

GIOVANNI STRAFFELINI, *Meccanica quantistica e realismo*, in «Atti della Accademia Roveretana degli Agiati. B, Classe di scienze matematiche, fisiche e naturali» (ISSN: 1124-0350), s. 9 v. 8 (2018), pp. 25-36.

Url: <https://heyjoe.fbk.eu/index.php/atagb>

Questo articolo è stato digitalizzato dal progetto ASTRA - *Archivio della storiografia trentina*, grazie al finanziamento della Fondazione Caritro (Bando Archivi 2021). ASTRA è un progetto della Biblioteca Fondazione Bruno Kessler, in collaborazione con Accademia Roveretana degli Agiati, Fondazione Museo storico del Trentino, FBK-Istituto Storico Italo-Germanico, Museo Storico Italiano della Guerra (Rovereto), e Società di Studi Trentini di Scienze Storiche. ASTRA rende disponibili le versioni elettroniche delle maggiori riviste storiche del Trentino, all'interno del portale [HeyJoe](#) - *History, Religion and Philosophy Journals Online Access*.

This article has been digitised within the project ASTRA - *Archivio della storiografia trentina* through the generous support of Fondazione Caritro (Bando Archivi 2021). ASTRA is a Bruno Kessler Foundation Library project, run jointly with Accademia Roveretana degli Agiati, Fondazione Museo storico del Trentino, FBK-Italian-German Historical Institute, the Italian War History Museum (Rovereto), and Società di Studi Trentini di Scienze Storiche. ASTRA aims to make the most important journals of (and on) the Trentino area available in a free-to-access online space on the [HeyJoe](#) - *History, Religion and Philosophy Journals Online Access* platform.

Nota copyright

Tutto il materiale contenuto nel sito [HeyJoe](#), compreso il presente PDF, è rilasciato sotto licenza [Creative Commons](#) Attribuzione–Non commerciale–Non opere derivate 4.0 Internazionale. Pertanto è possibile liberamente scaricare, stampare, fotocopiare e distribuire questo articolo e gli altri presenti nel sito, purché si attribuisca in maniera corretta la paternità dell’opera, non la si utilizzi per fini commerciali e non la si trasformi o modifichi.

Copyright notice

All materials on the [HeyJoe](#) website, including the present PDF file, are made available under a [Creative Commons](#) Attribution–NonCommercial–NoDerivatives 4.0 International License. You are free to download, print, copy, and share this file and any other on this website, as long as you give appropriate credit. You may not use this material for commercial purposes. If you remix, transform, or build upon the material, you may not distribute the modified material.



GIOVANNI STRAFFELINI

MECCANICA QUANTISTICA E REALISMO

ABSTRACT - STRAFFELINI G., 2019 - Quantum mechanics and realism.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 268, 2018, ser. IX, vol. VIII, B: 25-36.

Many philosophers teach us to use some skepticism about everything we perceive with our senses. The possibility of considering such things as truly existing, the so-called *direct realism*, is questioned. Quantum mechanics raises the bar a lot, since it commits us to consider the existence of objects that we cannot in principle detect. Objects that mainly have a mathematical nature, very often also on a virtual level. More than any other scientific discipline, quantum mechanics forces us to reconsider our understanding of realism. In the present paper, I will first introduce the two main lines of modeling of quantum mechanics, namely the 'mechanics of matrices' originally proposed by Heisenberg and Dirac and the 'wave mechanics' introduced by Schrödinger, whose interpretation directly involves the realism. Thereafter, I will try to understand which of the two visions can be preferred using the main ideas of cognitive neuroscience that prompt us to review our ability to perceive the physical world. The logic path will lead to favoring the mechanics of matrices, and the vision of the world that it entails, commonly called the *vision of Copenhagen*.

KEY WORDS - Quantum mechanics; Realism; Neuroscience.

RIASSUNTO - STRAFFELINI G., 2019 - Meccanica quantistica e realismo.

Molti filosofi ci insegnano ad usare un certo scetticismo relativamente ad ogni cosa che percepiamo con i nostri sensi. Viene messo in dubbio il cosiddetto *realismo diretto*, vale a dire la possibilità di considerare tali percezioni autenticamente reali. La meccanica quantistica sposta di molto l'asticella e ci obbliga a confrontarci con il cosiddetto *realismo scientifico*, dal momento che ci impegna a considerare vera l'esistenza di oggetti che neppure per principio possiamo vedere; oggetti che hanno principalmente una natura matematica, molto spesso pure a livello virtuale. Più di ogni altra disciplina scientifica, la meccanica quantistica ci costringe pertanto a confrontarci col tema del realismo. Nella presente memoria introdurrò le due principali linee di modellazione della meccanica quantistica, vale a dire la 'meccanica delle matrici' proposta originariamente da Heisenberg e Dirac e la 'meccanica ondulatoria' introdotta da Schrödinger, la cui interpretazione tocca in modo essenziale il tema del realismo. Cercherò quindi di capire quale delle due visioni possa essere preferita utilizzando le idee salienti delle neuroscienze cognitive che ci spingono a rivedere le nostre capacità di percepire il mondo (fisico) esterno alla nostra mente. La riflessione condurrà a privilegiare la meccanica delle matrici e la visione del mondo che essa comporta, comunemente denominata *visione di Copenhagen*.

PAROLE CHIAVE - Meccanica quantistica; Realismo; Neuroscienze.

1. INTRODUZIONE

La meccanica quantistica è un'architettura di modelli variamente integrati tra loro che intende descrivere e predire ciò che succede nell'intimo della materia. Tali modelli sono caratterizzati dalla presenza di grandezze e concetti dai nomi spesso strani e curiosi, almeno per i non addetti ai lavori: funzione d'onda, quanti, orbitali, onda pilota, ... Una domanda viene allora spontanea: tutte queste cose strane, esistono realmente "là fuori"? ⁽¹⁾.

Molti filosofi ci hanno sempre insegnato ad usare un certo scetticismo relativamente ad ogni cosa che percepiamo. Penso ad esempio a Cartesio (1596-1650), che era assai dubbioso sull'esistenza della realtà esterna visto che i sensi sovente ci ingannano (pensiamo ai sogni); egli era sicuro solo dell'esistenza del pensiero e dunque degli esseri pensanti (*cogito ergo sum*). Cartesio si era posto il dubbio iperbolico che ancora oggi tormenta molti pensatori: non è che tutto ciò che percepiamo è la creazione di un diavoletto malefico? Il filosofo francese aveva trovato una risposta: per essere sicuri dell'esistenza del mondo esterno bisogna affidarsi alla bontà di Dio; Dio non ci inganna, per cui «dobbiamo concludere che vi è una certa sostanza, estesa in lunghezza, larghezza e profondità, che esiste attualmente nel mondo con tutte le proprietà che conosciamo manifestamente appartenerele» (*Principi della filosofia*). George Berkeley (1685-1753) era ancora più drastico di Cartesio, e riteneva che la materia proprio non esiste. Se la materia esistesse, sosteneva il filosofo e vescovo irlandese, essa sarebbe passiva e non potrebbe certo produrre delle idee, le quali esistono solo nello spirito pensante (*esse est percipi*). David Hume (1711-1776) era d'accordo con Berkeley nel ritenere che non abbiamo motivi di credere nell'esistenza di una realtà oggettiva là fuori. Dunque l'idea di sostanza, che conferisce realtà agli oggetti esterni, non «è distinta da quella di una collezione di qualità particolari» che percepiamo e uniamo con l'immaginazione e che «hanno un particolare nome a loro assegnato, con il quale possiamo richiamare in noi stessi e negli altri questa collezione», detta anche *fascio di percezioni* (*Trattato sulla natura umana*) ⁽²⁾.

Il realismo messo in dubbio da questi filosofi è il cosiddetto *realismo diretto*, o *ingenuo*, che esprime la possibilità di considerare autenticamente esistenti le cose che percepiamo con i nostri sensi. La meccanica quantistica sposta di molto l'asticella e ci obbliga a confrontarci con il cosiddetto

⁽¹⁾ Tra i molteplici testi introduttivi alla meccanica quantistica ne segnalo due: NEWTON 2011; AL-KHALILI 2014.

⁽²⁾ Le citazioni di Galileo, Cartesio e Hume sono tratte da: NICOLA 2000.

realismo scientifico, dal momento che ci impegna a considerare l'esistenza di oggetti – come quelli elencati sopra – che neppure per principio possiamo vedere; oggetti che hanno principalmente una natura matematica, molto spesso pure a livello virtuale, come si dice. Più di ogni altra disciplina scientifica, la meccanica quantistica ci obbliga insomma a confrontarci col tema del realismo, e – sempre di più – con molte acquisizioni delle neuroscienze cognitive che ci spingono a rivedere le nostre capacità di percepire il mondo (fisico) esterno alla nostra mente.

Fin dagli albori la meccanica quantistica si è sviluppata lungo due linee principali di modellazione, alle quali sono corrisposte due diverse piste di *interpretazione* dei fenomeni coinvolti, entrambe col denominatore comune di essere poco intuitive. La prima è geminata principalmente dall'attività e le idee di Niels Bohr (1885-1962) e Werner Heisenberg (1901-1976), ed è sovente chiamata *meccanica delle matrici*; la seconda è nata invece principalmente dal lavoro del fisico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961), ed è denominata *meccanica ondulatoria*. Questi due approcci conducono entrambi a valutazioni numeriche assai precise, ma comportano pure due visioni interpretative assai diverse che riguardano appunto il tema del realismo e dunque la nostra comprensione del mondo, e che sono state spesso – e sono tutt'ora – fonte di contrapposizione tra i fisici e tra tutti coloro che si interessano di scienza. Nella presente memoria cercherò di capire quale delle due visioni possa essere preferita utilizzando le idee salienti delle neuroscienze cognitive sul tema del realismo. La riflessione condurrà a privilegiare la meccanica delle matrici e la visione del mondo che essa comporta (comunemente denominata *visione di Copenhagen*) ⁽³⁾.

2. ANTEFATTO: LA VECCHIA MECCANICA QUANTISTICA

Nel 1800 il fisico inglese Thomas Young (1773-1829) condusse un celebre esperimento. Studiò il comportamento della luce che passa attraverso due strette fenditure e va ad illuminare la superficie di uno schermo. Egli mostrò che, nelle condizioni opportune, la luce forma una serie di strisce luminose intervallate da strisce scure, invece che due strisce luminose come sarebbe spontaneo attendersi. Come mai? Per tentare una risposta si ricorse al concetto di *onda*. In ambito fisico le *onde* – come le onde del mare, le onde sonore e così via – mostrano tutte un comportamento simile a quello mostrato dalla luce nell'esperimento di Young, e tale comportamento è

⁽³⁾ Le riflessioni qui riportate sono tratte da: STRAFFELINI 2019.

denominato *interferenza*. In sostanza, in certe zone le creste di due onde che si incontrano si sovrappongono formando un'onda più alta (la striscia luminosa), mentre in altre zone una cresta di un'onda si sovrappone con un avvallamento dell'altra e quindi in quella zona l'onda scompare (la striscia scura). Su tali basi è stato proposto, per analogia, che tutto ciò che manifesta questo comportamento – l'interferenza – sia modellabile come se fosse un'onda e che, evidentemente, anche la luce vada considerata in tale modo (cioè un'onda *elettromagnetica*).

All'inizio del XX secolo la ricerca in ambito fisico era tumultuosa. Ernest Rutherford (1871-1937) sulla base di particolari esperimenti propose il suo celebre modello dell'atomo, visto in analogia con il sistema solare in miniatura: il nucleo è il Sole e gli elettroni sono i pianeti che ci girano intorno. Il fisico tedesco Max Planck (1858-1947) trovò invece la soluzione ad un annoso problema: perché un pezzo di ferro incandescente assume colori diversi all'aumentare della temperatura? Planck propose un modello interpretativo basato sull'idea che l'energia emessa (o assorbita) da un corpo, come un pezzo di ferro, si presenti in quantità discrete, dette pacchetti o *quanti*. Un altro fisico, Albert Einstein (1879-1955), usò questa idea di Planck per proporre che la luce sia rappresentabile come se fosse granulare, cioè costituite da particelle che in seguito furono denominate *fotoni*.

Ma allora, la luce è considerabile come se fosse un'onda, come lascia supporre l'esperimento di Young, o come se fosse una particella, come proposto da Einstein? Molti contestarono l'idea di Einstein: che la luce fosse un'onda elettromagnetica sembrava una cosa ormai assodata. Quasi per ironia della sorte – come vedremo fra un attimo – non vi si oppose il giovane fisico danese Niels Bohr, il quale arrivò in Inghilterra per lavorare come assistente di Rutherford. Qui Bohr propose un nuovo modello di atomo, basato proprio sulle idee rivoluzionarie di Planck e Einstein. Egli propose che gli elettroni possono ruotare intorno al nucleo in orbite specifiche, caratterizzate da un determinato livello di energia; inoltre, se eccitato con la giusta intensità di energia, ogni elettrone può saltare al livello superiore, dal quale può poi ritornare al livello inferiore emettendo, a sua volta, il corrispondente *pacchetto* (o quanto) di energia. Nonostante i molti problemi teorici, il modello atomico di Bohr funzionava egregiamente. Tra le criticità, una era particolarmente rilevante: come valutare quanto tempo un elettrone rimane eccitato prima di ritornare allo stato energetico inferiore emettendo il corrispondente pacchetto di energia? Ebbene, la risposta venne fornita da Einstein un paio di anni più tardi, introducendo – all'interno dell'impalcatura della meccanica quantistica che si andava costruendo – l'idea di *probabilità*, e dunque di *indeterminazione*: Einstein infatti propose

un modello per calcolare la probabilità che un elettrone eccitato torni al livello di energia inferiore.

3. LA GRANDE MECCANICA QUANTISTICA

Bohr tornò a Copenhagen, e qui radunò nei suoi laboratori alcuni tra i migliori giovani ricercatori del tempo, tra i quali il giovane fisico tedesco Werner Heisenberg il quale utilizzò le idee di Einstein sul calcolo delle probabilità di transizione degli elettroni da un livello all'altro per fondare la *grande meccanica quantistica*, usando la formulazione matematica della *meccanica delle matrici*. Heisenberg introdusse anche il famoso e fondamentale *principio di indeterminazione*, il quale stabilisce che non è possibile misurare (e dunque conoscere) con elevata precisione la posizione e la quantità di moto ⁽⁴⁾ di una particella – così come di altre coppie di grandezze tra loro correlate, come l'energia e il tempo – poiché all'aumentare della precisione con cui si misura una grandezza, aumenta l'imprecisione con cui si può misurare l'altra.

Cosa può fare il modello scientifico sviluppato da Heisenberg (col successivo contributo saliente di Paul Dirac)? Si immagina di avere un cannone elettronico, simile a quello che c'era nei vecchi apparecchi televisivi, e di lanciare elettroni liberi verso uno schermo di vetro, costringendoli a passare, uno alla volta, attraverso un piccolissimo foro. Ad ogni lancio è prodotto un piccolo lampo sullo schermo. Si è osservato sperimentalmente che anche se il foro è piccolissimo, i lampi si distribuiscono su una rosa abbastanza ampia invece che concentrarsi perfettamente nel centro ⁽⁵⁾. Questo conferma che è lecito modellare gli elettroni come se fossero particelle visto che causano i singoli impatti contro lo schermo. Non solo: si evince pure che gli elettroni hanno un comportamento *indeterminato*, nel senso che ogni elettrone non si muove con una traiettoria precisa ma forma sullo schermo una dispersione di punti di impatto. In altre parole, ad ogni lancio non possiamo sapere con precisione quale punto dello schermo l'elettrone colpirà: ogni esperimento produce un risultato diverso dal precedente. Possiamo dunque rispondere alla domanda dicendo che il modello di Heisenberg-Dirac permette di fare due cose: 1) calcolare le grandezze fisiche che caratterizzano le particelle fondamentali, come un elettrone, quando interagiscono con un altro corpo, come lo schermo in vetro; 2) calcolare la *probabilità* che

⁽⁴⁾ La 'quantità di moto' di un qualunque oggetto è data dal prodotto della sua massa per la sua velocità.

⁽⁵⁾ Non solo, la dispersione aumenta al diminuire della dimensione del foro.

tali particelle abbiano una certa proprietà alla successiva interazione. Il modello non stabilisce alcunché su che cosa accada alle particelle tra una collisione e quella successiva.

Facciamo ora un passo avanti e proviamo a condurre un esperimento analogo a quello di Young, ponendo davanti al cannone elettronico due fori, anziché uno. Ebbene, uno alla volta gli elettroni producono dei piccoli lampi sullo schermo in modo indeterminato; tuttavia quando il numero di lampi, cioè di elettroni sparati dal cannone, è molto elevato, ci si accorge che sullo schermo è descritta una serie di bande verticali, proprio come nell'esperimento di Young! Questo lascia indurre che anche gli elettroni si comportino come se fossero onde... In effetti, già ai tempi di Heisenberg il francese Louis de Broglie (1892-1987), dopo aver notato che la luce, usualmente modellata come se fosse un'onda elettromagnetica, si comportava anche come se fosse una particella, propose che anche un elettrone, una particella, potesse – per analogia – comportarsi come se fosse un'onda. Partendo da tale premessa, dalla definizione di energia quantizzata di Planck e dall'equazione generale delle onde (quella già usata con successo per modellare le onde sonore), il fisico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961) sviluppò – per deduzione – il modello della *meccanica ondulatoria*, alternativo a quello di Heisenberg-Dirac. Il modello di Schrödinger apparve subito assai affascinante e intuitivo: gli elettroni e tutte le particelle fondamentali ⁽⁶⁾ si comportano come se fossero granelli quando sono misurate (si pensi ai lampi sullo schermo in vetro) e come se fossero onde tra una misura e l'altra (quando cioè il modello di Heisenberg-Dirac tace). Allo stesso tempo, tuttavia, apparve a molti ricercatori assai oscuro, soprattutto perché non si capiva – e non si capisce – cosa esattamente ondeggi: se nelle onde del mare è l'acqua che oscilla su e giù, e nelle onde sonore è la pressione dell'aria che oscilla, nel caso delle onde della meccanica ondulatoria non vi sono idee su cosa oscilli (l'etere?). Dirac, da matematico e fisico geniale, dimostrò come i due modelli potessero essere unificati. Fu poi Max Born ad attribuire un significato alla funzione d'onda che compare nell'equazione di Schrödinger, mostrando come essa possa essere interpretata come la probabilità di trovare una particella in una piccola porzione di spazio, conferendo così anche alla meccanica ondulatoria la tipica caratteristica di indeterminatezza che connota il modello di Heisenberg-Dirac.

⁽⁶⁾ Compresi i fotoni, visto che nel 1923 il fisico Arthur Compton mostrò sperimentalmente che la luce è indubbiamente uno sciame di particelle.

4. REALISMO, DETERMINISMO E INDETERMINISMO

La meccanica quantistica dispone dunque di due modelli distinti che permettono di studiare e predire con precisione i fenomeni del mondo atomico e subatomico. Il problema è interpretare questi due modelli, vale a dire descrivere quello che succede usando concetti che siamo almeno in grado di intuire. E qui entra in gioco il realismo.

La meccanica delle matrici di Heisenberg-Dirac è alla base del modello (a volte si parla di visione) di *Copenhagen*. In prima battuta si può dire che tale visione sia caratterizzata dai seguenti assunti:

1. La struttura matematica della meccanica quantistica modella correttamente e in modo completo ciò che succede a livello subatomico. Tale struttura si basa anche sul *principio di località* che vedremo fra poco.
2. Il comportamento indeterministico sperimentale di “oggetti” che modelliamo come particelle fondamentali è una caratteristica propria del mondo microscopico e non il riflesso della nostra incapacità di modellarlo adeguatamente.
3. La meccanica quantistica non fornisce un’interpretazione (realistica o meno) di tali sistemi ma si limita a modellare con successo come si presentano alle nostre osservazioni. Bohr sosteneva proprio che la scienza doveva limitarsi a modellare la realtà senza preoccuparsi di capirla.

Albert Einstein non era affatto persuaso della visione di Copenhagen. Lui che aveva dato l’inizio al tutto proponendo per primo un’interpretazione probabilistica di un fenomeno quantistico (il salto di elettrone verso un diverso livello di energia), era un *realista* e un *determinista* convinto. Einstein riteneva che: a) la realtà esterna, compreso l’elettrone, esiste indipendentemente dall’osservatore («la luna esiste lassù anche quando non la guardo»), sostenendo così il realismo scientifico; b) non c’è spazio per l’indeterminazione e ogni evento è causalmente determinato da un evento precedente, così che tutto ciò che accade in questo mondo è parte di una lunghissima catena di cause e di effetti («Dio non gioca a dadi col mondo») (7). Nel 1935, insieme agli assistenti Boris Podolsky e Nathan Rosen, Einstein pubblicò un famoso articolo, noto come il *paradosso EPR*. Senza entrare nei dettagli, possiamo dire che questi autori dimostrarono che, assunti per veri i due seguenti principi (che esprimono le suddette convinzioni di Einstein) (8):

(7) Al che Bohr, che contrastava fieramente la visione di Einstein, rispose: «Non è compito degli scienziati dire a Dio come funziona il mondo, ma solo scoprirlo».

(8) NICROSINI 2002.

- 1) *Il principio di realtà*: «se, senza intervenire su un dato sistema, è possibile prevedere con certezza (cioè con probabilità pari a 1) il valore di una grandezza fisica, a questa corrisponde una proprietà oggettiva del sistema, cioè una proprietà indipendente da eventuali osservatori esterni».

Questo principio corrisponde – in buona sostanza – al *realismo scientifico*; non si focalizza sull'esistenza degli oggetti in sé ma – in buon accordo con la visione di Galileo – si riferisce alle proprietà fisiche misurabili degli oggetti e alla constatazione che esse esistono sempre, anche quando non sono misurate.

- 2) *Il principio di località*: «dati due sistemi fisici e supposto che durante un certo intervallo di tempo essi rimangono isolati tra loro, allora l'evoluzione delle proprietà fisiche di uno di essi durante tale intervallo di tempo non può essere influenzata da operazioni eseguite sull'altro». Questo principio definisce l'impossibilità di un'azione *istantanea* a distanza, vale a dire che un fenomeno che accade in un certo sistema possa avere effetti istantanei su un altro sistema più lontano. Del resto niente, neppure l'informazione, può viaggiare a velocità maggiore di quella della luce e se due oggetti sono separati nello spazio allora lo sono anche nel tempo. Questo principio comprende l'idea generale di causalità (e dunque del *determinismo*), vale a dire dell'esistenza dei rapporti causa-effetto, dove una causa *precede* sempre il relativo effetto.
Allora:

- 3) Il modello della meccanica quantistica – nella formulazione della meccanica delle matrici o ondulatoria – *non è completo*, ovvero non considera tutti gli aspetti della realtà fisica.

Ciò significava, per Einstein e colleghi, che l'antirealismo e l'indeterminismo della meccanica quantistica sono solo apparenti, e i modelli sono incompleti perché ci sono delle *variabili nascoste* che sono trascurate: un modello completo basato su di esse ripristinerebbe una visione completamente realista e deterministica del mondo, compreso quello sub-atomico. Si trattava di trovarlo... Trent'anni dopo, le considerazioni teoriche condotte dal fisico irlandese John Bell (1928-1990) e i successivi lavori sperimentali del gruppo di ricerca francese di Alain Aspect (nel 1982), mostrarono che la meccanica quantistica (vale a dire i modelli di Heisenberg-Dirac e di Schrödinger) *non* può essere completata con una teoria a variabili nascoste che preservi il principio di realtà e quello di località ⁽⁹⁾. Quello che si è capito è che le tre

⁽⁹⁾ Per approfondire il lavoro e il pensiero di John Bell: BELL 2010.

asserzioni appena viste (il principio di realtà, il principio di località, la completezza della meccanica quantistica), non possono valere contemporaneamente: in ogni modello fisico coerente (cioè esente da contraddizioni interne) almeno una di queste assunzioni deve cadere.

Cosa rimane allora? Certamente la visione di Copenhagen, per la quale la meccanica quantistica è completa (tutto funziona come si deve), preserva il principio di località⁽¹⁰⁾ e *rinuncia al realismo scientifico* (e pure a quello *diretto*), come sostenuto da Bohr. I nostri sforzi non ci possono permettere di giungere alla conoscenza della realtà del mondo subatomico e dobbiamo accettare che tutte le grandezze che caratterizzano i modelli scientifici della meccanica quantistica – come gli operatori matriciali di Heisenberg, le funzioni d'onda di Schrödinger e le stesse particelle – siano *solo strutture matematiche* che non hanno necessariamente riscontri diretti con ciò che c'è là fuori. Sapevamo già che non possiamo osservare le particelle fondamentali neanche volendo, e che abbiamo solo evidenza indiretta di esse. Ebbene la visione di Copenhagen afferma che tali particelle appartengono al nostro mondo solo come oggetti astratti, supposti dai modelli scientifici, e che *l'indeterminismo è una proprietà intrinseca del modo in cui tali oggetti si manifestano alle nostre osservazioni*. Non solo: possiamo conoscere le proprietà di queste particelle *solo* quando ci *relazioniamo* con i fenomeni che le rivelano, mentre non possiamo sapere nulla delle loro proprietà e del loro comportamento prima della misura, cioè prima di porci in tale relazione.

Questa visione non piaceva però a tanti, tra i quali sicuramente John Bell che, parole sue, non avrebbe mai rinunciato al realismo (scientifico). Bell preferiva la cosiddetta visione di de Broglie-Bohm, che prende le mosse dalla meccanica ondulatoria. L'americano David Bohm (1917-1992) riscrisse l'equazione di Schrödinger suddividendola in due equazioni accoppiate. Bohm sostenne che ad ogni particella fondamentale va quindi associata un' *onda pilota reale*, che sarebbe la variabile nascosta non locale (nel senso che non ubbidisce al principio di località) che completa il modello. Tale onda guiderebbe le particelle fondamentali lungo certe traiettorie reali e definite. Pertanto, la visione di de Broglie-Bohm è completa, non locale e preserva il realismo perché l'onda guida e la funzione d'onda sono considerati come oggetti fisici reali. È pure deterministica, anche se è impossibile per principio determinare con precisione le condizioni iniziali,

⁽¹⁰⁾ Infatti le nostre osservazioni modificano la nostra conoscenza dei sistemi che studiamo, ma nulla possiamo dire delle loro proprietà in sé.

come posizione e velocità, di una particella e dunque determinare la sua traiettoria; l'indeterminismo riemerge allora sotto forma di una nostra (cioè dell'osservatore) incapacità di conoscenza ⁽¹⁾. Va infine notato che nel 1957 fu proposta, da parte del fisico Hugh Everett III (1930-1982), quella che John Bell ha definito "la parte romantica della rappresentazione dell'onda pilota" di de Broglie-Bohm. È un modello semplice e, diciamo così, spiazzante: esso afferma che ogni volta che facciamo una misura la funzione d'onda assume tutti i valori che deve assumere e noi ne misuriamo uno, quello che corrisponde al nostro universo; in un altro universo, distinto dal nostro, un altro osservatore osserva un altro valore, e così via. Ad ogni misura – e più in generale, ad ogni scelta che effettuiamo – c'è insomma una *moltiplicazione degli universi* di cui non potremmo mai avere conoscenza, con buona pace – tra le altre cose – del requisito di verificabilità dei modelli scientifici. Peraltro, se nel suo complesso questo modello è deterministico, per un osservatore in un determinato universo, come lo siamo noi, esso rimane gnoseologicamente indeterministico.

5. VISIONI A CONFRONTO

Quale delle due visioni della meccanica quantistica preferire? Entrambi i modelli permettono di ottenere risultati concordi con le osservazioni sperimentali ma l'interpretazione che propongono è assai diversa. In genere c'è una preferenza per la visione di Copenhagen, anche se la visione di de Broglie-Bohm sta acquisendo crescenti consensi, sospinta dalla convinzione che il suo più grande difetto sia quello di essere venuta tardi, dopo che la visione di Copenhagen si era ormai affermata tra gli esperti del settore.

Come detto nell'introduzione di questo paragrafo, mi pare che la visione di Copenhagen sia da preferire. Riprendendo in parte le argomentazioni del fisico Carlo Rovelli ⁽²⁾, si può ritenere che la visione proposta dalla meccanica ondulatoria sia per molti versi fuorviante. Innanzitutto, non si capisce il significato della *funzione d'onda* che caratterizza l'equazione di Schrödinger: è difficile considerarla qualcosa di oggettivo là fuori visto che si tratta di un astratto concetto matematico formato da tutte le possibili configurazioni del sistema nello spazio di Hilbert... E ovviamente non si

⁽¹⁾ Se per la visione di Copenhagen l'indeterminismo è *ontologico* (proprio della materia, in qualunque modo si manifesti alle nostre osservazioni), per la visione di de Broglie-Bohm è *gnoseologico*, cioè dovuto alla nostra imprescindibile ignoranza delle condizioni iniziali delle particelle.

⁽²⁾ ROVELLI 2014.

capisce come un'onda possa comportarsi da particella quando viene misurata. Per non dire della moltiplicazione degli universi. Infine – sostiene Rovelli – le ultime scoperte sperimentali condotte al CERN di Ginevra supportano sicuramente la visione di Copenhagen, mentre non supportano la visione antagonista geminata dalla meccanica ondulatoria (vale a dire la teoria delle stringhe). Seppur critico con la visione di Copenhagen, sospetto che pure Einstein non avrebbe gradito la visione di de Broglie-Bohm, che si propone come realista e deterministica (in principio ci siamo, anche se nei fatti è caratterizzata da un indeterminismo gnoseologico), ma poi rinuncia per forza al principio di località e quindi al principio di causalità, e pertanto appare in parte contraddittoria (lo è di sicuro rispetto alle intenzioni iniziali di Einstein).

Ma il motivo principale che fa pendere l'ago della bilancia verso la visione di Copenhagen viene dalla comprensione del realismo che ci viene oggi consegnata dalle neuroscienze cognitive. Il discorso è, nei suoi tratti essenziali, abbastanza semplice. Noi ci rendiamo conto di vedere un qualunque oggetto nel mondo esterno perché un opportuno *programma* nella corteccia cerebrale è in grado di decifrare l'informazione che arriva e conferirle il significato corrispondente creando una *rappresentazione mentale* di tale oggetto. Gli sciami di fotoni provenienti dagli oggetti che ci circondano (e che le loro superfici emettono come riflessione della luce di una sorgente esterna come il Sole o una lampadina), sono raccolti dal sistema visivo e i segnali sono poi inviati al cervello tramite il nervo ottico. Di per sé tali segnali non significano nulla. Come ha scritto il noto neuroscienziato Arnaldo Benini: «Durante il viaggio nel cervello, i potenziali elettrici acquistano caratteristiche che gli oggetti non hanno. Si diventa coscienti di qualità che nel mondo non esistono. I suoni, gli odori, i colori, il caldo e il freddo, la luce e il buio non sono nel mondo» ⁽¹³⁾. Esiste dunque una chiara cesura tra il mondo esterno e le nostre rappresentazioni mentali. Riprendendo l'analisi di Galileo e, soprattutto, quelle di Berkeley e Hume, dobbiamo ammettere che non c'è differenza tra qualità primarie e secondarie: in tutti i casi ci sono sollecitazioni esterne (radiazioni luminose, onde sonore, molecole gassose) che sono raccolte dai nostri organi di senso (vista, udito, olfatto, tatto), sono trasformate in segnali chimico-fisici i quali sono inviati al cervello che infine provvede a elaborarli e trasformarli in rappresentazioni di nostra comprensione. Le neuroscienze cognitive ci obbligano dunque ad una visione annacquata del realismo, spesso denominata *realismo indiretto*, che suddivide il concetto di realtà in due parti. Da una parte c'è la *realtà*

⁽¹³⁾ BENINI 2012.

percepita e condivisibile, data dalle percezioni e le relative rappresentazioni, prodotta dal cervello con i suoi programmi interni; è condivisibile perché è una realtà di cui siamo consapevoli e che possiamo raccontare agli altri, in uno scambio informativo fondamentale. E – separata ma in qualche modo correlata con la realtà percepita e condivisibile – c'è *la realtà in sé*, la faccia della realtà a noi inconoscibile, che è oltre le nostre capacità conoscitive. Insomma l'analisi scientifica proposta dalle neuroscienze cognitive è in sostanziale accordo con la riflessione di molti filosofi – con diverso grado di idealismo – nel dichiarare obsoleto il realismo diretto e ci obbliga pure a prendere posizione sull'interpretazione da preferire della meccanica quantistica, privilegiando senza dubbio la visione di Copenhagen. La quale conferma che la realtà in sé è inconoscibile e chiarisce i confini della nostra capacità di modellazione scientifica dell'intimità della materia. La materia è considerata come se fosse formata da particelle caratterizzate da una bizzarra indeterminazione; esse si mostrano solo quando le osserviamo; sul loro comportamento possiamo ottenere solo informazioni probabilistiche e comunque, lo ripetiamo, senza mai la pretesa di considerare tali informazioni come proprietà oggettive delle particelle stesse ⁽¹⁴⁾.

BIBLIOGRAFIA

- AL-KHALILI J., 2014 - *La fisica dei perplessi. L'incredibile mondo dei quanti*, Bollati Boringhieri.
- BELL J., 2010 - *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi.
- BENINI A., 2012 - *La coscienza imperfetta*, Garzanti, p. 11.
- NEWTON R., 2011 - *La fisica dei quanti sfida la realtà*, Edizioni Dedalo
- NICOLA U., 2000 - *Antologia di filosofia*, Demetra, 2000.
- NICROSINI O., 2002 - *Paradosso EPR e teorema di Bell*, *Quaderni di fisica teorica*, Università degli Studi di Pavia, edizione web.
- ROVELLI C., 2014 - *La realtà non è come ci appare*, Raffaello Cortina Editore.
- STRAFFELINI G., 2019 - *Indagine sulla scienza*, Lindau.

⁽¹⁴⁾ Su alcune conseguenze di questa presa di posizione, mi permetto di richiamare ancora il mio testo già citato: STRAFFELINI 2019.