

2006 Istituto di Filosofia Arturo Massolo
Università di Urbino
Isonomia



Ontologia, spiegazione e interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica*

Mario Alai

Istituto di Filosofia Arturo Massolo, Università di Urbino

mario.alai@libero.it

Abstract

As no non paradoxical ontological interpretation for Quantum Mechanics has been found up to now, I argue that (despite some criticisms by J.C. Cramer) the Copenhagen School successfully avoids the paradoxes by the positivist strategy of accepting only an empirical interpretation and rejecting any ontological interpretation of the theory. In this way, however, it cannot explain the various regularities exhibited by the empirical data, nor draw from the formalism any knowledge concerning the deep structure of physical reality.

Alla scuola di Copenaghen non si devono solo alcune delle idee chiave nello sviluppo della meccanica quantistica, ma anche l'interpretazione di quella teoria a tutt'oggi più seguita e considerata "ortodossa". Svolgiamo allora alcune considerazioni di carattere epistemologico e metodologico anzitutto sulle interpretazioni delle teorie in generale, e poi sull'interpretazione di Copenaghen in particolare¹.

L'interpretazione di una teoria fisico-matematica può declinarsi in due modi, svolgendo due diverse funzioni: anzitutto, essa può avere la funzione di connettere il formalismo matematico della teoria ai dati osservativi (ossia fornire il "significato

* Nella stesura di questo contributo mi sono avvalso di utilissimi consigli e osservazioni da parte di Alessandro Afriat e Enzo Fano, che ringrazio sinceramente.

empirico” dei termini della teoria), in modo da consentirne il controllo empirico e l’uso nella spiegazione e nella previsione. Parliamo allora in questo senso di *interpretazione empirica* della teoria. Come dati osservativi si possono intendere o eventi soggettivi (quali sensazioni o dati percettivi) oppure fatti riguardanti le entità direttamente osservabili (i corpi fisici di medie dimensioni, e in particolare metri, dinamometri, quadranti e indici dei contatori, tracciati, videate dei calcolatori e simili (anche se il concetto di “direttamente osservabile” è graduale, vago e ampliabile a seconda delle diverse concezioni epistemologiche).

In secondo luogo, l’interpretazione può connettere lo stesso formalismo alla realtà oggettiva (se l’interpretazione empirica viene fornita in termini di dati puramente soggettivi), o comunque alla realtà senza limiti (cioè, in particolare, alla realtà non direttamente osservabile, se l’interpretazione empirica viene fornita in termini di fatti ed entità oggettive osservabili). Ciò equivale a fornire il significato *completo* dei termini della teoria, cioè ad assegnare alla teoria dei modelli fisici, in sostanza a dirci di cosa parla. In questo modo è possibile comprendere la teoria, metterla a confronto con altre teorie e utilizzarla in congiunzione con esse, e in definitiva fare di ciò che altrimenti non è che un apparato di simboli matematici una descrizione della realtà (non solo empirica) che ci circonda. Nella misura in cui risulti vera, tale descrizione esprimerà poi una conoscenza della realtà. Chiamiamo un’interpretazione che svolge questo ruolo *interpretazione ontologica*.

Normalmente l’interpretazione empirica emerge assieme alla teoria stessa, dato che quest’ultima nasce, se non esattamente *dai* dati empirici², almeno con un occhio a essi. Inoltre, ai primordi della fisica moderna (come ad esempio con Galileo) la stessa interpretazione ontologica non era ancora ben distinta da quella empirica, e nasceva anch’essa con la teoria, dato che la quest’ultima parlava di enti e proprietà osservabili, anche se già in termini abbastanza astratti. In un certo senso, per teorie di quel genere non si dovrebbe nemmeno parlare di un’interpretazione, in quanto il formalismo stesso è costituito da semplici relazioni matematiche tra i valori quantitativi delle proprietà osservabili attribuite a enti pure osservabili: contenuto empirico, contenuto reale e struttura matematica fanno un tutt’uno, e non c’è bisogno di un processo o di una relazione di interpretazione.

In seguito si sono avuti due sviluppi strettamente collegati: da un lato le teorie sono andate sempre più postulando entità e proprietà non direttamente osservabili, e dall'altro gli apparati matematici hanno sempre più assunto un ruolo autonomo nella scoperta, nella costruzione della teoria, e nel caratterizzare i suoi oggetti inosservabili. L'emergere di una teoria ha finito dunque per coincidere con l'elevarsi di una struttura formale, che ponendosi al di sopra e al di là dei dati empirici, diventa la nostra interfaccia con un mondo che sfugge all'ispezione diretta dei sensi. Questo sviluppo è culminato nella famosa affermazione di Hertz, secondo cui la teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell altro non era che le equazioni di Maxwell. Tutto ciò è particolarmente vero per la meccanica quantistica, che si occupa delle entità più remote dalla nostra esperienza, e in cui il formalismo matematico (ad esempio la matematica delle matrici, le equazioni differenziali, la teoria degli operatori, gli spazi di Hilbert)³ ha giocato un ruolo euristico fondamentale, sviluppandosi spesso indipendentemente dalle indicazioni che potevano provenire dai dati empirici o dal riferimento a possibili modelli fisici.

In casi del genere, si pone molto chiaramente il problema dell'interpretazione. Soprattutto, (dato che come dicevamo l'elaborazione della teoria e dell'interpretazione empirica vanno di pari passo, mentre la realtà di cui ci si occupa sfugge alla conoscenza sensibile diretta) si pone il problema se un'interpretazione *ontologica* della teoria sia possibile, al di là e al di sopra di quella empirica, e in che modo. Possiamo dunque considerare *realistiche* le concezioni che ammettono un ruolo autonomo dell'interpretazione ontologica, e *antirealistiche* quelle che lo negano. Naturalmente i dati empirici costituiranno la prima e fondamentale guida a una possibile interpretazione ontologica. Ma ciò significa che l'interpretazione ontologica non può in alcun modo trascendere quella empirica, come sostiene un empirismo radicale? Oppure l'interpretazione ontologica ci può dire qualcosa in più dei dati empirici descritti dalla teoria? E come?

Se a questa domanda si dà la prima risposta, quella dell'empirismo radicale, si possono assumere tre diverse posizioni sull'interpretazione ontologica, due antirealistiche e una realistica: o sostenere che essa si riduce a quella empirica (riduzionismo), o che a essa si deve rinunciare del tutto (eliminativismo), o infine, che essa è possibile come frutto di una pura speculazione filosofica, priva di basi empiriche

(realismo speculativo). Un empirista moderato può assumere tuttavia una diversa posizione realistica (realismo empirico): l'interpretazione ontologica può dirci qualcosa in più di quella empirica, anche senza essere puramente speculativa; essa si basa infatti sui dati empirici, ma li trascende per mezzo di procedimenti inferenziali ampliativi, quali l'induzione, l'abduzione o il ragionamento analogico.

Quando l'interpretazione empirica è intesa in termini di esperienze soggettive, il riduzionismo presuppone una metafisica fenomenista, in quanto in tal caso dire che l'interpretazione ontologica si riduce a quella empirica è come dire che la realtà si riduce ai fenomeni soggettivi, e dunque che non esiste una realtà materiale o trascendente, ma solo delle sensazioni o percezioni. Questa posizione ha inoltre la paradossale conseguenza che una teoria fisica non parlerebbe in realtà di fatti fisici, ma psicologici. Se invece l'interpretazione empirica è intesa in termini di entità oggettive direttamente osservabili, il riduzionismo implica una metafisica del senso comune, in quanto sostenendo che l'interpretazione ontologica fa tutt'uno con quella empirica si afferma che esistono solo gli oggetti osservabili del senso comune, e non esistono entità che sfuggano alla percezione sensoriale diretta.

Ma i positivisti, e specialmente i neopositivisti, si resero conto che negare l'esistenza di ciò che non si osserva è altrettanto speculativo quanto affermarla, e che un empirismo radicale richiede piuttosto che di ciò che va oltre i dati empirici non si parli affatto. Per quanto riguarda l'interpretazione ontologica, ciò significa che più che affermarne la riducibilità a quella empirica, si dovrebbe semplicemente riconoscerne l'impossibilità; la loro posizione fu dunque quella dell'eliminativismo. (Sia il riduzionismo che l'eliminativismo sono compatibili con i due classici approcci antirealisti al significato degli enunciati non osservativi della teoria: quello verificazionistico, per cui il loro significato è completamente specificabile in termini di osservazioni empiriche; e quello strumentalistico, per cui essi non vanno presi alla lettera, come descrizioni, ma come asserzioni prescrittive, ossia strumenti computazionali per ricavare predizioni empiriche da descrizioni di condizioni iniziali empiriche).

Proporre un'interpretazione ontologica significa specificare in che modo la teoria descriva il mondo nel suo complesso, e ciò può coinvolgere vari tipi di affermazioni o rappresentazioni: anzitutto, vi sono i veri e propri modelli fisici (ad esempio, il modello corpuscolare, quello ondulatorio, ecc.). Poi possono esservi concezioni generali di

filosofia della natura (come ad esempio l'idea che tutto sia retto da un principio causale, o viceversa, dalla casualità; o come la concezione deterministica e l'opposta concezione indeterministica della natura). Infine, un'interpretazione ontologica può comportare delle ancor più generali concezioni metafisiche (come il realismo metafisico contrapposto al fenomenismo o all'idealismo; il dualismo spirito-materia contrapposto al materialismo o allo spiritualismo; l'ammissione o meno della possibilità dello spirito di agire sulla materia⁴; l'ammissione di uno o di molti universi; ecc.).

Affinché il tentativo di offrire un'interpretazione ontologica abbia successo, la descrizione della realtà proposta deve essere concettualmente plausibile, internamente coerente e compatibile con altre teorie o descrizioni accettate, e quindi, per esempio, *non generare paradossi*. Per condurre questo tentativo su basi empiriche, inoltre, i modelli proposti devono non solo essere compatibili coi dati, ma anche spiegarli, e possibilmente permettere nuove predizioni. L'interpretazione ontologica deve avere cioè un contenuto empirico, e in qualche misura anche una conferma empirica. Fin che il fisico non trova un'interpretazione che soddisfi tali condizioni (e talora, come nel caso della meccanica quantistica, non è affatto facile), può astenersi dal proporre una, e dunque assumere in via provvisoria la soluzione dei positivisti, o eliminativismo.

Alla nascita e allo sviluppo della meccanica quantistica hanno contribuito in parte sia generalizzazioni su dati empirici, come la legge di Balmer, o le leggi di Wien e di Rayleigh-Jeans, sia analogie e modelli fisici, essenzialmente quello corpuscolare e quello ondulatorio. Tuttavia è impossibile scegliere tra onde e corpuscoli come modello base per la teoria, poiché i dati suggeriscono volta a volta caratteristiche ondulatorie o corpuscolari

Consideriamo, ad esempio, la ben nota esperienza delle due fenditure (nella quale, secondo Feynman, si concentrano i principali paradossi della meccanica quantistica): una sorgente emette fotoni o elettroni, e questi, passando attraverso due fori praticati in un primo schermo, vanno a colpire un secondo schermo, sul quale vediamo imprimersi dei segni puntiformi. Se facciamo in modo di osservare da quale dei due fori passa ciascun fotone, sullo schermo posteriore si formano due gruppi di punti addensati attorno a una zona centrale, il che sarebbe perfettamente spiegato interpretando i fotoni come corpuscoli che seguono due traiettorie approssimativamente rettilinee. Se però non controlliamo in alcun modo da che foro passi ciascun fotone, sullo schermo

posteriore i punti vengono a formare uno schema a frange alterne, come se ciascun fotone fosse un'onda che passa per entrambi i fori, e uscendo da essi dà luogo a due onde che si diffrangono e poi interferiscono a vicenda: sappiamo infatti dalla fisica classica che l'interferenza di due onde produce delle frange alterne in quanto dove le due onde si trovano in coincidenza di fase le loro intensità si sommano, e dove invece si trovano in contrapposizione di fase le loro intensità si sottraggono, attenuandosi fino a svanire.

Inoltre, il comportamento corpuscolare non appare facilmente isolabile da quello ondulatorio, e viceversa; infatti, anche quando è possibile descrivere un fotone come particella, il suo impulso dipende dalla frequenza del raggio luminoso, ciò che presuppone una natura ondulatoria. Viceversa, anche quando sullo schermo posteriore troviamo le frange tipiche dell'interferenza ondulatoria, sono pur sempre dei segni puntiformi, quelli che addensandosi e rarefacendosi formano le frange; e in quanto puntiformi, hanno tutta l'aria di esser prodotti da particelle.

D'altra parte, non si è finora riusciti a proporre un modello spazio-temporale coerente che inglobi i due aspetti senza però contrastare coi dati o con altre teorie (come ad esempio la relatività einsteiniana) o sollevare problemi insoluti: se sostenessimo che vi sono sia onde che particelle, dovremmo vedere la cosiddetta *funzione d'onda* Ψ (chiave di volta del formalismo della teoria quantistica) come rappresentazione di un'onda fisica, e interpretare l'improvviso *collasso* della funzione d'onda quando si procede a una misura come l'istantanea trasformazione di un'onda in una particella. Ad esempio, quando nell'esperimento delle due fenditure non osserviamo da che foro passa il fotone, questo sarebbe un'onda, mentre appena sorvegliamo i fori per controllare il passaggio dei fotoni, questi si trasformerebbero in particelle. Ma nessuna spiegazione ontologica di tale trasformazione da onda a particella (tra quelle proposte alcune invocano l'interazione tra il mondo microscopico e quello macroscopico, altre l'azione della coscienza sulla materia, altre ancora l'esistenza di molti universi) risulta convincente.

In più, sia l'assunzione ontologica delle onde, sia quella dei corpuscoli, hanno problemi ciascuna di per sé, anche indipendentemente dall'altra. Ad esempio, si potrebbe assumere come De Broglie un modello ondulatorio, in cui i corpuscoli non sono altro che *picchi* dell'onda⁵. Ma gli esperimenti proposti per controllare l'esistenza

di onde quantistiche hanno dato esito negativo⁶. Conversamente, si potrebbe sostenere come Born⁷ che la teoria verte su particelle, e la funzione d'onda (o più precisamente il suo modulo quadrato) non è che una misura della probabilità che la particella si trovi in una posizione o in un'altra, abbia un certo impulso o un altro, prima di appurarla per mezzo di una misura. Ma anche tale interpretazione è assai problematica, poiché gli esperimenti⁸ sembrano scoraggiare (se non propriamente contraddire) l'ipotesi che prima della misura esista già una particella con una posizione o un impulso determinato.

Infine, se pensiamo a enti fisici oggettivamente esistenti, sia che li concepiamo come onde o come particelle, gli esperimenti mostrano che questi dovrebbero esser parti di un'unica realtà indivisa ed estesa per tutto l'universo, nella quale ogni parte risente immediatamente di quanto accade a ogni altra parte, un po' come nel Brahman delle filosofie indù⁹. Eppure tutto ciò non solo contraddice le metafisiche tradizionalmente prevalenti in Occidente, ma risulta anche concettualmente incompatibile con il principio di località che informa la relatività di Einstein.

Una reazione radicale, a questo punto, potrebbe essere il riduzionismo: non esiste alcuna realtà oggettiva, ma solo i risultati delle osservazioni e delle misure; o quanto meno, non esiste una realtà oggettiva non osservabile, ma solo quella macroscopica osservabile, al cui interno ci interessa in particolare il comportamento di quegli oggetti che sono gli apparati sperimentali e gli strumenti di misura; perciò l'interpretazione ontologica della meccanica quantistica coincide con la sua interpretazione empirica, e tutti i suddetti paradossi, che nascono dal rappresentarsi situazioni fisiche incoerenti o comunque implausibili, svaniscono immediatamente. Ma, come si è detto, il riduzionismo implica una metafisica e trascende i limiti dell'esperienza, e in quanto tale è stato rigettato dal positivismo. Anche la Scuola di Copenaghen, sensibile alle posizioni positivistiche, è più incline alla seconda delle soluzioni antirealistiche prima ricordate, cioè a rinunciare a un'interpretazione ontologica per limitarsi alla sola interpretazione empirica.

Per Heisenberg, «ci si può chiedere se nascosto dietro l'universo statistico della percezione esista tuttavia un 'vero' universo in cui valga la legge della causalità. Ma tali speculazioni ci sembrano prive di valore e significato, poiché la fisica deve limitarsi a descrivere le relazioni tra percezioni»¹⁰ (l'interpretazione empirica qui è evidentemente concepita in termini di eventi soggettivi). E quando Bohr scrive che «non esiste un

mondo quantistico», non intende propugnare una metafisica riduzionista, poiché precisa: «Il compito della fisica non è scoprire come è fatta la natura. La fisica riguarda solo quello che si può dire della natura»¹¹. Secondo Pauli, «Non ci si dovrebbe tormentare ... con il problema se qualcosa di cui non si può sapere nulla esista ...»¹².

Come ricorda von Weizsäcker, la scuola di Copenaghen non sostiene che «quel che non si può osservare non esiste», ma che «quel che si osserva certamente esiste, e su quel che non si osserva siamo liberi di fare opportune assunzioni. Usiamo tale libertà per evitare paradossi»¹³ (parole, queste, che al contrario di quelle di Heisenberg paiono alludere a un'interpretazione empirica in termini di entità materiali osservabili). Di conseguenza, secondo Born, il modulo quadrato della funzione d'onda non indica la probabilità che la particella *sia* (ad esempio) in una particolare posizione, ma la probabilità che se si esegue una misura di posizione questa dia quel particolare risultato¹⁴. In questo senso, la funzione d'onda Ψ non è altro che una codifica della «nostra conoscenza del sistema»: per Heisenberg, «il concetto di realtà oggettiva evapora nella matematica, che non rappresenta più il comportamento delle particelle elementari, ma la nostra *conoscenza* di quel comportamento»¹⁵ (e qui torniamo a un'interpretazione empirica di tipo soggettivo).

In questo modo, anche i paradossi legati all'una o all'altra interpretazione ontologica “evaporano” automaticamente: la teoria non dice che il mondo sia fatto di onde né di particelle, né di entrambe insieme, e dunque a maggior ragione non parla di collasso di onde in particelle, o di azione istantanea di certi sistemi o parti di sistema su altri. Il collasso della funzione d'onda non rappresenta altro che il mutamento che ovviamente una nuova osservazione produce nella nostra conoscenza, ed è naturale che il mutamento dell'informazione su una parte del sistema implichi automaticamente un mutamento dell'informazione su altre parti di esso. Come scrive Heisenberg, «col cambiamento improvviso della nostra conoscenza, naturalmente, anche la rappresentazione matematica di tale conoscenza cambia improvvisamente»¹⁶.

John Cramer ha avanzato alcune critiche a questa lettura “epistemica” della funzione d'onda¹⁷: a suo parere, essa implica la nozione di un osservatore intelligente, e inoltre quelle di memoria e del suo fluire temporale, presupponendo così un'asimmetria temporale estranea al modo in cui la microfisica tratta il flusso del tempo¹⁸. Essa renderebbe inoltre impossibile parlare della funzione d'onda dell'intero universo (che

per ipotesi non è conoscibile da alcun osservatore)¹⁹, e ancora, aprirebbe la porta al noto paradosso dell'amico di Wigner²⁰. Mi pare tuttavia che questi problemi siano superabili se la funzione d'onda è intesa come la rappresentazione matematica non della conoscenza posseduta da questo o quel soggetto, o da tutti i soggetti insieme, ma di tutta l'informazione che è *disponibile* in un determinato istante e includente sia il contenuto empirico della teoria, sia i dati risultanti dagli esperimenti compiuti fino a quell'istante: in altri termini, se la funzione d'onda è vista come misura non di una condizione soggettiva, ma di un contenuto logico oggettivo, di qualcosa appartenente non al *Mondo 2* ma al *Mondo 3* di Popper²¹.

Cramer mostra anche²² che alla luce della relatività dell'ordine cronologico illustrata da Einstein, vi dovrebbero essere diverse funzioni d'onda, a seconda che di due esperimenti correlati (ad esempio in una situazione di tipo EPR) uno preceda l'altro (in un sistema di riferimento) o viceversa (in un altro sistema). Ma nella misura in cui accettiamo diversi ordinamenti temporali come egualmente legittimi, non disturba che vi siano anche diverse evoluzioni dell'informazione totale disponibile, perché la crescita e la struttura dell'informazione dipende dal tempo.

Cramer sostiene infine²³ che il paradosso della violazione della località accertata con l'esperimento di Freedman-Clauser (e con gli altri esperimenti attestanti la violazione delle disuguaglianze di Bell) non è risolto dalla concezione epistemica della funzione d'onda. Tuttavia, come ho già accennato, il paradosso sparisce nel momento in cui nulla di ciò che la teoria dice viene interpretato come riguardante particelle, onde, o le loro reciproche interazioni, ma solo come risultati di possibili esperimenti: non vi possono essere paradossi, senza interpretazioni ontologiche. Come insegnano ad esempio i miraggi, l'esperienza non è mai in sé scorretta o paradossale, solo la nostra interpretazione la rende tale. Pertanto una teoria che abbia solo un'interpretazione empirica non rischia errori, se non quello di generalizzazioni affrettate, sempre correggibili al bisogno.

Tuttavia l'interpretazione di Copenaghen ha un problema, lo stesso che affligge ogni interpretazione esclusivamente empirica: non è in grado di spiegare i fenomeni che descrive, non può render conto delle loro analogie né delle loro differenze, poiché solo un'ontologia può spiegare qualcosa²⁴.

Ad esempio, consideriamo nuovamente l'esperienza delle due fenditure. Ebbene, un'ontologia corpuscolare spiegherebbe sia il carattere puntiforme dei segni, sia le situazioni in cui sullo schermo posteriore si formano due gruppi di punti addensati attorno a una zona centrale. Un'ontologia ondulatoria, invece, spiegherebbe la diffrazione e le frange d'interferenza. Come si è detto, naturalmente, per utilizzare entrambi questi modelli dovremmo spiegare tale dualità, incontrando anche gli altri problemi già menzionati. Ma se non vi sono corpuscoli né onde, perché sul secondo schermo troviamo dei punti? E perché talora essi si dispongono proprio come se attraverso i fori avessimo sparato delle particelle? E perché, invece, in altre circostanze, si produce lo schema dell'interferenza di onde? Se la funzione d'onda indica solo delle distribuzioni di probabilità, perché queste sono di due tipi diversi? In particolare, dato che le probabilità sono solo positive, e non possono dunque creare interferenze distruttive annullandosi a vicenda, da dove vengono le frange alternate? La probabilità che si verifichi P non può mai essere superiore alla probabilità che si verifichi P oppure Q . Perché allora, se c'è solo un foro nel primo schermo la probabilità di trovare un segno è diversa da zero in ogni punto del secondo schermo, mentre se i fori sono due in certi punti diventa zero? In effetti, i valori della funzione d'onda sono dei numeri complessi, i cui moduli quadrati danno le probabilità; ma vi sono anche gli argomenti, e sono loro a dar luogo alle fasce alternate, a seconda del modo in cui si sommano. Ma ciò significa che la funzione d'onda non può essere letta *solo* come una misura di probabilità, c'è anche qualcos'altro; di che cosa si tratta?

Naturalmente, secondo l'Interpretazione di Copenaghen, quel che c'è in più è solo, ancora una volta, la rappresentazione di regolarità che si osservano in certe situazioni (come appunto, la distribuzione a frange quando ci sono due fori). Ciò significa allora che i dati empirici non manifestano un unico tipo di regolarità, ma almeno due: a volte si osserva quel che osserveremmo se vi fossero particelle, altre volte quel che osserveremmo se vi fossero onde. Ma perché, se non vi sono né queste né quelle? Perché due diversi tipi di regolarità?

Oltre a ciò, il prezzo pagato dalla scuola di Copenaghen per evitare i paradossi è quello di rinunciare a connettere il formalismo della meccanica quantistica alla realtà totale, ciò che solo un'interpretazione ontologica può fare. Limitandosi ad assegnare alla teoria un'interpretazione empirica, essa si preclude la possibilità di leggersi quelle

conoscenze sulla realtà che essa contiene, posto che sia vera e ammetta una corretta interpretazione ontologica. Quando l'interpretazione empirica è intesa in termini di percezioni o di conoscenze soggettive, come suggerito dalle precedenti citazioni di Heisenberg, l'Interpretazione di Copenaghen produce l'ulteriore (meta)paradosso che la meccanica quantistica, da teoria fisica, diventa in effetti una teoria psicologica. Se invece l'interpretazione empirica è data in termini di oggetti osservabili, come apparati sperimentali e strumenti di misura, abbiamo il caso di una teoria fisica che (pur senza negare l'esistenza di un mondo fisico microscopico, perché diversamente cadrebbe nella metafisica riduzionistica) rinuncia tuttavia a descriverlo. Essa rimane una semplice teoria del mondo macroscopico, e inoltre puramente descrittiva, incapace di spiegare i fenomeni che descrive.

Troviamo analogie con questa situazione in un'altra grande rivoluzione scientifica, quella copernicana. Nella cosmologia tolemaica i pianeti inferiori avevano il raggio vettore del *deferente* parallelo a quello del sole, mentre per i pianeti superiori era il raggio vettore dell'*epiciclo*, a essere parallelo a quello del sole; inoltre, tutti i pianeti avevano epicicli, tranne il sole. Anche a questo proposito, ci si sarebbe potuto chiedere: perché i pianeti sono regolati da leggi così diverse? E perché questa continua relazione col sole?

Per lungo tempo la maggioranza degli astronomi non si pose il problema o non gli diede gran peso, non ritenendo si dovesse cercare un'interpretazione ontologica della cosmologia: dopo tutto non si supponeva che esistessero realmente deferenti, epicicli, raggi vettori, ma moti di punti luminosi sulla volta del cielo, che la teoria descriveva e prevedeva esattamente. Molti non concepivano infatti l'astronomia come una teoria fisica, ma come una semplice fenomenologia del mondo celeste, con scopi eminentemente pratici (come la redazione di calendari, la predizione di congiunzioni astrali ed eclissi, e simili)²⁵. Eppure, anche allora avrebbe avuto senso chiedersi: perché quei punti luminosi (i dati empirici) hanno un comportamento caratterizzato da simili regolarità e differenze? Perché, ad esempio, osserviamo che i pianeti superiori compiono un moto retrogrado quando si trovano in opposizione al sole, mentre non si osserva nulla di ciò per i pianeti inferiori? È per questo che il sistema tolemaico fu abbandonato non appena apparve la cosmologia copernicana: perché quest'ultima consentiva un'interpretazione ontologica che spiegava tutte quelle differenze e

coincidenze²⁶, e in generale si dimostrava in grado di descrivere adeguatamente il comportamento dei corpi celesti nello spazio (oltre che nel tempo), offrendo così una conoscenza fisica dell'universo.

Il caso della meccanica quantistica somiglia forse a quello dell'astronomia *prima* di Copernico: non è ancora disponibile un'interpretazione ontologica che spieghi adeguatamente, in modo non paradossale e compatibile con le altre teorie accettate, tutte le analogie e le differenze nelle strutture dei dati. Per questo può esser ragionevole, oggi come oggi, attenersi a un'interpretazione positivista come quella di Copenaghen. È probabilmente meglio mantenere la consapevolezza critica che siamo di fronte a problemi non risolti, che adottare interpretazioni *ad hoc* o ipotesi fantasiose non rispondenti ai criteri di plausibilità sopra accennati²⁷. Proprio per questo motivo, tuttavia, sembra anche prudente considerare tale interpretazione positivista come una soluzione provvisoria e *par faute de mieux*: essa può servire a ricordarci che siamo ancora in attesa di una risposta convincente, e non a convincerci che non v'è alcun problema e non serve alcuna risposta. Rinunciare a un'interpretazione ontologica ci risparmia senz'altro molti grattacapi, ma significa anche rinunciare a soddisfare molte importanti curiosità.

Bibliografia

Aronson, J.L., 1984, *A Realist Philosophy of Science*, New York, The Macmillan Press, (Una filosofia realista della scienza, trad. it. di R. Camedda, Roma, Armando 1987.

Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G., 1982, «Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time Varying Analyzers», *Physical Review Letters*, XLIX, p.1804, http://prola.aps.org/abstract/PRL/v49/i25/p1804_1.

Born, M., 1954, «The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics», *Nobel Lecture*, December 11, 1954, <http://nobelprize.org/physics/laureates/1954/born-lecture.pdf#search='max%20born%20nobel%20lecture>.

- Capra, F., 1975, *The Tao of Physics*, London, Wildwood House (*Il Tao della fisica*, trad. it. di G. Salio, Adelphi, Milano 1983).
- Copernicus, N., 1543, *Nicolai Copernici Torinensis De reuolutionibus orbium coelestium, Libri 6*, Norimbergae, apud Ioh. Petreium.
- Cramer, J.C., 1986, «The Transactional Interpretation of Quantum mechanics», *Reviews of Modern Physics* LVIII, pp. 647-688, in http://mist.npl.washington.edu/npl/int_rep/tiqm/TI_toc.html.
- De Broglie, L., 1927a, *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris* CLXXXIV, p. 273.
- 1927b, *Journal de Physique et du Radium* VIII, p. 225.
- Duhem, P., 1908, *Σώζειν τὰ φαινόμενα. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paris, Herman.
- Budnik, P.P. Jr «Experimental Tests of Bell's Inequality», in *What is and what will be* <http://www.mtnmath.com/whatth/node62.html>
- Everett, H., 1957, «Relative State Formulation of Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics* XXIX, pp. 454-462.
- Ghirardi, G., 1997, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Milano, Il Saggiatore.
- Heisenberg, W., 1927, «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», *Zeitschrift für Physik* XLIII, pp. 172-198; ora in Wheeler and Zurek (1983, 62-84).
- 1958, «The representation of nature in contemporary physics», *Daedalus* LXXXVII, n. 3, pp. 99-108.
- Horgan, J., «Quantum Philosophy», in <http://www.tardyon.de/mirror/Mandel/qphil.html#mandel>.
- Jammer, M., 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York, J. Wiley & Sons.

- Jones, A., 1996, «Astronomia tardo-greco e bizantina», in Walker (1996, trad. it. 129-144).
- Losee, J., 1993, *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*, Oxford, Oxford University Press (*Filosofia della scienza*, trad. it. di P. Budinich, Milano, Il Saggiatore 2001).
- Popper, K.R., 1960, «On the Sources of Knowledge and of Ignorance», *Annual Philosophical Lectures*, British Academy («Le fonti della conoscenza e dell'ignoranza», in Popper, K.R., *Scienza e filosofia*, trad. it. di M. Trinchero, Milano, Einaudi, 1969, 69-120).
- 1972, *Objective Knowledge: an Evolutionary Approach*, Oxford, Clarendon Press (*Conoscenza oggettiva: un punto di vista evoluzionistico*, trad. it. di A. Rossi, Roma, Armando, 1975).
- «La teoria dei tre mondi», in *Enciclopedia Multimediale delle Scienze Filosofiche*, http://www.emsf.rai.it/dati/interviste/in_293.htm
- Ptolemaeus, C., 1984, *Ptolomy's Almagest*, translated and annotated by G.J. Toomer, London, Duckworth.
- Verdet, J.P., 1990, *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Editions du Seuil (*Storia dell'astronomia*, trad. it. di L. Sosio, Milano, Longanesi 1995).
- Wang, L.J., Zou, X.Y., Mandel, L., 1991a, «Induced coherence without induced emission», *Physical Review A* XLIV, n.7, pp. 4614-4622.
- Wang, L.J., Zou, X.Y., Mandel, L., 1991b «Experimental Test of the Broglie Guided-Wave Theory for Photons», *Physical Review Letters* LXVI, pp. 1111-1114.
- Walker, C. (ed.), 1996, *Astronomy Before the Telescope*, London, British Museum Press (*L'astronomia prima del telescopio*, trad. it. di E. Joli, Bari, Dedalo 1997).
- Weizsäcker von, C. F., 1971, «The Copenhagen Interpretation», in Bastin, T. (ed.), *Quantum Theory and Beyond*, London, Cambridge University Press, pp. 25-31.

Wheeler, J.A., and Zurek, W.H. (eds.), 1983, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, N.J., Princeton University Press.

Wigner, E. P., 1962, «Remarks on the Mind-Body Question», in Good, I.J. (ed.), *The Scientist Speculates*, London, Heinemann and Basic Books, pp.284-302.

«Many-worlds Interpretation», *Wikipedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Everett_many-worlds_interpretation#References.

Zou, X.Y., Wang, L.J., Mandel, L., 1991, «Induced Coherence and Indistinguishability in Optical Interference», *Physical Review Letters* LXVII, n. 3, pp. 318- 321.

Zou, X.Y., Grayson, T.P., Wang, L.J., and Mandel, L., 1992 «Can an Empty de Broglie Pilot Wave Induce Coherence?», *Physical Review Letters* LXVIII, pp. 3667-69.

Note

¹ In realtà non esiste un'unica e ufficiale versione dell'interpretazione di Copenaghen, e gli interpreti non concordano su quali ne siano esattamente le tesi e l'estensione; ma non intendo qui affrontare questioni esegetiche, e non pretendo che il mio modo di caratterizzarla sia storicamente e filologicamente esatto.

² Popper ha convincentemente argomentato in molti lavori che i dati empirici non sono la fonte, o quanto meno non sono l'unica fonte, della nostra conoscenza scientifica. Vedi ad es. Popper (1972, cap. 2, §§ 12, 17-18), e Popper (1960, cap. XIII).

³ Che sono cruciali rispettivamente nei contributi di Heisenberg, di Schrödinger, di Dirac, e di Von Neumann.

⁴ Anche in modi diversi da quello mediato dall'attivazione volontaria del proprio corpo. Si noti che questo non è idealismo, dato che quest'ultimo non prevede la possibilità che il *soggetto empirico* modifichi direttamente la materia.

⁵ De Broglie (1927a, 1927b).

⁶ Tra essi importanti specialmente quelli di Mandel: Zou, Wang, Mandel (1991); Wang, Zou, Mandel (1991a); Wang, Zou, Mandel (1991b); Zou, Grayson, Wang, Mandel, (1992); see also Horgan, «Quantum Philosophy».

⁷ Born (1954).

⁸ In particolare quelli che hanno mostrato la violazione delle note disuguaglianze di Bell: vedi «Experimental Tests of Bell's Inequality», e specialmente Aspect, Dalibard, Roger (1982).

⁹ Sulle possibili connessioni tra meccanica quantistica e filosofie orientali si veda il ben noto Capra (1975).

¹⁰ Heisenberg, (1927, 172), citato in Cramer (1986, nota 8).

¹¹ Citato in Ghirardi (1997, 116).

¹² Citato in Ghirardi, (1997, 118).

¹³ Von Weizsäcker (1971), citato in Cramer (1986).

¹⁴ Ghirardi (1997, 118).

¹⁵ Heisenberg (1958, 95), citato in Cramer (1986, nota 6).

¹⁶ «*With the sudden change of our knowledge also the mathematical presentation of our knowledge undergoes of course a sudden change*» Riportato in Jammer (1974) da una lettera a Renninger del 2 febbraio 1960, citato in Cramer (1986, nota 7).

¹⁷ In Cramer (1986).

¹⁸ Ibid., 2.1.1

¹⁹ Ibid., 2.1.2

²⁰ Vedi Wigner (1962).

²¹ Vedi Popper (1972, trad. it. 150-165; 211-216); vedi pure Popper, «La teoria dei tre mondi».

²² Cramer (1986, 2.4.3-4).

²³ Ibid., 2.4.1-2

²⁴ Come illustra con grande chiarezza Aronson (1984, cap. 3, cap.7).

²⁵ Secondo Duhem (1908) già Platone aveva posto come obiettivo per gli astronomi quello di trovare modelli che salvassero i fenomeni, ma non è del tutto chiaro che questo fosse per lui l'unico scopo dell'astronomia: vedi Verdet (1990, trad. it. 36-41). In ogni caso, il problema fu dibattuto in età ellenistica, in particolare da Tolomeo nell'*Almagesto* (Ptolemaeus 1984, XIII, 2), e molti, allora e in seguito, fecero propria questa concezione antirealistica; sembra che essa sia stata seguita tra gli altri da Gemino da Rodi (vedi Losee 1993, trad. it.. 30-31) e da Proclo (vedi Jones 1996), ed era ancora presente nella prefazione al *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Copernicus 1543) scritta da Nicola Osiander.

²⁶ Come spiega Copernico stesso nella dedica premessa al *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Copernicus 1543).

²⁷ Come ad esempio quella dei molti universi: vedi Everett (1957);«Many-worlds Interpretations».