

È COMPLETA LA DESCRIZIONE DELLA REALTÀ FISICA FORNITA DALLA MECCANICA QUANTISTICA?

Valia Allori¹ e Nino Zanghi²

Negli anni venti del XX secolo, il fisico danese Niels Bohr, a quel tempo probabilmente il fisico quantistico più autorevole ed influente, incominciò a difendere l'idea che il realismo scientifico tradizionale fosse infantile e non scientifico, e propose quella che ancora oggi è chiamata l'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica. Secondo il punto di vista di Copenaghen, la realtà è divisa in due mondi, il microscopico e il macroscopico, il classico e il quantistico, il mondo regolato dalla logica classica e quello regolato dalla logica quantistica. Sebbene non sia chiaro dove stia il confine tra questi due mondi, e come questa dualità sia compatibile con il fatto che le mele e le sedie consistano d'elettroni e d'altre particelle, la dottrina di Copenaghen è diventata l'ortodossia, vale a dire, è diventata non solo il punto di vista maggioritario tra i fisici, ma anche il dogma.

Nonostante l'omaggio di prammatica riservato al dogma, questa divisione arbitraria del mondo e il ruolo peculiare dell'osservatore nella formulazione della teoria hanno da sempre lasciato perplessi molti fisici. Richard Feynman, uno dei maggiori fisici della seconda metà del XX secolo e tra i padri della moderna elettrodinamica quantistica, nelle sue *Lectures on Gravitation* espresse il suo disagio nel seguente modo:

Tutto ciò mi rende estremamente confuso, specialmente quando consideriamo che anche se possiamo consistentemente considerarci osservatori esterni quando guardiamo il resto del mondo, il resto del mondo allo stesso tempo ci sta osservando ... Vuol forse dire che le mie osservazioni diventano reali solo quando osservo un osservatore che osserva qualcosa che accade? Questo è veramente un punto di vista orribile. Ritieni seriamente che senza un osservatore non ci sia una realtà? Quale osservatore? Una mosca è un osservatore? Una stella è un osservatore? C'era qualche realtà antecedente all'anno 10^9 prima di Cristo, prima che si sviluppasse la vita? Oppure sei tu l'osservatore? Allora ci sarà qualche realtà per il mondo

1 Department of Philosophy, Davison Hall, Rutgers, The State University of New Jersey, 26 Nichol Avenue, New Brunswick, NJ 08901-1411, USA. E-mail: vallori@eden.rutgers.edu

2 Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova and INFN sezione di Genova, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova, Italy. E-mail: zanghi@ge.infn.it

dopo che sarai morto? Conosco un certo numero di fisici rispettabili che ha stipulato un'assicurazione sulla vita. (Feynman, 2002)

Albert Einstein fu tra i pochi che immediatamente reagirono con vigore alla dottrina di Copenaghen. Nel volume in suo onore, curato da P. A. Schlipp e pubblicato nel 1949, Einstein tracciava un bilancio del suo contributo alla fisica del XX secolo e delle ragioni che lo avevano portato al rifiuto della dottrina di Copenaghen. Da un lato, non esitava a riconoscere l'importante e duraturo contributo della meccanica quantistica allo sviluppo della fisica; scriveva, infatti³:

[...] io riconosco pienamente l'importantissimo progresso che la teoria statistica dei quanti ha fatto compiere alla fisica teorica. Nel campo dei problemi meccanici – cioè dovunque è possibile considerare l'interazione delle strutture e delle loro parti con sufficiente precisione, postulando un'energia potenziale fra i punti materiali – questa teoria costituisce ancora oggi un sistema capace, pur nel suo carattere ristretto, di descrivere correttamente le relazioni empiriche fra fenomeni specificabili, in modo corrispondente alle previsioni della teoria: essa è finora la sola che unisca il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia in modo logicamente soddisfacente: e le relazioni in essa contenute sono, entro i limiti naturali fissati dalla relazione d'indeterminazione, complete. Le relazioni formali contenute in questa teoria cioè il suo intero formalismo matematico – dovranno essere contenute probabilmente, sotto forma di deduzioni logiche, in ogni teoria non inutile del futuro.

D'altro canto, non esitava ad evidenziare le difficoltà della teoria quantistica, perlomeno quando questa era interpretata secondo i dettami della dottrina di Copenaghen. Einstein vedeva nell'*incompletezza* della teoria la sorgente di tutti i problemi:

Ciò che non mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso ciò che mi sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica.

E indicava una possibile strada per lo sviluppo della teoria:

[...] la teoria statistica dei quanti – nel caso che gli sforzi compiuti per ottenere una descrizione fisica completa abbiano avuto successo – verrebbe a prendere, nel quadro della fisica futura, un posto approssimativamente analogo a quello della meccanica statistica nel quadro della meccanica classica. Io sono fermamente convinto che lo sviluppo della fisica teorica sarà di questo tipo; ma il cammino sarà lungo e difficile.

Einstein affrontò il problema della completezza della meccanica quantistica a più riprese e da diversi punti di vista. Nel famoso articolo pubblicato nel 1935 in collaborazione con Boris Podolsky e Nathan Rosen, Einstein intendeva dare una dimostrazione certa del fatto che la funzione d'onda non fornisce una rappresentazione completa della realtà fisica. Tuttavia, Einstein non fu mai

³ Salvo indicazione contraria, nel seguito le citazioni di Einstein sono tratte da “Replica alle osservazioni dei vari

soddisfatto dello stile di quest'articolo. In una lettera ad Erwin Schrödinger, datata 19 giugno 1935, scriveva: “Per ragioni di lingua questo [articolo] è stato scritto da Podolsky dopo molte discussioni. Tuttavia non è venuto fuori bene come io avrei voluto; al contrario, il punto principale, per così dire, è stato sepolto dall'erudizione [die Hauptsache ist sozusagen durch Gelehrsamkeit verschüttet].” Nella sua *Autobiografia Scientifica* Einstein ripresenta in altra forma l'argomentazione d'incompletezza di EPR: il ragionamento è ineccepibile e si basa su una sola premessa, il *principio di località*. Senza entrare nel merito di questo principio, ci basti qui ricordare che per decenni è stato considerato uno dei pilastri della fisica, uno dei principi più certi su cui basare la nostra conoscenza della natura. Per una messa in discussione di questo principio bisogna arrivare al 1964, l'anno in cui il fisico irlandese John Bell pubblicò la dimostrazione dell'incompatibilità di questo principio con la meccanica quantistica.

Bell fu un fisico eccellente, per quanto non della statura di Einstein, e fu, al pari di Einstein, uno dei più grandi filosofi della fisica del XX secolo. La sua dimostrazione del 1964 utilizza il ragionamento di EPR, ed è proprio in virtù di tale ragionamento, che le conclusioni dei Bell, oggi noto come *Teorema di Non Località di Bell*, sono del tutto generali. Questo teorema afferma che la meccanica quantistica, e in generale qualunque teoria in accordo con l'evidenza sperimentale, è *necessariamente* non locale.

A supporto della tesi d'incompletezza della meccanica quantistica Einstein non fornisce soltanto l'argomentazione EPR riveduta e corretta, ma utilizza anche l'argomentazione a cui era pervenuto Schrödinger in maniera del tutto indipendente. Questa argomentazione era stata presentata all'interno di un articolo d'ampio respiro sullo stato della meccanica quantistica che Schrödinger aveva pubblicato nello stesso anno dell'articolo EPR. Si tratta del famoso articolo “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, colloquialmente noto come l'articolo del “gatto”.

autori” contenuta nella traduzione italiana (incompleta) del volume di Schlipp, (Einstein, 1979).

A differenza dell'argomentazione EPR, le premesse del ragionamento di Schrödinger sono molto generali e non sono mai state messe in discussione dallo sviluppo successivo della fisica. Nel seguito, esporremo e discuteremo dettagliatamente il ragionamento di Schrödinger.

Schrödinger era stato il padre della funzione d'onda, e, con Heisenberg, tra i fondatori della meccanica quantistica; probabilmente nessuno più di lui avrebbe voluto che fosse vera la congettura che la funzione d'onda fornisce una descrizione completa dei sistemi fisici, ma fu proprio Schrödinger a mostrare che questo non è possibile. Dopo settant'anni l'argomentazione di Schrödinger mantiene intatta la sua validità e non ha perso nulla della forza originaria. Arriveremo al cuore di quest'argomentazione seguendo Einstein passo passo, ma prima vogliamo sgombrare il campo da due equivoci.

Il primo equivoco riguarda la nozione stessa di completezza. L'adeguatezza empirica di una teoria fisica presuppone un dominio di validità che non sempre copre la vasta gamma di fenomeni che si osservano in natura; in questo senso, qualunque teoria fisica sarebbe da ritenersi incompleta. Inoltre, la nostra conoscenza empirica del mondo muta nel corso degli anni: la meccanica celeste newtoniana ha ceduto il passo alla moderna meccanica celeste einsteiniana che la contiene come caso limite e la termodinamica è stata assorbita dalla moderna meccanica statistica. La teoria "del tutto" di oggi, se sopravvivrà al vaglio dell'esperienza – e alla critica roditrice dei topi – probabilmente diventerà una delle teorie approssimate di domani. In questo senso, nessuna teoria scientifica, per sua natura, fornisce una descrizione completa della realtà. In altre parole, se – come diceva Novalis – le teorie (o le ipotesi) sono come reti da pesca che si gettano nel mare, per quanto fini siano le maglie, ci saranno sempre dei pesci che sfuggiranno. Tuttavia non è questo il senso d'incompletezza che Einstein aveva in mente: il problema sollevato da Einstein riguarda piuttosto la *natura* della relazione tra formalismo matematico della teoria e predizioni empiriche *nel dominio di validità sperimentale* della teoria stessa. Il resto di quest'articolo sarà principalmente dedicato al chiarimento di questo

punto.

Il secondo equivoco riguarda la supposta impossibilità per una persona di buona cultura, ma poco avvezza ai tecnicismi della fisica e della matematica, di comprendere i termini del problema che stiamo discutendo. Se da un lato occorre riconoscere che sovente gli scienziati amano ammantare anche le loro idee più semplici di tecnicismi incomprensibili di cui, talvolta, loro per primi cadono vittime, dall'altro bisogna ammettere la fisica basa la sua ricostruzione concettuale del mondo su formalismi matematici complicati che rendono difficile al profano la comprensione delle teorie fisiche. Tuttavia, per comprendere i termini generali della questione che stiamo discutendo – il rapporto tra formalismo matematico della meccanica quantistica e realtà empirica – non è indispensabile una conoscenza profonda dell'alfabeto matematico delle teorie fisiche, piuttosto è utile far tesoro di una regola di “buon senso epistemologico” che, il 7 maggio del 1952, in una lettera a Maurice Solovine, Einstein riassume così:

Io vedo la cosa nel modo seguente:

1. Ci sono date le E (esperienze immediate).
2. A sono gli assiomi da cui traiamo le conclusioni. Dal punto di vista psicologico gli A poggiano sulle E . Ma non esiste alcun percorso logico che dalle E conduca agli A ; c'è solamente una connessione intuitiva (psicologica) e sempre “fino a nuovo ordine”.
3. Dagli A si ricavano, con procedimento deduttivo, enunciati particolari che possono pretendere di essere veri.
4. Gli A sono messi in relazione con le E (verifica per mezzo dell'esperienza). Questa procedura, a ben vedere, appartiene essa stessa alla sfera extra-logica (intuitiva), non essendo di natura logica la relazione tra i concetti che intervengono negli enunciati e le esperienze immediate.

Questa relazione tra gli A e le E è tuttavia (pragmaticamente) molto meno incerta di quella che sussiste tra gli A e le E (ad esempio tra il concetto di cane e le corrispondenti esperienze immediate). Se una tale corrispondenza, pur restando inaccessibile alla logica, non potesse essere stabilita con un elevato grado di certezza, tutto l'armamentario logico non avrebbe alcun valore ai fini della “comprensione della realtà” (ad esempio, la teologia). L'aspetto essenziale è qui il legame, estremamente problematico, tra il mondo delle idee e ciò che può essere sperimentato (l'esperienza sensibile).

Gli assiomi di una teoria fisica riguardano, tra l'altro, la definizione e il comportamento degli enti matematici che svolgono un ruolo essenziale nella formulazione della teoria stessa. Ad esempio, nella meccanica celeste newtoniana i movimenti del sole e dei pianeti sono matematicamente rappresentati dal moto di un punto nello *spazio delle fasi* – lo spazio delle posizioni e delle velocità del sole e dei pianeti; in termodinamica si utilizzano variabili, quali la temperatura o la pressione, che

rappresentano matematicamente lo stato macroscopico di un corpo, e che sono poste in relazione con ben definite procedure sperimentali di controllo e misura.

Sebbene la corrispondenza tra costrutti teorici e realtà empirica sia sempre – come ci ricorda Einstein – *molto problematica* ed abbia un ineliminabile elemento extra-logico ed *intuitivo*, essa deve – sempre come ci ricorda Einstein – poter essere stabilita, per lo meno pragmaticamente, con un elevato grado di certezza. In altre parole, affinché una teoria fisica sia empiricamente adeguata deve sussistere una qualche relazione tra il formalismo matematico della teoria e certi stati di cose del mondo – se non altro, almeno quelli a cui abbiamo un accesso sensoriale diretto. Talvolta questa relazione è garantita da una sorta di “contiguità semantica” tra i significati delle variabili matematiche della teoria e concetti che sono propri del senso comune – come, in effetti, accade per gli esempi sopra citati, in cui si fa riferimento a posizioni, velocità o temperatura dei corpi; *ma non sempre un'interpretazione di questo tipo è possibile.*

Il prototipo di variabile matematica che svolge un ruolo essenziale in meccanica quantistica è la *funzione d'onda* – la funzione che evolve nel corso del tempo secondo l'equazione scoperta da Schrödinger nel 1926. A differenza d'altre funzioni che s'incontrano nella fisica – ad esempio, la funzione che ad ogni punto dello spazio occupato da un corpo associa la temperatura che il corpo ha in quel punto ad ogni istante di tempo – la nozione di funzione d'onda sembra sfuggire a qualunque comprensione intuitiva. In particolare, contrariamente alla temperatura, la funzione d'onda di un corpo non è affatto localizzata, vale a dire non ha un valore ben definito in ogni punto dello spazio; ad esempio, la funzione d'onda di un atomo d'ossigeno ha un valore numerico ben definito soltanto se si specificano almeno nove punti nello spazio fisico (nell'approssimazione in cui il nucleo dell'atomo è trattato come indivisibile), mentre per un corpo macroscopico si deve scegliere almeno 10^{23} punti nello spazio, prima di poter parlare di valore numerico della funzione d'onda di quel corpo.

Nonostante l'assenza di un'interpretazione "intuitiva" del formalismo matematico, il buon senso e il tatto hanno permesso – *pragmaticamente* – di utilizzare questo formalismo per svelare i segreti del mondo sotto la scala atomica e molecolare e di arrivare a predizioni di notevole portata empirica. Alla base di questo successo ci sono regole di calcolo per le distribuzioni di probabilità dei risultati di qualunque esperimento (nel dominio di validità della meccanica quantistica) e regole di "corrispondenza" tra variabili matematiche e quantità misurabili.

Nel 1926, sulla base della rappresentazione matematica fornita dalla funzione d'onda (e la regola di corrispondenza tra frequenze d'oscillazione della funzione d'onda ed energia, che generalizza la relazione tra frequenze ed energia ipotizzata da Einstein nel 1905 per i quanti di luce), Schrödinger determinò i livelli energetici dell'atomo d'idrogeno, pervenendo così ad una giustificazione teorica delle regole di quantizzazione che erano state postulate da Bohr tredici anni prima. Da allora, il metodo di Schrödinger è stato esteso ad atomi più complessi, alle molecole, ai nuclei degli atomi, ai protoni e neutroni che formano i nuclei e alle particelle elementari che sono state via via scoperte. Dal 1926 ad oggi la sofisticazione matematica e sperimentale è notevolmente aumentata, ma i principi di base del metodo sono rimasti pressoché inalterati.

Sebbene la funzione d'onda sia un ente matematico astratto e poco intuitivo, non è, di *per sé*, questa sua caratteristica all'origine del problema della completezza. Nel famoso "articolo del gatto" Schrödinger scriveva: "che la funzione d'onda sia un costrutto matematico non intuitivo e astratto è uno scrupolo che viene sempre fuori verso nuovi strumenti di pensiero e non reca con sé un grande messaggio (Schrödinger, 1935)". Piuttosto, secondo Schrödinger, il problema nasce dall'"offuscamento" suggerito dal carattere di "sparpagliamento" della funzione d'onda che "influisce su cose macroscopicamente tangibili e visibili, per cui il termine "offuscamento" è semplicemente sbagliato (*ibidem*)". Per chiarire che cosa Schrödinger intenda con i termini "sparpagliamento" e "offuscamento" è utile partire dall'esempio che Einstein considera

nell'*Autobiografia Scientifica*: un atomo radioattivo con un tempo di decadimento medio ben definito, localizzato in modo praticamente esatto in un punto dello spazio. Nel formalismo matematico della meccanica quantistica, il processo radioattivo d'emissione di una particella leggera è descritto da una funzione in tre dimensioni – la *funzione d'onda* della particella leggera – che nell'istante iniziale è diversa da zero solo all'interno della regione occupata dall'atomo, ma che, negli istanti di tempo successivi, si espande nello spazio esterno. Questa funzione fornisce la probabilità che la particella, in un certo istante arbitrario, si trovi in una data parte dello spazio, ma non implica alcun'affermazione sul momento della disintegrazione dell'atomo radioattivo.

Alla domanda se possiamo ritenere questa descrizione teorica come la descrizione *completa* della disintegrazione del singolo atomo, Einstein risponde negativamente:

Immediatamente la risposta più attendibile è: No. Infatti, si è portati immediatamente a pensare che il singolo atomo decada in un tempo ben definito; ma la descrizione compiuta per mezzo della funzione [d'onda] non implica affatto un valore temporale ben definito. *Quindi, se il singolo atomo ha un tempo di disintegrazione definito, allora nei riguardi del singolo atomo la descrizione compiuta per mezzo della funzione [d'onda] dev'essere interpretata come una descrizione incompleta.* In questo caso, la funzione [d'onda] dev'essere considerata come la descrizione, non di un singolo sistema, ma di un insieme ideale di sistemi. Si è portati così alla convinzione che una descrizione completa di un singolo sistema, alla fin fine, debba essere possibile; ma per una descrizione completa di questo genere non c'è posto nel sistema concettuale della teoria statistica dei quanti.

Dopo di che anticipa una possibile obiezione al suo ragionamento:

Questo ragionamento sta in piedi o cade se sta in piedi o cade l'affermazione che esista effettivamente qualcosa di simile a un tempo definito di disintegrazione del singolo atomo (un istante di tempo che esista indipendentemente da ogni osservazione); ma quest'affermazione, dal mio punto di vista, non è soltanto arbitraria, ma addirittura priva di senso. Affermare l'esistenza di un istante preciso in cui avviene la disintegrazione avrebbe senso solo se potessi determinare empiricamente, in linea di principio, quest'istante. Ma questa determinazione (che, in ultima analisi, porta al tentativo di dimostrare l'esistenza della particella al di là della barriera di potenziale) implicherebbe una perturbazione ben definita del sistema di cui ci stiamo occupando, cosicché il risultato di essa non permetterebbe di trarre alcuna conclusione sullo stato del sistema non perturbato. Quindi, la supposizione che un atomo radioattivo abbia un tempo di disintegrazione ben definito non è giustificata assolutamente da nulla; e quindi non è dimostrato nemmeno che la funzione d'onda non possa essere concepita come una descrizione completa del singolo sistema. Tutta questa pretesa difficoltà deriva dal fatto che si postula come "reale" una cosa che non è osservabile. (Questa sarebbe la risposta del teorico quantistico.)

Nella risposta del teorico quantistico, così ben tratteggiata da Einstein, si scorge quell'atteggiamento anti-metafisico che è stato molto salutare per lo sviluppo della scienza moderna. In effetti – come diceva Bell – ma mano che sondiamo il mondo nelle regioni remote dall'esperienza

ordinaria non abbiamo alcun diritto di aspettarci che le nozioni familiari siano adeguate; siamo già molto fortunati ad avere regole di calcolo e procedure sperimentali che funzionano. In altre parole, non dovremmo stupirci se nel mondo *microscopico* si *offuscano* le categorie tradizionali di pensiero, come l'idea che esista un tempo ben definito per l'accadimento di un evento.

Tuttavia, proprio riflettendo su questo aspetto del problema – il rapporto tra quadro concettuale e realtà – Einstein arrivò ad un *capovolgimento* del ragionamento del teorico quantistico. Paradossalmente, Bohr e i cultori della dottrina di Copenaghen, arrivarono invece alla convinzione opposta: ritennero che era impossibile andare oltre le categorie di quel quadro concettuale “classico” forgiato dal mondo dell'esperienza quotidiana. Alla risposta del teorico quantistico Einstein muove dapprima un'obiezione filosofica, poi enuncia un criterio metodologico molto generale e, infine, passa all'argomentazione di Schrödinger del 1935.

L'obiezione filosofica riguarda l'atteggiamento positivista fondamentale che è alla base del ragionamento del teorico quantistico, un atteggiamento che, secondo Einstein, finisce per confondersi con il principio del vescovo George Berkeley che *essere è essere percepito*. Per Einstein, al contrario, la giustificazione di un costrutto teorico non è nella sua derivazione dai dati dei sensi; per Einstein questo tipo di derivazione non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero pre-scientifico: “*la giustificazione dei costrutti teorici, che per noi rappresentano la realtà, sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi.*” Einstein passa quindi ad enunciare il criterio metodologico che ne discende:

Non ci si può chiedere soltanto se esista un istante di tempo ben definito della trasformazione di un singolo atomo, ma occorre chiedersi piuttosto: “*È ragionevole, nel quadro della nostra costruzione teorica complessiva, supporre l'esistenza di un punto temporale ben definito della trasformazione di un singolo atomo?*”⁴ Non ci si può neppure chiedere che cosa significhi quest'affermazione. Ci si può chiedere soltanto se una proposizione del genere, nel quadro del sistema concettuale scelto, e tenendo presente la sua capacità di afferrare teoricamente ciò che è dato empiricamente, sia ragionevole o no.

Se accettiamo questo criterio, ci troviamo di fronte alle seguenti possibilità: 1) possiamo

⁴ Enfasi non nell'originale.

assumere un quadro concettuale in cui la funzione d'onda non fornisce una rappresentazione del singolo sistema individuale, ma di un insieme di sistemi identicamente preparati (che hanno in comune l'essere associati alla stessa funzione d'onda, nel senso che la funzione d'onda regola le proprietà statistiche di tale insieme di sistemi); in tal caso possiamo tranquillamente ammettere che esista un istante di tempo definito in cui il singolo atomo radioattivo decade . Oppure: 2) possiamo assumere un quadro concettuale in cui la funzione d'onda è considerata come la descrizione completa del singolo sistema; in tal caso siamo legittimati a rifiutare che esista uno specifico tempo di decadimento del singolo atomo radioattivo.

Per Einstein la seconda possibilità deve essere scartata sulla base dell'argomentazione fornita da Schrödinger. Quest'argomentazione, adattata al caso considerato, può essere schematizzata nel modo seguente. Invece di considerare soltanto l'atomo radioattivo, si consideri un sistema che comprende anche l'apparato strumentale che accerta la trasformazione radioattiva, per esempio, un contatore Geiger; si supponga, inoltre, che l'apparato strumentale includa un nastro per la registrazione sul quale sia fatto un segno quando scatta il contatore Geiger, e che il nastro sia fatto scorrere a velocità costante, di modo che dalla lettura della posizione del segno sul nastro si possa risalire al tempo in cui è avvenuto il singolo decadimento. Sebbene questo sistema totale sia molto complesso – la sua funzione d'onda dipende dalla sua *configurazione microscopica*, vale a dire dalle posizioni di tutti i suoi costituenti elementari – è del tutto legittimo trattare tutto questo sistema dal punto di vista della meccanica quantistica.⁵

Come nel caso considerato in precedenza del solo atomo che decade, la funzione d'onda del sistema totale determina la probabilità della configurazione microscopica ad ogni istante di tempo. Consideriamo questa funzione d'onda ad un tempo molto grande in rapporto al tempo medio di

⁵ Non porre, *a priori*, alcun limite al dominio di validità ad una teoria fisica fondamentale è inevitabile, perché insito nel supposto carattere *fondamentale* della teoria stessa. Senza questa mossa metodologica sarebbe impossibile comprenderne il potere esplicativo; ad esempio, l'assunzione di Boltzmann che la meccanica newtoniana avesse validità universale, sia nella scala macroscopica che in quella microscopica degli atomi, permise di comprendere

decadimento dell'atomo radioattivo – cioè ad un tempo in cui siamo praticamente certi che si sia prodotto un segno sul nastro. Ad ogni configurazione microscopica corrisponde una posizione ben definita del segno sul nastro di carta, e la funzione d'onda risulta *sparpagliata* su tutte queste configurazioni. Vale a dire, questa funzione non assegna un valore numerico ben definito *soltanto* all'insieme di configurazioni microscopiche a cui corrisponde *una e una sola* configurazione macroscopica che rappresenta un nastro di carta con un segno ben definito da qualche parte, ma assegna valori numerici a configurazioni a cui corrisponde una moltitudine di posizioni (macroscopicamente distinte) del segno sul nastro di carta. È questo carattere di sparpagliamento della funzione d'onda che preoccupava Schrödinger, uno sparpagliamento che, come diceva Schrödinger, *produce un offuscamento delle cose tangibili e visibili per cui il termine offuscamento è semplicemente sbagliato*.

Insomma, la funzione d'onda fornisce soltanto le probabilità di tutte le configurazioni microscopiche possibili, e per le posizioni macroscopiche dà soltanto le probabilità, ma non le posizioni del segno sul nastro di carta. Poiché non rappresenta affatto ciò che osserviamo in laboratorio, cioè un nastro di carta con un segno ben definito da qualche parte, questa funzione non fornisce una descrizione completa degli stati di cose macroscopici. Si ha così – a parte un *caveat* di cui ci occuperemo tra poco – una *reductio ad absurdum* dell'ipotesi di completezza della funzione d'onda. A commento del ragionamento appena esposto Einstein scrive:

In questo ragionamento, la posizione del segno sul nastro ha la stessa parte che aveva nel ragionamento originario l'istante di disintegrazione. La ragione per cui s'introduce un sistema corredato di meccanismo di registrazione sta in questo. La posizione del segno sul nastro di registrazione è un fatto che rientra interamente nell'ambito dei concetti macroscopici, a differenza dell'istante di disintegrazione di un singolo atomo.

Nella sua argomentazione originale, per mettere in risalto l'assurdità dell'ipotesi di completezza, invece del nastro con meccanismo di scrittura, Schrödinger aveva immaginato una situazione ancora più paradossale. Nell'esperimento mentale di Schrödinger, il mondo macroscopico

l'origine microscopica dell'irreversibilità macroscopica espressa dalle leggi della termodinamica. A questo riguardo,

è rappresentato da un gatto: l'animale viene messo in una stanza insieme con l'atomo che decade secondo le modalità che abbiamo descritto, con la sola differenza che, anziché azionare il dispositivo che traccia un segno sul nastro, il contatore Geiger che accerta la trasformazione radioattiva rompe una fiala di veleno. Se mettiamo il tutto in una scatola, e consideriamo la situazione ad un tempo non troppo lungo rispetto al tempo di decadimento, a quel tempo il gatto sarà di certo o vivo o morto, ma la funzione d'onda del sistema totale, a quello stesso tempo, non rappresenta affatto questo stato di cose, ma è sparpagliata sia sulle configurazioni corrispondenti al gatto vivo che su quelle corrispondenti al gatto morto, e quindi *non rappresenta in maniera completa lo stato di cose* che si realizza nel mondo – lo stato di salute del gatto, se ci si concede la facezia.

Ritorniamo adesso al *caveat* lasciato in sospeso:

Se proviamo ad accettare l'interpretazione per cui la descrizione della teoria quantistica dovrebbe essere intesa come una descrizione completa del sistema individuale, siamo costretti a interpretare la posizione del segno sul nastro come qualcosa che non appartiene al sistema in sé, ma la cui esistenza dipende essenzialmente dal fatto che si sia condotta un'osservazione sul nastro registratore. Un'interpretazione del genere, certamente, non è affatto assurda da un punto di vista puramente logico; tuttavia, è molto improbabile che ci sia qualcuno disposto a prenderla seriamente in considerazione.

Di certo, come risulta dal passo che abbiamo citato all'inizio di quest'articolo, Feynman provò un senso di disagio di fronte alla possibilità che l'osservatore crea, in qualche modo, la realtà – nel caso del gatto, il suo essere vivo o morto sarebbe causato dall'azione di un osservatore che guarda all'interno della scatola che lo contiene. È difficile credere che un'interpretazione del genere possa essere presa in seria considerazione da molti fisici, perlomeno, per così dire, “nel loro orario di lavoro”. La ragione, come ci ricorda Einstein, è chiara:

Infatti, nel campo macroscopico si considera semplicemente certo che ci si debba attenere al programma di una descrizione realistica nello spazio e nel tempo; mentre nel campo microscopico si è più facilmente portati a rinunciare, o almeno a modificare, questo programma.

Per alcuni fisici, invece, il *caveat* del ragionamento di Einstein è diventato la lezione

si confronti, nella discussione che segue, l'atteggiamento di Einstein con quello di Bohr.

principale della meccanica quantistica. Il fisico americano John Wheeler, per esempio, è famoso per avere congetturato un “universo partecipativo” in cui le osservazioni fatte nel *presente* dai fisici sperimentali, o dall’uomo della strada quando osserva il cielo stellato, danno “realità tangibile” al *passato* lontano. Si tratta di una concezione in cui le *azioni* che compiamo adesso possono, in qualche modo, produrre la struttura fisica del passato dell’universo, invece di fornirci, semplicemente, informazioni sul suo passato. È una speculazione ardita che viola il buon senso: come non pensare che i miei occhi abbiano visto i fotoni emessi da quella stella migliaia d’anni fa perché quei fotoni si stavano già muovendo in quella direzione molto prima che io avessi deciso di andare sul terrazzo e di guardare proprio quella stella? Pensare che io abbia contribuito alla formazione della struttura fisica del passato del mondo – influenzando il processo di emissione di quei fotoni che sono finiti nel mio occhio – è ben più che la violazione delle certezze del senso comune a cui la scienza ci ha abituato, sembra piuttosto sconfinare nella megalomania e nella follia.

Se il quadro concettuale 2) comporta tali conseguenze sulla struttura del mondo, l’adozione del quadro concettuale 1) sembrerebbe l’atteggiamento più naturale. Le ragioni del perché questo non sia diventato l’atteggiamento maggioritario tra i fisici sono molteplici e, tra queste, la convinzione largamente diffusa che siano i fatti sperimentali della meccanica quantistica a rendere impossibile una formulazione completa della meccanica quantistica (con buona pace degli sforzi metodologici ed epistemologici di Einstein nel chiarire i termini corretti della questione).

Questa convinzione si è nutrita dei cosiddetti teoremi limitativi di “non esistenza delle variabili nascoste”. Si ritiene che questi teoremi – di von Neumann, Bell, Kochen and Specker, e simili — dimostrino che non è possibile che la casualità quantistica emerga semplicemente dall’ignoranza, in altre parole, che non possano esistere quelle variabili che, nella visione di Einstein, dovrebbero completare la descrizione della realtà fisica fornita dalla funzione d’onda, cosicché “la teoria statistica dei quanti ... verrebbe a prendere, nel quadro della fisica futura, un posto

approssimativamente analogo a quello della meccanica statistica nel quadro della meccanica classica.”⁶ Tuttavia, nel suo articolo pionieristico ed influente *On the problem of hidden variables in quantum mechanics*⁷, John Bell ha mostrato che questi teoremi limitativi coinvolgono assunzioni immotivate e quindi non giustificano il rigetto del punto di vista di Einstein sull'incompletezza del formalismo quantistico e sull'origine della casualità quantistica.

A questo punto è utile fare una pausa e chiarire un possibile dubbio. La descrizione in termini della funzione d'onda è solo una delle possibili rappresentazioni matematiche del formalismo quantistico; una rappresentazione equivalente è quella di Heisenberg, basata sul *vettore astratto di stato* e sugli operatori auto-aggiunti che evolvono nel corso del tempo secondo le equazioni operatoriali di Heisenberg; un'altra formulazione utilizza il metodo di “integrazione sui cammini” sviluppato da Feynman. Occorre aver chiaro che la conclusione di incompletezza del formalismo quantistico non dipende da quale rappresentazione matematica si utilizza.

Per comodità di linguaggio, conveniamo di chiamare “*variabili B*” le variabili del formalismo quantistico – qualunque sia la particolare rappresentazione matematica utilizzata. Allora la tesi d'incompletezza diventa l'insostenibilità del quadro concettuale in cui la descrizione completa del singolo sistema è fornita *soltanto* dalle *variabili B*. Più precisamente, la tesi d'incompletezza afferma che qualunque sia la rappresentazione matematica del formalismo quantistico in termini di *variabili B*, e qualunque sia il criterio che utilizziamo per associare la condizione iniziale di un certo stato di cose macroscopico alle *variabili B* che lo rappresentano⁸, la condizione finale delle *variabili B* non corrisponde allo stato di cose finale che si realizza nel mondo – sulla base, ovviamente, dello stesso

⁶ Questa interpretazione del pensiero di Einstein è stata rigettata da Max Jammer nel suo libro *The Philosophy of Quantum mechanics*. In accordo con le critiche mosse da Bell a Jammer (Bell, 1987, p. 89) riteniamo la posizione di Jammer del tutto implausibile.

⁷ Ristampato in Bell 1987, p.1.

⁸ Purchè sia un criterio “ragionevole”. Non è nostra intenzione affrontare in questa sede le cosiddette “interpretazioni a molti mondi” che sembrerebbero contraddire la tesi d'incompletezza sulla base di un criterio di associazione che, anche ad essere caritatevoli, sarebbe da ritenersi, per molti versi, poco “ragionevole”.

criterio di associazione tra *variabili B* e stati di cose macroscopici.⁹

Il punto di vista di Einstein può essere riassunto dall'affermazione che devono esistere altre variabili, – chiamiamole “*variabili A*” – che forniscono la descrizione completa di ogni situazione individuale “che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica”. Il riferimento di Einstein al rapporto tra meccanica statistica e meccanica classica intende chiarire che in una formulazione completa della meccanica quantistica, il ruolo delle *variabili B* è quello di governare la statistica delle *variabili A*. Nulla sembrerebbe più lontano dall'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica. Tuttavia, per quel che riguarda il problema della completezza, sorprendentemente, la posizione di Bohr non sembrerebbe così diversa da quella di Einstein. Cerchiamo di capire in che senso e perché.

Per Bohr è in linea di principio impossibile formulare i concetti fondamentali della meccanica quantistica senza usare la meccanica classica. Per dirla con le parole di Landau e Lifshitz, “la meccanica quantistica occupa una posizione assai particolare nell'ambito delle teorie fisiche: essa contiene la meccanica classica come caso limite, e al tempo stesso ha bisogno di questo caso limite per la sua fondazione.” Quindi, la visione ortodossa finisce per fornire al problema della completezza, una risposta che molti cultori dell'ortodossia faticano ancora oggi ad accettare: la funzione d'onda, e più in generale le *variabili B* quantistiche, non forniscono una rappresentazione completa dello stato cose nel mondo; in aggiunta a queste, occorre specificare i valori delle variabili classiche – che per comodità chiameremo *variabili C*.

Secondo Bohr, sono proprio le *variabili C* a fondare la meccanica quantistica e a rendere il formalismo quantistico coerente ed applicabile allo studio dei fenomeni che osserviamo in laboratorio o in natura. In altre parole, secondo la visione ortodossa, la descrizione completa di uno stato di cose

⁹ Occorre tenere presente quest'ultima precisazione, per quanto ovvia e scontata, per non cadere nella prestidigitazione di chi oggi fa appello alla famigerata “decoerenza” per dissolvere il problema sollevato da Schrödinger ed Einstein. Chi si muove lungo questa strada utilizza un altro ingrediente del formalismo quantistico – la cosiddetta matrice densità – cioè un altro esempio di *variabile B*. La prestidigitazione consiste nel cambiare surrettiziamente, e con

del mondo è dato dalla coppia (B, C) , dove le C sono in qualche senso variabili macroscopiche. Quindi, sebbene secondo la visione ortodossa le *variabili B* non rappresentino niente di reale – celebre è il motto “non esiste un mondo quantistico, esiste solo una descrizione quantistica astratta” – il ruolo delle *variabili B* è quello di governare la statistica delle *variabili C* che rappresentano ciò che è da considerarsi reale, o perlomeno “concreto”; ad esempio, le *variabili B* permettono di calcolare le probabilità che il gatto sia vivo o sia morto. L’analogia formale con il punto di vista di Einstein non potrebbe essere più calzante – basta sostituire le C con le A . Esistono tuttavia differenze sostanziali che è utile approfondire.

Come sovente ha sottolineato John Bell, nella formulazione originaria dell’interpretazione di Copenaghen, il senso in cui la descrizione completa di uno stato di cose del mondo sia dato dalla coppia (B, C) non è specificato chiaramente. Anche la dinamica della coppia (B, C) non è precisata in modo chiaro e non ambiguo: talvolta la dinamica della funzione d’onda è data dall’equazione di Schrödinger e talvolta la dinamica delle variabili macroscopiche è quella fissata dalle leggi della meccanica classica e dell’elettromagnetismo classico; ma quando le variabili classiche interagiscono con le variabili quantistiche – le *variabili B* – le leggi dinamiche cambiano: ad esempio, la funzione d’onda non evolve più secondo l’equazione di Schrödinger – ma evolve secondo la cosiddetta regola di collasso della funzione d’onda– e le *variabili C* subiscono “salti” casuali, del tutto imprevedibili sulla base delle leggi classiche e questi salti sono regolati statisticamente dalle *variabili B*.

La difficoltà sollevata da Feynman per la visione di Bohr diventa: dov’è la linea di confine tra ciò che è classico e ciò che è quantistico? Quando possiamo trattare un oggetto come classico e quando dobbiamo invece trattarlo come quantistico? In altre parole, la distinzione tra *microscopico* e *macroscopico*, così come quella tra *mondo classico* e *mondo quantistico*, mancano di una definizione precisa e introducono un’ambiguità fondamentale che non può avere alcun posto in una qualunque

abbastanza accortezza verbale di modo che il trucco non si veda, il criterio d’associazione tra condizioni iniziale e

teoria che abbia la pretesa di precisione fisica. Questa ambiguità e la conseguente difficoltà a comprendere come la dualità tra mondo classico e mondo quantistico possa essere compatibile con il fatto che le mele e le sedie consistano di elettroni e di altre particelle sono alla base della “filosofia della complementarità” di cui Bohr fu propugnatore; si tratta di una filosofia accondiscendente con le contraddizioni che si compiace dell’utilizzo di concetti ambigui.

Ma insomma – verrebbe da dire – se si deve in ogni caso pagare il prezzo dell’incompletezza, perché si dovrebbe anche pagare il sovrapprezzo della violazione delle regole della logica ordinaria? In altre parole, perché invece della coppia (B, C) , non si preferisce un completamento della meccanica quantistica nel senso di Einstein, cioè un completamento in cui la coppia (B, C) è sostituita dalla coppia (A, B) ?

L’ovvia risposta è che costruire teorie è un lavoro che richiede fatica e immaginazione. La scoperta di nuove teorie – teorie di variabili ben più primitive delle variabili del formalismo quantistico usuale – non è un lavoro così facile quanto interpretare filosoficamente un formalismo già esistente, che è quello che, in effetti, Bohr finisce per fare. La risposta di Bohr è che la ricerca delle *variabili A* è vana perché non è possibile andare oltre lo schema interpretativo della meccanica quantistica basato sulle *variabili C*; ma la ragione di questa supposta impossibilità, una volta che si è preso atto dell’inutilità dei teoremi limitativi sulle variabili nascoste, si riduce alla seguente petizione di principio: “perché le nostre capacità cognitive non ci permettono di rappresentare con immagini chiare e non contraddittorie quello che accade nel mondo microscopico”. Secondo questo principio le leggi fisiche non hanno più a che fare con la questione di com’è fatto il mondo, ma con la nostra possibilità di conoscerlo, che è intrinsecamente limitata: la meccanica quantistica di Copenaghen rifiuta in linea di principio di fornire una storia consistente a quello che accade agli oggetti microscopici.

L'insistenza di Einstein sulla possibilità di arrivare ad una formulazione completa *non ambigua e indipendente dall'osservatore* sembrerebbe, in effetti, l'atteggiamento più naturale se confrontata con le categoriche asserzioni di Bohr riguardanti l'impossibilità, in linea di principio, di una descrizione di questo tipo. Ciò nonostante, la maggioranza dei fisici ritiene che questo dibattito tra Einstein e Bohr, durato decenni, sia stato vinto da Bohr e che questo dibattito sia per lo più filosofico e non suscettibile di alcuna soluzione scientifica.

Tuttavia, oggi possiamo affermare con certezza che quel dibattito è stato risolto, e, in effetti, a favore di Einstein: quello che Einstein desiderava e che Bohr riteneva impossibile, in effetti, esiste. Esiste una meccanica quantistica che fornisce una "descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica", vale a dire, una meccanica quantistica basata sulle variabili primitive A . Anzi, oggi abbiamo diverse teorie di questo tipo. Abbiamo la meccanica bohmiana, anche nota come teoria d'onda pilota di de Broglie-Bohm, che esiste dal 1927, quando fu per la prima volta presentata da Louis de Broglie al congresso Solvay che si tenne in quell'anno, e che fu indipendentemente riscoperta nel 1952, l'anno in cui David Bohm pubblicò due lavori intitolati *A Suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables*, cioè una proposta di interpretazione della teoria quantistica in termini di quelle variabili che sarebbero precluse da quei teoremi limitativi di "non esistenza delle variabili nascoste" a cui abbiamo prima accennato.

In meccanica bohmiana, un sistema di particelle è descritto in parte dalla sua funzione dell'onda che evolve, come di consueto, secondo l'equazione di Schrödinger. Tuttavia, la funzione dell'onda fornisce soltanto una descrizione parziale del sistema. Questa descrizione è completata dalla specificazione delle posizioni reali delle particelle che costituiscono quindi le *variabili A* di questa teoria. La loro evoluzione è regolata da una equazione di guida che esprime le velocità delle particelle in termini della funzione d'onda. Perciò in meccanica bohmiana la configurazione di un

sistema di particelle evolve secondo un movimento che è in qualche modo governato dalla funzione d'onda. In questa teoria il gatto è sempre o vivo o morto, essendo questa sua condizione determinata dalle posizioni delle particelle che lo costituiscono e che hanno sempre, ad ogni istante, valori ben definiti.

Nel 1986 i fisici italiani Gian Carlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber ebbero successo nello sviluppare un'altra teoria di questo tipo, la cosiddetta "teoria GRW". In questa teoria la linea di confine tra mondo classico e mondo quantistico è definita da una nuova costante di natura. Contrariamente a quel che accade nella meccanica quantistica di Bohr, in questa teoria il confine tra mondo classico e mondo quantistico è suscettibile di indagine sperimentale, e sebbene il presente sviluppo tecnologico non permetta ancora di portare a termine esperimenti cruciali, la teoria è in linea di principio falsificabile, perché prevede che su una ben definita scala l'interferenza quantistica sia soppressa. Secondo la proposta di Ghirardi, le *variabili A* di questa teoria descrivono un campo sullo spazio fisico che può essere identificato, su scala macroscopica, con l'usuale densità di massa degli oggetti fisici. La descrizione che ne deriva, in termini di come la massa degli oggetti si distribuisce nello spazio fisico in accordo con i valori assunti da questo campo, è in completo accordo con la nostra esperienza quotidiana, e include gatti, contatori Geiger e nastri di carta; secondo questa descrizione, il gatto non risulta essere un agglomerato di particelle, ma corrisponde ad una data configurazione del campo che, su scala macroscopica, ne disegna le sembianze familiari.¹⁰

Quando queste teorie sono analizzate attentamente, emerge una lezione filosofica molto importante: nella struttura di queste teorie si possono scorgere alcune caratteristiche molto generali che sono, in effetti, comuni a tutte le "teorie quantistiche senza l'osservatore", cioè a tutte le formulazioni precise e serie della meccanica quantistica che non sono basate su nozioni vaghe e imprecise come "misura" o "osservatore". Una caratteristica essenziale di queste teorie è la loro

¹⁰ Per una trattazione non tecnica di meccanica bohiana e teoria GRW, incluse le indicazioni bibliografiche ai lavori originali si veda il recente volume *La natura delle cose* di Allori & al. nonché il libro *Un occhiata alle carte di*

ontologia primitiva – le particelle in meccanica bohiana o la densità di massa nella teoria GRW –, vale a dire ciò di cui la teoria tratta a livello fondamentale e che è matematicamente rappresentato dalle *variabili A*. Per un approfondimento di quest'analisi si veda il recente lavoro di Allori & al. (2006).

Meccanica bohiana e teoria GRW sono teorie che alla fantastica precisione numerica della meccanica quantistica convenzionale fanno corrispondere un'altrettanta precisione concettuale nella formulazione dei loro assiomi. Si tratta di teorie che, per così dire, chiariscono l'*ABC* di una formulazione completa della meccanica quantistica. In queste teorie le *variabili A* rappresentano l'*ontologia primitiva*, vale a dire i mattoni da costruzione di tutto ciò che esiste – dalle particelle subatomiche agli atomi e alle molecole, fino ai tavoli e alle sedie. Le *variabili B* governano la statistica e la dinamica delle *variabili A*, e, infine, le *variabili C* descrivono la realtà macroscopica che ci è familiare (nastri di carta, contatori Geiger, gatti, tavole, sedie, etc). Tuttavia, contrariamente a quello che accade nell'interpretazione di Copenaghen, le *variabili C* sono interamente determinate dalle *variabili A*, sia nella fisica che nella metafisica – sopravvengono sulle *variabili A*, come si direbbe nel gergo filosofico corrente. Le leggi di natura espresse in termini delle *variabili C* – le leggi della termodinamica, per esempio – non sono altro che una manifestazione macroscopica delle leggi fondamentali espresse in termini delle *variabili B*.

Ciascuna di queste teorie può essere vista come una realizzazione dell'intuizione di Einstein che la funzione d'onda non fornisce una rappresentazione completa della realtà fisica.¹¹ Nonostante questo, e nonostante la chiarezza con cui Einstein espresse le sue critiche all'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, circolano ancora fraintendimenti del pensiero di Einstein che non trovano alcun riscontro in quello che Einstein effettivamente scrisse; una summa involontaria di

Dio di Ghirardi.

¹¹ Va comunque ricordato che Einstein non trovò di suo gradimento la teoria di Bohm (la teoria GRW, ovviamente, non esisteva ancora): la trovava “troppo a buon mercato”, per quanto fosse – come Max Born osservò – “abbastanza in linea con le sue proprie idee” (Bell, 1987, p. 163).

quasi tutti questi fraintendimenti ed errori compare, ad esempio, in un recente articolo del fisico austriaco Anton Zeilinger.

A volte si sostiene che la meccanica quantistica sia stata una novità concettuale così radicale e rivoluzionaria da poter essere compresa soltanto da giovani menti prive di pregiudizi classici, ma al di fuori della portata del “vecchio” Einstein, la cui mente era ancorata alle categorie concettuali della cosiddetta fisica classica. Ci piacerebbe sapere quale sia il pregiudizio classico che ha guidato il ragionamento di Einstein che abbiamo sopra riportato. Einstein, partendo dalla domanda se sia ragionevole, nel quadro della nostra costruzione teorica complessiva, supporre l'esistenza di un punto temporale ben definito della trasformazione di un singolo atomo, arriva alla tesi di incompletezza attraverso un'analisi concettualmente accurata in cui vengono scrupolosamente analizzate e vagliate tutte le implicazioni. In tutto questo non scorgiamo alcun pregiudizio classico – a meno non si voglia sostenere che l'uso della logica e della ragione sia da ritenersi tale.

Inoltre, riferendosi alla famosa frase di Einstein “Dio non gioca a dadi”, c'è chi ritiene che il pregiudizio del *determinismo* abbia impedito ad Einstein di comprendere la vera novità della meccanica quantistica. Ma anche di questo pregiudizio non c'è traccia nel ragionamento che abbiamo ripercorso fino a qui. Non solo Einstein afferma che il quadro concettuale che assume l'incompletezza della funzione d'onda e quello basato sull'ipotesi di completezza sono entrambi *a priori* concepibili, ma, per quel che riguarda il secondo, Einstein non afferma affatto che dall'incompletezza della funzione d'onda si debba inferire che l'istante di tempo di decadimento sia *determinato* dalle condizioni iniziali dell'atomo (o dell'universo). Einstein si limita ad affermare che, in un quadro concettuale in cui la funzione d'onda non fornisce una rappresentazione del singolo sistema individuale, *ha senso parlare di istante di tempo definito in cui il singolo atomo radioattivo decade*, senza per questo sposare la causa del determinismo: un meccanismo *deterministico* di decadimento (come peraltro accade in meccanica bohmiana) o un meccanismo *indeterministico* (come

nella teoria GRW) sono entrambi compatibili con l'idea che la funzione d'onda non fornisce una rappresentazione completa del singolo sistema.

Einstein, inoltre, è stato sovente accusato, di avere avuto pregiudizi metafisici. Se da un lato verrebbe immediatamente da rispondere “e chi non li ha?”, dall'altro bisognerebbe riconoscere che l'atteggiamento di Einstein verso la metafisica sia stato molto pragmatico, ben più flessibile e problematico di quello dei suoi critici; scriveva infatti:

Il “reale” in fisica dev'essere inteso come un tipo di programma, che però non siamo costretti ad abbracciare a priori. Probabilmente, non c'è nessuno che voglia tentare di rinunciare a questo programma nel campo del “macroscopico” (posizione del segno sul nastro di carta “reale”). Ma il “macroscopico” e il “microscopico” sono così connessi fra loro che rinunciare a questo programma nel solo “microscopico” sembra impossibile a farsi.

E, in una lettera a Schrödinger, datata 1935, affermava:

La vera difficoltà sta nel fatto che la fisica è un tipo di metafisica; la fisica descrive “la realtà”. Ma noi non sappiamo cosa sia “la realtà”, se non attraverso la descrizione fisica che ne diamo di essa.

Ringraziamenti. Gli autori ringraziano Federico Laudisa per una lettura attenta del manoscritto e utili suggerimenti.

Bibliografia

-
- Allori V., Dorato M., Laudisa F., Zanghì N.: *La natura delle cose, introduzione ai fondamenti e alla filosofia della fisica*. Carocci, Roma (2005)
 - Allori V., Goldstein S., Tumula T., Zanghì N.: *On the Common Structure of Bohmian Mechanics and the Ghirardi-Rimini-Weber Theory*. quant-ph/0603027 (2006)
 - Bell J. S.: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge (1987)
 - Bohm D.: *A Suggested Interpretation in Terms of “Hidden Variables”*: Part I and Part II, *Physical Review* 85: 166-179 and 180-193 (1952)
 - de Broglie L. in Solvay Congress (1927), *Electrons et Photons: Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de l'Institut International de Physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars (1928)
 - Einstein E.: *Autobiografia Scientifica*, Boringhieri, Torino (1979).
 - Einstein E., Podolsky B., Rosen N.: *Can Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete?*, *Physical Review* 47: 777-780 (1935).
 - Feynman R.: *Feynman Lectures on Gravitation*, Perseus, Cambridge, MA (2002)
 - Ghirardi G. C. Un'occhiata alle carte di Dio, *Il Saggiatore*, Milano (2001)
 - Ghirardi G.C., Rimini A., Weber T.: *Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems*, *Physical Review D* 34: 470-491 (1986)
 - Landau L. D., Lifschitz E. M.: *Meccanica quantistica. Teoria non relativistica*, Editori Riuniti, Roma (1982)

- Schrödinger E.: *Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, *Naturwissenschaften* **23**, 807-812 (1935); trad. ingl. di J. D. Trimmer: *The Present Situation in Quantum Mechanics: a Translation of Schrödinger's "Cat Paradox" Paper*, in: "Wheeler, W. H. Zurek: *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton (1983)"
- Zeilinger, A.: *The message of the quantum*. *Nature* 438: 743 (2005)