

PER CHI SUONA LA CAMPANA

Piergiorgio Odifreddi

Ottobre 1995

La visione ingenua che l'uomo comune ha del mondo si basa su principi enunciati dai presocratici, e adottati dalla fisica classica: l'universo è costituito di sistemi limitati e distanziati nello spazio-tempo (*separabilità*), che hanno proprietà intrinseche e indipendenti dall'osservatore (*realtà*), e che possono interagire fra loro solo quando siano sufficientemente vicini (*località*).

In mancanza di questi principi sembra essere impossibile sviluppare teorie che si possano sensatamente interpretare come descrizioni del mondo fisico: la separabilità permette di isolare sistemi dal resto dell'universo, la realtà attribuisce loro un'esistenza oggettiva, e la località permette di circoscrivere le cause dei fenomeni (senza di essa, qualunque evento potrebbe essere pensato come causato da altri chissà dove).

I principi precedenti ricevono la loro applicazione più estrema nelle cosiddette *teorie di campo*, che descrivono ad esempio i fenomeni elettromagnetici (Maxwell) o gravitazionali (Einstein), e che riducono a dimensioni infinitesime le regioni dello spazio-tempo a cui si assegna valenza ontologica di sistemi indipendenti.

La formulazione della meccanica quantistica, che sembra a prima vista essere incompatibile con quei principi, ha dunque provocato gravi problemi di interpretazione: in particolare, essa ha scatenato un dibattito tra Albert Einstein e Niels Bohr che ha segnato uno dei punti più alti di speculazione *filosofica* del secolo, e che ha avuto sviluppi e conseguenze epistemologiche inaspettate e sorprendenti.

La posizione idealista di Bohr, che si possa considerare come esistente solo ciò che si è misurato, è sintetizzata dalla massima di George Berkeley *esse est percipi* ("essere è essere percepito") o, meno pomposamente, dalle rime del prelado Ronald Arbuthnot Knox:

Si stupiva un dì un allocco:
“Certo Dio trova assai sciocco
che quel pino ancora esista
se non c'è nessuno in vista”.

La posizione realista di Einstein, che l'esistenza sia da considerare indipendente dalle misurazioni, è invece espressa nella risposta di un anonimo:

“Molto sciocco, mio signore,
è soltanto il tuo stupore.
Tu non hai pensato che
se quel pino sempre c'è
è perchè lo guardo io.
Ti saluto: sono Dio.”

Bohr e Einstein spostarono però il dibattito dal mondo macroscopico degli alberi a quello microscopico delle particelle elementari.

Heisenberg e Schrödinger (1925)

I problemi della meccanica quantistica derivano tutti, in ultima analisi, dal fatto che essa è costretta a descrivere fenomeni di livello microscopico mediante un linguaggio naturale ed un formalismo matematico che sono stati sviluppati nel corso dell'evoluzione biologica e della storia culturale per la descrizione di fenomeni di livello macroscopico.

Il principio di realtà, ad esempio, deriva dal fatto che le nostre percezioni sensoriali (vista, tatto, udito) si basano su fenomeni estremamente deboli, il cui effetto su sistemi macroscopici osservati è talmente piccolo da poter esser trascurato. Ma il principio viene ovviamente a cadere quando fenomeni e sistemi che interagiscono sono paragonabili.

Così se un'auto in corsa si scontra con un'onda elettromagnetica lanciata dai vigili per determinarne la velocità, il suo moto non ne viene influenzato e l'effetto non viene neppure notato, come dimostra la sorpresa che a volte si ha nel ricevere una multa. Ma se essa si scontra con un'altra auto in corsa, non solo l'effetto si nota: le velocità delle due auto risultano diverse dopo lo scontro, ed esse stesse potrebbero anche non esistere più (per lo meno in quanto auto) dopo l'interazione.

Se sono due onde elettromagnetiche a scontrarsi, si avrà un effetto analogo: e poichè qualche cosa bisogna pur fare per effettuare degli esperimenti, per misurare le proprietà di particelle si dovranno usare altre particelle, con effetti dirompenti. In particolare, la misurazione di una delle proprietà di un sistema microscopico lo modifica in modo sostanziale, ed impedisce quindi di misurarne le rimanenti proprietà: di qui il *principio di indeterminazione* di Werner Heisenberg, secondo cui non si possono misurare contemporaneamente quantità complementari quali posizione e momento di una particella, o durata ed energia di un evento.¹

Poichè di un sistema quantistico non si può in generale avere una conoscenza completa, a causa dell'impossibilità di misurare precisamente tutte le sue proprietà, Erwin Schrödinger ne ha proposto una descrizione in termini probabilistici, mediante una *funzione d'onda* che stabilisce per ciascuna proprietà del sistema la probabilità di ottenerne certi valori. Con la misura di una delle proprietà del sistema la funzione d'onda 'collassa', e si perde l'informazione relativa a tutte le altre proprietà.

La descrizione dell'evoluzione dei sistemi quantistici in termini di funzione d'onda comporta, almeno apparentemente, una violazione dei principi sia di separabilità che di località: se alcune parti di un sistema si allontanano sufficientemente nello spazio-tempo, dapprima la funzione d'onda del sistema originario continua comunque ad esserne una descrizione fino al collasso dovuto a qualche misura, il che fa sì che le varie parti continuino ad essere considerate come un solo sistema (violando il principio di separabilità), e poi la misura stessa su una delle parti modifica anche la funzione d'onda delle altre parti (violando il principio di località).

Bohr (1927)

La formulazione della meccanica quantistica in termini di funzione d'onda è risultata essere tanto soddisfacente da un punto di vista fisico, da venir considerata una descrizione completa del mondo subatomico. Ma a causa della sua incompatibilità coi principi di realtà, separabilità e località essa è completamente insoddisfacente da un punto di vista metafisico, e non permette

¹Per misurare precisamente la posizione di una particella è necessaria un'onda di piccola lunghezza: ma essa ha un'alta energia, e non può misurare precisamente il momento. Simmetricamente, per misurare precisamente il momento è necessaria un'onda di bassa energia: ma essa ha una grande lunghezza, e non può misurare precisamente la posizione.

di elaborare una coerente immagine del mondo.

Al congresso Solvay del 1927 Bohr propose una scappatoia che, sotto il nome di *interpretazione di Copenhagen* (Bohr era danese), fu accettata dalla maggioranza degli addetti ai lavori: considerare la teoria non come una descrizione ontologica del mondo, ma come una descrizione epistemologica della nostra conoscenza di esso. In altre parole, la teoria deve essere vista come una descrizione non delle proprietà di ipotetiche particelle fisiche, ma solo dei risultati di esperimenti in funzione delle condizioni degli apparati di misura (osservatori inclusi).²

In questo modo il fallimento dei principi di realtà, separabilità e località viene visto solo come una limitazione della nostra conoscenza, e non del mondo fisico. Anzi, si può addirittura pensare che tali principi continuino a valere per il mondo microscopico, e che sia (almeno teoricamente) possibile darne una descrizione alternativa alla meccanica quantistica e in sintonia con le teorie fisiche classiche (a questo proposito si parla di *variabili nascoste*, su cui avrebbe appunto dovuto basarsi una tale descrizione).

Einstein scoprì però nel 1935 che *dai principi di realtà, separabilità e località segue l'incompletezza della meccanica quantistica*. Basta infatti considerare due sistemi fisici che, dopo aver interagito (ed esser quindi stati un solo sistema), si siano separati nello spazio in modo tale da essere appunto diventati due sistemi: ciascuno possiede allora proprietà intrinseche che sono indipendenti da ciò che succede all'altro, e che la completezza richiederebbe di descrivere in modo univocamente determinato. La meccanica quantistica, invece, fa dipendere la descrizione dello stato di ciascuno dei due sistemi dalla scelta e dai risultati degli esperimenti effettuati sull'altro, ed è quindi incompleta.

Questo è un primo risultato: se si crede che la meccanica quantistica sia completa, che cioè essa descriva tutto ciò che c'è sperimentalmente da descrivere, allora qualcuno dei tre principi deve fallire per il mondo stesso e non soltanto per la nostra conoscenza di esso: la teoria ci dice quindi qualcosa sul mondo oggettivo, e la scappatoia di Bohr è solo un paraocchi (già nel 1928 Einstein l'aveva chiamata "una soporifera religione, che fornisce al credente un soffice cuscino per dormire sonni profondi").

²In termini logici si può dire che Bohr propose una *semantica operativa* della meccanica quantistica, sostenendo l'impossibilità di proporle una *semantica descrittiva* (nel senso di una visione *metafisica* in accordo con la teoria fisica).

Al prezzo di accettare l'incompletezza della meccanica quantistica è ancora possibile comunque mantenere intatta la fiducia nei tre principi, e non essere costretti a cambiare i fondamenti della nostra immagine intuitiva del mondo. Questa è la via che Einstein seguì sino alla sua morte.

Einstein, Podolsky e Rosen (1935)

Prima di trovare il semplice argomento precedente³ Einstein aveva tenacemente discusso con Bohr, soprattutto in occasione dei due congressi Solvay del 1927 e 1930. Nel primo egli aveva cercato di dimostrare direttamente l'*inconsistenza* della meccanica quantistica, tentando di descrivere un esperimento su *un* sistema da cui si potessero ricavare più informazioni di quelle permesse dal principio di indeterminazione. Nel secondo congresso, ormai convinto che la meccanica quantistica fosse corretta da un punto di vista pratico, egli si rivolse all'*incompletezza* teorica, descrivendo un esperimento su *due* sistemi che divenne poi noto come il *paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen (EPR)*, dal nome dei coautori dell'articolo pubblicato in seguito.⁴

In realtà il risultato era una dimostrazione del *teorema* di incompletezza precedente, e fu chiamato *paradosso* solo perchè la sua conclusione fu considerata assurda dagli addetti ai lavori. Ai fini dell'incompletezza l'argomento EPR è comunque superato dalla dimostrazione più semplice (e storicamente successiva) vista sopra: esso ha però anche implicazioni dirette per i tre principi, indipendentemente dalla meccanica quantistica, e sono queste che ci interessano ora.

Come sopra, si considerano due sistemi fisici che, dopo aver interagito, si siano sufficientemente separati nello spazio. L'interazione è stata però in questo caso tale da creare delle correlazioni fra le proprietà dei due sistemi: ad esempio, essi hanno momenti e posizioni uguali e contrarie. Misurando il momento di uno dei due sistemi si può allora determinare anche il momento dell'altro senza effettuare misure dirette su di esso, e si può dire che esso sia quindi una proprietà reale del sistema; analogamente per la posizione. Misurando dunque il momento di un sistema e la posizione dell'altro si deduce che sia il momento che la posizione sono proprietà reali di entrambi i sistemi.

³Albert Einstein, "Quantenmechanik und Wirklichkeit", *Dialectica*, 2 (1948) 320-324.

⁴Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Physical Review*, 47 (1935) 777-780.

Bohm (1951)

Una leggera variante dell'argomento EPR, introdotta da David Bohm nel 1951,⁵ riguarda un esperimento in cui si effettua sui due sistemi una *stessa* misura che può dare risultato positivo o negativo. Nel caso in cui i risultati delle due misure siano entrambi positivi o entrambi negativi, diremo che essi sono correlati.

Per fissare le idee, consideriamo anzitutto un esempio macroscopico. Supponiamo che due persone non in comunicazione fra loro ricevano periodicamente una busta contenente un foglio che può essere bianco o nero: esse aprono la busta, registrano i colori del foglio, e confrontano le registrazioni dopo aver ricevuto un gran numero di buste. Se ogni volta nelle due buste c'è un foglio dello stesso colore, allora essi ovviamente noteranno una perfetta correlazione fra le loro osservazioni (anche nel caso in cui la scelta del colore da parte del mittente fosse stata ogni volta casuale). Viceversa, dalla perfetta correlazione delle loro registrazioni i due destinatari potranno dedurre che ogni volta nelle due buste c'era un foglio con lo stesso colore.

A livello microscopico il foglio nella busta corrisponde ad una particella, il colore ad una proprietà fisica misurabile, i due destinatari a due sistemi, e l'apertura delle buste ad una misura della proprietà della particella. La formulazione di Bohm dell'argomento EPR è semplicemente che *dai principi di realtà, separabilità e località segue che ci deve essere una perfetta correlazione*.

Poichè le stesse conclusioni sono raggiunte anche dalla meccanica quantistica, la formulazione non costituisce un *experimentum crucis* fra le ipotesi classiche e quelle quantistiche. Essa espone però l'obiezione di Einstein a Bohr in termini memorabili: come è possibile che due registrazioni di dati possano essere allo stesso tempo assolutamente casuali e perfettamente correlate, senza supporre che la correlazione sia già presente a livello degli eventi registrati? Ad esempio, come si potrebbe credere che non ci sono stati trucchi se in due diversi casinò sono usciti sistematicamente gli stessi numeri alla roulette?

⁵David Bohm, *Quantum theory*, Prentice Hall, 1951.

Bell (1964)

Una variante essenziale dell'argomento EPR, introdotta da John Bell nel 1964,⁶ consiste nel misurare la stessa proprietà dei due sistemi in *modi diversi*. Essa riguarda un esperimento in cui si effettuano sui due sistemi tre possibili tipi di misure (A , B e C), ciascuna delle quali può dare un risultato positivo o negativo.

Per continuare con l'esempio precedente, supponiamo questa volta che le due persone ricevano periodicamente una busta contenente un foglio diviso in tre striscie, ciascuna delle quali può essere bianca o nera, e che la busta si possa aprire in tre modi diversi, ciascuno dei quali permette di vedere una sola striscia. Le due persone decidono ogni volta indipendentemente quale striscia aprire, registrano i risultati delle loro osservazioni, e li confrontano dopo aver ricevuto un gran numero di buste. Se ogni volta nelle due buste c'è lo stesso tipo di foglio, in cui striscie corrispondenti abbiano cioè lo stesso colore, allora:

- quando i destinatari hanno aperto la stessa striscia, hanno sempre visto lo stesso colore;
- quando i destinatari hanno aperto striscie qualunque, hanno visto lo stesso colore almeno $\frac{5}{9}$ delle volte.

La prima conclusione è ovvia. Per quanto riguarda la seconda, basta notare che i fogli hanno sempre almeno due striscie dello stesso colore, ed essi devono dunque mostrare lo stesso colore in almeno 5 casi su 9: i 3 in cui viene osservata la stessa striscia, ed i 2 (simmetrici) in cui i destinatari osservano appunto le due differenti striscie aventi lo stesso colore.

La scoperta di Bell, che astrae dall'esempio precedente le caratteristiche essenziali, è semplicemente che *dai principi di realtà, separabilità e località segue che certe frequenze (medie) di correlazione sono impossibili*. Ad esempio, non è possibile che:

- se si effettua lo stesso tipo di misura in entrambi i sistemi, si abbia sempre correlazione;
- se si effettuano tipi qualunque di misure nei due sistemi, si abbia correlazione solo metà delle volte.

⁶John Bell, "On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox", *Physics*, 1 (1964) 195-200.

I tre principi implicano infatti che il risultato delle varie misure dipenda da qualche proprietà oggettiva che determina, per ciascuno dei tre tipi di misura, se il risultato debba essere positivo o negativo. Allora, come nel caso delle lettere, se si effettuano le stesse misure si ha perfetta correlazione, e se si effettuano misure qualunque si ha correlazione *almeno* $\frac{5}{9}$ delle volte: questo concorda con la prima ipotesi ma non con la seconda, che richiede che per misure qualunque si abbia correlazione *solo metà delle volte*.

Stapp (1979)

Un'ulteriore variante, introdotta da Stapp nel 1979,⁷ è importante da un punto di vista pratico perchè essa non richiede, come nei casi di Bohm e Bell, l'esistenza di una completa correlazione in certi casi (che sarebbe problematico poter verificare fisicamente, a causa degli inevitabili errori sperimentali).

Questa volta consideriamo un esperimento in cui si effettuino su un sistema due tipi di misure (A e B) e sull'altro due diversi tipi di misure (C e D), ciascuna delle quali può dare un risultato positivo o negativo.

In questo caso *dai principi di realtà, separabilità e località segue che altre frequenze di correlazione sono impossibili*. Ad esempio, non è possibile che:

- se si effettua una delle quattro possibili combinazioni di tipi di misura (ad esempio A e C), si abbia correlazione il 15% delle volte;
- se si effettuano le tre rimanenti possibili combinazioni (A e D , B e C , B e D), si abbia correlazione l'85% delle volte.

Poichè i due sistemi sono separati, il risultato di una serie di misure di un certo tipo su uno dei sistemi non può infatti dipendere dal tipo di misure effettuato sull'altro sistema. Consideriamo quattro serie di misure di ciascuno dei quattro possibili tipi, cioè A e B sul primo sistema, e C e D sul secondo. Dalla prima ipotesi segue che le serie A e C devono differire *almeno l'85% delle volte*. Dalla seconda ipotesi segue che le serie A e D possono differire al più il 15% delle volte, ed analogamente per le serie D e B , e per le serie B e C : ma allora le serie A e C possono differire *al più il 45% delle volte*.

⁷Henry Stapp, "Whiteheadian approach to quantum theory and the generalized Bell's theorem", *Foundations of Physics*, 9 (1979) 1–25.

Aspect (1982)

Il teorema di Bell e le sue variazioni non sarebbero molto interessanti, se le loro ipotesi non fossero realizzabili fisicamente. Come si può immaginare, non è ovviamente questo il caso. Anzi, il tipo di misura che si richiede non è altro che la polarizzazione della luce secondo certe direzioni: un fenomeno ben noto a causa delle lenti per occhiali, o dei filtri per apparecchi fotografici.

Come prima approssimazione, invece di due sistemi separati consideriamo un solo raggio di luce che passi successivamente attraverso due filtri polarizzati, come tipo di misura in ciascun sistema consideriamo le direzioni di polarizzazioni dei filtri, e come segno di correlazione consideriamo il fatto che un fotone passi attraverso entrambi i filtri. La meccanica quantistica prevede, e l'esperienza conferma, che la frazione dei fotoni componenti il raggio di luce che passa attraverso due filtri le cui direzioni di polarizzazione formino un angolo α , è $\cos^2(\alpha)$.

Per realizzare le condizioni del teorema di Bell, basta considerare come possibili tipi di misura le direzioni di polarizzazione corrispondenti ad angoli di 0° , 60° e 120° . Se i due filtri hanno la stessa direzione, il che succede in $\frac{1}{3}$ dei 9 possibili casi, essi lasciano passare tutti i fotoni: la prima ipotesi del teorema è dunque soddisfatta. Se i due filtri hanno invece direzioni diverse, il che succede nei rimanenti $\frac{2}{3}$ casi, essi formano sempre un angolo di 60° , e lasciano passare $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ dei fotoni ciascuno: in tutto passano quindi $\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ dei fotoni, ed anche la seconda ipotesi del teorema è soddisfatta.

Per realizzare le condizioni della variante di Stapp, basta invece considerare come possibili tipi di misura le direzioni di polarizzazione corrispondenti ad angoli di 0° e 45° per una lente, e $22,5^\circ$ e $67,5^\circ$ per l'altra. In tre casi l'angolo tra le direzioni di polarizzazione dei due filtri sarà di $22,5^\circ$, ed essi lasceranno quindi passare $\frac{2+\sqrt{2}}{4} \approx 85\%$ dei fotoni: la seconda ipotesi è dunque soddisfatta. Nel rimanente caso l'angolo sarà invece di $67,5^\circ$, e passerà il 15% dei fotoni: la prima ipotesi è dunque anch'essa soddisfatta.

A questo punto basta soltanto inventare un esperimento in cui, invece di avere un solo raggio di luce che passa successivamente attraverso due filtri polarizzati, si abbiano due raggi di luce correlati che passano attraverso filtri separati e sufficientemente lontani. La cosa è possibile eccitando in modo preciso un atomo di calcio mediante due raggi laser, ed osservando poi la luce emessa (in forma di fotoni) quand'esso ritorna allo stato normale non

eccitato.⁸

Vari tipi di esperimenti di questo genere sono stati effettuati, di cui i più noti sono quelli realizzati dal gruppo di Alain Aspect in Francia nel 1982.⁹ In particolare, in uno di essi si decideva solo all'ultimo momento in quale direzione misurare la polarizzazione, poco prima che i fotoni giungessero ai filtri e molto dopo che erano partiti, in modo che essi non potessero comunicare fra loro a velocità inferiori a quelle della luce. Tutti questi esperimenti hanno effettivamente confermato le previsioni quantistiche.

Conclusione

A questo punto la meccanica quantistica esce però di scena: il fatto essenziale di questi esperimenti non è infatti tanto che i loro risultati siano in accordo con le previsioni quantistiche, quanto che essi permettano di refutare *sperimentalmente* assunzioni *metafisiche*! Più precisamente, le verifiche sperimentali provano che *la visione ingenua del mondo basata sui tre principi di separabilità, realtà e località è in contrasto con l'esperienza*.

Ma questa, più che una conclusione, è soltanto un nuovo inizio: rimane anzitutto da decidere quale dei tre principi si debba lasciar cadere, e poi da costruire una coerente metafisica che permetta di rielaborare una nuova visione del mondo che si accordi con l'esperienza e la teoria. L'impresa non è facile, proprio a causa dell'apparente necessità dei tre principi per l'elaborazione di una qualunque metafisica.

Il rifiuto del principio di realtà a livello microscopico non richiederebbe necessariamente un suo rifiuto a livello macroscopico, come sembrava invece suggerire Einstein quando chiedeva se Bohr voleva veramente farci credere che la luna c'è solo quando qualcuno la osserva. Rimarrebbe però il problema di spiegare come la realtà si materializzi nel passaggio dal micro al macro: problema in un certo senso analogo a quello della creazione della freccia del tempo macroscopico (a partire da un tempo microscopico reversibile).

Ancora più problematico sarebbe un rifiuto del principio di località, perchè

⁸John Clauser, M.A. Horne, Abner Shimony e R.A. Holt, "Proposed experiment to test hidden variable theories", *Physical Review Letters*, 23 (1969) 880–883.

⁹Alain Aspect, Philippe Grangier e Gérard Roger, "Realization of the EPR-Bohm Gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities", *Physical Review Letters*, 49 (1982) 91–94; Alain Aspect, Jean Dalibard e Gérard Roger, "Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers", *idem*, 1804–1807.

esso deriva naturalmente dalla relatività: un suo abbandono richiederebbe cioè il ripudio o la revisione di una delle più sperimentate e coerenti teorie fisiche.

La via più praticabile e meno traumatica sembrerebbe dunque essere il rifiuto del principio di separabilità: una visione del mondo olistica è infatti già stata sviluppata al di fuori dell'occidente, e potrebbe forse fornire una coerente metafisica già pronta per l'uso, e non in disaccordo con altri aspetti della fisica subatomica.¹⁰

Il rifiuto di questo o quel principio non costituisce però che un punto di partenza per lo sviluppo di interpretazioni e teorie che tengano conto dei risultati sperimentali. Sono anzitutto state elaborate varie versioni di realismo, compatibili con la meccanica quantistica:

- *realismo complementare*: poichè gli enti subatomici esibiscono proprietà sia corpuscolari che ondulatorie, Louis De Broglie dapprima (1927) e David Bohm poi (1952) hanno proposto di considerarli sia come particelle che come onde, allo stesso tempo. Come lo spostamento di una nave determinato dal lavoro meccanico prodotto dal motore è pilotato dall'informazione che arriva dal radar, così il moto fisico di una particella è determinato dall'informazione derivante dalla natura ondulatoria (*onda pilota*, o *potenziale quantistico*), che si trasmette istantaneamente e viola dunque il principio di località.
- *realismo multiplo*: poichè la funzione d'onda descrive gli enti subatomici mediante una distribuzione probabilistica dei loro possibili stati, fino a che una misura non ne determina uno di essi mediante il collasso, Hugh Everett ha proposto nel 1957 di considerare tutti i possibili stati come realmente esistenti. Gli esperimenti determinano quindi non i propri risultati, ma soltanto la scelta di un percorso conoscitivo attraverso un insieme di possibilità che sono tutte fisicamente e simultaneamente realizzate in mondi paralleli (*universi multipli*).¹¹

¹⁰Vedi *Fisica e oriente*. Naturalmente, il teorema di Bell richiede una visione olistica soltanto per sistemi che abbiano fra loro interagito nel passato. Secondo la teoria del Big Bang, l'intero universo è però appunto un tale sistema.

¹¹In termini logici il realismo multiplo si può vedere come un'interpretazione modale delle affermazioni probabilistiche relative alle misure quantistiche, nello spirito di Leibniz e Kripke (secondo cui *necessario* significa vero in tutti i mondi possibili, e *contingente* vero in qualcuno).

- *realismo potenziale*: al problema della sovrapposizione degli stati Werner Heisenberg ha dato nel 1958 una risposta alternativa, proponendo di estendere l'ontologia basata su 'oggetti dotati di proprietà (attuali)' della fisica classica, mediante la considerazione di 'enti dotati di tendenze (potenziali)' (dette anche latenze o *potentia*, e di cui le proprietà costituiscono solo casi limite).¹²
- *realismo duale*: nel 1961 Eugene Wigner ha invece dato una risposta alternativa al problema della misurazione, nello stile del dualismo cartesiano. La funzione d'onda descriverebbe cioè il mondo fisico in modo puramente deterministico, ed il suo collasso sarebbe provocato dall'azione non lineare della *coscienza*. Questa, pur distinguendosi in modo radicale dagli altri fenomeni, interagirebbe dunque con essi in modo concreto e reale.

Altre proposte, ancor più provocatorie, concernono un *superdeterminismo* che coinvolga il comportamento degli osservatori stessi, e neghi quindi la possibilità di effettuare libere scelte sperimentali, o un ritorno all'*etere* come sistema di riferimento privilegiato, rispetto al quale si possa effettivamente parlare di velocità superiori a quella della luce.

Come si vede ce n'è per tutti i gusti, ed una sola cosa è certa: che i rintocchi del teorema di Bell suonano a morto per la visione ingenua del mondo in cui tutti noi non addetti ai lavori ci ostiniamo ingenuamente a crogiolarci.

¹²In termini matematici il realismo potenziale si può vedere come una sostituzione delle algebre booleane della logica classica con reticoli ortomodulari (la cui proprietà più caratteristica è di non essere distributivi).

Bibliografia

Un libro introduttivo sull'argomento, con l'imprimatur di Bell, è:

- David Peat, *Einstein's moon: Bell's theorem and the curious quest for quantum reality*, Contemporary Books, 1990.

Una discussione profonda e completa, non limitata al teorema di Bell, è:

- Bernard d'Espagnat, *I fondamenti concettuali della meccanica quantistica*, 1971 (Bibliopolis, 1977).

I lavori originali sull'argomento si possono trovare in:

- John Wheeler e Wojciech Zurek (curatori), *Quantum theory and measurement*, Princeton University Press, 1983.
- John Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, 1987.

Segnaliamo infine due raccolte, rispettivamente di interviste e saggi:

- Paul Davies e Julian Brown (curatori), *The ghost in the atom*, Cambridge University Press, 1986.
- James Cushing e Ernan McMullin (curatori), *Philosophical consequences of quantum theory: reflections on Bell's theorem*, University of Notre Dame Press, 1989.