



Jean Bricmont

**CONTRO
LA FILOSOFIA
DELLA
MECCANICA
QUANTISTICA**

petite plaisance

In copertina:
Campo relazionale.

JEAN BRICMONT,

Contro la filosofia della meccanica quantistica.

Traduzione di Fabio Acerbi del lavoro originale: J. Bricmont, *Contre la philosophie de la mécanique quantique*, in *Les sciences et la philosophie. Quatorze essais de rapprochement*, «Science - Histoire - Philosophie», Publication de l'Institut Interdisciplinaire d'Epistémologiques, Paris, Vrin 1995, pp. 131-179. J. Bricmont, Unità di fisica teorica e fisica matematica - Université catholique de Louvain.

Il saggio è già stato pubblicato in *Koinè*, Periodico culturale, Anno X, nn. 1-2, Gennaio-Giugno 2002, Editrice Petite Plaisance, Pistoia, pp. 153-195.

ISBN 978-88-7588-217-4

Copyright
© 2018



Associazione culturale senza fini di lucro

Via di Valdibrana 311 – 51100 Pistoia

Tel.: 0573-480013

C. c. postale 1000728608

www.petiteplaisance.it

e-mail: info@petiteplaisance.it

*Chi non spera quello
che non sembra sperabile
non potrà scoprirne la realtà,
poiché lo avrà fatto diventare,
con il suo non sperarlo,
qualcosa che non può essere trovato
e a cui non porta nessuna strada.*

ERACLITO

CONTRO LA FILOSOFIA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Jean Bricmont

La filosofia tranquillizzante di Heisenberg e Bohr – o si tratta di una religione? – è strutturata così abilmente da permettere ai veri credenti di riposarsi tra guanciali talmente soffici che non è facile svegliarli.

A. Einstein

RIASSUNTO

La "filosofia della meccanica quantistica", o almeno ciò che è stato a lungo presentato come tale, non ha fatto altro che occultare problemi interni alla teoria fisica. Non solo: essa ha anche reso difficile un effettivo apprezzamento del teorema di Bell. Dopo aver introdotto il problema della misura e la non località, passeremo in rassegna vari tentativi di soluzione che sono state proposti per elaborare una versione (o un'alternativa) completamente coerente della meccanica quantistica.

1 – INTRODUZIONE

Quando ho studiato la meccanica quantistica ho imparato che l'oggetto più fondamentale di questa teoria, la funzione d'onda, non descriveva il sistema fisico in esame, bensì la conoscenza che ne avevamo.¹ In ciò risiedevano l'originalità e la stranezza radicale della meccanica quantistica. Ma cosa significava tutto ciò? Di certo, non quello che si poteva credere ingenuamente: non si studiavano certo i processi interni al cervello umano che sono associati a ciò che chiamiamo "conoscenza". In fin dei conti, si trattava forse di qualcosa di banale: non possiamo far altro che studiare oggetti o proprietà accessibili alla conoscenza umana; se esistono realtà

Traduzione di FABIO ACERBI del lavoro originale: J. Bricmont, *Contre la philosophie de la mécanique quantique*, in *Les sciences et la philosophie. Quatorze essais de rapprochement*, Paris, Vrin 1995, pp. 131-179.
J. BRICMONT, Unità di fisica teorica e fisica matematica – Université catholique de Louvain.

¹ Per esempio, Heisenberg scrive: «La concezione della realtà oggettiva delle particelle elementari si è dunque stranamente dissolta, non nella nebbia di una nuova concezione della realtà oscura o mal compresa, ma nella chiarezza trasparente di una matematica che non rappresenta più il comportamento della particella elementare

radicalmente inaccessibili alla nostra percezione o alla nostra conoscenza non le studiamo per definizione. Ma allora, dove stava la novità? Capitava di spingersi più in profondità; si imparava allora che la meccanica quantistica non aveva fatto che giustificare un punto di vista filosofico precedente, risalente almeno a Kant, Hume e Mach e sviluppato dai positivisti moderni.²

Strano: ecco una teoria fisica che ci costringe ad adottare una prospettiva filosofica specifica, senza la quale non è possibile comprenderla.³ Mermin cita una formulazione estremizzata di quest'idea ([42], p. 115): «*La dottrina secondo cui il mondo è fatto di oggetti la cui esistenza è indipendente dalla coscienza umana si trova essere in conflitto con la meccanica quantistica e con fatti sperimentali ben stabiliti*» ([50]). Effettivamente, la scienza suppone tradizionalmente che si possa separare il "soggetto" umano dall'oggetto studiato. Ma la meccanica quantistica aveva imposto una svolta: la filosofia "realista" (a volte completata con la parola "metafisica" o "ingenua") era divenuta non più difendibile. Questa filosofia aveva avuto i suoi momenti di gloria nel XVIII e nel XIX secolo, all'apogeo del materialismo scientifico trionfante. Einstein era ancora legato a quella visione delle cose. È per questa ragione che non aveva mai potuto ammettere la meccanica quantistica. Ma quest'ultima ci era imposta dai fatti.

Personalmente, neanch'io mi trovavo disposto ad accettare un tale punto di vista. Mi sembrava che ci fosse qualche cosa di profondamente sbagliato nella posizione positivista, ma per delle ragioni puramente filosofiche, e non vedevo come una teoria scientifica, ed ancor meno "i fatti", potessero cambiare qualcosa in tutta la faccenda. Non solo, vedevo che Einstein, Schrödinger e qualche volta de Broglie avevano sollevato obiezioni all'interpretazione dominante della meccanica quantistica. Ma, mi si diceva, costoro appartenevano ad un'altra generazione, e non avevano mai potuto ammettere la nuova visione del mondo e della scienza elaborata da Bohr, Heisenberg e Pauli. Tuttavia, ogni teoria scientifica essendo destinata a perire, almeno così pare, non potrebbe darsi che un giorno un'altra teoria, più perfezionata, comportasse una revisione delle nostre concezioni filo-

ma la conoscenza che ne abbiamo» ([34], p. 18). Dal canto suo Bohr dichiarava: «*Non c'è un mondo quantistico. C'è solo una descrizione quantistica astratta. È sbagliato pensare che lo scopo della fisica sia di sapere che cos'è la natura. La fisica si occupa di ciò che possiamo dire della natura*» (si veda [7], p. 142). E Peierls aggiunge: «*Vedete, la descrizione della meccanica quantistica si fa in termini di conoscenza. E la conoscenza necessita di qualcuno che conosca*» ([17], p. 174). Se ci si sposta sulla divulgazione scientifica si arriva talvolta a questo: «*I fisici si domandano se un albero – o qualsiasi altra cosa – debba essere osservato per poter esistere realmente*» ([19], citato in [42], p. 115). Visto quello che dicono gli scienziati, è difficile rimproverare a qualcun altro, per esempio a Claude Levi-Strauss, di fare le seguenti affermazioni: «*Fino al diciannovesimo secolo almeno, la fortuna delle scienze 'dure' è stata che i loro oggetti vennero considerati meno complessi dei mezzi di cui dispone la mente per studiarli. La fisica quantistica ci sta insegnando che ciò non è più vero e che in questo rispetto prende corpo una convergenza tra le differenti scienze (o pretese tali). E così, almeno mi pare, che occorre intendere le affermazioni di Niels Bohr*» [37].

² Quando utilizzo il termine "positivismo" è a questa tradizione che faccio riferimento, non ad Auguste Comte.

³ Ciò contraddiceva un'altra idea, altrettanto diffusa, secondo cui la scienza poteva perfettamente fare a meno della filosofia. I due asserti potevano essere riconciliati facendo apparire il positivismo non più come una filosofia specifica, ma come una parte integrante dell'argomentare scientifico.

sofiche? Ma anche questa speranza era vana, von Neumann avendo, almeno così sembrava, dimostrato che ogni teoria "realista" sarebbe entrata necessariamente in conflitto con le previsioni sperimentali. I fatti stessi imponevano dunque una visione della scienza radicalmente nuova.

Eppure, Schrödinger ed il suo gatto mi sembravano aver messo in rilievo una difficoltà concettuale fondamentale della meccanica quantistica. Mi sembrava si trattasse di un problema ben più importante della tradizionale questione del determinismo, nella quale si volevano rinchiudere i "dissidenti". D'altro canto, non riuscivo bene a vedere quale partito trarre dalle obiezioni di Einstein: con Podolsky e Rosen, egli aveva tentato di mostrare che la meccanica quantistica era manifestamente una descrizione incompleta della realtà. Ma tutti erano d'accordo nel ritenere che Bohr avesse fatto fronte in modo magistrale a queste obiezioni. C'era anche un certo Bohm che, sulle tracce di Louis de Broglie, aveva cercato di proporre un'"interpretazione" della meccanica quantistica in termini di "variabili nascoste". Ma anche questo tentativo si era rivelato un fallimento. In più, un certo Bell aveva mostrato in maniera incontrovertibile che ogni tentativo d'interpretazione in termini di "variabili nascoste" doveva, se non voleva contraddire le previsioni della meccanica quantistica, essere non locale, il che era chiaramente inaccettabile.

Non vedendo vie di uscita ai problemi mi sono occupato di altre cose, restando comunque insoddisfatto, come molti della mia generazione. Da qualche anno sembra però essersi risvegliato l'interesse per le questioni relative ai fondamenti della meccanica quantistica. Le differenti versioni di quella che viene chiamata "*l'interpretazione di Copenhagen*" sembrano raccogliere consensi sempre meno unanimi.⁴ Uno degli scopi di questo articolo è quello di spiegare come vi sia un problema effettivo nella meccanica quantistica in quanto teoria fisica. Il problema è sottile e non ha conseguenze pratiche – ma sussiste. Occorre però evitare di attribuire a questo problema un'importanza eccessiva e, in ogni caso, non precipitare nella deriva irrazionalista in cui ci si imbatte talvolta ai margini del dibattito sulla meccanica quantistica. Peraltro, intendo mostrare che il problema è stato storicamente trasfigurato pretendendo che la soluzione risiedesse nell'adozione di uno specifico punto di vista filosofico. Intendo anche spiegare perché un certo numero di idee trasmesseci, come quelle che avevo imparato quando ero studente (sul teorema di Bell, sull'impossibilità di teorie a variabili nascoste), siano erranee.

Comincerò con una breve discussione filosofica sull'opposizione tra realismo e positivismo (sezione 2). Può sembrare strano iniziare con una

⁴ Ovviamente, l'immensa maggioranza dei fisici si fa forte di questa interpretazione. Tuttavia, tra coloro che scrivono libri o articoli sulla meccanica quantistica si avverte un crescente malcontento. A mio avviso l'opera di Bell [7], che è ancora troppo poco conosciuta, ha giuocato un ruolo notevole in questa lenta presa di coscienza. A parte quest'opera fondamentale possiamo citare, ad esempio, [38, 1, 2, 20] come testi che criticano, almeno implicitamente, i dogmi della scuola di Copenhagen. Si danno anche sforzi recenti che tentano di migliorare la presentazione del punto di vista di Copenhagen, senza per questo rompere con tale tradizione [33, 44, 28].

discussione filosofica.⁵ Mi sembra tuttavia indispensabile prendere le mosse da una chiarificazione di queste nozioni, spiegando in particolare ciò che il realismo filosofico non è, a tal punto la confusione su tale questione perverte ogni discussione sui fondamenti della meccanica quantistica.

Indicherò poi quale sia esattamente il problema della meccanica quantistica (sezione 3), e cercherò di mostrare che tale problema non è legato ad una posizione filosofica specifica. Non solo, l'idea in base alla quale la soluzione del problema consista nell'adottare una posizione filosofica positivista ha reso difficile la comprensione dell'aspetto più radicalmente nuovo della meccanica quantistica, cioè il suo carattere non locale, messo in evidenza da Einstein, Podolsky, Rosen e da Bell (sezione 4). Infine, indicherò brevemente le soluzioni possibili esistenti (sezione 5). Sebbene nessuna di esse sia interamente soddisfacente, alcune sono molto più interessanti di quanto si affermi correntemente (spesso senza esaminarle in dettaglio), ed occorre certamente studiarle se si vuole arrivare un giorno ad una teoria quantistica totalmente coerente e priva di ambiguità.

Devo però sottolineare che pressoché niente di ciò che si trova in quest'articolo è originale (eccetto, come si dice di solito, gli errori). In effetti, i lavori di Bell ([7, 5]) contengono, anche se spesso in maniera molto stringata, quasi tutto ciò che può essere detto oggi sui problemi della meccanica quantistica. Uno degli obiettivi principali di questo articolo è quello di incoraggiare il lettore a studiare gli scritti di Bell. Per facilitare la lettura dell'articolo ho spostato tutta la parte dell'esposizione che necessita di equazioni nelle appendici da I a III, mentre l'ultima appendice è dedicata ad alcune tracce bibliografiche.

⁵ E controproducente: i fisici hanno una profonda diffidenza, in parte legittima, per i "pregiudizi" filosofici. Ma il mio scopo è di mostrare che i peggiori pregiudizi non stanno necessariamente dalla parte del realismo. Del resto, non essendo un filosofo, sono cosciente di utilizzare una terminologia un po' imprecisa per designare le differenti correnti di pensiero. Quello che mi interessa è il modo in cui tali correnti si riflettono nella posizione adottata dagli scienziati di fronte alla loro prassi.

È interessante osservare che i solipsisti e i positivisti, quando hanno figli, si fanno un'assicurazione sulla vita.

J. S. Bell

Che cos'è la conoscenza scientifica? Parlando a grandi linee, ci sono due concezioni contrapposte a questo riguardo. Per la prima concezione, realista, noi conosciamo, nell'essenziale, la natura così come è. Evidentemente, tutti sanno che il mondo non è necessariamente così come ci appare. Non ammettere ciò equivarrebbe a dar prova di realismo ingenuo. Osserviamo di sfuggita che persone come Einstein, che sono spesso accusate di aver dato prova di un eccesso di realismo, ci hanno trasmesso una concezione del mondo abbastanza lontana dalle apparenze (pensiamo al paradosso dei gemelli in relatività!). Il realismo consiste nel ritenere che si possano elaborare teorie che ci diano una conoscenza oggettiva del mondo per mezzo del confronto sistematico di teoria ed esperimento.

È però possibile assumere una posizione scettica nei confronti di questa prima concezione. Da dove ricaviamo che le nostre conoscenze si rapportino al mondo così come è? Dopo tutto, ogni genere di relazione tra la nostra mente ed il mondo passa necessariamente per i nostri sensi. Chi ci dice che questi ultimi non ci ingannino? Potrebbe essere che fossimo impaniati in un sogno e niente di ciò che crediamo percepire esistesse realmente. Tutte le rappresentazioni mentali possono essere illusioni interne alla mia mente. È la posizione solipsista. Mi chiedo se qualcuno abbia sinceramente creduto in questa dottrina, o se anche il vescovo Berkeley non facesse leva su questa posizione che come argomento contro il materialismo. Tuttavia, essa è certamente inconfutabile. Se qualcuno si ostina a negare la realtà del mondo esterno alla sua coscienza, e vuole intestardirsi a pensare di essere un clavicembalo che suona da solo, non c'è alcun modo per convincerlo del suo errore.

Un'altra posizione, più complessa e diffusa, consiste nell'ammettere l'esistenza del mondo esterno ma nel dubitare della nostra capacità di conoscerlo oggettivamente. Un tale scetticismo può prendere varie forme. In linea generale, non si dubita di tutte le nostre conoscenze; ma si può decidere di limitarsi ad avere fiducia nei dati immediati dei sensi e di ridurre la scienza allo stabilire relazioni tra questi dati. In una serie di interviste fatte per la BBC a proposito della meccanica quantistica, il giornalista riassume bene questa posizione: «L'idea che il mondo 'esista realmente' e che le nostre teorie siano in qualche modo 'vere' o 'false' oppure approssimazioni di questa realtà, beh, penso che quest'idea non sia particolarmente utile». Rispondeva a Bell, che gli aveva appena detto: «Credo assolutamente che il mondo ci fosse prima di me e che ci sarà dopo di me, e penso che lei ne faccia parte! E credo che la maggioranza dei fisici assuma questo punto di vista quando è messa alle strette

dai filosofi» ([17], p. 50).⁶ Si può sempre dire che si tratta di una "credenza", nel senso che non c'è modo di dimostrarla assolutamente vera. Ma resta il fatto che la maggioranza dei fisici ha guadato questo Rubicone filosofico e fa propria questa credenza. È questo il motivo per cui il problema di sapere ciò che fondi ulteriormente tale "credenza" viene di preferenza lasciato ai filosofi.

Non solo gli scienziati credono nell'esistenza del mondo esterno, ma pensano anche che l'immagine che ce ne fornisce la scienza sia globalmente corretta. Si può dubitare di una specifica teoria sull'estinzione dei dinosauri, ma ci sono pochi scienziati che avrebbero dubbi sul fatto che le proprietà dei corpi si spieghino per mezzo della loro costituzione atomica e molecolare, o che la teoria dell'evoluzione renda conto, nelle sue grandi linee, della diversità delle specie. Occorre dire che, dati gli immensi successi teorici della scienza, è difficile prenderla per un'illusione qualsiasi, o farne nella sua essenza una costruzione sociale. Per non portare che un esempio, possiamo prendere due orologi estremamente precisi e sincronizzati e farli viaggiare in versi opposti intorno alla terra. Si constata allora un leggero difetto di sincronizzazione, dell'ordine di un millimiliardesimo di secondo. Tuttavia, questo sfasamento è misurabile e, il che è straordinario, può essere previsto con precisione sufficientemente elevata per mezzo della teoria della relatività [9]. Se si dà un'occhiata al calcolo, si vede che è fatto, nella totale ignoranza del dispositivo sperimentale utilizzato, in maniera da non ammettere alcun "trucco" atto ad aggiustare i conti in modo che si accordino con l'esperimento. Quando ci si trova di fronte ad un gran numero di successi siffatti, ad esempio in fisica delle alte energie, è difficile non credere all'oggettività delle nostre conoscenze scientifiche.⁷

Ma tutto ciò ci allontana dal positivismo. Come definirlo esattamente? Se si mettono da parte le posizioni estreme (solipsismo, scetticismo radicale), che sono coerenti ed inconfutabili ma che nessuno sostiene veramente, non ne esiste alcuna definizione chiara. Si tratta di un insieme di idee che tenta di mettere l'osservazione, le misure, i dati immediati dei sensi alla base della prassi scientifica. Si cerca di sbarazzarsi di ogni "metafisica". Si tratta certamente di una reazione sana di fronte a tutti i discorsi a priori sulla "natura delle cose". Gli esperimenti costituiscono in effetti il solo mezzo che abbiamo per mettere alla prova le nostre idee sulla natura. Ma la scienza non si limita a registrare fatti. D'altronde, non si riesce a ricostruire l'insieme del discorso scientifico partendo unicamente dai dati immediati dei sensi.⁸ Heisenberg racconta come Einstein gli spiegava questo fatto:

⁶ Bohm è altrettanto categorico: quando il giornalista gli chiede se pensa che il mondo esterno esista indipendentemente dalla nostra esistenza e dalle nostre osservazioni, risponde: «Tutti i fisici lo credono» ([17], p. 119).

⁷ Si veda l'eccellente libro di Weinberg [55] per una critica al relativismo storico-sociologico ed al positivismo.

⁸ La presa di coscienza di questa situazione è probabilmente responsabile del fatto che in filosofia il positivismo sembra passato di moda.

«[Einstein] pensava che ogni teoria contenesse di fatto quantità non osservabili. Il principio secondo cui non si deve fare appello che a quantità osservabili non può essere sostenuto fino in fondo in maniera consistente. E quando gli obiettavo che facevo appello al genere di filosofia che lui stesso aveva posto alla base della teoria della relatività, mi rispondeva semplicemente: 'Ho forse utilizzato, anche in testi scritti, una tale filosofia in passato, ma si tratta in ogni caso di un nonsenso'» (citato in [55], cap. 7).

Per rendere un po' più precisa la differenza tra realismo e positivismo prendiamo un esempio: quando si dice che i dinosauri sono esistiti si intende esattamente ciò che questa frase vuol dire: x milioni di anni fa la terra era popolata di animali che assomigliavano approssimativamente a quelle gentili bestiole che invadono i nostri schermi. È importante capire bene la distinzione, che è particolarmente chiara quando ci riferiamo alla preistoria, tra il significato di un asserto (che si rapporta a ciò che il mondo è, o era, realmente) ed i metodi utilizzati per verificarne la validità. Dopo tutto, non abbiamo accesso che a scheletri di dinosauri per poter compiere i nostri studi. Ci è assolutamente impossibile ritornare indietro per "andare a vedere" ciò che succedeva realmente in quell'epoca. Tutti, proprio tutti gli asserti che si rapportano a quell'epoca, o al passato in generale, sono "teorie" che trascendono i dati immediati dei sensi. Esse non ci danno neanche "ossa di dinosauro". Esse ci danno oggetti che noi interpretiamo come ossa di creature vissute x milioni di anni fa. Dire che si tratta di ossa di dinosauro fa già parte della teoria. Tuttavia, è proprio questo che intendiamo quando ne parliamo.

Un altro ostacolo fondamentale sulla strada dei positivisti consiste nell'impossibilità di definire con precisione che cosa siano i dati immediati dei sensi. A partire da quando si può ritenere di essere di fronte ad una teoria, e non più ad un'osservazione pura? Anche considerando oggetti della vita quotidiana occorre tener presente che si ha una "teoria" (spontanea, implicita) sul mondo. Dire che c'è un tavolo se lo si vede è fare l'ipotesi teorica che ciò che è la causa (almeno in parte) della nostra "sensazione" (il vedere il tavolo) è proprio l'esistenza di un tavolo al di fuori di me e della mia coscienza. Per i dinosauri la situazione è molto peggiore: la stessa idea di preistoria è palesemente teorica (perché il mondo non è stato creato poco fa, con tutti i reperti già sul posto?), e tutti gli asserti fatti a questo proposito sono "teorie" in cui vengono mescolate "percezioni" oppure "osservazioni" ed "ipotesi".

O, come dice Bell:

«Il problema della misura e dell'osservatore è di sapere dove l'uno e l'altro comincia e finisce. Prendete i miei occhiali per esempio: se li tolgo, a quale distanza li devo porre perché facciano parte dell'ogget-

to piuttosto che dell'osservatore? Ci sono problemi simili a partire dalla retina fino al nervo ottico ed al cervello. Penso che quando si analizzi questo linguaggio in cui sono precipitati i fisici, cioè che la fisica concerne i risultati osservativi, ci si accorge che tutto ciò evapora e che non è stato detto niente di chiaro» ([17], p. 48).

Bisogna però mettere in rilievo ciò che il realismo non è: non afferma che la verità sia "assoluta" nel senso che avrebbe un fondamento assoluto (non si può confutare né il solipsismo né lo scetticismo), o che alla fine si debba necessariamente arrivare ad una teoria perfetta. Non afferma neanche che tutti i concetti introdotti nella teoria debbano necessariamente corrispondere a qualche cosa di reale. Pone bensì la domanda: "Che cosa esiste realmente?". Un secolo fa la domanda era: ci sono veramente gli atomi? O sono soltanto una maniera comoda per descrivere il mondo? Possiamo porre lo stesso genere di domande per i geni o per altre quantità che non sono necessariamente "osservabili" al momento in cui vengono introdotte. Ma porre questo genere di domande, chiedere alla fisica di definire l'ontologia, fa progredire la ricerca, mentre dichiarare a priori che si tratta di questioni "metafisiche" (la posizione di Mach sugli atomi) non fa che bloccarla.⁹ Il realismo non consiste neanche nel credere che sia impossibile che la mente umana incontri un giorno difficoltà insormontabili nel suo sforzo di comprensione oggettiva del mondo. Dopo tutto, il cervello umano è il prodotto di un'evoluzione nel corso della quale la capacità genetica di comprendere scientificamente il mondo procurava un vantaggio selettivo piuttosto limitato. L'essenziale per un realista è che la veridicità delle nostre teorie dipenda principalmente non da ciò che succede nelle nostre teste, ma da ciò che il mondo è. E che una conoscenza parziale ma oggettiva del mondo sia possibile, e che lo scopo della scienza sia quello di avvicinarsi progressivamente ad una tale conoscenza.

⁹ Un altro esempio, legato alla meccanica quantistica, concerne il teorema di Bell (cfr. le sezioni 4 e 6).

3 – IL PROBLEMA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Per comprendere il problema occorre in primo luogo prendere le misure alle ambizioni della fisica. Queste ambizioni sono state descritte molto bene da Laplace:

«Un'intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati ad un'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi».

Ciò che occorre ritenere di questo testo non è tanto l'idea del determinismo universale quanto quella del riduzionismo universale.¹⁰ Lo scopo è avere una visione del mondo e delle sue leggi che sia completa in linea di principio. Ciò significa che deve rendere conto in linea di principio di tutti i fenomeni osservati. Evidentemente, il punto importante sta in cosa si intende con *"in linea di principio"*. Nessuno ha mai pensato di scrivere le equazioni che reggono l'universo e di dedurre tutti i fenomeni osservati. Per spiegare questi ultimi occorrerà sempre fare ricorso ad ipotesi particolari concernenti dati aspetti della realtà. Ma non si può fare a meno di porsi la domanda: manca qualcosa nelle nostre leggi, nel qual caso non c'è alcun motivo per non proseguire la ricerca, oppure esse sono complete?¹¹ Esempio: nella fisica classica non tutto può essere ricondotto alle leggi della meccanica; occorre introdurre almeno le leggi dell'elettromagnetismo. Altro esempio: il dibattito sul vitalismo nel XIX secolo, che giunse alla conclusione che la *"vita"* è riconducibile alla chimica-fisica. Nel suo libro sui calcolatori, la mente e le leggi della fisica [47], Penrose si domandava se queste leggi possano, in linea di principio, rendere conto del funzionamento della mente umana. Quale che sia l'opinione che abbiamo sulla sua risposta, è chiaro che la domanda è importante.

Il punto di vista riduzionista è anche un punto di vista unificatore, e si oppone all'atomizzazione della scienza. La scienza non è una lunga serie di *"modelli"* (fisici, chimici, biologici ecc.) senza legame reciproco e *"verificati sperimentalmente"* più o meno bene. Ogni *"modello"* deve essere, se possibile, ricondotto a leggi più fondamentali.

Nella fisica classica si pensava di possedere una descrizione completa del mondo: si era autorizzati a pensare che *"bastasse"* fissare le posizioni e le velocità di tutte le particelle costituenti l'universo, così come le forze che agiscono tra di esse; volendo essere più precisi, occorre anche introdurre la configurazioni dei campi elettromagnetici e gravitazionali. Perché ciò

¹⁰ Nel suo libro [55] Weinberg illustra e difende proprio bene una versione moderna del riduzionismo.

¹¹ Feynman poneva la domanda: *«L'equazione di Schrödinger contiene le rane, i compositori, la morale?»* [24].

sia una teoria del *"tutto"* occorre che questi dati determinino a mezzo di leggi (che qui sono deterministiche, ma che potrebbero essere stocastiche) i valori delle posizioni e delle velocità delle particelle per tutti i tempi posteriori. La meccanica quantistica sconvolge questo schema – ma offre poi un'alternativa, un'altra teoria, in linea di principio, del *"tutto"*? Se la questione non viene posta in questi termini, i problemi che si incontrano in meccanica quantistica non possono neanche essere formulati. In effetti, questa teoria potrebbe essere considerata come un *"modello"* che descrive certi costituenti elementari della materia in certe situazioni sperimentali, e, considerata da quest'angolazione, la teoria è inappuntabile. In tale prospettiva, si può per esempio postulare che la meccanica quantistica non si applichi ad aggregati atomici sufficientemente complicati, quali gli apparati di misura, e tutte le difficoltà scompaiono.

In linea di principio, la meccanica quantistica introduce un oggetto che è ritenuto rimpiazzare le posizioni e le velocità delle particelle, cioè la funzione d'onda del sistema. Ma dare la funzione d'onda del sistema determina il suo valore a tempi posteriori? La risposta a questa domanda è un po' complicata. Se ci si attiene ai principi applicati in pratica in meccanica quantistica (per ottenere quel notevole accordo con gli esperimenti), la risposta è no. In effetti, da un lato la funzione d'onda evolve secondo l'equazione di Schrödinger, che la determina sicuramente a tempi posteriori. Tuttavia, ed è qui che compare la difficoltà, quando si fa una *"misura"* si è obbligati a *"ridurre"* la funzione d'onda, cioè a farle seguire una *"legge"* d'evoluzione differente da quella data dall'equazione di Schrödinger (si veda l'appendice I per una formulazione matematica del problema). Se ciò non viene fatto, le previsioni ulteriori non saranno in accordo con gli esperimenti. (Riprendendo la notazione di Penrose [47], che spiega bene questo curioso dualismo, chiamiamo U la legge corrispondente all'equazione di Schrödinger ed R la riduzione.) Ma la riduzione non è un'operazione che sia determinata in qualche rispetto dai dati che caratterizzano il sistema prima della misura, cioè dalla sua funzione d'onda. Questo è d'altronde il motivo per cui la meccanica quantistica è una teoria intrinsecamente probabilistica. La funzione d'onda, che è ricavata come soluzione dell'equazione di Schrödinger, permette di calcolare, prima della misura, la probabilità dei differenti risultati ai quali conduce la riduzione dopo la misura. Ma il particolare risultato ottenuto è determinato unicamente dall'osservazione.

Si ritiene spesso che sia il carattere intrinsecamente aleatorio della meccanica quantistica a suscitare l'ostilità della maggioranza dei critici, in particolare di Einstein. È vero che egli ha dichiarato che Dio non gioca a dadi con l'Universo, ma è altrettanto chiaro che, nella sua essenza, la sua opposizione alla meccanica quantistica non veniva da questo aspetto irriducibilmente probabilistico. Per iniziare, occorre capire bene la differenza tra la probabilità quantistica e quella classica, per lo meno nell'interpretazione abituale. Prendiamo un dado: lo si può lanciare e, fino a che non si

guardi su quale faccia è caduto, si può descrivere quest'ultimo evento per mezzo di una distribuzione di probabilità, cioè una probabilità su sei per ciascuna faccia, almeno se il dado non è truccato. Esiste nondimeno una faccia su cui il dado è caduto. Nessuno dirà che la distribuzione di probabilità è la descrizione fisica completa del dado prima che lo si guardi. In questo caso non c'è alcuna difficoltà ad ammettere una differenza tra la conoscenza che abbiamo ad un momento dato e la situazione reale. Ma in meccanica quantistica ordinaria l'idea fondamentale è che non esista un valore determinato di checchessia prima della misura o dell'osservazione. Esiste una funzione d'onda e nient'altro. Questa funzione d'onda non dà la probabilità di nient'altro che dei risultati possibili della misura.¹² E dunque di nient'altro che della funzione d'onda che sarà prodotta, dopo la misura, dall'operazione *R*. Quindi l'operazione *R* non registra un valore (della misura) preesistente e forse sconosciuto, ma lo crea.

Il problema può essere riassunto così: che cosa distingue le situazioni fisiche in cui dobbiamo utilizzare l'operazione *U* da quelle in cui dobbiamo utilizzare *R*? E che cosa definisce fisicamente una misura? Processi siffatti si producono unicamente in laboratorio o possono avere luogo, spontaneamente, in natura? Come dice Bell, occorre aspettare che ci fossero esseri umani sulla terra perché l'operazione *R* facesse la sua comparsa? Oppure occorre attendere persone munite di un dottorato? [5]. È evidente che, da un punto di vista pratico, si sa che cos'è una misura. Ma la situazione è chiaramente insoddisfacente se vogliamo considerare la meccanica quantistica, in linea di principio, come una "teoria del tutto". Tutto il problema è qui. Ma è il solo problema. Non è facile da risolvere, ma occorre sottolineare che si hanno tutti i diritti di considerarlo poco importante in rapporto agli immensi successi della teoria quantistica, e che non giustifica in alcun modo le affermazioni eccessive sulla "scomparsa del reale" in cui ci si imbatte talvolta.¹³

Una prima posizione possibile consiste nel dare un senso puramente soggettivo alla funzione d'onda e di conseguenza all'operazione *R*. La funzione d'onda rappresenta la conoscenza che abbiamo del sistema. Non è dunque sorprendente che questa funzione cambi repentinamente quando si effettua una misura. Si apprende qualche cosa di più sul sistema (si tratta di un'interpretazione possibile delle frasi citate nella nota 2). Ma questa visione pone molti problemi: da un lato, secondo l'interpretazione ortodossa, non si impara veramente qualcosa sul sistema, ma lo si modifica, ovvero gli si impone una proprietà che prima non possedeva. D'altro can-

¹² In altri termini, non si ha a che fare con una probabilità di essere qualche cosa, bensì di essere misurato.

¹³ Ancora alcuni esempi, presi da opere divulgative: «Non c'è niente di reale, ci dice la meccanica quantistica, e non possiamo fare alcun commento su avvenimenti che si producono quando non li osserviamo» ([32] coperatina). O ancora: «Insomma sta per nascere una sorta di nuova religione, che abbiamo chiamato 'sincretismo quantistico', che riconduce tutto — materia e mente — ad un assoluto inconoscibile ma la cui esistenza potrebbe essere dedotta dagli aspetti straordinari della nuova fisica» ([45], p. 159). Forse, ma si tratta di far lavorare l'immaginazione!

to, ponendosi da questo punto di vista soggettivo, si deve forse ritenere che ogni sperimentatore, e potenzialmente ogni individuo, possieda la "sua" funzione d'onda, che è semplicemente un riassunto di tutte le sue "osservazioni" passate? Probabilmente nessuno arriverebbe fino a questo punto.¹⁴

Si può tentare di dare un senso più oggettivo all'operazione R cercando di metterla in relazione con l'apparato di misura: dopo tutto non è sorprendente, a priori, che un apparato di misura, per definizione macroscopico, perturbi considerevolmente un sistema costituito da un atomo o da un elettrone. Si potrebbe tentare di descrivere l'insieme composto dal sistema misurato e dall'apparato di misura seguendo strettamente l'equazione di Schrödinger applicata alla funzione d'onda dell'insieme, e sperare che l'operazione R appaia come una descrizione approssimata dell'effetto di quest'ultima sul sistema misurato.

Sfortunatamente, si può mostrare che questa speranza è vana se non si è disposti a cambiare l'equazione di Schrödinger: quest'ultima essendo lineare e deterministica, tutto ciò che l'accoppiamento tra l'apparato di misura e l'oggetto misurato può produrre è una funzione d'onda che è la sovrapposizione di stati macroscopici differenti (cfr. appendice I). È ciò che Schrödinger ha voluto illustrare con il suo gatto. Ogni tentativo di eliminare R si riduce o a cambiare la teoria, o ad ammettere il suo carattere incompleto.

Consideriamo ora l'insieme di idee che viene associato all'interpretazione di Copenhagen. Occorre distinguere con cura tra l'algoritmo pratico che si utilizza in meccanica quantistica (descritto nell'appendice I) e la teoria che tenta di giustificarlo. Nessuno contesta l'algoritmo, in pratica, né pensa di modificarlo (in ogni caso non gli autori delle varie soluzioni proposte nella sezione 5). Una prima giustificazione introdotta dalla scuola di Copenhagen consiste nel considerare l'apparato di misura come totalmente classico. Questa posizione potrebbe essere accettata come provvisoria (per il momento non si può fare di meglio) ma questa non era, così pare, l'idea di Bohr.

Ciò che disturba in questo punto di vista è proprio il successo della meccanica quantistica: come è possibile che si abbia una teoria che funziona così bene, nel senso che nessuna delle sue previsioni si è mai rivelata errata, dagli atomi fino alle stelle, ma che occorra nondimeno restringere il suo campo di applicazione, e per ragioni puramente concettuali? Perché mai gli apparati di misura dovrebbero sottrarsi alle leggi della fisica?

È a partire da qui che si introducono le "soluzioni" filosofiche. Invece di ammettere che ci sia un problema quando si analizza il processo di misura, si introduce l'"osservatore". Quest'ultimo è "classico", ma soprattutto è

¹⁴ Dare un senso puramente statistico alla funzione d'onda pone lo stesso genere di problemi: nei due approcci si ammette implicitamente che la descrizione quantistica, così interpretata, non è completa. Forse si pensa che una descrizione completa sia impossibile, ma occorre giustificare una tale convinzione.

completamente esterno alle equazioni della teoria. Il suo unico ruolo è quello di ridurre la funzione d'onda. Si tenta allora di giustificare una tale "soluzione" parlando di «*conoscenza che abbiamo del sistema*» ma senza voler attribuire un senso puramente soggettivo alla funzione d'onda (si veda [42], p. 187 per una buona illustrazione di questo genere di ambiguità).

Una seconda "soluzione" vaga è la "complementarità". Certe proprietà sono "incompatibili". A parte il fatto che questa mossa non risolve il problema della misura, si tratta ancora di un modo per aggiungere alla teoria qualcosa che non si trova assolutamente nelle sue equazioni.¹⁵

Un'altra maniera filosofica di aggirare il problema è dichiarare che lo scopo della scienza è quello di predire i risultati delle misure. Chiaramente, il problema che abbiamo incontrato scompare. Se le previsioni sono corrette, poco importa della coerenza interna dell'edificio. Ma come possiamo prendere questa posizione veramente sul serio? Qui si confondono i fini con i mezzi.¹⁶ Come abbiamo visto nella sezione 2, in tutta la pratica scientifica si utilizzano gli esperimenti per controllare le nostre conoscenze, ma lo scopo non è semplicemente quello di predire i risultati sperimentali «*per il piacere di farlo*».

La pecca di tutte queste soluzioni è che permettono di evitare di attribuire uno status fisico ben definito alla funzione d'onda: ruolo soggettivo? Oggettivo? Ampiezza di probabilità? Oggetto reale? Queste ambiguità hanno anche occultato per lungo tempo il problema della non località quantistica, cui rivolgiamo ora la nostra attenzione.

¹⁵ In Bohr, la complementarità era supposta applicarsi a tutte le discipline, biologia, parapsicologia ecc.. Con a volte accenti vitalistici: «*Solo la rinuncia ad una spiegazione della vita, nel senso ordinario della parola, ci dà la possibilità di tener conto delle sue caratteristiche*» ([13], p. 124).

¹⁶ Bohm: Se il solo scopo della fisica fosse spiegare gli esperimenti, penso che la fisica sarebbe stata molto meno interessante di quanto lo è in realtà. Voglio dire: perché volete spiegare gli esperimenti? Vi diverte o cosa? ([17], p. 124). Bell: L'esperimento è un mezzo. Il fine resta quello di comprendere il mondo. Restringere la meccanica quantistica esclusivamente ad operazioni in laboratorio finisce per tradire l'impresa scientifica ([5]).

4 - LA NON LOCALITÀ

Nel 1935 Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) posero in primo piano l'aspetto concettualmente più rivoluzionario della meccanica quantistica. Sfortunatamente, quest'aspetto è stato generalmente mal compreso all'epoca, e l'articolo venne presentato dai suoi stessi autori come costituente soltanto una critica all'interpretazione tradizionale della meccanica quantistica.

Solo nel 1964 John Bell ha mostrato come l'unica conclusione possibile dell'analisi di Einstein, Podolsky e Rosen fosse che il mondo è non locale. Allo scopo di comprendere con chiarezza cosa significhi quest'espressione, vediamo in primo luogo l'argomento di Einstein, Podolsky e Rosen. Viene costruita una sorgente che invia particelle in direzioni opposte, diciamo verso sinistra e verso destra, e queste particelle si trovano in un certo stato quantico. Vengono sistemati degli strumenti di misura, uno per ogni particella. Gli strumenti possono, in linea di principio, essere posti arbitrariamente lontani l'uno dall'altro.¹⁷ Ciascuno degli apparati può trovarsi in tre posizioni, (1, 2, o 3) ed il risultato della misura è di tipo binario. Lo denoteremo con "sì" o "no". Il risultato di un esperimento può dunque essere messo sotto la forma, ad esempio, (1, sì; 2, no): l'apparato di sinistra si trova nella posizione 1 ed il risultato è "sì", mentre quello di destra si trova nella posizione 2 ed il risultato è "no".

Einstein, Podolsky e Rosen sono partiti dal fatto che lo stato quantico predice una correlazione perfetta quando gli apparati, a sinistra e a destra, si trovano nella stessa posizione: se si trovano tutti e due su 1 (o 2, o 3) le risposte saranno tutte e due "sì" o tutte e due "no".¹⁸ Ma lo stato quantico delle particelle non ci dice se il risultato sarà "sì" oppure "no". In linguaggio metaforico, nessuna delle due particelle è pronta a dire "sì" né pronta a dire "no", quale che sia la direzione lungo la quale "la si interroghi".

Ecco, supponiamo adesso che si esegua in un primo momento soltanto una misura a sinistra, ritardando quella a destra (allontanando un poco l'apparato di misura). Subito dopo la misura a sinistra, si è però sicuri del risultato a destra (sì se quello a sinistra è sì, no se è no). Effettuando la misura a sinistra, abbiamo cambiato lo stato fisico del sistema a destra?¹⁹

¹⁷ Perché ciò che segue resti valido, occorre che le particelle siano isolate dal resto del mondo prima di interagire con l'apparato di misura, il che in pratica sembra impossibile per grandi distanze. Negli esperimenti le distanze sono dell'ordine di qualche metro. Il fenomeno è però talmente straordinario che il fatto che la distanza tra apparati di misura possa essere in linea di principio grande a piacere merita di essere sottolineato.

¹⁸ Ogni "risposta" compare con frequenza 1/2 quando si ripeta l'esperimento un gran numero di volte.

¹⁹ Nel formalismo abituale, quel che succede è semplicemente che la misura a sinistra riduce la funzione d'onda ma, data la forma di quest'ultima, la riduzione opera anche a destra (cfr. l'appendice II). Chiaramente, l'importanza che si attribuisce a questo fatto, quando viene espresso nel formalismo della meccanica quantistica, si ricollega allo status che viene accordato alla funzione d'onda ed alla sua riduzione. È per questo che è meglio discutere la non località direttamente, senza passare per il formalismo della meccanica quantistica, allo scopo di evitare di sovrapporre il problema a quello delle interpretazioni. Inoltre, si mostra così che la non località è una proprietà della natura stabilita a partire da esperienze e ragionamenti elementari, indipendentemente dall'interpretazione che si dà del formalismo quantistico. Di conseguenza, ogni teoria ulteriore che possa rimpiazzare la meccanica quantistica dovrà essere ugualmente non locale.

Se ci si attiene alla descrizione appena fornita, la risposta è sì: prima della misura (a sinistra) il sistema era radicalmente indeterminato (da entrambe le parti), mentre dopo la misura (a sinistra) è determinato (a sinistra e a destra), nel senso che ora la misura ulteriore (a destra) possiede un risultato ben determinato. Sembra dunque di avere a che fare con una forma di azione a distanza – forse sottile, ma comunque un’azione.²⁰

L’argomento presenta però una falla evidente: chi ci dice che quando effettuiamo la misura a sinistra non scopriamo effettivamente una proprietà intrinseca della particella (espressa sotto forma della “risposta” sì/no), che sarebbe semplicemente la stessa per la particella inviata a destra? Certo, il formalismo quantistico non parla di tali proprietà (le particelle non dicono né sì né no prima di essere misurate), ma perché questo formalismo dovrebbe essere la parola fine della storia? Prima di ammettere una conclusione così radicale come la non località, occorrerebbe forse considerare tutte le altre possibilità. Per esempio, dato che le particelle provengono da una sorgente comune, può ben darsi, a priori, che portino con sé delle “istruzioni” che specifichino come rispondere alle differenti domande.²¹ Di conseguenza, non ci sarebbe più alcun mistero né azione a distanza nel fatto che le loro risposte siano le medesime. E per Einstein, Podolsky e Rosen era questa la conclusione che si imponeva: la non località essendo impensabile, pensavano di aver dimostrato che la meccanica quantistica è “incompleta”. Occorre precisare bene il senso di questa parola. Non vuol dire che “istruzioni”, o “variabili nascoste” – come le si chiama –, cioè qualsiasi cosa non sia la funzione d’onda, siano accessibili alla nostra conoscenza, che possiamo manipolarle, predirle ecc.... Si tratta proprio del fatto che esse esistono. Che ci sia qualcosa nel mondo, qualche meccanismo – deterministico o probabilistico poco importa – che spieghi come la sorgente dia tali “istruzioni” alle particelle. Se il lettore pensa che parlare della mera esistenza di qualcosa (le “istruzioni”) che possa essere radicalmente inaccessibile, incontrollabile, imprevedibile prima della misura sia fare della metafisica tanto meglio – perché lo è, ma della metafisica sperimentale.

In effetti, ed è questo il contributo geniale di Bell, c’è modo di controllare se questo qualcosa che manca alla meccanica quantistica e che salverebbe la località esiste. Ma prima di arrivare a Bell, riassumiamo ciò che hanno detto Einstein, Podolsky e Rosen: o il mondo è non locale nel senso che effettuare una misura a sinistra ha effetti anche a destra, oppure la mecca-

²⁰ È difficile esprimere come la nozione di azione a distanza faccia orrore a certi fisici: Newton scriveva «che un corpo possa agire su di un altro a distanza attraverso il vuoto e senza la mediazione di qualche altro corpo [...] mi sembra una tale assurdità che penso che nessuna persona che possieda la facoltà di ragionare in questioni filosofiche potrà mai crederci» (citato in [35], p. 213), ed Einstein, parlando della situazione descritta nell’articolo EPR, diceva: «Ciò che esiste realmente in un punto B non dovrebbe dipendere dal tipo di misura che viene fatta in un altro punto A dello spazio. Allo stesso modo, ciò dovrebbe essere indipendente dal fatto che si misuri o no qualcosa in A» ([14], citato in [42], p. 121).

²¹ Il termine “istruzioni” è dovuto a Mermin [40], ma poco importa la parola. Essa designa qualsiasi cosa permetta di spiegare come il fatto che le particelle provengano da una sorgente comune possa rendere conto, in modo puramente locale, delle correlazioni perfette.

nica quantistica è incompleta. Questa conclusione è inevitabile se analizziamo l'esperimento EPR.

Il solo errore di Einstein, Podolsky e Rosen è stato di concluderne un po' frettolosamente che la meccanica quantistica doveva essere incompleta. Questo errore è stato la fonte di molta confusione. In particolare, la risposta di Bohr all'articolo EPR è da un lato incomprensibile, ma dall'altro mette giustamente in discussione l'ipotesi di località avanzata da Einstein, Podolsky e Rosen (si veda l'analisi di Bell nell'appendice 1 di [6]). Ma, in generale, si dimentica troppo facilmente che se le conclusioni di Einstein, Podolsky e Rosen vengono formulate sotto forma di un'alternativa, come abbiamo fatto sopra, esse sono assolutamente corrette: non c'è alcun modo di rendere conto delle correlazioni perfette senza supporre o un'influenza della misura a sinistra sullo stato del sistema a destra, oppure che la funzione d'onda non descriva completamente il sistema.

In effetti, esiste un'interpretazione della meccanica quantistica che è perfettamente compatibile con la seconda possibilità.²² Alla funzione d'onda viene attribuito uno status eminentemente epistemico. Essa rappresenta tutto quel che potremo mai conoscere sul sistema. Ciò non impedisce per niente che esistano delle variabili "nascoste" che determinano, per ogni particella, il risultato della misura: per ogni posizione 1, 2 o 3 una particella data risponderà sì o no e questa risposta è la stessa a sinistra e a destra in quanto la particella proviene dalla stessa sorgente. Ma, visto che non abbiamo accesso a tali risposte prima di misurarle e che lo stato iniziale è tale che le risposte sono una volta su due sì, una volta su due no, si ha l'illusione di un'azione a distanza.

Veniamo ora a Bell. Tutto quello che Bell mostra è che variabili nascoste tali da salvare la località non esistono e basta. Come è possibile controllare un'idea apparentemente così "metafisica"? Ci si rivolge a quello che succede quando i contatori non sono allineati. In quel caso non si ha più correlazione perfetta, bensì certi risultati statistici,²³ previsti altrettanto bene dalla meccanica quantistica e che sono incompatibili con l'esistenza di istruzioni in grado di spiegare la correlazione perfetta (si veda l'appendice II). Occorre sottolineare che qui ci troviamo di fronte ad un risultato puramente matematico. Inoltre, visto che queste previsioni della meccanica quantistica sono state verificate sperimentalmente [3], il ragionamento può essere impostato in modo da scavalcare la teoria e concludere che la non località viene dedotta direttamente dall'esperimento attraverso il ragionamento di EPR-Bell. Ma occorre non dimenticare la parte EPR dell'argomento. Altrimenti, se ne ricava che Bell ha soltanto mostrato l'inesistenza di certe variabili nascoste, il che era sempre stato pensato essere vero, e

²² Questa interpretazione "soggettiva", menzionata nella sezione 3, è spesso implicitamente ammessa da coloro che praticano la meccanica quantistica. Ciò spiega anche perché la situazione EPR non pare loro così sconvolgente in prima battuta.

²³ Esiste una variante dell'argomento di Bell [31] con tre particelle ed in cui non si ha bisogno della statistica: un solo evento è sufficiente per mostrare l'inesistenza delle "istruzioni". In questo caso l'esperimento non è stato fatto.

che «Bohr vince di nuovo» [6].²⁴ Ma la questione non consiste in questo. L'inesistenza di queste variabili nascoste implica che il mondo è non locale in quanto tali variabili erano la sola "scappatoia" alla luce dell'argomento EPR. Questo è l'aspetto veramente sorprendente nel risultato di Bell. Ecco ciò che ne dice lui stesso:

«Il disagio che provo deriva dal fatto che le correlazioni quantistiche perfette che si osservano sembrano esigere una sorta di ipotesi 'genetica' (gemelli identici, che abbiano geni identici). Per me, è ragionevole supporre che i fotoni in questi esperimenti portino con sé dei programmi, correlati preliminarmente e che dettino il loro comportamento. Ciò è così razionale che penso che quando Einstein lo ha visto mentre gli altri si rifiutavano di vederlo, era lui l'uomo razionale. Gli altri, benché la storia abbia dato loro ragione, nascondevano la testa nella sabbia. Penso che la superiorità intellettuale di Einstein su Bohr, in questo caso, fosse enorme; uno scarto immenso tra colui che vedeva chiaramente ciò che era necessario – e l'oscurantista. Per me, è un peccato che l'idea di Einstein non funzioni. Ciò che è ragionevole non funziona, e basta» ([8], p. 84).

Occorre sottolineare che Bell è ancora troppo cortese: la storia non ha per niente dato ragione agli avversari di Einstein. Questi ultimi non vedevano chiaramente la non località presente nella natura: che «non possiamo evitare il fatto che l'intervento da un lato abbia un'influenza causale dall'altro» ([6], p. 150) è divenuto chiaro solo con il risultato di Bell.

Vediamo più in dettaglio che cos'è realmente la non località. A questo scopo porto due esempi di ciò che non è. In primo luogo c'è l'esempio di Bell delle calze del signor Bertlmann [6]. Per illustrare la stessa idea, immaginiamo che io tagli in due un'immagine e che invii per posta ciascuna metà a dei corrispondenti, diciamo uno negli Stati Uniti, l'altro in Australia. Queste due persone aprono simultaneamente la busta; ciascuna apprende istantaneamente (supposto che siano al corrente della procedura) quale metà dell'immagine abbia ricevuto l'altra. Diciamo che c'è acquisizione (istantanea) di informazione a distanza, ma non c'è niente di misterioso. Il risultato di Bell ci dice che la situazione EPR non è assolutamente di questo genere. Qui, ogni metà dell'immagine corrisponderebbe alle istruzioni di cui Bell mostra che non esistono.

²⁴ Bell stesso si lamenta del fatto che il suo teorema sia quasi sistematicamente interpretato come una mera confutazione delle teorie a variabili nascoste, dimenticando le conseguenze concernenti la località: «Il mio primo lavoro sull'argomento – *Physics* 1, 135 (1965) – inizia con un riassunto dell'argomento EPR, che deduce dalla località le variabili nascoste deterministiche. Ma i commentatori hanno quasi universalmente detto che quell'articolo partiva da variabili nascoste deterministiche» ([6], p. 157). Osserviamo di passaggio che variabili nascoste deterministiche non farebbero che complicare il compito delle particelle che devono rispondere nella stessa maniera dalle due parti. Per una discussione più dettagliata si veda [38].

Prendiamo un altro esempio, del tutto differente. Immaginiamo uno stregone, o un mago, che agisca a distanza: manipolando un'effigie influenza lo stato di salute della persona rappresentata.²⁵ Questo genere di azione (immaginaria) a distanza ha quattro proprietà notevoli:

- 1) è istantanea o per lo meno, visto che giochiamo di fantasia, possiamo supporlo;
- 2) è individualizzata: ne viene toccata una persona particolare e non quelle che le sono accanto;
- 3) ha raggio d'azione infinito: anche se la persona in questione si rifugiasse sulla luna non sfuggirebbe all'azione dello stregone;
- 4) permette la trasmissione di messaggi: possiamo codificare un messaggio sotto forma di una stringa di 0 ed 1 ed inviarlo facendo corrispondere "1" all'azione del mago, "0" all'assenza della sua azione.

Ciò che è straordinario nella non località quantistica è che essa ha le prime tre proprietà "magiche" ma non la quarta. Le proprietà due e tre sono sicuramente le più sorprendenti: inviando un gran numero di particelle parallele, un apparato di misura a sinistra influenzerà lo stato della particella a destra che sia "gemella" di quella che viene misurata, non delle altre. Inoltre, tale azione non decresce in linea di principio con la distanza, contrariamente a tutte le forze conosciute in fisica.²⁶ Infine, questa azione sembra istantanea, in ogni caso propagandosi con velocità maggiore di quella della luce [3]. Ma non permette di inviare segnali. La ragione è semplice: quale che sia l'orientazione dell'apparato di misura a sinistra, il risultato a destra sarà una stringa aleatoria di "sì" e di "no". Solo a posteriori possiamo confrontare le stringhe dei risultati ottenuti e constatare la presenza di strane correlazioni. Il carattere aleatorio dei risultati blocca in qualche maniera la trasmissione di messaggi (si vedano [35], [38] per una discussione più approfondita).

Non si insiste mai abbastanza su questo aspetto della situazione EPR: è ciò che la distingue da ogni forma di magia e che rende inutili in anticipo gli sforzi di coloro che vorrebbero vedere nel risultato di Bell una porta spalancata per una giustificazione scientifica dei fenomeni paranormali.

Ma gli altri aspetti restano, e sono proprio sconcertanti: istantaneità, individualità, non decrescenza con la distanza. Almeno, è questa la conclusione che si può trarre oggi, alla luce dei risultati sperimentali.

²⁵ Si vedano, per esempio, le opere ben note di meccanica quantistica *Le sette sfere di cristallo e Il tempio del sole*, Hergé, ed. Casterman. È inutile dire, ma è ancora meglio se viene detto, che non penso assolutamente che la non località esibita dalla fisica quantistica abbia qualcosa a che vedere con la magia, la parapsicologia, la "New Age", le medicine "olistiche" ed altre piacevolezze del genere. Sfortunatamente, questo fatto non è sempre ben compreso. Per fornire solo un esempio, in un periodico «*health food*» di New York si trova la pubblicità per un «*programma di purificazione spirituale*» comprendente «*un'iniziazione alla Dinamica Quantistica*». Ciò permetterebbe di «*dissolvere il Karma della vita passata*» ([8], p. 6). Per una buona critica delle pseudoscienze si vedano [15] e soprattutto [27] sull'uso abusivo dell'esperimento EPR da parte dei parapsicologi.

²⁶ Posto che le particelle siano isolate, il che è impossibile in pratica per grandi distanze. D'altronde, non si tratta di una "forza" ma di un fenomeno nuovo.

Inoltre, occorre guardarsi dal concludere che l'impossibilità d'inviare segnali significativi che non c'è azione a distanza né relazione di causa-effetto. La nozione di causa è complicata da analizzare, eppure, come fa notare Maudlin [38], i terremoti o il Big Bang non sono controllabili e non permettono dunque l'invio di segnali, ma sono nondimeno delle cause che hanno certi effetti (si vedano [38], [39] per una discussione della nozione di causa in relazione con la situazione EPR). La nozione di segnale è troppo antropocentrica perché la nozione di causa possa essere ricondotta ad esso.

Quali sono le reazioni dei fisici di fronte al teorema di Bell? Il minimo che si possa dire è che variano. Ad un estremo, H. Stapp dichiara che «*il teorema di Bell è la più profonda scoperta della scienza*» [51] ed un fisico di Princeton afferma: «*chi non è turbato dal teorema di Bell deve avere dei sassi nella testa*» [40]. L'indifferenza è però la reazione più diffusa. Mermin distingue tipi differenti di fisici [40]: quelli del primo tipo sono turbati da EPR-Bell. La maggioranza (tipo 2) non lo è, ma occorre distinguere due sottovarietà. Quelli del tipo 2a spiegano perché non li turbi. Le loro spiegazioni tendono a tenersi completamente al margine della questione o a contenere asserzioni fisiche dimostrabilmente false. Quelli del tipo 2b non sono turbati e si rifiutano di dire perché. La loro posizione è inattaccabile (esiste ancora una variante del tipo 2b: dice che Bohr ha spiegato tutto ma si rifiuta di dire come).

Le spiegazioni si riducono sempre, almeno in base alla mia esperienza personale, a una delle due posizioni seguenti: 1) si dichiara che non c'è azione a distanza solo per il fatto che si impari qualcosa sulla particella a destra effettuando la misura a sinistra. Born adottava questa posizione:

«Il nucleo della differenza tra Einstein e me consisteva nell'assioma che avvenimenti che si producono in luoghi distinti A e B sono indipendenti l'uno dall'altro nel senso che l'osservazione della situazione in A non può insegnarci niente sulla situazione in B» [14].

Bell chiosa correttamente:

«L'incomprensione era totale. Einstein non aveva alcuna difficoltà ad ammettere che situazioni in luoghi distinti siano correlate. Quello che non accettava era che l'azione in un luogo potesse influenzare, immediatamente, la situazione in un altro luogo» [6].²⁷

²⁷ Bell aggiunge: «Ciò illustra le difficoltà che si incontrano a mettere da parte i propri pregiudizi e ad ascoltare quel che viene effettivamente detto. Questo deve anche incoraggiare voi, cari ascoltatori, ad ascoltare un po' meglio».

L'idea di Born, quando la si renda precisa, conduce proprio alle «*variabili nascoste*» di cui Bell mostra che anche solo l'esistenza è impossibile.

La seconda risposta si riduce a sostenere che la meccanica quantistica spiega il fenomeno e che è completa e locale. In primo luogo, come dice Bell, «*la meccanica quantistica non spiega veramente; in effetti, i padri fondatori della meccanica quantistica si facevano piuttosto un vanto di rinunciare all'idea di spiegazione*» ([17], p. 51). Evidentemente, la meccanica quantistica *predice* le correlazioni perfette ed imperfette che intervengono nel ragionamento di EPR-Bell. Ma predire equivale a spiegare? A mio avviso, identificare le due nozioni conduce a cadere di nuovo in una confusione filosofica. Anche se la nozione di spiegazione è notoriamente difficile da esplicitare, ciascuno ne possiede un'idea intuitiva sufficiente per afferrare la distinzione: immaginiamo un vero mago che agisca davvero a distanza, in un modo che sfidi tutte le leggi della fisica, ma che egli possa perfettamente predire quando i suoi poteri agiscano. Nessuno prenderebbe questa previsione per una spiegazione.

Tuttavia, è possibile fornire una spiegazione del fenomeno EPR-Bell nel quadro della meccanica quantistica (si veda l'appendice II) (nella situazione presa in considerazione da Einstein, Podolsky e Rosen). Si prende la meccanica quantistica sul serio (attribuendo cioè alla funzione d'onda uno status fisico e non epistemico e considerando reale l'operazione R) ed essa è manifestamente non locale (almeno lo è R nell'esperimento EPR).

Tutta questa discussione mostra che l'ambiguità nello status della funzione d'onda (mezzo di calcolo, oggetto reale?) alimentata dalla tradizione positivista ha reso difficile la comprensione della non località. Se la funzione d'onda è puramente epistemica, che le operazioni effettuate su di essa siano "*non locali*" non è chiaramente un problema. Ma se essa non è reale, che cosa è reale? Quale che sia la risposta, non si scappa alla non località; quest'ultima è manifesta se la funzione d'onda è reale ed è una conseguenza del ragionamento EPR-Bell se la funzione d'onda è epistemica.

Dal momento che quest'azione a distanza è istantanea o per lo meno più rapida della velocità della luce, non entra forse in contraddizione con la relatività? Si tratta di una questione piuttosto complessa che non svilupperò (si veda [38] per una discussione approfondita), ma è chiaro che c'è un problema. Come dice Penrose: «*C'è intrinsecamente un conflitto tra la nostra concezione spazio-temporale della realtà fisica – anche l'immagine quantistica non locale, che è corretta – e la relatività ristretta!*» [47]. Ma, dato che la disuguaglianza di Bell viene interpretata di solito in maniera scorretta, il problema del conflitto (sottile ma reale) non località/relatività non si pone neanche. Occorre però sottolineare che la mera esistenza di una teoria quantistica e relativistica dei campi (le cui previsioni sono le più spettacolarmente verificate di tutta la storia della scienza) non permette di negare l'esistenza del problema. In effetti, l'operazione R non viene mai trattata in maniera relativistica. Ed è attraverso quest'operazione che la non località si introduce in maniera esplicita nel formalismo quantistico.

Alla luce del carattere controintuitivo della non località e del conflitto con la relatività, si è tentati di riprendere l'argomento, di analizzarlo in dettaglio e di vedere se non ci sia una scappatoia. Si può dire che tutto o quasi sia stato provato (si vedano per esempio [41] o [16] per tentativi differenti e Maudlin [38] per una discussione critica).

In [6], Bell conclude che ci sono quattro possibilità:

1) Che gli esperimenti diano torto alla meccanica quantistica. Ma i risultati non vanno proprio in questa direzione.

2) Ammettere la non località.

3) Considerare la possibilità che la posizione degli apparati di misura non sia realmente indipendente dalle particelle. In altri termini, ciò si riduce ad asserire che le particelle portino con loro delle istruzioni ma non per tutte le domande contemporaneamente. Solo per quella che si sta per porre. Ma come lo fanno? La risposta risiede in ciò che a volte viene denominato "*superdeterminismo*": la libertà degli sperimentatori che credono di poter orientare i rilevatori a loro piacere è un'illusione. Non solo il libero arbitrio è un'illusione (non è qui il problema), ma l'orientazione dei rilevatori, che può anche essere determinata dai risultati di due lotterie "*indipendenti*", è sottilmente correlata con lo stato delle particelle inviate. Visto che "*tutto*", sperimentatori, particelle, lotterie ecc. proviene da un'origine comune (il "*Big Bang*"), questo punto di vista è in linea di principio sostenibile, anche se almeno altrettanto strano che la non località. Inoltre, se ci si riflette, tale genere di spiegazioni può essere invocato come sostitutivo di qualsiasi teoria fisica. Se una legge non mi piace posso sempre dichiarare che vale un'altra legge, ma che c'è una cospirazione nelle condizioni iniziali dell'universo che mi induce in errore (sistematicamente). Osserviamo di passaggio che un tale superdeterminismo viene suggerito come alternativa ai problemi posti da una teoria (la meccanica quantistica) che era supposta introdurre un indeterminismo radicale nelle leggi della natura; quest'ironia dei fatti dovrebbe dare da riflettere a tutti coloro che proclamano periodicamente la morte del determinismo.

4) Non c'è nessuna realtà al di sotto di un livello "*classico*" "*macroscopico*". A mio avviso, Bell qui si sbaglia. Tutto il problema viene da correlazioni tra risultati di misure (effettuate da apparati, per definizione, macroscopici). All'inizio, non viene presupposta né l'esistenza di particelle, né di fotoni, né di alcuno dei loro attributi. Tutto il problema deriva dal fatto che le correlazioni (macroscopiche) non ammettono alcuna spiegazione locale.

È interessante osservare che Feynman [25], quando discute la disuguaglianza di Bell, suggerisce due possibilità: o il futuro influenza il passato (il che in una teoria relativistica è essenzialmente equivalente alla non località), cioè le particelle "si sistemano" in funzione dell'orientazione dei rilevatori che stanno per incontrare. Oppure il "superdeterminismo". E conclude: «i fisici non hanno un buon punto di vista». Bohm, al contrario, non è impressionato oltremisura: «Sono assolutamente pronto ad abbandonare la località. Penso che sia un'ipotesi arbitraria. Nel corso degli ultimi secoli ha avuto un peso enorme. Ma se risalite di 1000 o 2000 anni in avanti, quasi tutti pensavano in maniera non locale» ([17], p. 125). Forse, ma, come scrive Redhead, «Le nostre teorie, dice Popper, sono 'reti che costruiamo per catturare il mondo'. Dobbiamo renderci conto che la meccanica quantistica ci ha fatto arrivare un pesce ben strano» ([49], p. 169).

5 – SOLUZIONI POSSIBILI AL PROBLEMA DELLA MISURA

Bell distingue "sei mondi possibili", cioè sei posizioni o soluzioni possibili. Ne rubrica tre sotto la categoria "romantico", tre sotto la categoria "non romantico". La prima posizione, non romantica, è il pragmatismo. Dato che la difficoltà legata alla teoria quantistica non ha alcuna conseguenza pratica (in effetti, sappiamo bene cosa sia una misura), perché preoccuparsi? Tale posizione, se viene veramente presa sul serio – riconoscendo cioè che in fondo il problema esiste e non dissimulandolo dietro una cortina argomentativa filosofica –, è molto attraente. Ha però i propri limiti. L'attività dei fisici teorici è talmente concentrata sui principi (particelle elementari, Big Bang, buchi neri) che una posizione pragmatista da parte loro è quanto meno bizzarra. Inoltre, si incontrano a volte problemi legati ai fondamenti della meccanica quantistica: se studiamo l'universo in quanto tale (come fa ad esempio la cosmologia quantistica) dove si situa l'osservatore? Se trascuriamo la riduzione della funzione d'onda (considerata come non fondamentale) come riconciliare la meccanica quantistica con il caos (si veda [21])?

La seconda soluzione, questa qui romantica, è la posizione di Bohr discussa nella sezione 3. Essa è "romantica" perché eleva la contraddizione quasi al livello di principio e sottolinea, per mezzo della nozione di "complementarità", la nostra incapacità di comprendere oggettivamente il mondo. L'apparato di misura è composto di particelle che obbediscono alle leggi quantistiche, eppure esso è radicalmente classico. Pare che a Bohr piacessero aforismi del tipo «l'opposto di una verità profonda è ancora una verità profonda» oppure «la verità e la chiarezza sono complementari» ([7], p. 190).

Un'altra soluzione romantica consiste nel collocare l'operazione R puramente e semplicemente al livello della coscienza. Il mondo fisico obbedirebbe strettamente all'equazione di Schrödinger, sarebbe interamente descritto dalla propria funzione d'onda e tutte le sovrapposizioni macroscopiche (gatto vivo e morto) potrebbero coesistere in esso se non fosse per l'azione di una coscienza umana immateriale che interviene a ridurre la funzione d'onda. Per adottare questo punto di vista occorre evidentemente supporre che la coscienza sia ontologicamente distinta dal cervello, fatto che pone almeno altrettanti problemi di quanti ne risolve.

L'ultima soluzione romantica consiste nel respingere *tout court* l'operazione R . La funzione d'onda ha uno status oggettivo, fornisce una descrizione completa del sistema fisico e la sua evoluzione è sempre governata dall'equazione di Schrödinger. Si è allora obbligati ad introdurre degli universi paralleli: ogni volta che viene effettuata una misura tutti i possibili risultati coesistono, ma in universi distinti. Ad ogni misura si creano quindi tanti universi quanti sono i possibili risultati di tale misura, ed in ciascuno di essi ritroviamo uno di questi risultati. Evidentemente, questa teoria è per lo meno bizzarra: pensiamo al numero di universi che dovrebbero coesistere. In certo senso, si tratta della posizione più estremistica-

mente realista che si possa immaginare: postulare, unicamente per ragioni di coerenza interna della teoria, una siffatta moltitudine di mondi è certamente il miglior modo per provocare Ockham ad affilare il suo rasoio. D'altronde, il problema di sapere ciò che veramente definisce una misura persiste. Gli universi si moltiplicano solo durante una misura in laboratorio o ciò accade ugualmente nel corso di altri processi fisici?²⁸

Non si insiste mai abbastanza sul fatto che questi universi paralleli dovrebbero esistere veramente perché il problema possa dirsi risolto. In effetti, si sente sollevare talvolta l'obiezione «*cosa intendete con 'esistere'?*». Probabilmente, quelli che pongono questo genere di domande sanno ciò che intendono con «*esistere*» per quanto riguarda il mondo in cui viviamo (altrimenti possiamo smettere di discutere). Bene, occorre che gli altri mondi esistano esattamente nella stessa maniera. In particolare, non possiamo considerare gli altri mondi come artifici matematici o qualcosa di simile. Altrimenti, la difficoltà permane invariata: l'operazione R distingue il mondo reale (unico) dagli altri.²⁹

Se releghiamo quest'idea nel regno della fantascienza siamo condotti ad una seconda soluzione non romantica, cercare cioè di fare in modo che l'operazione R sia riducibile ad U . Ma, come abbiamo visto, ciò risulta impossibile se vogliamo che la teoria resti invariata (cfr. l'appendice I). La sola possibilità sarebbe modificare U rimpiazzandola con un'operazione non lineare oppure stocastica. Quest'ultima dovrebbe avere due proprietà: essere approssimata da U sufficientemente bene quando un numero piccolo di particelle sia in esame, in modo che le previsioni della meccanica quantistica restino vere per la nuova teoria, e ricondursi essenzialmente, quando un numero grande di particelle sia in gioco (per esempio un apparato di misura), all'operazione R . Vari autori hanno fatto tentativi in questa direzione, nessuno dei quali sembra essere soddisfacente. Considerate le difficoltà matematiche connesse con il trattamento delle equazioni non lineari, un tale stato di cose non può invero essere considerato un argomento forte contro questo suggerimento: dal momento che la maggior parte dei fisici considera accettabile la meccanica quantistica ordinaria sono stati fatti in fin dei conti pochi tentativi. Alcuni invocano contro tale approccio l'eleganza dell'equazione di Schrödinger (in quanto lineare). A parte il fatto che non vedo perché criteri estetici, necessariamente soggettivi, debbano giocare un qualche ruolo nelle scienze (soprattutto quando si cerchi di sfuggire ad un'incoerenza – l'ineleganza suprema), si potrebbe anche rispondere, con Penrose:

²⁸ Questa teoria può davvero essere formulata in maniera coerente? Si vedano Bell ([7], capitoli 11 e 15) ed Albert [1] per una critica più approfondita di questa «soluzione». Albert suggerisce che, per renderla coerente, dovremmo introdurre delle «*menti multiple*».

²⁹ Bell: «È facile capire l'attrattiva dei tre mondi romantici per i giornalisti che cercano di attirare l'attenzione dell'uomo della strada. L'opposto di una verità è ancora una verità! Gli scienziati dicono che la materia è impossibile senza la mente! Tutti i mondi possibili sono mondi reali!» ([17], pp. 193-194).

«Tuttavia, penso che sarebbe sorprendente se la teoria quantistica non dovesse subire cambiamenti profondi in futuro – verso qualcosa di cui questa linearità sarebbe solo un'approssimazione. Si danno precedenti di questo genere di cambiamenti. La potenza dell'eleganza della teoria della gravitazione di Newton è in gran parte dovuta al fatto che in questa teoria le forze si sommano linearmente. Ma con la teoria della relatività generale di Einstein si vede che questa teoria è solo un'approssimazione – e l'eleganza della teoria di Einstein supera anche quella della teoria di Newton» [47].

Dal momento che una tale teoria non lineare al momento non esiste, occorre segnalare che è possibile formulare una teoria stocastica, in cui la funzione d'onda è ridotta aleatoriamente in ogni istante, anche se con una bassa probabilità per un sistema microscopico. Ma quando si consideri un numero grande di particelle, come in un apparato di misura, la probabilità di una riduzione diviene elevata. Nella sua formulazione attuale, la teoria sembra particolarmente ad hoc (i parametri che caratterizzano questa riduzione probabilistica sono fissati in maniera da essere in accordo con gli esperimenti), ma non è una qualità irrilevante quella di rendere conto dei fenomeni quantici in maniera precisa e senza fare ricorso ad alcun principio filosofico. In questa teoria, denominata "GRW" dal nome dei suoi autori [29], nessun mistero si celebra nel corso della misura: semplicemente, i "salti quantici" che si producono ovunque ed in ogni istante sono amplificati a causa del carattere necessariamente macroscopico dell'apparato di misura.

Infine, una terza possibilità non romantica consiste nel considerare R come non fondamentale, ma senza cambiare U . Ma allora, dato che R non può ridursi ad U , occorre introdurre nella teoria qualcosa in più rispetto alla funzione d'onda. Viene chiamata "variabile nascosta" ogni quantità introdotta nella descrizione del sistema e che non si riduca alla funzione d'onda. Il teorema di Bell rende in generale le persone scettiche sulla possibilità di introdurre tali variabili. Inoltre, si cita a volte il teorema di von Neumann, che tentava di dimostrare l'impossibilità di introdurre variabili nascoste pur mantenendo le previsioni della meccanica quantistica. Riguardo all'interesse di questo teorema, Bell ne ha intrapreso un'analisi dettagliata ([7], capitoli 1, 4 e 17), la cui conclusione è espressa in termini poco caritatevoli: «La dimostrazione di von Neumann, se la guardate per bene, si sgretola nelle vostre mani. Non solo è falsa, ma è proprio idiota!» [4]. La violenza dell'enunciato deve essere situata nel contesto: come è possibile che quest'argomento, in cui non c'è effettivamente niente, sia stato preso sul serio da tanti fisici e filosofi per un tempo così lungo, anche dopo che era stato confutato in dettaglio? Si tratta di una questione interessante per gli storici ed i sociologi della scienza [48].

Bell spiega che è sì sempre preoccupato per l'aspetto "soggettivo" della meccanica quantistica, cioè per la necessità di introdurre l'osservatore

(o l'operazione R) nella teoria. Egli conosceva anche il teorema di von Neumann, che pretendeva mostrare come non si potesse fare di meglio. Ma nel 1952 vide realizzarsi l'impossibile. David Bohm, riprendendo idee di de Broglie, introduceva delle "*variabili nascoste*" e metteva in piedi una teoria «*in ogni rispetto equivalente alla meccanica quantistica da un punto di vista sperimentale, ma che era però non ambigua e realista*» ([17], p. 56). Nella teoria di de Broglie-Bohm lo stato completo di un sistema è dato dalla funzione d'onda e dalle posizioni delle particelle (cfr. l'appendice III). L'evoluzione della funzione d'onda è assicurata dall'equazione di Schrödinger, cioè da U , senza alcun cambiamento rispetto all'impostazione canonica. La funzione d'onda, a sua volta, guida le particelle. La si può pensare come una specie di velocità generalizzata. La teoria è quindi perfettamente deterministica. Si può però dimostrare che, se la distribuzione statistica delle particelle ad un istante dato è identica a quella prevista dalla meccanica quantistica, allora lo stesso accadrà a tutti i tempi successivi. In questa maniera si ritrova l'accordo empirico tra questa teoria e le previsioni della meccanica quantistica. L'operazione R perde il suo status fondamentale: nel corso di una misura si impara qualcosa sul sistema (pur modificandolo), ma, da questo punto di vista, lo status delle probabilità non risulta più sorprendente di quello che ha nelle situazioni classiche (un lancio di dadi, per esempio).

In che modo la teoria di Bohm sfugge ai vari teoremi di impossibilità? La risposta è di una semplicità sorprendente: qui le "*variabili nascoste*" sono semplicemente le posizioni delle particelle. Si tratta di una teoria della materia in movimento. Nessun argomento è stato mai proposto per mostrare che l'introduzione di tali variabili sia impossibile. È per questo che tutti i discorsi del tipo «*la luna non c'è quando non la si guardi*»,³⁰ oppure «*non c'è niente di reale*» sono basati sul puro niente. L'argomento di Bell ci dice che è impossibile, in generale, introdurre delle variabili del genere di quelle di spin (le istruzioni della sezione 4). È a questa impossibilità che i discorsi sulla "*scomparsa del reale*" fanno (scorrettamente) allusione, ma si tratta di tutt'altra cosa rispetto alle posizioni. Supporre che le variabili di spin debbano necessariamente esistere prima della "*misura*" significa dare prova di realismo ingenuo e trascurare il ruolo "*attivo*" dell'apparato di misura.³¹ Uno dei grandi meriti della teoria di Bohm è stato mostrare esplicitamente perché certe variabili nascoste non possano esistere e perché, conformemente all'intuizione di Bohr, il loro valore sia "*determinato*" dalla misura. Tuttavia, a differenza di Bohr, non ci troviamo qui di fronte ad un postulato imposto dall'esterno, bensì ad una conseguenza delle equazioni della teoria. Peraltro, ogni "*logica quantistica*" diventa manifestamente inutile una volta che il ruolo dell'apparato di misura sia ben capito.

³⁰ L'origine di questa frase risale ad Einstein che, irritato dal riferimento costante all'osservazione, disse a Parigi: «*Ma davvero credete che la luna non ci sia quando non la guardate?*» ([46], p. 907).

³¹ Si veda [22] per una critica di siffatto realismo ingenuo.

Riassumendo, ci sono almeno due approcci alternativi che si offrono a chi voglia comprendere la meccanica quantistica in quanto rappresentante qualcosa di più di un algoritmo che permette di predire certi risultati sperimentali. Uno di essi – modificare l'equazione di Schrödinger – si trova essenzialmente allo stato di suggerimento. L'altro, introdurre delle "variabili nascoste" (cioè semplicemente le posizioni delle particelle) presenta il vantaggio di essere una teoria perfettamente sviluppata e che rende conto di tutti i fatti sperimentali invocati per giustificare la meccanica quantistica non relativistica. Sebbene si tratti in parte di una questione di gusti, la teoria di Bohm è altrettanto naturale ed elegante di qualunque altra teoria fondamentale in fisica. Non permane alcun problema di inconsistenza o di soggettivismo, e la funzione d'onda acquista un significato fisico ben preciso.

Beninteso, la teoria è non locale. Il teorema di Bell ci mostra che ogni teoria nel senso proprio del termine avrà questa proprietà. La non località deve dunque essere considerata come una qualità della teoria di Bohm, non come un difetto. Ma, evidentemente, il conflitto con la relatività si pone e non è risolto (si veda l'appendice III). Prima di tirare conclusioni frettolose da questo stato di cose, pensiamo a quel che è stato fatto nel quadro non relativistico, e che andava contro alcuni dei pregiudizi più radicati. D'altra parte, il problema della misura non si trova neanche formulato da un punto di vista relativistico. È lecito insomma richiedere che si consideri la teoria di Bohm unicamente come teoria non relativistica. Nessuna obiezione seria è mai stata sollevata in quell'ambito. Ora, in essa il problema della misura non esiste chiaramente più. Pertanto, occorrerebbe dire che il problema della meccanica quantistica è il problema dell'invarianza sotto il gruppo di Lorentz, dal momento che, a parte ciò, la teoria di Bohm risolve tutti i problemi. Sarebbe già un bel cambiamento di prospettiva porre la questione in questi termini.

In conclusione, per citare Albert, la teoria di Bohm è una teoria sul moto dei corpi materiali che non contiene «*niente di criptico, niente di metafisicamente nuovo, niente di ambiguo, niente di non esplicito, niente di vago, niente di incomprensibile, niente di inesatto, niente di sottile, una teoria in cui tutte le domande hanno un senso ed hanno una risposta ed in cui non si presentano mai due proprietà di chechessia che siano 'incompatibili' l'una con l'altra*» ([1], p. 169). Aggiungiamo, con meno lirismo, che questa teoria rende precisa l'intuizione geniale di Bohr sul ruolo dell'apparato di misura, dà un senso fisico chiaro alla funzione d'onda e toglie ogni aura di mistero all'origine delle probabilità in meccanica quantistica. Inoltre, essa fa tutto ciò aggiungendo una riga (l'equazione 2. dell'appendice III) al formalismo abituale, e rende così la teoria perfettamente deterministica, contraddicendo con questo tutte le "dimostrazioni" dell'impossibilità di una tale impresa. Perché questa teoria, dovuta ad uno dei più grandi fisici del nostro tempo, sia in pratica universalmente ignorata resta un enigma che gli storici della scienza dei secoli futuri dovranno risolvere.

6 – CONCLUSIONI

Negli anni Venti e Trenta del secolo scorso una filosofia a tendenza scettica ha dominato l'atmosfera in cui la meccanica quantistica si è sviluppata. Questa filosofia metteva al centro delle sue preoccupazioni l'osservazione, le misure o i dati immediati dei sensi. Ogni tentativo mirante a costruire una teoria oggettiva del mondo era giudicato con diffidenza, ed era sospettato di voler fare ritorno alla discredita metafisica medievale. Occorre sottolineare che, vista la bizzarra dei fenomeni osservati all'epoca, il carattere straordinariamente nuovo del formalismo quantistico ed il successo non meno straordinario riscosso da questo formalismo nella previsione dei fenomeni, era normale, ed in certa misura desiderabile, che tale filosofia si installasse nel retropensiero dei fisici dell'epoca.

Ma ciò che vale in un periodo storico non vale necessariamente in un altro. Da parzialmente progressista che era, la filosofia quantistica è divenuta oscurantista. Già all'epoca dei padri fondatori, Einstein, Schrödinger ed altri si accorgevano che prendendo alla lettera certi suoi slogan («*il ruolo della scienza si limita a prevedere i risultati delle misure*») l'essenziale dell'impresa scientifica veniva abbandonato. Mettere l'osservatore al centro di tutto («*l'uomo è autore e non spettatore nel teatro della vita*» [13]) finiva per far ritornare alle illusioni antropocentriche dell'argomentare prescientifico. L'assenza di una formulazione precisa della meccanica quantistica incoraggia discorsi confusi e talvolta francamente irrazionali.

Il teorema di Bell è peraltro una buona illustrazione delle virtù del realismo. Pauli paragonava il problema di sapere se qualcosa di cui non si può sapere nulla esiste con la vecchia questione di quanti angeli si possono sedere sulla punta di uno spillo, e pensava che le domande di Einstein fossero di quel genere ([42], p. 81). Bell conosceva invece la teoria di Bohm, la trovava soddisfacente ma era turbato dal suo carattere non locale. Voleva vedere se ci fosse modo di fare meglio oppure se ogni teoria riguardante il mondo reale dovesse necessariamente avere quest'aspetto straordinario. Ma è stato ponendosi tali questioni "*metafisiche*" che è giunto al suo risultato.

Ritornando alla teoria di Bohm (ed alla teoria GRW), essa mostra che occorre stare attenti ad essere dogmatici con i teoremi di impossibilità e a proclamare troppo in fretta che abbiamo toccato i limiti della nostra comprensione razionale del mondo.

«Che ci piaccia o no, si tratta di un perfetto controesempio all'idea che la vaghezza, la soggettività, l'indeterminismo ci siano imposti dai fatti sperimentali della meccanica quantistica non relativistica» [7].

Lascerei l'ultima parola ad un filosofo, Seneca, che, parlando delle mete, esprimeva il suo ottimismo nel futuro delle conoscenze umane:

«Verrà il giorno in cui, dopo uno studio di parecchi secoli, le cose attualmente incomprensibili saranno evidenti, e la posterità si meraviglierà che verità così chiare ci siano sfuggite».

APPENDICE I

Il problema della misura

Il problema è semplice da enunciare e risale a von Neumann [54].³²

I principi base della meccanica quantistica possono enunciarsi così:

- Lo stato fisico di un sistema è un elemento $|\Psi\rangle$ di uno spazio vettoriale (spazio di Hilbert).
- L'evoluzione temporale è data da

$$1. \quad |\Psi_t\rangle = U(t) |\Psi_0\rangle$$

dove $|\Psi_t\rangle$ designa lo stato al tempo t ed $U(t)$ è un operatore lineare (unitario). Ciò implica il principio di sovrapposizione: se $|\Psi_0\rangle = |\Psi'_0\rangle + |\Psi''_0\rangle$ allora $|\Psi_t\rangle = |\Psi'_t\rangle + |\Psi''_t\rangle$, ed il determinismo: $|\Psi_t\rangle$ è univocamente determinato una volta dato $|\Psi_0\rangle$. L'evoluzione dinamica data da (1.) è equivalente all'equazione di Schrödinger.

- Se "misuriamo" al tempo t una quantità fisica rappresentata da un operatore A , dove (per semplificare)

$$2. \quad |\Psi_t\rangle = c_1 |\Psi_1\rangle + c_2 |\Psi_2\rangle$$

con $A |\Psi_i\rangle = \lambda_i |\Psi_i\rangle$, $i = 1, 2$ e $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$, allora il risultato della misura sarà λ_i con probabilità $|c_i|^2$ e lo stato fisico del sistema dopo la misura sarà $|\Psi_i\rangle$, dove $i = 1$ o 2 a seconda che il risultato della misura sia λ_1 o λ_2 .

È in quest'ultimo enunciato che interviene l'operazione R , la riduzione della funzione d'onda, ed è di qui che viene il problema. $|\Psi_t\rangle$ diventa uguale a $|\Psi_1\rangle$ o $|\Psi_2\rangle$ dopo la misura. La riduzione è necessaria perché, se effettuiamo una seconda misura della quantità rappresentata da A , ritroviamo con certezza λ_1 o λ_2 , a seconda del risultato della prima misura. Ma tale riduzione non è contenuta nella dinamica (di Schrödinger) $U(t)$. Per mostrare ciò, occorre considerare se l'apparato di misura non potrebbe produrre la riduzione (almeno approssimativamente). Anche se non sappiamo analizzare in dettaglio l'apparato di misura, è possibile convincersi, utilizzando soltanto il carattere lineare e deterministico dell'equazione di Schrödinger, che è impossibile.

Ecco l'argomento. Se la meccanica quantistica si applica a tutto e la funzione d'onda rappresenta la descrizione completa del sistema fisico, allora occorre attribuire una funzione d'onda all'apparato di misura, così come al sistema apparato-oggetto misurato.

³² Si veda [1] per una discussione molto chiara.

Consideriamo un sistema in cui, prima dell'esperimento, alla particella sia associata la funzione d'onda $|\Psi^1\rangle$ (come nell'equazione (2.) con $c_1 = 1$, $c_2 = 0$). Denotiamo con $|\Phi\rangle$ la funzione d'onda iniziale dell'apparato di misura.³³ Prima dell'interazione tra la particella e l'apparato, al sistema sarà associata la funzione d'onda $|\Phi\rangle|\Psi^1\rangle$. Dopo l'interazione, la funzione d'onda sarà $|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle$, dove $|\Phi^1\rangle$ denota una funzione d'onda che indica come l'apparato abbia "misurato" la particella e come questa si trovi nello stato $|\Psi^1\rangle$. In realtà, $|\Phi^1\rangle$ rappresenta una classe di funzioni d'onda, ed evolve nel tempo. Ma poco importa; quello che conta è che esiste necessariamente una differenza tra $|\Phi^1\rangle$ ed una (o più) funzioni d'onda $|\Phi^2\rangle$ indicanti che la particella si trova nello stato $|\Psi^2\rangle$. In effetti, possiamo distinguere tra due stati macroscopici differenti dell'apparato di misura (basta guardarlo); altrimenti non si tratterebbe di una misura. Se la funzione d'onda è una descrizione *completa* dello stato del sistema, essa deve come minimo rendere conto di tale distinzione. Se, d'altro canto, la particella si trova inizialmente nello stato $|\Psi^2\rangle$, dopo la misura il sistema sarà, in maniera analoga, nello stato $|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle$.

Fino a questo punto, nessun problema: abbiamo soltanto espresso il fatto che l'apparato di misura è un buon apparato di misura. Il problema si pone se consideriamo lo stato (2.) come stato iniziale della particella. Allora, il carattere lineare e deterministico dell'equazione di Schrödinger implica che il sistema sarà necessariamente nello stato

$$3. \quad c_1 |\Phi^1\rangle |\Psi^1\rangle + c_2 |\Phi^2\rangle |\Psi^2\rangle$$

dopo la misura, almeno se il sistema completo obbedisce a questa legge di evoluzione. Il problema è che (3.) non rappresenta in alcun modo lo stato dell'apparato di misura quale noi lo conosciamo. L'apparato si trova o nello stato $|\Phi^1\rangle$ o nello stato $|\Phi^2\rangle$, ma non in una sovrapposizione dei due! O, se si preferisce, la descrizione *completa* dell'apparato dopo la misura non è sicuramente una sovrapposizione. Si può dire che l'apparato di misura non è isolato, o che la misura ha luogo realmente quando il nostro cervello interagisce (visualmente) con l'apparato, questo non cambia il problema. Le misure hanno risultati ben definiti³⁴ ed il formalismo della meccanica quantistica non rende conto di questo fatto.

Il problema ha però poche conseguenze pratiche: supponiamo di decidere che la funzione d'onda sia ridotta (in $|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle$ o $|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle$) da un meccanismo che interviene durante la misura (violando dunque l'equazione di Schrödinger). Non c'è alcun bisogno, da un punto di vista prati-

³³ Che questa funzione non sia calcolabile in pratica o cambi nel corso del tempo in maniera complicata non ha qui alcuna importanza.

³⁴ L'apparato può essere connesso ad un gatto, come suggerisce Schrödinger, in maniera che $|\Phi^1\rangle$ rappresenti il gatto vivo e $|\Phi^2\rangle$ il gatto morto. Di nuovo, si ottiene una sovrapposizione >macroscopica che non corrisponde alla realtà.

co, che il momento in cui tale riduzione interviene venga precisato. In effetti, accade che sia impossibile in pratica effettuare un esperimento che permetta di distinguere tra teorie della riduzione differenti. Lo stesso accade se si vuole confrontare la teoria di Bohm con teorie della riduzione della funzione d'onda: queste teorie sono sperimentalmente distinguibili in linea di principio, non in pratica. Ma questa indistinguibilità pratica non permette in alcun modo di eliminare il problema.³⁵

Riassumendo, siamo posti di fronte ad un dilemma: gradiremmo poter sostenere le tre affermazioni seguenti ([38], pp. 144-145):

1) Gli apparati di misura e gli altri oggetti macroscopici come i gatti si trovano in stati ben definiti.

2) La funzione d'onda è la descrizione completa del sistema.

3) L'evoluzione di Schrödinger è sempre corretta e si applica a tutto (in ultima istanza alla funzione d'onda dell'universo).

Il fatto è che (sfortunatamente) le tre asserzioni non sono mutuamente compatibili. Quale abbandonare dunque? Secondo la scelta che viene fatta, si prende una delle tre direzioni seguenti:

– Si abbandona 1), il gatto vivo ed il gatto morto coesistono, ma in universi differenti. Ci si orienta verso gli universi multipli.

– Si abbandona 2), il che vuol dire che si introducono le "variabili nascoste" per completare la descrizione del sistema, come nella teoria di Bohm.

– Si abbandona 3), la dinamica deve essere stocastica o non lineare in quanto le sole proprietà di U che vengono utilizzate per arrivare allo stato (3) erano state il carattere lineare e deterministico di U . La versione "stocastica" viene sviluppata nella teoria GRW [29].

Bell ([7], capitoli 11 e 15) ha mostrato che era difficile sviluppare l'approccio 1) in maniera consistente (a parte la sua estrema bizzarria). Per lui, solo le soluzioni 2) e 3) conducono ad un'«immagine precisa». «La grande domanda, a mio avviso, è sapere quale di queste due immagini precise può essere sviluppata ulteriormente in maniera invariante sotto il gruppo di Lorentz, ammesso che ce ne sia una» [5].

³⁵ Si veda [1] per una discussione dettagliata. D'altro canto, Bell [5] ha ben analizzato le differenti maniere in cui il problema viene aggirato nei manuali.

APPENDICE II

Il teorema di Bell

Seguiamo la dimostrazione semplificata proposta da Mermin [42, 40]. Gli apparati di misura hanno 3 posizioni (1, 2, 3) con due risposte possibili (sì/no). L'argomento di Einstein, Podolsky e Rosen mostra che, se il mondo è locale, le particelle portano necessariamente con loro delle istruzioni per ogni orientazione dei rilevatori, e che le istruzioni sono identiche quando i rilevatori si trovano nella stessa posizione; si giunge pertanto alle seguenti otto possibilità:

	1	2	3
1	sì	sì	sì
2	sì	sì	no
3	sì	no	sì
4	sì	no	no
5	no	sì	sì
6	no	sì	no
7	no	no	sì
8	no	no	no

In questa tabella le colonne 1, 2, 3 rappresentano le orientazioni possibili dei rilevatori. Le triple rappresentano le risposte comuni che le particelle si apprestano a fornire secondo la posizione dei rilevatori: per esempio, per la risposta n° 2 si ha sì/sì/no, cioè 1 → sì, 2 → sì, 3 → no.

Dato che la posizione dei rilevatori viene fissata indipendentemente dalle particelle,³⁶ ogni particella deve portare con sé risposte a tutte le domande possibili, ed esse devono essere le stesse da entrambe le parti per rendere conto delle correlazioni perfette. Si hanno quindi le otto possibilità indicate nella tabella e nient'altro. Consideriamo ora un gran numero di esperimenti preparati nelle stesse condizioni. Niente ci dice con quali frequenze appariranno le varie possibilità. Si deve ottenere una volta su due una risposta "sì", una volta su due una risposta "no". Ma potrebbe

³⁶ L'abbandono di quest'ipotesi è stato considerato alla fine della sezione 4.

ben darsi, per il momento, che si ottengano una volta su due le istruzioni 1, una volta su due le istruzioni 8, e mai le altre. La sola cosa evidente è che, se tali istruzioni esistono, esse appaiono con una certa frequenza ben determinata.

Bell dimostra che non esiste alcuna maniera di associare frequenze alle varie istruzioni che renda conto dei risultati sperimentali. Per dimostrarlo, consideriamo in primo luogo i risultati statistici che si ottengono quando un rivelatore si trova nella posizione 1 e l'altro nella posizione 2: si ottiene $1/4$ di risposte sì/no o no/sì e $3/4$ di risposte sì/sì o no/no. Se diamo un'occhiata alla tabella, le istruzioni 3, 4, 5, 6 forniscono solo risposte sì/no o no/sì, mentre le altre forniscono risposte sì/sì o no/no. Se prepariamo quindi i sistemi nelle stesse condizioni, otteniamo $1/4$ delle particelle negli stati 3, 4, 5 o 6. Se poniamo ora un rivelatore nella posizione 2 e l'altro nella posizione 3, otteniamo di nuovo $1/4$ di risposte sì/no o no/sì. Il che vuol dire (cfr. la tabella) che l'insieme degli stati 2, 3, 6 e 7 appare con una frequenza $1/4$. Il che implica che l'insieme delle posizioni 2, 3, 4, 5, 6 e 7 appare con frequenza al più uguale ad $1/2$. Quindi gli stati 1 e 8 (tutti sì o tutti no) hanno insieme una frequenza almeno uguale ad $1/2$. A questo punto arriva la contraddizione. Se poniamo un rivelatore nella posizione 1 e l'altro nella posizione 3, il numero di risposte sì/no o no/sì diventa uguale a $3/4$ del totale. Ma negli stati 1 e 8 (la cui frequenza, lo abbiamo appena visto, è superiore a $1/2$) la risposta per questa posizione sarà sì/sì o no/no. Risulta quindi impossibile attribuire una frequenza, in qualsiasi maniera lo si faccia, alle "variabili nascoste" sì/no. Ciò significa che esse non esistono.

Riassumiamo l'argomento: l'insieme delle risposte è stato introdotto come sola spiegazione locale possibile delle correlazioni perfette. Queste ultime non vincolano in alcun modo la distribuzione statistica dei differenti giuochi di risposte. Solo sistemando i rivelatori in direzioni differenti è possibile accorgersi che nessuna distribuzione statistica può render conto dei risultati osservati.

Notiamo che non viene utilizzata alcuna nozione teorica di probabilità, soltanto le frequenze empiriche. Inoltre, una versione migliorata dell'argomento [31] non fa alcun ricorso alla statistica.

D'altro canto, è falso dire che l'argomento ci costringe a "scegliere" tra località e realismo. Qui "realismo" si riferisce probabilmente all'esistenza di "istruzioni" che stabiliscono come le proprietà che vengono misurate (spin, polarizzazione) preesistano alla misura. Il che non ha niente a che fare con il realismo filosofico. In effetti, non è certo un obbligo per il realista ammettere che una certa proprietà, lo spin per esempio, abbia un valore ben determinato, dato in anticipo. Ma l'argomento di Bell-EPR confuta sia questo "realismo" che la località: Einstein, Podolsky e Rosen mostrano che la località implica un "realismo" siffatto mentre Bell mostra che un "realismo" siffatto non è sostenibile. Non ci sono scelte possibili e non è in alcun modo una questione filosofica.

Veniamo ora alla descrizione quantistica della situazione: la sorgente emette una coppia di particelle la cui funzione d'onda è:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|1u\rangle|2d\rangle - |1d\rangle|2u\rangle),$$

dove le particelle sono denotate con 1, 2 e dove u (up) e d (down) si riferiscono all'orientazione dello spin (o della polarizzazione) secondo una direzione assegnata. Una proprietà notevole dello stato (1) è che esso mantiene la stessa forma quale che sia la direzione considerata (si veda ad es. [47], capitolo 6). I rilevatori sono sistemati in modo da "misurare lo spin" in direzioni diverse e gli angoli tra queste direzioni sono scelti opportunamente (nel calcolo quantistico i valori $1/4$ e $3/4$ derivano dal fatto che $\sin^2 30^\circ = 1/4$ e $\sin^2 60^\circ = 3/4$).

Se interpretiamo la meccanica quantistica considerando la riduzione come un'operazione fisica reale (nel quadro di una teoria GRW [29] per esempio), allora la non località si mostra in maniera manifesta: una misura sulla particella 1 ridurrà lo stato (1) in

$$|1u\rangle|2d\rangle \text{ o } |1d\rangle|2u\rangle$$

(secondo il risultato), ma facendo questo lo stato della particella 2 si modifica nello stesso modo, senza che si verifichi la minima azione diretta, locale, su questa particella (per semplicità, abbiamo identificato il risultato up/down con sì/no a destra adottando la convenzione opposta a sinistra).

APPENDICE III

La teoria di Bohm

La prima qualità di questa teoria è che la funzione d'onda Ψ acquista un senso fisico preciso; il suo status è duplice, dinamico e statistico.³⁷

Iniziamo con l'aspetto dinamico. In primo luogo, per un sistema di n particelle, lo stato completo del sistema è dato da (x, Ψ) , dove Ψ è la funzione d'onda $\Psi(x_1, \dots, x_n)$ e $x = (x_1, \dots, x_n)$ denota le posizioni delle particelle. Sono le "variabili nascoste" della teoria. La dinamica è data da

$$1. \quad \Psi_t = U(t)\Psi_0$$

e

$$2. \quad \frac{dx_i}{dt} = \frac{\hbar}{m_i} \operatorname{Im} \frac{\Delta_i \Psi}{\Psi} \quad i = 1, \dots, n$$

dove la prima equazione è semplicemente la dinamica di Schrödinger e la seconda mostra come Ψ "guidi" le particelle determinando le loro velocità (Δ_i è il gradiente in rapporto ad x_i e m_i è la massa).

La teoria di Bohm finisce (quasi) qui. Vediamo ciò che essa implica. Prima osservazione: è completamente deterministica: dato (x_0, Ψ_0) le posizioni e la funzione d'onda a tempi successivi sono determinati. Ciò risolve peraltro immediatamente il problema della misura: in effetti, riflettendoci un attimo ci si accorge che tutte le nostre misure sono, in fin dei conti, misure di posizione: posizione del rilevatore di velocità per esempio. Allo stesso modo, le posizioni delle particelle che compongono il gatto sono sufficienti a determinare se è vivo o è morto.³⁸ In questa teoria non c'è quindi alcun bisogno di attribuire uno status privilegiato alla misura, all'osservatore ecc...

La dinamica di Bohm non è filosoficamente differente dalla meccanica classica pur restando fortemente non classica. Nell'esperienza delle due fenditure (si veda [24]), infatti, la particella passa per una di esse ma la sua funzione d'onda, che la guida, è diversa a seconda che la seconda fenditura sia aperta oppure no.³⁹

³⁷ L'hamiltoniana H possiede uno status analogo (ma si tratta solo di un'analogia) in meccanica classica: essa governa la dinamica ma, al tempo stesso, la probabilità di una configurazione all'equilibrio è proporzionale a $e^{-\beta H}$.

³⁸ Come fa osservare Bell, chiamare "variabili nascoste" le posizioni è un errore storico; in effetti, sono le posizioni che si manifestano, ed è la funzione d'onda che è "nascosta", cioè che deve essere costruita a partire da teoria ed esperimento.

³⁹ Si veda [53] per una simulazione numerica di questo esperimento dal punto di vista della teoria di Bohm.

Si verifica d'altronde un'"effettiva" riduzione della funzione d'onda in questa teoria. Nel corso di una misura, se otteniamo una funzione d'onda quale quella data dall'equazione (3.) dell'appendice 1, accade che i supporti di $|\Phi_1\rangle|\Psi_1\rangle$ e di $|\Phi_2\rangle|\Psi_2\rangle$ siano in generale disgiunti, e che lo restino a tempi successivi. Ora, la particella si trova o nel supporto di $|\Phi_1\rangle|\Psi_1\rangle$ o nel supporto di $|\Phi_2\rangle|\Psi_2\rangle$ ed è guidata dalla "parte" della funzione d'onda nel supporto della quale si trova (si veda l'equazione 2.).

Da un punto di vista pratico possiamo quindi "dimenticarci" dell'altra parte (o "ramo") della funzione d'onda. La riduzione si manifesta bensì, ma né come principio fondamentale né come mistero (si vedano [1], [2] e soprattutto [20] per una discussione più approfondita).

Consideriamo ora l'aspetto propriamente statistico della teoria: come ritrovare le previsioni statistiche della meccanica quantistica e le disuguaglianze di Heisenberg?

La risposta è semplicissima. Supponiamo di avere un gran numero di particelle distribuite aleatoriamente al tempo $t = 0$ secondo la distribuzione $|\Psi_0\rangle^2$. Una conseguenza matematica elementare delle equazioni (1.) e (2.) è che al tempo t la particelle saranno distribuite aleatoriamente secondo la legge $|\Psi_t\rangle^2$. È quindi sufficiente supporre che all'inizio le particelle siano distribuite secondo $|\Psi_0\rangle^2$ perché si ottenga per tutti i tempi la distribuzione statistica prevista dalla meccanica quantistica.

È evidente che, in ultima istanza, ogni ipotesi sulle distribuzioni statistiche iniziali rinvia alle condizioni iniziali dell'Universo. Lo stesso problema si presenta in meccanica statistica quando si voglia spiegare la seconda legge della termodinamica. Penrose [47] argomenta bene che, per render conto di questa legge, occorre supporre che l'Universo abbia avuto inizio in condizioni estremamente "improbabili". E l'ipotesi che viene fatta nel quadro della teoria di Bohm è infinitamente più naturale di quella che occorre fare per giustificare la seconda legge della termodinamica.

Nella teoria di Bohm è infatti sufficiente supporre che le particelle siano distribuite aleatoriamente secondo la legge $|\Psi_0\rangle^2$, cioè secondo l'equilibrio quantistico. Si deducono di qui le previsioni statistiche della meccanica quantistica, ivi comprese le disuguaglianze di Heisenberg, così come l'impossibilità, in linea di principio, di "spingersi più in là" e di controllare le posizioni delle particelle per ottenere risultati che violino queste disuguaglianze (si veda [20]).

Per spiegare la relazione tra equilibrio quantistico ed i limiti che esso impone alle nostre conoscenze facciamo ricorso ad un'analogia con la fisica statistica. Consideriamo un recipiente contenente un gas, e comprimiamo quest'ultimo per mezzo di un pistone in una metà del recipiente. Il pistone viene poi ritirato ed al gas è permesso di raggiungere l'equilibrio nel recipiente. Una volta raggiunto l'equilibrio è impossibile, in base ad osservazioni fatte sul gas, determinare in quale parte del recipiente fosse stato compresso precedentemente. In linea di principio, "basta" conoscere

(da un punto di vista classico) le posizioni e le velocità di tutte le particelle del gas per poter retrodurre la sua storia. Ma il fatto è che nessuna delle misure (macroscopiche) alle quali abbiamo effettivamente accesso ci permette di risolvere il problema. Una delle proprietà delle distribuzioni statistiche di particelle del gas all'equilibrio è infatti quella di "bloccare" la nostra conoscenza e di impedirci di dire da dove esso proviene.

Inoltre, proprio il fatto di avere a disposizione sistemi che non sono all'equilibrio, come gli uomini ed i pistoni, ci permette di porre il gas in una metà del recipiente o, più in generale, di eseguire esperimenti ed acquisire conoscenze. Se invece tutto ciò che si trova fuori dal nostro cervello fosse all'equilibrio, ogni conoscenza sarebbe impossibile o illusoria. Avremmo la giustificazione fisica del solipsismo.

Nel mondo reale la funzione d'onda non è all'equilibrio, il che ci permette di esistere e di conoscere. Ma se le posizioni delle particelle, di tutte le particelle, sono all'equilibrio quantistico, è facile capire che non si può andare al di là delle previsioni statistiche della meccanica quantistica. Uno degli aspetti più notevoli della teoria di Bohm è forse l'introduzione di un'approccio "materialista" all'inconoscibile: ciò che è conoscibile e ciò che è inconoscibile non è posto a priori ma dipende, in fin dei conti, dalla maniera in cui è fatto il mondo.

Un altro aspetto positivo della teoria di Bohm è che spiega il ruolo essenziale dell'apparato di misura. Tale ruolo era ovviamente già stato sottolineato da Bohr, ma in maniera aprioristica o filosofica, mentre nella teoria di Bohm questo ruolo fa parte delle leggi naturali. In effetti, e non si sottolinea mai abbastanza il punto, non ci sono, in questa teoria, "variabili nascoste" attribuenti valori predeterminati ad "osservabili" quali l'impulso, lo spin ecc... Ciò permette d'altronde alla teoria di Bohm di sfuggire a tutte le "dimostrazioni d'impossibilità" di teorie a variabili nascoste.

È certo vero che, in quanto la teoria è deterministica, se vengono precisate la posizione iniziale e la funzione d'onda iniziale della particella, così come i dettagli del dispositivo di misura, il risultato è determinato. Ma occorre precisarli questi "dettagli". L'azione dell'apparato di misura consiste nell'agire sulla funzione d'onda della particella (determinando l'hamiltoniana del sistema, e quindi anche l'operatore $U(t)$ a mezzo dell'equazione 1.); la funzione Ψ , a sua volta, guida la particella. Occorre quindi specificare l'interazione specifica dell'apparato di misura per sapere quello che quest'ultimo fa effettivamente. Albert [2] fornisce un esempio di "misura di spin" in cui ruotando l'apparato il risultato cambia da "spin up" a "spin down", anche se "misuriamo" la stessa particella con la stessa posizione iniziale e la stessa funzione Ψ di partenza. Ciò mostra efficacemente come le parole "misura" ed "osservabili" siano pericolose. Meglio sarebbe parlare di interazione o di esperimenti.

Qual è la relazione tra teoria di Bohm e non località? Una qualità supplementare della teoria è rendere conto in maniera naturale della non località. In effetti, la funzione d'onda è definita sullo spazio delle configura-

zioni.⁴⁰ Per esempio, per due particelle abbiamo $\Psi(x_1, x_2)$ e può darsi che il supporto di Ψ sia dato da $x_1 \in V_1, x_2 \in V_2$, dove V_1 e V_2 sono regioni dello spazio lontane l'una dall'altra. Possiamo ora agire su Ψ grazie ad un'interazione fisica localizzata in V_2 . Ma questo può influenzare il comportamento della particella n° 1, via l'equazione (2.) (a meno che $Y(x_1, x_2)$ non si fattorizzi in $\Psi(x_1)\Psi(x_2)$). È esattamente ciò che accade alla funzione d'onda data dall'equazione (1.) dell'appendice II.

Come riconciliare la teoria di Bohm con la relatività, dato che è non locale? Occorre distinguere due problemi: in primo luogo, è possibile avere una teoria di Bohm che renda conto dei risultati previsti dalla teoria quantistica dei campi? In secondo luogo, questa teoria sarà invariante sotto il gruppo di Lorentz? Per quanto riguarda la prima domanda, Bell propone in *Beables for quantum field theory* [7] di prendere il numero di fermioni come variabile che rimpiazza le posizioni delle particelle. Anche se la sua teoria non è ben sviluppata matematicamente, Bell non vede problemi di principio a rispondere affermativamente alla prima domanda. Ma la teoria così formulata non è invariante sotto il gruppo di Lorentz. Il che pone un problema, ma non "perché viene contraddetta dai fatti". La teoria giustifica nella maniera canonica l'esperimento di Michelson-Morley e gli altri esperimenti a sostegno della relatività. C'è però una specie di etere che permette di definire una simultaneità assoluta. Bell spiega bene che non sussiste, nei fatti, alcuna incoerenza né alcuna contraddizione con l'esperienza nel presentare la relatività servendosi di un etere ([7], capitolo 9). Ciò pare soltanto arbitrario ed inelegante. Ma forse la non località ci costringe ad adottare una soluzione che va in questa direzione. Come dice Bell, «è una maniera buffa di fare il mondo», ma forse è così che è fatto.

⁴⁰ Questo per un sistema a molte particelle. Un campo classico, ad esempio quello elettrico, è invece sempre definito sullo spazio reale.

APPENDICE IV

Bibliografia

Indico qui alcuni libri o articoli in cui il lettore potrà trovare complementi di informazione.

1. *I problemi della meccanica quantistica e le loro possibili soluzioni*: si veda [1], capitolo 4, [5] e "The moral aspect of Quantum Mechanics" (capitolo 3 di [7]) per l'esposizione del problema e la confutazione di soluzioni troppo semplicistiche.

Le differenti posizioni possibili sono discusse in "Six possible worlds of quantum mechanics" ([7], capitolo 20). La teoria dei "molti mondi" e delle "molte menti" si trova analizzata in [1] ed in "Quantum mechanics for cosmologists" ([7], capitolo 15, ed anche capitolo 11, in cui questa teoria è messa a confronto con quella di Bohm). Sulla teoria "GRW" (modificare l'equazione di Schrödinger in maniera stocastica) si veda, oltre a [29], il capitolo 22 di [7] ed il libro di Albert ([1], capitolo 5).

Per la teoria di Bohm, oltre alla versione originale [11] si possono leggere i capitoli 17, 20 e 14 di [7]. Bell spiega perché le "dimostrazioni di impossibilità", come quella di von Neumann, delle teorie a variabili nascoste non lo sono, il che è molto interessante (visto il credito accordato spontaneamente a tali "dimostrazioni") da un punto di vista storico.

Un'introduzione elementare alla teoria di Bohm è dovuta ad Albert ([2], [1]).

L'esposizione più dettagliata dell'aspetto statistico della teoria di Bohm si trova in [20] (si vedano anche [21], [22]).

Per una versione "bohmiiana" della teoria quantistica dei campi si veda "Beables for quantum field theory" ([7], capitolo 19) e per un modo di presentare la relatività ristretta che possa essere compatibile con la non località quantistica si veda "How to teach special relativity" (capitolo 9 di [7]).

2. *La non località*: l'articolo di Bell più chiaro su questo argomento è "Bertlmann's socks and the nature of reality" ([7], capitolo 16). Occorre dire che la non località è talmente sconvolgente che è normale assistere, anche in Bell, ad un'evoluzione, per lo meno nella presentazione del risultato. A mio avviso, è in "Bertlmann's socks" che la non località è enunciata nel modo più chiaro. In particolare, tutti gli articoli di Bell parlano di probabilità (condizionate), il che crea a volte l'illusione che nell'argomento sia presente qualche sottigliezza associata all'impiego del concetto teorico di probabilità. Uno dei vantaggi della presentazione di Mermin risiede nel formulare tutto in termini frequenze empiriche ([42, 40]; si veda anche [35] per

una discussione elementare ed una confutazione di alcune idee false piuttosto diffuse). Una discussione elementare di tutti i teoremi riguardanti le variabili nascoste si trova in [43]. La non località è spiegata bene nel libro di Albert [1] ed in [52]. Si può rilevare come né il determinismo né il "realismo" siano posti come ipotesi in questi testi.

Infine, per una discussione dettagliata della non località e dei problemi legati alla relatività, l'opera di riferimento è Maudlin [38].

3. Per una prospettiva storica si consulterà [36] come riferimento generale, ma soprattutto [26] per la temperie intellettuale in cui è nata la meccanica quantistica. Per un buon riassunto si veda [30]. In [48] è possibile leggere un'analisi del fatto che il teorema di von Neumann che "confuta" le teorie a variabili nascoste sia stato citato a lungo dopo che questo stesso teorema era stato "confutato" dall'esistenza della teoria di Bohm.

Ringraziamenti

Nel corso degli anni ho beneficiato di numerose conversazioni sui fondamenti della meccanica quantistica o su questo articolo con, tra gli altri, Bertrand Hespel, Antti Kupiainen, Christian Maes, Tim Maudlin, André Naudts e Jean Pestieau. Li ringrazio per questo, pur precisando che le loro opinioni non collimano necessariamente con le mie. Ma è nel corso di numerose conversazioni con Sheldon Goldstein che ho imparato l'essenziale di ciò che tento di spiegare in questo articolo.

RIFERIMENTI

- [1] D. Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.) (1992). [tr. it. di T. Cannillo: *Meccanica quantistica e senso comune*, Adelphi, Milano (2000)]
- [2] D. Albert, Bohm's alternative to quantum mechanics, *Scientific American*, May 1994. [tr. it. in *Le Scienze* **311**, luglio 1994, pp. 42-50]
- [3] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analysers, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804-1807 (1982).
- [4] J. S. Bell, intervista in *Omni*, Maggio 1988, p. 88.
- [5] J. S. Bell, Against "measurement", *Physics World* **3** 33-40 (1990).
- [6] J. S. Bell, Bertlmann's socks and the nature of reality, capitolo 16 in [7].
- [7] J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge (1993).
- [8] J. Bernstein, *Quantum Profiles*, Princeton University Press, Princeton (1991).
- [9] M. Berry, *Principles of Cosmology and Gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge (1976).
- [10] D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics*, Harper, New York (1957).
- [11] D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variables", Parts 1 and 2, *Phys. Rev.* **89**, 166-193 (1992).
- [12] N. Bohr, Can quantum mechanical description of reality be considered complete?, *Phys. Rev.* **48**, 696-702 (1935).
- [13] N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gonthier (1961).
- [14] M. Born (curatore), *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, London (1971).
- [15] H. Broch, *Au coeur de l'extraordinaire*, L'Horizon chimérique, Bordeaux (1992).
- [16] J. T. Cushing, E. MacMullin (curatori), *Philosophical Consequences of Quantum Theory. Reflections on Bell's Theorem*, University of Notre Dame Press, Notre Dame (1989).
- [17] P. C. W. Davies, J. R. Brown (curatori), *The Ghost in the Atom* (BBC interviews), Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [18] B. d'Espagnat, *Une incertaine réalité*, Gauthier-Villars, Paris (1981).
- [19] *Discover*, Ottobre 1982, p. 69.
- [20] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty, *J. Stat. Phys.* **67**, 843-907 (1992).
- [21] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Quantum chaos, classical randomness and Bohmian mechanics, *J. Stat. Phys.* **68**, 259-270 (1992).
- [22] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Naive realism about operators, *Erkenntnis* **45**, 379-397 (1996).

- [23] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantum mechanical description of reality be considered complete?, *Phys. Rev.* **47**, 777-780 (1935).
- [24] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading (1965). [tr. it. di E. Clementel, M. Cresti, S. Focardi e L. Monari: *La fisica di Feynman*, Inter European Editions, Amsterdam (1975)]
- [25] R. P. Feynman, Simulating physics with computers, *Intern. Journal of Theor. Phys.* **21**, 467 (1982).
- [26] P. Forman, Weimar culture, causality and quantum theory, 1918-1927: adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile intellectual environment, *Hist. Studies in the Phys. Sci.* **3**, 1-115 (1971). [tr. it. a cura di T. Tonietti: *Fisici a Weimar*, CRT, Pistoia 2002]
- [27] M. Gardner, *The New Age. Notes of a Fringe Watcher*, Prometheus Books, Buffalo (1988).
- [28] M. Gell-Mann and J. B. Hartle, *Quantum mechanics in the light of quantum cosmology*, in *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, W. Zurek ed., Addison-Wesley, Reading, pp. 425-458 (1990); *Alternative decohering histories in quantum mechanics*, in *Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics*, Singapore 1990, K. K. Phua and Y. Yamaguchi eds., World Scientific, Singapore (1991); *Classical equations for quantum systems*, *Phys. Rev.* **D47**, 3345-3382 (1993).
- [29] G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber, Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems, *Phys. Rev.* **D34**, 470-491 (1986).
- [30] S. Goldstein, J. L. Lebowitz, *Quantum mechanics: does the wave function provide a complete description of physical reality?* in *The Physical Review: The first hundred years*, H. H. Stroke (curatore), AIP Press (1994).
- [31] D. Greenberger, M. Horn, A. Shimony, Z. Zeilinger, Bell's theorem without inequalities, *Am. J. Phys.* **58**, 1131-1143 (1990).
- [32] J. Gribbin, *Le chat de Schrödinger*, Le Rocher, Monaco (1984).
- [33] R. B. Griffiths, Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics, *J. Stat. Phys.* **36**, 219-272 (1984); A consistent interpretation of quantum mechanics using quantum trajectories, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2201 (1993).
- [34] W. Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, Gallimard, Paris (1962).
- [35] N. Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, Garden City (1985).
- [36] M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York (1974).
- [37] C. Levi-Strauss, intervista in "Les grands entretiens du Monde", *Le Monde, dossiers et documents*, numero speciale, maggio 1994.
- [38] T. Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, Blackwell, Cambridge (1994).
- [39] T. Maudlin, *A modest proposal concerning laws, counterfactuals and explanations*, preprint, Università di Rutgers.

- [40] D. Mermin, Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory, *Phys. Today*, Aprile 1985.
- [41] D. Mermin, *Lettere e risposte in Physics Today*, Dicembre 1990.
- [42] D. Mermin, *Boojums All the Way Through*, Cambridge University Press, Cambridge (1990).
- [43] D. Mermin, Hidden variables and the two theorems of John Bell, *Rev. Mod. Phys.* **65**, 803-815 (1993).
- [44] R. Omnes, Consistent interpretations of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **64**, 339-382 (1992); Logical reformulation of quantum mechanics I, *J. Stat. Phys.* **53**, 893-932 (1988).
- [45] S. Ortoli, J. P. Pharabod, *Le cantique des quantiques*, La Découverte, Paris (1984). [tr. it. di E. Castelli: *Il cantico dei quanti*, Theoria, Roma-Napoli (1991)]
- [46] A. Pais, *Einstein and the quantum theory*, *Rev. Mod. Phys.* **51**, 863-914 (1979).
- [47] R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford (1989). [tr. it. di L. Sosio: *La mente nuova dell'imperatore*, Sansoni Editore, Milano (1992)]
- [48] T. Pinch, *What does a proof do if it does not prove?* in *The Social Production of Scientific Knowledge*, E. Mendelsohn, P. Weingart, R. Whitley (curatori), Reidel, Dordrecht (1977).
- [49] M. Redhead, *Incompleteness, Non locality and Realism*, Clarendon Press, Oxford (1987).
- [50] *Scientific American*, Novembre 1979, p. 158.
- [51] H. Stapp, *Nuovo Cimento* **40B**, 191 (1977).
- [52] H. Stapp, Bell's theorem and the foundations of quantum physics, *Amer. J. Phys.* **53**, 306-317 (1985).
- [53] J. P. Vigièr, C. Dewdney, P. E. Holland, A. Kyprianidis, *Causal particle trajectories and the interpretation of quantum mechanics*, in *Quantum Implications; Essays in Honour of David Bohm*, B. J. Hiley, F. D. Peat (curatori), Routledge, London (1987).
- [54] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1955). [tr. it. di G. Boniolo: *I fondamenti matematici della meccanica quantistica*, Il Poligrafo, Padova (1997)]
- [55] S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Vintage, London (1993). [tr. it. di G. Rigamonti: *Il sogno dell'unità dell'universo*, Arnoldo Mondadori Editore, Milano (1993)]



1. L. Grecchi, *La verità umana nel pensiero religioso di Sergio Quinzio*.
2. AA. VV., *Sumbállein. Riflessioni sugli scritti di U. Galimberti*. F. Bordonaro, *L'età della tecnica? Appunti di lettura di «Psiche e Techne»* – M. Marolla, *Dalla crisi della ragione alla coscienza simbolica. Esposizione e osservazioni critiche intorno al saggio di U. Galimberti, «La terra senza il male. Jung: dall'inconscio al simbolo»* – F. Toscani, *Sacro, tecnica, etica nel pensiero di U. Galimberti* – D. Melegari, *Dall'equivoco alla possibilità* – A. G. Biuso, *Corpo e Tempo* – C. Preve, *Marx e Heidegger. Pervasività della tecnica e critica culturale al capitalismo nei due classici ed in alcuni loro interpreti contemporanei* – G. Bailone, *I vizi di Galimberti e il peccato di Aracne*.
3. U. Galimberti – L. Grecchi, *Filosofia e Biografia*.
4. L. Grecchi, *Nel pensiero filosofico di Emanuele Severino*.
5. L. Grecchi, *Corrispondenze di metafisica umanistica*.
6. L. Grecchi, *Il necessario fondamento umanistico della metafisica*.
7. C. Preve – L. Grecchi, *Marx e gli antichi Greci*.
8. AA. VV., *Dialettica oggi*. C. Preve, *Elogio della filosofia. Fondamento, verità e sistema nella conoscenza e nella pratica filosofica dai greci alla situazione contemporanea* – G. Bailone, *La verità si può mettere ai voti?* – E. Berti, *Si può parlare di una evoluzione della dialettica platonica?* – M. Vegetti, *La dialettica nella Repubblica di Platone* – D. Losurdo, *Contraddizione oggettiva e analisi della società: Kant, Hegel, Marx* – Giovanni Stelli, *Alcune osservazioni sulla dialettica hegeliana* – N. De Bellis, *Note a margine sulla dialettica di Hegel* – A. G. Biuso, *Dialettica e benedizione. Sull'antropologia greca di F. Nietzsche* – M. Marolla, *Riflessioni sull'attualità della dialettica*.
9. L. Grecchi, *Conoscenza della felicità*. Premessa di M. Vegetti.
10. L. Grecchi, *Il pensiero filosofico di Umberto Galimberti*. Presentazione di C. Vigna.
11. Costanzo Preve, *Storia della Dialettica*.
12. M. Gentile, *La metafisica presofistica*. Con una Appendice su "Il valore classico della metafisica antica". Introduzione di E. Berti.
13. C. Preve, *Storia dell'Etica*.
14. E. Berti, *Incontri con la filosofia contemporanea*.
15. L. Grecchi, *Il presente della filosofia italiana*.
16. C. Preve, *Storia del Materialismo*.
17. G. Casertano, *La nascita della filosofia vista dai Greci*.
18. M. Vegetti, *Scritti con la mano sinistra*.
19. D. Fusaro, *Incursioni nella filosofia moderna*.
20. AA. VV., *Filosofia ed estetica*. F. Toscani, *Poesia e pensiero nel «tempo di privazione»*. In cammino con Hölderlin e Heidegger – D. Sperduto, *Eschilo in*

G. D'Annunzio, E. Severino e L. Grecchi – C. Preve, *L'estetica di Lukács fra arte e vita. Considerazioni storiche, politiche e filosofiche* – D. Fusaro, *Per una teoria dell'arte in Marx* – A. G. Biuso, «Abbiamo l'arte per non naufragare nella verità». *Sull'estetica dionisiaca di Nietzsche* – D. Stea, *Popolarizzazione e rifunzionalizzazione della musica colta* – M. Marolla, *Estetica e modernità secondo Benedetto Croce* – F. Toscani, *Il riso di Zarathustra. Prospettivismo e benedizione nel Nietzsche di A. G. Biuso* – O. Spisni, *Vedere senza vedere* – M. Nicolaci, *L'interpretazione come modello di razionalità* – R. Signorini, *Alle origini del fotografico*.

21. L. Grecchi, *L'umanesimo della antica filosofia greca*.

22. P. Manuli – M. Vegetti, *Cuore, sangue e cervello. Biologia e antropologia nel pensiero antico*.

23. L. Grecchi, *L'umanesimo di Platone*.

24. L. Grecchi, *L'umanesimo di Aristotele*.

25. L. Grecchi, *L'umanesimo di Plotino*.

26. L. Grecchi, *Il filosofo e la vita. I consigli di Platone e dei classici Greci, per la buona vita*.

27. A. Cavadi, *Chiedete e non vi sarà dato. Per una filosofia (pratica) dell'amore*.

28. E. Screpanti, *Marx e il contratto di lavoro: dall'astrazione naturale alla sussunzione formale*.

29. L. Grecchi, *L'umanesimo della antica filosofia cinese*.

30. L. Grecchi, *L'umanesimo della antica filosofia indiana*.

31. L. Grecchi, *L'umanesimo della antica filosofia islamica*.

32. AA. VV., *Filosofia e politica. Che fare? Intenzioni* – C. Preve, *La saggezza dei Greci. Una proposta interpretativa radicale per sostenere l'attualità dei Greci oggi* – A. Tosei, *I diritti dell'uomo e i livelli dell'universale. Aporie della mediazione* – D. Collin, *Per una critica dell'economia politica* – G. Pezzano, *Filosofi(a) e politica (?)*. *Breve storia di un rapporto controverso* – D. Losurdo, *I «Protocolli dei Savi dell'Islam» ovvero come si costruiscono le leggende nere* – C. Vigna, *Politica e speranza* – E. Berti, *Per una nuova società politica* – D. Fusaro, *La gabbia d'acciaio: M. Weber e il capitalismo come destino* – E. Screpanti, *Marx e il contratto di lavoro: dall'astrazione naturale alla sussunzione formale* – M. Vegetti, *La filosofia e la città: processi e assoluzioni* – F. Toscani, *Speranza e utopia nel pensiero di E. Bloch* – F. Leonardi, *La Repubblica di Platone. Il tiranno e il filosofo: una affinità elettiva* – M. Marolla, *Benedetto: politica, filosofia, fede nel tempo della crisi* – A. G. Biuso, *Oltre liberalismo e socialismo* – M. Barison, *Critica della produzione immateriale* – A. Cavadi, *La filosofia-in-pratica. Una discussione lacustre* – D. Sperduto, *Agire o lasciar fluire?* E. Severino e C. Levi a confronto – L. Tonetti, *I filosofi e la politica: che fare? Nuova filosofia del fare: azione e riflessione nella politica di oggi* – C. Preve, *Il saggio di Luca Grecchi Occidente: radici, essenza, futuro. Un convincente esercizio di filosofia della storia* – D. Benvenuti, *Il saggio di A. Sangiacomo: Scorci. Ontologia e verità nella filosofia del Novecento* – A. Cavadi, *Il saggio di N. Pollastri: Consulente filosofico cercasi*.

33. Rodolfo Mondolfo, *Gli albori della filosofia in Grecia*. Introduzione di G. Casertano.

34. C. Tinnirello, *Singolarità estetica. Prassi mimetiche tra arte e filosofia da Nietzsche a Nancy*. Introduzione di G. Frazzetto.
35. L. Grecchi, *Perché non possiamo non dirci Greci*. In *Appendice: In difesa di Socrate, Platone ed Aristotele*.
36. L. Grecchi, *La filosofia della storia nella Grecia classica*.
37. L. Grecchi, *Gli stranieri nella Grecia classica. Paralleli con il nostro tempo*.
38. G. Quaresima, *La globalizzazione e le nuove teorie dell'imperialismo. Una rassegna critica*.
39. C. Vigna – L. Grecchi, *Sulla verità e sul bene*. Presentazione di E. Berti. Postfazione di C. Preve.
40. AA. VV., *Bene comune. – Intenzioni – E. Berti, Il bene – C. Vigna, Per una metafisica del bene comune – P. Sequeri, Agorà / Oltre il dialogo. Sfida congiunta alla passioni tristi – D. Fusaro, Quale comune? Per una critica del marxismo deleuziano di T. Negri – D. G. Lassere, Lo statuto della critica. Per una ricostruzione filosofica dell'ultimo quarantennio – C. Preve, Le avventure della coscienza storica occidentale. Note di ricostruzione alternativa della storia della filosofia e della filosofia della storia – G. Casertano, Il bene e la linea – Franco Toscani, Il rapporto etica-politica e il tema dell'amicizia in Aristotele – M. Scarpari, La concezione dell'essere umano nella filosofia cinese – A. Monchietto, Connivenza con l'insensatezza. Fatalismo, speranza e schiavitù nel pensiero di Diego Fusaro – G. Pezzano, Contributo alla critica della giurisdizione umanitaria del bene comune a partire dal diritto romano – C. Lucchini, Alcune riflessioni sulle nozioni di felicità e di natura umana nel pensiero di L. Grecchi – L. Dorato, Relativismo e universalismo astratto: le due facce speculari del nichilismo. Bene e Verità come concetti "rivoluzionari" alla base di un universalismo sostanziale e di una critica radicale del capitalismo – C. Preve, Gli antichi, i moderni, l'umanesimo e la storia. Alcuni rilievi a partire dagli ultimi lavori di L. Grecchi e di D. Fusaro*.
41. L. Grecchi, *Diritto e proprietà nella Grecia classica. Paralleli con il nostro tempo*.
42. A. Monchietto, *Per una filosofia della potenzialità ontologica*.
43. L. Grecchi, *L'umanesimo di Omero*.
44. C. Preve, *Lettera sull'Umanesimo*. Postfazione di G. Pezzano.
45. L. Grecchi, *Il presente della filosofia nel mondo*. Postfazione di G. Pezzano.
46. G. Pezzano, *Tractatus Philosophico-Anthropologicus. Natura umana e capitale*.
47. L. Grecchi, *L'umanesimo politico dei "Presocratici"*.
48. C. Lucchini, *Il cervello e il bene*. Presentazione di G. Pezzano.
49. AA. VV., *Per un pensiero forte. – Intenzioni – L. Dorato, Verità, ontologia umana e capitalismo – C. Preve, Questioni di filosofia, di verità, di storia, di comunità. Intervista a cura di Saša Hrnjez – L. Grecchi, Ancora sul pensiero di Emanuele Severino – D. Fusaro, Il realismo, fase suprema del postmodernismo? Note su «New Realism», postmodernità e idealismo – G. Pezzano, Per un'antropologia del «metron». Brevi considerazioni preliminari – G. Cavallo, Potere e natura umana. Paradigmi a confronto – L. Cesana, Karel Kosík: Praxis e*

verità. «L'uomo si realizza, cioè si umanizza nella storia» – M. Marolla, *Ratzinger: fasi e natura del relativismo contemporaneo* – Franco Toscani, *L'anima e la morte nel Fedone di Platone. Sugli inizi della metafisica occidentale* – D. Trematore, *Un parricidio postmoderno* – V. Cordero, *La metafisica è ancora viva* – F. Valagussa, *Nietzsche. Il Senso come "poiesi" del Pensiero*. «Sostenersi senza appoggio» – G. Pezzano, Note critiche intorno a G. Pasquale, *La ragione della storia. Per una filosofia della storia come scienza* – A. Cavazzini, Note critiche intorno a C. Lo Iacono, *Althusser in Italia. Saggio bibliografico (1959-2009)* – M. Marolla, Note critiche intorno a C. Caltagirone, *La misura dell'uomo. La questione veritativa dell'antropologia* – G. Pezzano, Note critiche intorno a C. Lucchini, *Il bene come processo possibile concreto. Natura umana e ontologia sociale* – C. Preve, *Nel labirinto delle scuole filosofiche contemporanee. A partire dalla bussola di L. Grecchi* – Carmelo Vigna, *Sull'Europa*.

50. C. Preve, *Una nuova storia alternativa della filosofia. Il cammino ontologico-sociale della filosofia*.

51. L. Grecchi, *Il pensiero filosofico di Enrico Berti*. Presentazione di C. Vigna. Postfazione di E. Berti.

52. C. Fiorillo – L. Grecchi, *Il necessario fondamento umanistico del "comunismo"*.

53. Ernesto Screpanti, *Marx dalla totalità alla moltitudine (1841-1843)*.

54. Luca Grecchi, *Perché, nelle aule universitarie di filosofia, non si fa (quasi) più filosofia*.

55. Giovanni Stelli – Luca Grecchi, *Lettere su filosofia e università*.

56. AA. VV., *Senso e valore della filosofia. Tre domande, alcune risposte. – Intenzioni* – Rispondono: C. Preve, L. Grecchi, L. Dorato, G. Stelli, A. Cavadi, F. Toscani, A. G. Biuso – G. Pezzano, *Recensione a: A. G. Biuso, Temporalità e Differenza* – C. Preve, *Recensione a: C. Fiorillo-L. Grecchi, Il necessario fondamento umanistico del "comunismo"*.

57. A. Monchietto - G. Pezzano (a cura di), *Invito allo Straniamento. I. Costanzo Preve filosofo*. CONTRIBUTI DI: A. Monchietto, G. Pezzano, S. Sissa, A. Volpe, P. Zygmalski, D. Fusaro, A. Bulgarelli, L. Grecchi.

58. Luca Grecchi, *Discorsi di filosofia antica*.

59. Alessio Cernicchiaro, *Günther Anders. La Cassandra della filosofia. Dall'uomo senza mondo al mondo senza uomo*. Presentazione di Giacomo Pezzano: *Anders e noi*.

60. Carlo Carrara, *Solitudine ed esistenza [Kierkegaard/Nietzsche/Unamuno/Heidegger/Jaspers/Sartre/Camus/Marcel/Berdjaev/Abbagnano]*. Presentazione di Angela Ales Bello.

61. Luca Grecchi, *Discorsi sul Bene*.

62. Alessandro Monchietto, *Da capo senza fine. Il marxismo anomalo di Georges Sorel*.

63. Lorenzo Dorato, *Relativismo e universalismo astratto. Le due facce speculari del nichilismo*.

64. Andrea Bulgarelli – Costanzo Preve, *Collisioni. Dialogo su scienza, religione e filosofia*.

65. Luca Grecchi, *Discorsi sulla morte*.
66. Giovanni Stelli, *Tre lezioni sulla politica di Aristotele*.
67. A. Monchietto (a cura di), *Invito allo Straniamento*. Il. Costanzo Preve marxiano. CONTRIBUTI DI: A. Bulgarelli, O. Calcagno, D. Fusaro, L. Grecchi, G. La Grassa, D. Melegari, R. Monacelli, G. Pezzano, F. Ravelli, F. Toscani.
68. Elena Irrera, *Figure del bello nella filosofia di Aristotele*.
69. Claudia Baracchi, Enrico Berti, Barbara Botter, Matteo Cosci, Silvia Fazzo, Arianna Fermani, Giovanna R. Giardina, Luca Grecchi, Carmelo Vigna, Marcello Zanatta, *Sistema e sistematicità in Aristotele*.
70. Carlo Carrara, *L'uomo ancora non pensa. Nei sentieri di Heidegger*.
71. Luca Grecchi, *Compendio di metafisica umanistica*.
72. Marino Gentile, *Come si pone il problema metafisico*. Introduzione di C. Vigna.
73. Giuseppe Cambiano - Cesare Pianciola (a cura di), *Esistenza, ragione, storia. Pietro Chiodi (1915-1970)*. Hanno collaborato a questo volume: G. Cambiano - G. Garelli - P. Marchetti - A. Mecacci - G. Pedullà - C. Pianciola - A. Ribero - F. Remotti.
74. AA. VV., *Quale progettualità*. - L. Grecchi, *Sulla progettualità* - A. Monchietto, *Quale progettualità? A partire da alcune considerazioni di Luca Grecchi* - C. Lucchini, *La progettualità comunista tra utopia concreta e necessità di funzionamento quotidiano* - A. Fiocco, *Difendere in tutti i modi la progettualità* - A. Pallassini, *Note marginali per la progettazione di un comunismo della finitezza a partire da Spinoza* - L. Grecchi, *Perché la progettualità* - C. Lucchini, *Annotazioni sulla progettualità del bene etico-sociale e sulla determinatezza materiale-naturale dell'uomo* - L. Dorato, *La progettualità come necessaria riflessione sui destini collettivi e sociali* - G. Pezzano, *Commento all'articolo di Luca Grecchi "Sulla progettualità"*; *Commento all'articolo di Luca Grecchi "Perché la progettualità?"* - L. Grecchi, *Nel merito dei commenti di Giacomo Pezzano - G. Pezzano, Il vero punto filosofico da scavare è che cosa si voglia intendere con "progettualità"* - L. Grecchi, *Una prima conclusione sulla progettualità*.
75. Claudio Lucchini, *L'etica umana tra natura e storia. Sulla possibilità di un universalismo radicalmente democratizzante*.
76. Massimo Bontempelli - Carmine Fiorillo, *Il sintomo e la malattia. Una riflessione sull'ambiente di Bin Laden e su quello di Bush dopo l'11 settembre*.
77. Stefano Daniele, Corrado De Benedittis, Gianluca Gatti, Federico Limongelli, Francesco Malizia, Giacomo Pisani, Gabriella Putignano, *Cantautorato & Filosofia. Un (In)Canto possibile*.
78. Alessandro Pallassini, *Finitezza e Sostanza. Sulla fondazione della libertà politica nella metafisica di Spinoza*.
79. Giampaolo Abbate, Claudia Baracchi, Enrico Berti, Barbara Botter, Matteo Cosci, Annabella D'Atri, Andrea Falcon, Arianna Fermani, Luca Grecchi, Alberto Jori, Diana Quarantotto, Monica Ugaglia, Carmelo Vigna, Marcello Zanatta, *Immanenza e Trascendenza in Aristotele*.

80. Luigi Ruggiu, *Tempo, coscienza ed essere nella filosofia di Aristotele. Saggio sulle origini del nichilismo*. Prefazione di Emanuele Severino.
81. Massimo Bontempelli, *Gesù di Nazareth. Uomo nella storia, Dio nel pensiero*. Prefazione di Marco Vannini. Postfazione di Giancarlo Paciello.
82. Mario Vegetti, *Il coltello e lo stilo. Animali, schiavi, barbari e donne alle origini della razionalità scientifica*.
83. Lapo Ferrarese, *Progresso scientifico e naturalismo nella concezione di Larry Laudan*.
84. Mario Vegetti, *Tra Edipo e Euclide. Forme del sapere antico*.
85. Marino Gentile, *Umanesimo e tecnica*. Introduzione di Mario Quaranta.
86. Mario Vegetti, *Scritti sulla medicina ippocratica*.
87. Silvia Fazzo, *ALEXANDER ARABUS. Studi sulla tradizione araba dell'aristotelismo greco*. Prefazione di Marwan Rashed.
88. Francesco Verde, *A cosa serve oggi fare storia della filosofia? Una modesta riflessione*.
89. Mario Vegetti, *Scritti sulla medicina galenica*.
90. Fabio Acerbi, *Concetto e uso dei modelli nella scienza greca antica*.
91. Jean Bricmont, *Contro la filosofia della meccanica quantistica*. Traduzione dal francese di Fabio Acerbi.
92. Massimo Bontempelli, *Il pregiudizio antimetafisico della scienza contemporanea*.
93. Marcello Cini, *C'è ancora bisogno della filosofia per capire il mondo?*