

regola di creazione degli eventi.

relatività, teoria della:

- collassi e;
- di Einstein;
- equazione della;
- funzione d'onda e;
- spaziotempo e;
- teoria del collasso e;
- teoria dell'onda pilota e;
- velocità della luce e.

relatività generale:

- Einstein e;
- nadi e;
- non lineare;
- Penrose e;
- pianeti e;
- soluzione della;
- sovrapposizione e;
- spaziotempo e;
- teoria quantistica e.

relatività ristretta:

- collasso e;
- Einstein e;
- energia e;
- equilibrio quantistico e;
- geometria dello spaziotempo relazionale e;
- non località e;
- quantità di moto e;
- realismo e;
- teoria dell'onda pilota e.

relazionalismo.

relazionalismo eternalista.

relazionalismo temporale.

relazioni.

relazioni causali.

religione.

restrizione.

reti.

reti di spin.

retrocausalità.

reversibilità.

rivelatori, decoerenza e.

risultati:

degli esperimenti nell'interpretazione a molti mondi;

probabilità e;

Regola 2 e.

Roger, Gerard.

Rosen, Nathan; *vedi anche* stato di Einstein-Podolsky-Rosen.

Rosenfeld, Léon.

rotazioni.

Rovelli, Carlo.

rumore, teoria del collasso e.

Rutherford, Ernest.

Saunders, Simon.

scala atomica.

Schrödinger, Erwin:

de Broglie, L., e;

dualismo onda-particella e;

equazione di;

gatto di;

premio Nobel di;

retroscena dell'invenzione di.

scienza.

seconda legge della termodinamica.

semantica, informazione e.

sensazioni.

Shannon, Claude.

Shimony, Abner.

Shore, Peter.

simmetria.

simultaneità fondamentale.

sistema solare.

sistemi atomici, funzione d'onda e.

sistemi complessi.

sistemi dinamici deterministici.

sistemi fisici.

sistemi macroscopici.

sistemi quantistici.

sistemi simili.

soggettività, entropia.

Sorkin, Rafael.

sovrapposizione:

- di atomi;
- di elettroni;
- di fotoni;
- di molecole;
- di oggetti;
- di particelle;
- di sistemi quantistici;
- di stati;
- entanglement e;
- funzione d'onda e;
- gatto di Schrödinger;
- gravità e;
- meccanica quantistica e;
- misurazione e;
- quantistica;
- realtà e;
- relatività generale e;
- stati quantistici e;
- teoria dell'onda pilota e.

sovrapposizione quantistica.

spazio:

- come illusione;
- delle configurazioni;
- dimensioni dello;
- emergente;
- entanglement e;
- fondamentale;
- geometria dello;
- località e;
- relazioni nell'ambito dello;
- reti e.

spazio delle configurazioni.

spaziotempo:

- atomi;
- background e;
- causalità e;
- Einstein e;
- emergente;
- entanglement e;
- funzione d'onda e;

geometria dello;
informazione e;
meccanica quantistica e;
principio relazionale dello;
problema inverso e;
quantistico;
relatività generale e;
relazioni causali e;
sommare due spazitempo;
teoria della relatività e.
spaziotempo quantistico.
Specker, Ernst.
spettro.
spin.
stati; *vedi anche* stati quantistici:
classici;
contrari;
correlati;
definizione di;
di atomi;
di elettroni;
sovrapporre.
stati contrari.
stati correlati.
stati quantistici:
definizione di;
di atomi;
frequenza e;
funzione d'onda;
interpretazione a molti mondi e;
natura e;
non lineari;
operazionalismo e;
probabilità e;
problema della misurazione e;
somma di;
sovrapposizione e;
sovrapposti;
tempo e;
universo e.
stati stazionari.

stato classico.
stato di Einstein-Podolsky-Rosen (EPR).
stelle.
Stoppard, Tom.
storie.
strumentalismo.
struttura causale.
superdeterminismo.

tecniche sperimentali.
tecnologia, entanglement.
teletrasporto quantistico.
temperatura.

tempo:

- capsule;
- causalità e;
- come illusione;
- emergente;
- eventi e;
- gravità e;
- irreversibilità del;
- leggi del;
- leggi della natura e;
- meccanica quantistica e;
- momenti e;
- natura e;
- quantità di moto e;
- retrocausalità;
- stato quantistico e.

teorema di Kochen-Specker.
teorema di ricorrenza di Poincaré.
teoria causale delle visioni.
teoria degli ensemble reali.
teoria degli insiemi causali.
teoria dei campi.
teoria dei molti momenti.
teoria dei molti mondi interagenti.
teoria dei *twistor*.
teoria del collasso:

- problema della misurazione e;
- rumore e;

teoria della relatività e;
teoria dell'onda pilota e.
teoria del collasso dinamico.
teoria della relatività, *vedi* relatività, teoria della.
teoria delle decisioni.
teoria delle stringhe.
teoria dell'informazione quantistica.
teoria dell'onda pilota:
 al di là della;
 applicazioni della;
 atomi e;
 Bohm e;
 Bohr e;
 complementarità e;
 computer quantistici e;
 definizione della;
 dualismo onda-particella e;
 Einstein e;
 entanglement e;
 equazioni della;
 Everett e;
 funzione d'onda e;
 incoerenza della;
 insegnamenti della;
 interpretazione a molti mondi e;
 meccanica quantistica e;
 obiettivo di ricerca nell'ambito della;
 particelle e;
 probabilità nella;
 problema della misurazione e;
 rami fantasma della;
 realismo e;
 reciprocità e;
 Regola 1 e;
 Regola 2 e;
 relatività ristretta e;
 reversibilità della;
 sfide per la;
 sovrapposizione e;
 teoria del collasso e;
 teoria della relatività e;

teoria relativistica dei campi e;
universo e;
variabili nascoste nella.
teoria di de Broglie - Bohm, *vedi* teoria dell'onda pilota.
teoria ombra.
teoria quantistica:
Bohr e;
decoerenza e;
della cosmologia;
di Einstein;
di Penrose;
incompletezza della;
leggi naturali e;
misurazione e;
non è corretta;
realismo e;
Regola 1 e;
Regola 2 e;
relatività generale e;
restrizione e;
struttura della;
strutture di background della;
unificazione della;
universo e.
teoria quantistica relazionale.
teoria relativistica dei campi, teoria dell'onda pilota e.
teorie costruttive.
teorie di principi.
teorie fisiche.
teorie topologiche dei campi.
termodinamica.
Terra.
't Hooft, Gerard.
tirannia.
Tumulka, Roderich.

Unger, Roberto Mangabeira.
unificazione.
unificazione delle forze.
universi paralleli.
Università di Princeton.

universo:

aspetto scelto;
come insieme causale;
espansione dell';
fisica nell'universo primordiale;
funzione d'onda e;
informazione e;
meccanica quantistica;
modello relazionale dell';
nadico;
osservazione e;
specchio vivente dell';
stati quantistici e;
teoria dell';
teoria dell'onda pilota e;
teoria quantistica e;
universi paralleli.

universo primordiale.

Valentini, Antony.

variabili nascoste.

variabili nascoste relazionali.

varietà.

velocità.

velocità della luce; *vedi anche* località.

verità.

vicino, nelle reti.

Vigier, Jean-Pierre.

vita accademica.

von Neumann, John.

Weinberg, Steven.

Weyl, Hermann.

Wheeler, John Archibald.

Wigner, Eugene; *vedi anche* amico di Wigner.

Witten, Edward.

Wittgenstein, Ludwig.

Young, Thomas.

Il libro

LA FISICA QUANTISTICA È LA PUNTA DI DIAMANTE DELLA SCIENZA moderna, la base della nostra comprensione degli atomi, della radiazione e di molto altro, dalle particelle elementari alle forze fondamentali e al comportamento della materia. Da ormai un secolo, tuttavia, è anche una teoria estremamente problematica, attraversata da profondi disaccordi interni, strani paradossi e implicazioni spesso fantasiose. Che si tratti del gatto di Schrödinger, una creatura al tempo stesso viva e morta, o della credenza che il mondo non esista indipendentemente dalle nostre osservazioni, la teoria quantistica mette in dubbio i nostri assunti fondamentali sulla realtà.

Ne *La rivoluzione incompiuta di Einstein*, il fisico teorico Lee Smolin sostiene provocatoriamente che i problemi che hanno tormentato sin dall'inizio la disciplina sono irrisolvibili per la semplice ragione che la teoria è incompleta. Vi è molto altro che attende di essere scoperto. Il nostro compito – se vogliamo avere risposte semplici alle domande semplici che ci poniamo sull'universo in cui viviamo – deve essere quello di andare al di là della meccanica quantistica arrivando a una descrizione sensata del mondo su scala atomica.

In questo libro vivace e accessibile, Smolin ci guida in un viaggio tra gli elementi essenziali della fisica quantistica, come tra le storie degli esperimenti e dei protagonisti che hanno trasformato la nostra comprensione dell'universo, affrontando enigmi e dilemmi forte di una visione improntata a una buona dose di realistico buon senso.

Se vogliamo avere qualche speranza di completare la rivoluzione che Einstein iniziò quasi un secolo fa, abbiamo bisogno di una teoria che offra una descrizione completa della natura. Con questo libro, Lee Smolin ci fa avanzare di un passo verso la soluzione di una delle più grandi controversie scientifiche della nostra epoca.

«La miglior spiegazione di ciò che dev'essere ancora spiegato».

George Dyson

«Questo libro racconta cosa significhi affrontare la vita come un'inflessibile ricerca della natura della realtà. Si occupa di fisica, ma anche del periodo storico in cui viviamo. Conosciamo l'essenza di ogni cosa? Siamo solo rifinando i dettagli e consolidando i nostri poteri, o l'umanità è ancora in gran parte ignorante? Smolin inizia raccontando con scrupolo imparziale le idee recenti della fisica per poi accelerare verso una visione del futuro della disciplina. Il ragionamento conclusivo è composto di frasi il più possibile semplici, come particelle elementari. Leggetele lentamente. Colpiscono in profondità».

Jaron Lanier

«Lee Smolin ha scritto un libro eccellente e di ampia portata. L'autore ci fa avvicinare a Bohr, Bohm ed Everett e ben oltre con un'analisi magistrale, e poi allo sforzo per superare la meccanica quantistica giungendo alla gravità quantistica. *La rivoluzione incompiuta di Einstein* è davvero un ottimo libro».

Stuart Kauffman

L'autore

LEE SMOLIN è un fisico teorico che ha offerto contributi importanti alla ricerca di un'unificazione della fisica. È uno dei membri fondatori del Perimeter Institute for Theoretical Physics e docente del dipartimento di Filosofia dell'Università di Toronto. Fra i suoi libri: *La vita del cosmo* (Einaudi, 1998), *Three Roads to Quantum Gravity* (Basic Books, 2001), *L'universo senza stringhe. Fortuna di una teoria e turbamenti della scienza* (Einaudi, 2007) e *La rinascita del tempo. Dalla crisi della fisica al futuro dell'universo* (Einaudi, 2014).

Dello stesso autore

La vita del cosmo
L'universo senza stringhe
La rinascita del tempo

Titolo originale *Einstein's Unfinished Revolution.*
The Search for What Lies Beyond the Quantum

© 2019 Lee Smolin

Illustrazioni © 2019 Kaća Bradonjić

© 2020 Giulio Einaudi editore s.p.a., Torino

In copertina: artwork by Ben Denzer. Foto © Bettman / Getty Images.

Questo ebook contiene materiale protetto da copyright e non può essere copiato, riprodotto, trasferito, distribuito, noleggiato, licenziato o trasmesso in pubblico, o utilizzato in alcun altro modo ad eccezione di quanto è stato specificamente autorizzato dall'editore, ai termini e alle condizioni alle quali è stato acquistato o da quanto esplicitamente previsto dalla legge applicabile. Qualsiasi distribuzione o fruizione non autorizzata di questo testo così come l'alterazione delle informazioni elettroniche sul regime dei diritti costituisce una violazione dei diritti dell'editore e dell'autore e sarà sanzionata civilmente e penalmente secondo quanto previsto dalla Legge 633/1941 e successive modifiche.

Questo ebook non potrà in alcun modo essere oggetto di scambio, commercio, prestito, rivendita, acquisto rateale o altrimenti diffuso senza il preventivo consenso scritto dell'editore. In caso di consenso, tale ebook non potrà avere alcuna forma diversa da quella in cui l'opera è stata pubblicata e le condizioni incluse alla presente dovranno essere imposte anche al fruitore successivo.

www.einaudi.it

Ebook ISBN 9788858433157

Indice

Copertina	
Frontespizio	
Prefazione	
La rivoluzione incompiuta di Einstein	
PARTE PRIMA. Un'ortodossia dell'irreale	
I. La natura ama nascondersi	
II. I quanti	
III. Come cambiano i quanti	
IV. Stati condivisi	
V. Quel che la meccanica quantistica non spiega	
VI. Il trionfo dell'antirealismo	
PARTE SECONDA. La rinascita del realismo	
VII. La sfida del realismo: de Broglie e Einstein	
VIII. Bohm: il realismo ci riprova	
IX. Collasso fisico dello stato quantistico	
X. Realismo magico	
XI. Realismo critico	
PARTE TERZA. Al di là dei quanti	
XII. Alternative alla rivoluzione	
XIII. Lezioni	
XIV. Partire dai principî	
XV. Una teoria causale delle visioni	
Epilogo/Rivoluzioni. Nota a me stesso	
Note	
Glossario	
Lecture consigliate	
Ringraziamenti	
Indice analitico	
Il libro	
L'autore	
Dello stesso autore	
Copyright	