

PROBLEMI DI INTERPRETAZIONE E RICERCA DI PARADIGMI IN MECCANICA QUANTISTICA

di

Anton Zeilinger

Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Vienna, Austria

In questo articolo intendo occuparmi dei problemi della comprensione e dell'interpretazione della meccanica quantistica. Vorrei peraltro basarmi inizialmente su un esperto quale Feynman, il quale non molto tempo fa diceva: «Penso di poter affermare con certezza che nessuno oggi comprende la meccanica quantistica» (1) – e in questa affermazione include evidentemente anche se stesso – ovvero su Penrose, che nel libro pubblicato di recente *Quantum Concepts in Space and Time* esprimeva la sua posizione rispetto all'odierna meccanica quantistica non relativistica nel modo seguente: «La teoria ha due argomenti molto efficaci a suo favore e solo uno, di scarso rilievo, a sfavore. Innanzitutto, la teoria è sorprendentemente esatta rispetto a tutti i risultati sperimentali fino ad oggi ottenuti. In secondo luogo, ma non di minore importanza è il fatto che si tratta di una teoria di straordinaria e profonda bellezza dal punto di vista matematico. L'unica cosa, che può essere detta contro di essa, è che, presa in assoluto, non ha alcun senso!» (2).

Come mai proprio alcuni fisici, che ci hanno lasciato articoli sulla teoria dei quanti pur sempre molto significativi -- uno di questi, Feynman, ha ricevuto perfino il premio Nobel per una delle formulazioni matematiche della teoria -- scelgono tali inequivocabili e forti affermazioni, e ancora come mai la maggior parte dei fisici non sente mai parlare di tali problemi durante la propria formazione?

Per esaminare attentamente questa situazione, ci occuperemo del problema dell'interpretazione della meccanica quantistica. Notiamo innanzitutto che ci sono per lo meno due livelli di interpretazione, quello relativo al formalismo e quello relativo alla teoria fisica. Il primo livello, quello inferiore, fissa le

regole per stabilire quale elemento del formalismo corrisponda ad una determinata osservabile in una situazione sperimentale concreta. Nel caso delle scienze sperimentali, questo è un principio di assegnazione generale in gran parte non esplicito, ma spesso soltanto implicito per i fisici, nel senso di come le affermazioni della teoria debbano essere rese operative e di come dalla teoria possano essere ottenute previsioni per esperimenti o eventi futuri.

Nel caso della meccanica quantistica troviamo a questo livello inferiore l'interpretazione statistica che si ricava da Born, che vorrei chiamare *Interpretazione Statistica* in senso più rigoroso. Essa afferma che il quadrato del modulo della funzione d'onda, $x |\Psi|^2$, rappresenta la probabilità di ottenere un determinato risultato, per esempio la probabilità che l'elettrone debba trovarsi all'interno di un volume determinato. A questo livello di interpretazione regna tra i fisici il consenso pratico più completo, dal momento che, come mostra la summenzionata citazione di Penrose, le previsioni ottenute dalla teoria con l'aiuto di questa regola si accordano in modo eccellente con gli esperimenti. E' qui particolarmente impressionante anche l'ampiezza dell'uso pratico della teoria; la meccanica quantistica fornisce realmente previsioni dal settore subatomico relativo alla fisica dello stato solido fino ai problemi cosmologici. Finché ci si limiterà dunque ad impiegare la meccanica quantistica solo per rispondere alle formulazioni fisiche delle domande, non ci si imbatte mai in un problema di interpretazione, ma si troveranno con alta probabilità sempre più valide conferme della teoria.

In che cosa consiste allora il problema, dove si trovano le difficoltà? In effetti, esse compaiono proprio dove si tratta di concetti quali comprensione, significato, senso, ecc., dove poniamo domande del tipo: che cosa significa questa teoria per la nostra concezione del mondo o perfino domande sul perché, sul modo di essere dei fenomeni. Personalmente, lo giudico un problema di interpretazione del secondo livello, quindi un problema di metainterpretazione.

Come esempio interessante tratto dalla storia della fisica, vorrei citare l'articolo di Einstein sulla teoria della relatività speciale. Accadeva che quasi tutte le equazioni relativistiche, che compaiono nella pubblicazione di Einstein del 1905, erano conosciute già in precedenza, essenzialmente ad opera di Lorentz, Fitzgerald e Poincaré, ma semplicemente come tentativo di interpretare quantitativamente i dati sperimentali (nel senso più stretto) (3). Einstein, per primo, attraverso l'introduzione del suo principio di relatività, quindi del principio che le leggi fisiche devono essere uguali in tutti i sistemi inerziali, ha posto le basi concettuali dalle quali seguono le equazioni della

relatività insieme con la invariabilità della velocità della luce. Esiste quindi per la teoria della relatività un tale principio superiore, non c'è qui invece alcun problema di interpretazione né tantomeno alcuna discussione sulla interpretazione stessa (4).

Si sa per quale motivo le formule della teoria mostrano necessariamente che orologi, in sistemi di riferimento messi in moto relativamente uno rispetto all'altro, camminano con velocità differenti, e che ciò costituisce un'affermazione sulla relatività del tempo. La situazione è completamente diversa nel caso della teoria dei quanti. Qui abbiamo a che fare in senso lato con una pluralità di interpretazioni, che continuano ad essere in accordo con le previsioni sperimentali del formalismo.

Unicamente per mostrare a quali diverse implicazioni per la concezione del mondo queste interpretazioni conducano, vorrei qui riportare le tre interpretazioni più importanti.

Innanzitutto dovrebbe essere menzionata l'interpretazione della complementarità di Bohr (5), denominata spesso interpretazione di Copenhagen. In questa interpretazione di un fenomeno quantistico abbiamo a che fare con una totalità che include il sistema osservato e l'apparato di misura macroscopico. Senza specificare l'apparato di misura, è privo di significato parlare delle proprietà del sistema quantistico. E' quindi particolarmente assurdo attribuire contemporaneamente ad un sistema quantistico grandezze complementari quali posizione o impulso, in quanto gli apparati di misura necessari per la loro misura si escludono a vicenda. La funzione d'onda è soltanto il nostro modo di rappresentare quella parte della nostra conoscenza sul passato di un sistema, che è necessario per il calcolo della futura probabilità di risultati di misura specifici. Nel caso dell'esperienza della doppia fenditura, è possibile per noi calcolare la funzione d'onda, calcolare cioè tanto la probabilità che l'elettrone passi attraverso una determinata fenditura, quanto in quale punto della figura di interferenza appaia, per la qual cosa, tuttavia, l'osservazione di queste probabilità comporta dispositivi sperimentali che si escludono a vicenda. Che esista una proprietà che vada al di là della capacità di previsione della teoria, non è però in linea di principio possibile; è quindi del tutto impossibile prevedere attraverso quale fenditura passerà e in quale punto dell'immagine di interferenza apparirà un determinato elettrone.

D'altra parte, esiste anche l'interpretazione causale o insiemistica, evito qui di nuovo la denominazione spesso usata di *Interpretazione Statistica*, in quanto anche questa espressione sarà rivendicata da posizioni del tutto diverse (6). Originariamente, l'interpretazione causale viene sostenuta in-

nanzitutto da Bohm (7) e da de Broglie (8). Secondo Bohm la funzione d'onda fornisce un potenziale aggiuntivo, quello da lui chiamato potenziale quantistico, il quale – introdotto nelle equazioni di Hamilton-Jacobi della fisica classica – conduce a ben determinate traiettorie delle singole particelle. Nel caso dell'esperimento della doppia fenditura, secondo questa interpretazione, ogni particella passa di conseguenza attraverso una delle due fenditure. L'immagine d'interferenza deriva quindi dalla forma specifica del potenziale quantistico, il quale è costituito in modo tale che nei minimi d'intensità della figura d'interferenza finiscano meno tracce di particelle che nei massimi.

Questa interpretazione permette quindi – in opposizione all'interpretazione della complementarità – perfino in quei casi in cui il dispositivo sperimentale sia tale da registrare la figura d'interferenza, di parlare della traiettoria della particella. Ciò urta tuttavia contro l'incontrollabilità di principio delle condizioni iniziali, quindi con il dato di fatto che non è possibile neppure in linea di principio stabilire da quale origine una determinata particella inizia il suo moto.

Come terza interpretazione, ancora del tutto differente dalle due finora menzionate, ricordo l'interpretazione dello Stato Relativo di Everett (9), detta anche interpretazione degli universi paralleli. Secondo tale interpretazione sono stabili tutti i rami della funzione d'onda, non c'è quindi alcun collasso della funzione d'onda. Si parla qui piuttosto di una frattura dell'universo in singoli rami, per cui una parte della funzione d'onda è realizzata in ciascuno di questi rami. Questa interpretazione sostiene, di conseguenza, che anche l'osservatore esiste insieme all'universo in parecchi stati, quindi è dissociato; in questa interpretazione, il dato di fatto non chiarito è che il mio concreto, il mio essere cosciente, si sente *hic et nunc* in una condizione ben definita, quindi si trova in un determinato ramo dell'universo, nel quale è realizzato solo uno e ben determinato risultato tra i possibili del particolare processo di misura.

Questo confronto brevemente abbozzato tra le tre distinte interpretazioni (10) che, si noti ancora, conducono alle stesse previsioni sperimentali, porta a conclusioni differenti. In primo luogo, sembra che i fisici siano dotati di una fantasia molto prolifica. Quindi, sembra che sia possibile assegnare una proprietà ontologica, l'esistenza, ad una grandezza in una determinata interpretazione, cosa che in un'altra interpretazione le viene completamente negata. L'interpretazione di Bohm attribuisce ad ogni singola particella in ogni istante sia un impulso ben definito che una ben definita posizione, mentre l'interpretazione di Everett discute dell'equivalente esistenza di tutti i possibili

risultati di un processo di misura. In entrambi i casi, si tratta di posizioni che sono rifiutate dalle altre interpretazioni menzionate. In terzo luogo, sembra che ognuna delle interpretazioni lasci un elemento non chiarito. Ognuna delle interpretazioni nega la possibilità che esso provenga dalla descrizione completa del processo singolo. Così peraltro deve essere, in quanto il formalismo non fornisce informazioni di nessun genere circa il comportamento del processo singolo, e tutte e tre le interpretazioni fanno riferimento allo stesso formalismo. Esistono previsioni soltanto sull'insieme di molte misure singole, tanto sulla media quanto sulla forma stessa della distribuzione.

Questa imprevedibilità dell'evento singolo emerse naturalmente già molto presto nella corrente dello sviluppo della meccanica quantistica e fu elevata altrettanto presto a posizione di principio, cosicché sembrò che non fosse possibile né sensato, neppure in linea di principio, arrivare a una precisa e dettagliata previsione e descrizione del processo singolo.

Data l'impossibilità di principio di descrivere completamente, nel quadro della fisica dei quanti, il processo singolo in modo razionale, è evidente che ci troviamo di fronte ad un ostacolo sulla strada di una razionale, completa comprensione del mondo attraverso le scienze naturali. Secondo Jean Wahl (11), per una riflessione sulla storia dell'irrazionalismo nella filosofia sono necessarie due osservazioni metodologiche. In primo luogo, l'irrazionalismo sarebbe un concetto retrospettivo. La sua importanza, il suo significato possono essere accertati solo attraverso il contrasto relativo ad un irrazionalismo ben definito. In secondo luogo, non c'è alcuna tradizione dell'irrazionalismo, come invece esiste forse una tradizione del razionalismo. Ciò che osserviamo sarebbero irruzioni o forse addirittura eruzioni di irrazionalismo, dove irrazionalismo avrebbe il significato di rivoluzione. Sebbene questo giudizio fosse stato formulato con riguardo all'irrazionalismo nella storia della filosofia, possiamo riconoscere alcuni paralleli con il nostro caso. In primo luogo, esiste l'impossibilità di principio della descrizione del processo singolo, certo in contrasto con la posizione della fisica classica, come si manifesta chiaramente nella teoria cinetica dei gas. Qui molte complicate unità che circondano i fenomeni possono essere attribuite, almeno in linea di principio, ad una precisa, causale, dettagliata, descrizione dei costituenti individuali. In secondo luogo, non c'è in fisica, per quanto io sappia, alcuna tradizione di irrazionalismo.

In questo senso, l'irrazionalità del processo singolo è appena entrata in un'immagine complessiva del mondo dei fisici. Generalmente l'indescrivibilità del processo singolo è accettata solo come conseguenza delle regole quantistiche e come limite della descrivibilità classica del mondo. Mi sono tuttavia

note interessanti eccezioni. In primo luogo Pauli, dalla cui lettera a Markus Fierz del 13 Ottobre 1951 cito (12): «Il reale fisico non è più separabile dall'osservatore – e passa perciò attraverso le maglie della rete della fisica. Il caso singolo è *occasio* e non *causa*. Io sono incline a riconoscere in questa *occasio* – quella che comprende l'osservatore e la scelta da lui effettuata del dispositivo sperimentale – una 'revenue' dell'*anima mundi* respinta nel XVII secolo (naturalmente in 'forma trasformata'). *La donna è mobile* – anche l'*anima mundi* e l'*occasio*». Secondo Pauli, quindi, l'irrazionalità viene alla luce come caratteristica del mondo nella impossibilità di descrivere il processo singolo razionalmente. E' tuttavia degno di nota che Pauli vedesse ciò come manifestazione dello spirito del mondo. Quindi, evidentemente, egli cerca di nuovo una causa, anche se in modo molto diretto, in una più ampia concezione del mondo. Proprio perciò emerge in Pauli, a mio parere, la figura dello scienziato naturale.

Dalla complementarietà di Bohr si può rilevare un'altra posizione. Conformemente ad essa non è possibile né sensato porsi domande intorno alle proprietà di un sistema fisico. Piuttosto, tali domande sono sensate solo in rapporto ad una simultanea specificazione dell'apparato macroscopico. Anche qui esiste quindi un limite fondamentale alla conoscibilità della realtà, un limite per una completa e razionale comprensione del mondo. Questo è interpretato da Wheeler (13) in senso tale che egli designa la singola misura in meccanica quantistica come un «atto creativo elementare». In un'applicazione della riflessione di Bohr secondo cui un fenomeno quantistico fissa una totalità che è costituita dal sistema quantistico e dall'apparato di misura, egli dichiara decisamente che – in qualità di osservatori – siamo liberi di decidere in che modo porteremo a termine un fenomeno quantistico. Decidiamo noi, attraverso la scelta dell'apparato di misura, quale fenomeno può diventare realtà e quale no. Wheeler mostra ciò per il famoso caso del quasar, del quale noi vediamo due immagini a causa dell'effetto di lente gravitazionale di una galassia che si trova tra noi e il quasar. Possiamo qui decidere se il fenomeno quantistico, al quale partecipano i fotoni, sia un fenomeno d'interferenza o il passaggio del fotone sull'una o sull'altra traiettoria attorno alla galassia. In entrambi i casi, il processo singolo contiene ancora un elemento incontrollabile. Nel caso in cui scegliamo di far diventare reale la traiettoria, non abbiamo tuttavia alcuna influenza nel determinare quale dei due possibili percorsi del fotone diventerà effettivamente realtà. Wheeler designa, perciò, il singolo fenomeno quantistico come atto creativo elementare, nei cui confronti noi, in qualità di osservatori, attraverso la scelta dell'apparato di misura, possiamo

Paradigmi in meccanica quantistica

determinare quale grandezza fisica giungerà alla realizzazione nel fenomeno quantistico, sul cui valore non possiamo, tuttavia, influire. Siamo qui parte dell'universo, l'universo si crea quindi secondo Wheeler da sé, mentre attraverso di noi osserva se stesso.

Una posizione molto interessante è sostenuta da Just (14), che paragona la spontanea, discontinua ed indeterminata riduzione della funzione d'onda nel processo di misura quantomeccanico al processo del divenire cosciente, al quale corrispondono esattamente le medesime caratteristiche. Nella complementarità del processo di misura – cioè la proprietà per cui, se si determina esattamente una grandezza, un'altra ad essa complementare è indeterminata – Just vede un'analogia con i miti della creazione, i quali contengono anche una frantumazione della precedente totalità, unità, indistinguibilità in entità separate e differenziate. In lui si trova anche «l'ipotesi connessa, che durante il processo di misura della meccanica quantistica si sperimenta nel mondo esterno un processo psichico, e certo deve trattarsi proprio di quell'evento che altre culture ed epoche hanno descritto nel mito creativo».

Abbiamo posto in tal modo gradualmente al centro delle nostre difficoltà il ruolo dell'osservatore, un ruolo che è così descritto nell'analisi di Clauser e Shimony dell'attuale situazione di EPR-Bell (15): «I sistemi fisici non hanno alcuna proprietà ben definita indipendentemente dalla nostra osservazione: forse un albero che cade nella foresta non fa rumore». In questo contesto c'è stato un divario di opinioni tra Bohr, Heisenberg, Pauli e, naturalmente, Einstein: c'era evidentemente in proposito, negli anni Cinquanta, un interessante scambio di idee tra Bohr e Pauli sulla questione del cosiddetto «osservatore isolato» in meccanica quantistica (16). C'è poi ancora una citazione da una lettera di Pauli a Bohr del 15 Febbraio 1955 (17): «Mi sembra quanto mai opportuno considerare la descrizione concettuale della natura nella fisica classica, che Einstein così enfaticamente avrebbe voluto conservare, come l'ideale dell'osservatore isolato. In parole povere, secondo questo ideale, l'osservatore è apparso in maniera del tutto discreta come testimone segreto (*spectator*), mai come attore (*actor*); la natura pertanto è lasciata sola nel suo corso predeterminato degli eventi, indipendentemente dal modo in cui il fenomeno è osservato». Pauli arriva quindi nella stessa lettera a parlare della situazione in meccanica quantistica: «Poiché è qui possibile considerare gli strumenti di misura come una specie di prolungamento degli organi di senso dell'osservatore, io considero l'imprevedibile cambiamento di stato attraverso una singola osservazione – malgrado il carattere oggettivo di ogni osservazione e nonostante le leggi statistiche per osservazioni ripetute in circostanze uguali –

come una rinuncia all'idea dell'isolamento dell'osservatore dal corso degli eventi fisici esterni a lui». Aggiunse Bohr nel suo articolo *L'unità della scienza* (18): «La complementarità non significa in alcun modo un abbandono della nostra condizione di osservatore esterno, essa deve anzi essere considerata espressione logica della nostra posizione rispetto ad una descrizione oggettiva in questo ambito di esperienze. Sapere che l'interazione tra gli strumenti di misura e i sistemi fisici esaminati costituisce una parte integrante del fenomeno quantistico ha rivelato non solo un impreveduto limite dell'interpretazione meccanicistica della natura, nel momento in cui attribuisce determinate proprietà agli oggetti fisici stessi, ma ci ha obbligato, per quel che riguarda la disposizione degli esperimenti, a dedicare particolare attenzione al problema dell'osservazione».

In accordo con Laurikainen, non posso sottrarmi all'impressione che Bohr abbia qui eluso le questioni sollevate da Pauli. A che cos'altro, se non ad un'influenza dell'osservatore, si deve attribuire il fatto che prima di una misura non possono essere assegnate determinate proprietà agli oggetti fisici stessi, ma solo dopo la misura, quindi dopo l'interazione con l'apparato di misura scelto dall'osservatore?

Heisenberg (19) vede, tuttavia, questo problema proprio in relazione con le grandi difficoltà che ebbero a suo parere perfino eminenti scienziati come Einstein nel comprendere e nell'accettare l'interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica. Si osservi poi che le radici di tali difficoltà si troverebbero nella distinzione cartesiana. Tale distinzione sarebbe penetrata profondamente durante i tre secoli successivi a Descartes nella cultura umana e sarebbe stato necessario un tempo assai lungo per rimpiazzarla con una posizione veramente diversa. Indipendentemente dal fatto che, a mio parere, la posizione di Einstein non è qui riprodotta correttamente, in quanto egli capiva almeno fino in fondo la posizione di Bohr – sebbene forse proprio per questo non la accettasse – , bisogna ora capire bene la posizione espressa da Heisenberg, e cioè che non si è ancora trovato il paradigma su cui potremmo costruire una solida base teorico-conoscitiva, e che anche la meccanica quantistica, pur indiscutibilmente corretta, in quanto fornisce previsioni esatte, per quel che riguarda i suoi fondamenti è in certo qual modo ancora sospesa.

Ci sono naturalmente tentativi di ricerca di un tale paradigma, cioè di un nuovo ed esteso fondamento della nostra concezione fisica del mondo. Bisogna tuttavia riconoscere che questa ricerca non è ancora conclusa, dato che vi è – come descritto sopra – una molteplicità di interpretazioni della meccanica quantistica, che si trovano in reciproca concorrenza. Evelyn Fox-

Paradigmi in meccanica quantistica

Keller (20) ha addotto, come ulteriore ragione dell'assenza di un tale paradigma, il fatto che la maggior parte dei fisici operino una repressione cognitiva del problema di interpretazione. La Fox-Keller vede qui un parallelo molto interessante tra l'evoluzione storica del pensiero scientifico e lo sviluppo cognitivo del bambino, così come descritto da Piaget. Entrambi gli sviluppi attraversano varie fasi delicate di organizzazione strutturale. Prima che sia stabilita una nuova struttura concettuale, la scienza non trova alcuna possibilità di espressione di ciò che è già disponibile in forma non verbale, ed esige una repressione cognitiva nella misura in cui si trova in contraddizione con le strutture prima stabilite. Un bambino che si trovi nella transizione tra due fasi, mostra smarrimento, rifiuto ed incapacità di risposta, se si pretende da lui di manifestare impressioni e sensazioni, per le quali le strutture cognitive non siano ancora stabilite. Per la Fox-Keller si verifica il medesimo fenomeno nel rifiuto generalizzato di discutere le implicazioni della meccanica quantistica. Per la maggior parte dei fisici le domande sul significato della meccanica quantistica hanno ricevuto una definitiva risposta dalla interpretazione di Copenhagen ed ogni ulteriore domanda diventa quindi superflua, e quasi implica che chi chiede non capisca di cosa si tratti e tali domande sono ritenute «esclusivamente filosofiche», quindi illegittime per un fisico. Se tuttavia si chiede loro che cosa significhi l'interpretazione di Copenhagen, si riceve una pluralità di risposte diverse. Per la Fox-Keller anche questo è segno di una volontà di eludere la questione, per cui la cosa che viene elusa è la necessità di una nuova struttura cognitiva, radicalmente differente dalla struttura già esistente. La Fox-Keller chiama la vecchia struttura «oggettismo classico». La confusione sull'interpretazione della meccanica quantistica risiede anche nel tentativo di salvaguardare una o più componenti della posizione classica.

Abbiamo già stabilito che esiste un problema di fondamenti della fisica quantistica. Sorge ora la domanda di come debba apparire il nuovo paradigma cercato, di quali debbano essere le sue caratteristiche: E' perciò utile osservare attentamente quali caratteristiche connotino la nuova teoria rispetto alle vecchie. La prima evidenza è la presenza di un'azione minima universale, il quanto di azione di Planck, che può essere trasmessa in un processo fisico. Questo dato, che proviene dall'esperienza ed è incorporato nella teoria, dovrebbe certamente essere conseguenza di ogni accettabile paradigma. Che il valore numerico possa o debba essere seguito da riflessioni fondamentali, è parimenti chiaro. Se è così, allora occorre innanzitutto trovare una giustificazione del valore numerico dei numeri adimensionali, costruiti usando le differenti costanti naturali, ad esempio del valore della costante di struttura fina.

Personalmente dubito che nella spiegazione del valore numerico del quanto d'azione possa trovarsi anche la chiave per una comprensione più profonda. Questo, perché i problemi gnoseologici della meccanica quantistica sono insensibili ad una variazione del valore del quanto d'azione in un ampio intervallo. Tuttavia il fatto che ci sia un quanto d'azione è certamente significativo per la ricerca di un nuovo paradigma.

La seconda caratteristica della meccanica quantistica, che dovrebbe essere utile per questa ricerca, è il modo in cui calcoliamo la probabilità di un evento, se esistono molti percorsi per andare dallo stato iniziale allo stato finale. Invece di sommare semplicemente le corrispondenti probabilità, il fisico somma le loro radici complesse, procedura per la quale esistono certo regole esatte e solidamente fissate. Un punto fondamentale al riguardo è che il modo di procedere è ancora valido, se la disposizione sperimentale è tale che i diversi percorsi, attraverso i quali può passare l'evento osservato, siano in principio indistinguibili. Al contrario, il dispositivo sperimentale dovrebbe essere tale che i percorsi siano distinguibili, in modo che anche le probabilità siano da sommare. Qui si aggiungono dunque due proprietà significative. In primo luogo, notiamo di nuovo la diretta influenza dell'osservatore in linea di principio. Egli è libero di fissare, attraverso la scelta del dispositivo sperimentale, se i percorsi stabiliti, per i quali l'evento può passare, siano o no distinguibili. E, d'altronde, il formalismo è interpretato in modo che, ogni volta che esistono sperimentalmente tali percorsi indistinguibili, anche nel formalismo si trova l'indistinguibilità. Questa proprietà è certamente soddisfacente, come la situazione nella fisica classica, dove possiamo sempre considerare un insieme suddiviso in singole componenti, ed il comportamento stocastico dell'insieme complessivo deriva in linea di massima dal comportamento ben definito e probabile dei suoi costituenti. La regola quantomeccanica significa in forma lapidaria: «Non pensare anche di distinguere l'indistinguibile». La cosa affascinante è ora che, dal modo in cui la fisica quantistica applica questa teoria, segue la novità, vale a dire il fenomeno d'interferenza.

La terza caratteristica è l'impossibilità di una descrizione dettagliata, nel senso di una imprevedibilità del processo singolo, come di un limite ad una razionale descrivibilità. Per ricapitolare, accade che possiamo certamente fissare quale delle due grandezze complementari si manifesta, la posizione o l'impulso, ma non abbiamo alcuna influenza sul valore della grandezza. In qualità di osservatori, abbiamo quindi sul fenomeno quantistico un'influenza qualitativa, ma non quantitativa. Quest'ultima, l'impossibilità di un'influenza quantitativa, resta naturalmente intimamente collegata alla finalità del quanto

d'azione, e vedo in ciò una necessaria conseguenza della prima – l'influenza qualitativa –, per riconoscere all'osservatore un controllo non totale sui fenomeni della natura. L'osservatore quindi, attraverso la sua formulazione sperimentale della domanda, può costringere la natura, a seconda del dispositivo selezionato, a dare risposte qualitativamente differenti, che si escludono a vicenda, ma a prezzo di una non-influenza quantitativa.

Come quarta proprietà è da menzionare la non-località, e cioè come questa si manifesta nel modo più evidente nella situazione EPR (21), ma anche nell'effetto Aharonov-Bohm. Essa è, inoltre, a mio modo di vedere, una conseguenza delle cose dette, se si ammette che il fenomeno quantistico possa essere esteso a distanze qualsiasi. Se quindi, nel caso di una misura di spin, non si può dire prima della misura, in linea di massima, quali siano le direzioni degli spin in questione, lo stato quantico deve essere una sovrapposizione. Conformemente all'incompatibilità della meccanica quantistica con la disuguaglianza di Bell (22), gli spin di entrambe le particelle correlate prima della misura non sono stabiliti in nessun modo, neppure implicitamente. Ciò che è stabilito è solo il fatto che tali spin devono essere antiparalleli. Dopo la misura di una sola delle particelle, esiste allora uno stato con spins ben determinati per entrambe le particelle, indipendentemente dalla distanza di separazione delle due particelle.

E' una conseguenza inevitabile che il nuovo paradigma contenga aspetti totalizzanti. Già le riflessioni sul principio di sovrapposizione stabiliscono, nel caso di sistemi a molte particelle – che costituiscono realmente casi quanto meccanicamente interessanti –, che nemmeno in linea di principio è possibile separare l'osservazione in singole particelle e considerarle processi distinguibili. Aspetti totalizzanti seguono proprio dalle riflessioni relative al paradosso Einstein-Podolsky-Rosen (23).

Si vede quindi che la meccanica quantistica ci costringe ad una revisione radicale di quelle posizioni, che sono profondamente radicate nella nostra concezione del mondo in qualità di fisici, e non solo, ma anche nella nostra concezione quotidiana del mondo. Non dobbiamo aspettarci che il nuovo paradigma possa essere trovato innestando tali punti sulla nostra vecchia concezione del mondo o attraverso piccoli cambiamenti. Ciò che occorre è proprio un radicale cambiamento della nostra visione del mondo. Dalla nuova posizione, i punti sopracitati dovrebbero direttamente seguire come conseguenze ragionevoli immediate. E' difficile dire quale aspetto avrà questa nuova concezione del mondo. Per la sua ricerca ci si può soltanto riferire ad alcune posizioni poco solide. Una di queste è che noi, in qualità di osservatori

del mondo, siamo parte stessa di questo mondo. Una certa riflessività autoreferenziale è pertanto insita necessariamente nella nostra descrizione della natura, riflessività che non ha trovato finora posto nella descrizione fisica. Si riscontra qui un collegamento trasversale con il teorema di Gödel, e si può avanzare l'ipotesi che l'incompletezza di Gödel sia sufficiente per sistemi di assiomi complessi della stessa natura, come l'incompletezza della descrizione quantomeccanica della natura. La non descrivibilità del processo singolo sarebbe dunque un elemento inevitabile di ogni descrizione della natura. Una risposta definitiva sarà data soltanto da un approfondimento di quelle che, secondo Kant, sono condizioni delle possibilità di conoscenza. Kant stesso, al riguardo, nella sua *Critica della Ragion Pura*, non ha proceduto certo in modo sufficientemente radicale, ma si lascia troppo guidare dalla fisica di Newton, e dunque dall'immagine del mondo della fisica classica. Della nuova immagine del mondo possediamo per ora al massimo i *Prolegomena* (24-25).

Nelle mie riflessioni sono giunto alla conclusione che gli esperimenti esistenti, grazie al loro accordo con la meccanica quantistica, confermano questa teoria nei suoi tratti essenziali. Per ragioni di completezza, bisogna però dire che è ugualmente logico essere di opinione diversa (26). Ho anche volontariamente evitato di considerare domande del tipo: se ci sia una frontiera tra micro e macrofisica, se sia necessaria una nuova forma di logica per processi quantistici, ovvero se la coscienza abbia un'attiva e dinamica influenza sulla funzione d'onda. Tali posizioni sono state sostenute da alcuni fisici, tuttavia, a mio parere, esse potrebbero cadere vittime del rasoio di Occam: *Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*. Inoltre, si dovrebbe forse considerare almeno come estremamente improbabile ogni posizione che comporti un cambiamento del formalismo quantistico.

In conclusione, una citazione da una lettera di Einstein a Schrödinger del 22 Dicembre 1950, che mi sembra rappresenti ancora oggi lo stato attuale del problema dell'interpretazione della meccanica quantistica, anche se – come spero risulti da queste argomentazioni – non posso condividere pienamente né le opinioni di Einstein né quelle di Schrödinger: «E' piuttosto difficile accorgersi che ci troviamo ancora sempre nella fase del bambino in fasce, e non è sorprendente che gli individui si oppongano a questa sensazione: bisogna confessarlo (anche a se stessi)».

Ringrazio il prof. K.V. Laurikainen per la sua ospitalità presso l'Università di Helsinki e per avermi messo a disposizione i suoi lavori prima della

Paradigmi in meccanica quantistica

pubblicazione; essi sono stati uno stimolo fondamentale per le presenti riflessioni.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R.P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1965.

2. R. Penrose, «Gravity and State Vector Reduction», in *Quantum Concepts in Space and Time*, a cura di R. Penrose e C.J. Isham, pp.129-146, Clarendon Press, Oxford 1986.

3. W. Rindler, «Einstein's Priority in Recognizing Time Dilation Physically», *Am.J.Phys.* 38, 1111-1115 (1970).

4. Non si deve però assolutamente sostenere che non ci siano ancora nuove proposte che – senza volere qui giudicare – propugnano cambiamenti o addirittura una rinuncia alla teoria della relatività. Il fatto è tuttavia che al riguardo, non c'è una pluralità di interpretazioni in reciproca concorrenza, fondate sul medesimo formalismo.

5. N. Bohr, «Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, a cura di P.A. Schlipp, The Library of Living Philosophers, Evanston 1949, pp.200-241.

6. Cfr. L.E. Ballentine, «The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics», *Rev. Mod. Phys.* 42, 357-381 (1970), e C. Dewdney, A. Kyprianides e J.P. Vigièr, «Causal Non Local Interpretation of the Double Slit Experiment and Quantum Statistics», *Epistemological Letters*, 36, ottobre 1984, pp. 71-82.

7. D. Bohm, «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables, I and II», *Phys. Rev.* 85, 166-193 (1952).

8. L. de Broglie, *Nonlinear Wave Mechanics*, Elsevier Science, Amsterdam 1960. Si osservi al riguardo che Bohm ingloba esplicitamente le previsioni della meccanica quantistica, mentre de Broglie avrebbe ammesso un cambiamento del formalismo. Nel presente lavoro mi richiamo innanzitutto alla posizione di Bohm.

9. H. Everett III, «'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics», *Rev. Mod. Phys.* 29, 454-462 (1957).

10. Il numero effettivo di interpretazioni esistenti è considerevolmente più grande. Così N. Herbert da solo distingue otto diversi concetti di realtà (*Quantum Reality*, Anchor Press, New York 1985).

11. Jean Wahl, «Irrationalism in the History of Philosophy», in *Dictionary of*

the History of Ideas, a cura di Philip P. Wiener, vol. II, pp. 634-638, Charles Scribner's Sons, New York 1973.

12. Lettera PCL (Pauli Letter Collection, CERN, Ginevra) 0092.063, pubblicata in K.V. Laurikainen, «Wolfgang Pauli and Philosophy», *Gesnerus* 41, 225-227 (1984).

13. John Archibald Wheeler, «Law without Law», in *Quantum Theory and Measurement*, a cura di J.A. Wheeler e W.H. Zurek, Princeton University Press, Princeton 1983 pp. 182-213.

14. Wilhelm Just, *Del Mito nelle scienze esatte*. Conferenza tenuta il 14-2-1985 all'Università di Zurigo per la Physikalische Gesellschaft. Manoscritto non pubblicato, e *Immagini della creazione in fisica e in matematica*, Tesi di Laurea, C.G. Jung-Institut, Zurigo 1988.

15. J.F. Clauser e A. Shimony, «Bell's Theorem: experimental tests and implications», *Rep.Progr.Phys.* 41, 1881-1927 (1978).

16. Questo scambio di idee e la peculiare posizione filosofica di Pauli sono esposte in dettaglio in K.V. Laurikainen, *Beyond the Atom. The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*, Springer Verlag, Heidelberg 1988.

17. Lettera PCL 0014.51, pubblicata in K.V. Laurikainen, «Wolfgang Pauli and the Copenhagen Philosophy», in Atti del *Symposium on the Foundations of Modern Physics*, a cura di P. Lahti e P. Mittelstaedt, World Scientific, Singapore 1985, pp. 273-287.

18. N. Bohr, *L'unità della scienza*. Conferenza tenuta in occasione del 200° anniversario della Columbia University. Il passo qui citato è riprodotto in K.V. Laurikainen, *Beyond the Atom. The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*, Springer Verlag, Heidelberg 1988.

19. Werner Heisenberg, *Physik und Philosophie*, Hirzel, Lipsia 1944.

20. Evelyn Fox-Keller, «Cognitive Repression in Contemporary Physics» *Am. J. Phys.* 47, 718-721 (1978). Anche in *Reflections on Science and Gender*, Yale University Press, New Haven 1985 pp. 139-149.

21. A. Einstein, E. Podolsky und N. Rosen, «Can the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered complete?», *Phys.Rev.* 47, 777-780 (1935).

22. John S. Bell, «On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox», *Physics* 1, 195-200 (1964).

23. N. Bohr, «Can the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered complete?», *Phys.Rev.* 48, 696-702 (1935).

24. C.F. von Weizsacker, *Aufbau der Physik*, Henser-Verlag, München-Wien 1985.

Paradigmi in meccanica quantistica

25. M. Redhead, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism, A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford 1987.

26. F. Selleri, *Die Debatte um die Quantentheorie*, Vieweg, Braunschweig 1984.

27. Lettera di Einstein a Schrödinger del 22 Dicembre 1950, in *Briefe zur Wellenmechanik*, a cura di K. Przibram, Springer Verlag, Vienna 1983 pp. 36-37.