

APhEx 13, 2016 (ed. Vera Tripodi)
Ricevuto il: 26/10/2015
Accettato il: 29/03/2016
Redattori: Claudio Calosi & Pierluigi Graziani

APhEx
PORTALE ITALIANO DI FILOSOFIA ANALITICA
GIORNALE DI **FILOSOFIA**
NETWORK
N°13 GENNAIO 2016

L e t t u r e c r i t i c h e

Don Howard, Anche Einstein gioca a dadi. La lunga lotta con la meccanica quantistica, Roma, Carocci, 2015.

Federico Laudisa

Tra le imprese più impegnative della scienza moderna, il processo di costruzione di una vera e propria *concezione quantistica del mondo* ha rappresentato un obiettivo quanto mai denso di questioni concettuali: alle origini della meccanica quantistica, infatti, si è formato un contesto storico, teorico ed epistemologico nel quale l'ipotesi stessa che un mondo quantistico *esistesse* rappresentava un'ipotesi non innocua! Secondo una tradizione storica che ha visto lunghe e accese discussioni, la meccanica quantistica è infatti la teoria fisica che – diversamente da qualsiasi altra (inclusa la relatività) – sembra mettere in crisi non soltanto un'ampia classe di spiegazioni cui la meccanica e l'elettromagnetismo classici ci avevano abituato, ma anche per certi aspetti le *categorie razionali stesse* con cui il

pensiero scientifico moderno aveva analizzato il mondo fisico fino alle soglie del XX secolo. Negli anni che hanno visto lo sviluppo del nucleo fondamentale della teoria – dalle ipotesi di Planck del 1900 fino alla formulazione matematicamente rigorosa di von Neumann del 1932 – numerosi tra i protagonisti della rivoluzione quantistica hanno contribuito al dibattito sulle implicazioni filosofiche ed epistemologiche della meccanica quantistica, un dibattito ricco di suggestioni e di posizioni diverse. La cosiddetta *interpretazione di Copenhagen* (così chiamata in omaggio al luogo di insegnamento e di ricerca di Niels Bohr) – che indica solitamente l'interpretazione standard della teoria consolidatasi dagli anni Trenta in poi – è di fatto l'erede di una collezione (non del tutto coerente!) di idee molto diverse tra loro e non rende giustizia al pluralismo teorico di quegli anni, intensi sia scientificamente sia filosoficamente. Di fatto, al termine 'interpretazione di Copenhagen' non corrisponde una struttura concettuale unitaria e coerente ma un insieme eterogeneo di idee difficilmente unificabili in un quadro organico e spesso sostenuto più da ragioni sociologiche che di sostanza teorica¹. In un saggio dal titolo significativo *The earliest missionaries of the Copenhagen spirit*, lo storico della fisica John Heilbron ha descritto in termini vivaci il vero e proprio processo di indottrinamento che lo 'spirito' di Copenhagen ha rapidamente messo in atto nella comunità dei fisici europei della prima metà del XX secolo, un processo che fa assomigliare il confronto più a una disputa teologica che non a un dibattito scientifico. Heilbron parla dell'"imperialismo intellettuale del gruppo di Bohr"; in questo gruppo spiccava lo zelo di Léon Rosenfeld, un allievo di Bohr che in una lettera a Heisenberg lo stesso Wolfgang Pauli – di solito non tenero verso i critici dell'interpretazione ortodossa – aveva definito "la radice quadrata di Bohr × Trotsky" (Heilbron 1985, p. 196). La ricchezza concettuale che comunque caratterizzò quegli anni si è poi andata cristallizzando in una rappresentazione della teoria – diffusa tanto tra i divulgatori quanto tra numerosi scienziati – che in sé conserva ben poco di quella ricchezza.

Una delle vittime privilegiate di questa forma di ortodossia è proprio Albert Einstein. Un esempio storicamente significativo di questo trattamento rimanda alle vicende di una celebre lettera, indirizzata da

¹ La compattezza di questa interpretazione è in realtà un mito che è stato di fatto inventato da Werner Heisenberg: pur avendo sostenuto a lungo tesi difficilmente assimilabili a quelle di Bohr (cosa che questi non mancava di contestargli), è stato proprio Heisenberg a introdurre per primo nel 1955 l'espressione *interpretazione di Copenhagen* (Howard 2004).

Einstein a Max Born il 4 dicembre del 1926: la storia di questa lettera è un'efficace rappresentazione di come la posizione di Einstein sui fondamenti della meccanica quantistica sia rimasta spesso (e continui a rimanere) inchiodata a slogan e luoghi comuni, incapaci di fare giustizia alla complessa struttura dei ragionamenti einsteiniani. Leggiamo in quella lettera: “La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso sono convinto che *questi* non gioca a dadi col mondo.” (Einstein, Born 1973, pp. 108-109). Si tratta di una considerazione alla quale sospetto che Einstein avrebbe forse rinunciato, se solo avesse potuto immaginare la quantità di fraintendimenti che ne sarebbero derivati. Numerosissime sono infatti le conferme che ancora al giorno d'oggi ci convincono che la vecchia immagine di un Einstein retrogrado è dura a morire. In un articolo intitolato nientemeno che *The Role of Philosophy in Physics*, comparso in rete su www.forbes.com nel maggio del 2015, il fisico Chad Orzel (professore presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dello Union College (USA) e autore dell'imperdibile volume *La fisica spiegata al mio cane*) scrive:

Einstein è un caso interessante, perché la seconda parte della sua carriera indica una debolezza dell'approccio filosofico alla fisica. Mentre Einstein ha svolto un ruolo essenziale nell'avviare la meccanica quantistica, in seguito egli *respinse* la teoria a causa di controversie filosofiche. [...]

La reazione di Einstein nei confronti della meccanica quantistica era in gran parte una sorta di insoddisfazione – le predizioni quantistiche offendevano un'intuizione dura da definire su come il mondo ‘dovrebbe’ funzionare, ma non riuscì mai a formulare una solida alternativa. C'è una certa ironia in questa circostanza, naturalmente, perché pionieri della meccanica quantistica come Bohr e Heisenberg ritennero (con qualche giustificazione) che essi stavano seguendo lo stesso percorso seguito da Einstein con il suo lavoro sulla relatività. *La loro insistenza sull'impossibilità di parlare sensatamente di una realtà che andasse al di là dei risultati di misura è, in un certo senso, un'estensione dell'osservazione di Einstein secondo cui parlare di eventi simultanei non ha senso se non spiega prima come si potrebbe determinare la simultaneità. [...]* Heisenberg e Bohr non compresero mai la divergenza di Einstein dalla loro posizione e, ad essere onesti, non è del tutto chiaro che egli avesse una giustificazione filosofica meditata per questo.

Non è difficile rendersi conto che l'analisi einsteiniana della simultaneità in termini di procedure operative per determinarne l'applicazione non implica minimamente la tesi secondo cui sarebbe impossibile parlare di una realtà al di là dei risultati di misura, una tesi che dunque non è in alcun modo 'estensione' della prima. Che si tratti di tesi totalmente distinte e indipendenti è stato peraltro chiarito pubblicamente dallo stesso Einstein in più di un'occasione: celebre quella in cui Einstein ricordava nel 1926 a uno sbigottito Heisenberg, convinto di aver seguito nella sua formulazione matriciale della meccanica quantistica il solco inaugurato dall'articolo relativistico del 1905, che "è la teoria per prima che determina cosa è osservabile"². Quanto poi alla tesi secondo cui Einstein non aveva una giustificazione filosofica meditata per la sua insoddisfazione nei confronti della formulazione usuale della meccanica quantistica, si tratta di una tesi semplicemente assurda alla luce di quanto sappiamo sull'evoluzione della seconda parte della carriera scientifica di Einstein, incentrata in larga parte sull'approfondimento dei motivi sia teorici sia epistemologici per i quali la meccanica quantistica non dovrebbe essere considerata una teoria davvero *fondamentale*. Secondo la rappresentazione più diffusa, invece, l'impulso innovatore di Einstein si 'inceppa' di fronte all'emergere della meccanica quantistica nei primi tre decenni del XX secolo, fino a tramutarsi in un atteggiamento nostalgico e conservatore di fronte all'irresistibile ascesa della teoria fondata – anche in questo caso controversa – da Max Planck. Come spesso accade, le cose non sono così semplici. Come ben noto, Einstein ha in realtà dato contributi di prima grandezza alla costruzione della teoria quantistica, primi fra tutti la teoria corpuscolare della luce e la connessa spiegazione dell'effetto fotoelettrico che gli fruttò il Premio Nobel nel 1922, e le profonde riserve concettuali che egli ha effettivamente sviluppato con il passare del tempo nei confronti della meccanica quantistica come teoria *fondamentale* dei fenomeni microfisici hanno poco a che vedere con semplici pregiudizi filosofici e molto con problemi interpretativi cruciali.

Alla luce delle forme di questo dibattito, la pubblicazione in italiano di alcuni dei più importanti saggi di Don Howard con il titolo *Anche Einstein gioca a dadi. La lunga lotta con la meccanica quantistica*, Carocci 2015, va salutata come un autentico evento culturale, di cui dobbiamo essere grati ai curatori (Vincenzo Fano, Isabella Tassani e Giuseppe Bompreszi). Don Howard, storico e filosofo della fisica dell'università statunitense di Notre Dame nonché uno dei più fini conoscitori dell'opera di Einstein e del suo

² Heisenberg 1983, p. 114.

contesto storico-filosofico, è insieme ad Arthur Fine e a pochi altri uno degli studiosi che ha profuso il maggior impegno nel ribaltare l'immagine di Einstein cui abbiamo fatto riferimento, contribuendo a restituire a tale immagine la complessità che merita e a smentire l'idea che Einstein abbia maturato un atteggiamento critico nei confronti della teoria quantistica soltanto per un malinteso preconconcetto e per l'incapacità di seguire adeguatamente gli sviluppi della fisica del XX secolo. Il volume, aperto da una prefazione scritta da Howard espressamente per questa edizione e da un'utile introduzione dei curatori, comprende quattro lunghi saggi scritti lungo un arco di tempo piuttosto lungo. L'articolo *Località e separabilità secondo Einstein* è stato pubblicato nel 1985, mentre i restanti hanno visto la luce negli anni Novanta: l'articolo «*Nicht sein kann was nicht sein darf?*»: *sulla preistoria dell'EPR, 1909-35. Le prime preoccupazioni di Einstein sulla meccanica quantistica dei sistemi composti* è stato pubblicato nel 1990, l'articolo *Einstein e l'Eindeutigkeit: un tema negletto dello sfondo filosofico della relatività generale* nel 1992, mentre l'articolo *Una sbirciata dietro il velo di Maya. Einstein, Schopenhauer e lo sfondo storico della concezione dello spazio come fondamento per l'individuazione dei sistemi fisici* è uscito nel 1997. Come vedremo, si tratta di saggi che possono essere letti in modo complementare e che risultano caratterizzati da una notevole omogeneità e da una fitta rete di rimandi interni.

Il tema che in forme diverse è al centro dell'interesse riguarda il ruolo e i presupposti filosofici generali di una condizione fisica detta *separabilità*, che secondo Howard rappresenta l'autentico fattore critico intorno al quale ruota lo scetticismo di Einstein nei confronti della meccanica quantistica come teoria *completa* dei fenomeni microfisici. Secondo questa condizione, sistemi spaziotemporalmente separati posseggono una mutua indipendenza ontologica l'uno rispetto all'altro e Howard ha buon gioco nel mostrare come Einstein consideri la separabilità quasi alla stregua di una condizione 'trascendentale'. In un saggio intitolato *Meccanica quantistica e realtà*, pubblicato nel 1948 e allegato in una lettera a Born del 5 aprile dello stesso anno, Einstein scrive per esempio:

Inoltre è caratteristico degli oggetti fisici l'essere concepiti come disposti in un continuo spazio-temporale; in questa disposizione appare essenziale il fatto che in un dato istante gli oggetti considerati dalla fisica reclamino un'esistenza singola autonoma in quanto "collocati in regioni distinte dello spazio". *Fuori dall'ipotesi di una simile esistenza autonoma (di un "essere così") dei singoli oggetti spazialmente separati – ipotesi che deriva in primo luogo dalla riflessione quotidiana – non sarebbe possibile un pensiero fisico nel senso per noi abituale;*

né si vede come potrebbero essere formulate e verificate delle leggi fisiche senza una netta distinzione di questo tipo. (Einstein, Born 1973, p. 201, corsivo aggiunto)

Nelle righe immediatamente successive al passo appena citato, Einstein spiega poi che “la teoria dei campi ha portato alle estreme conseguenze questo principio, localizzando negli elementi spaziali infinitesimi (quadridimensionali) sia gli oggetti elementari – *esistenti indipendentemente gli uni dagli altri* – posti a base della teoria, sia le leggi elementari postulate per essa” (ivi, corsivo aggiunto). Se dunque la condizione di separabilità trova la sua espressione canonica nell’ambito della teoria dei campi, emerge chiaramente la radice fondamentale delle riserve di Einstein nei confronti della meccanica quantistica, dal momento che quest’ultima *non* rispetta in certe condizioni la condizione di separabilità.

Ma in che senso i saggi citati di Howard possono essere letti in modo complementare e, per così dire, si sostengono a vicenda indipendentemente dal loro anno di pubblicazione? Il saggio del 1990 «*Nicht sein kann was nicht sein darf?*»: *sulla preistoria dell’EPR, 1909-35* documenta l’esistenza di riserve di lungo periodo da parte di Einstein e prende l’articolo che contiene il celebre argomento di EPR come punto di arrivo; il saggio del 1985 *Località e separabilità secondo Einstein* si concentra invece sulle vicende della condizione di separabilità *successivamente* all’articolo di EPR, un articolo di cui – come ha mostrato per la prima volta Arthur Fine nei primi anni ’80 – Einstein era tutt’altro che soddisfatto, mentre l’ampio saggio del 1997 *Una sbirciata dietro il velo di Maya* si concentra sulle fonti schopenhaueriane della condizione di separabilità, in un’affascinante cavalcata di storia delle idee che parte da una circostanza apparentemente minore. Secondo Rudolf Kayser, genero e biografo di Einstein, lo studio di quest’ultimo nella Berlino degli anni Venti aveva tre ritratti appesi alla parete: i primi due rappresentavano Faraday e Maxwell – fin qui niente di inatteso – ma oggetto del terzo era proprio Schopenhauer.

Nel saggio «*Nicht sein kann was nicht sein darf?*»: *sulla preistoria dell’EPR, 1909-35. Le prime preoccupazioni di Einstein sulla meccanica quantistica dei sistemi composti* Howard mostra con dovizia di supporti testuali e analisi concettuale come – già a partire dai primi contributi sull’ipotesi quantistica sulla luce e non soltanto alla fine degli anni ’20 – Einstein avesse individuato nel trattamento che la meccanica quantistica riserva ai sistemi composti il più fondamentale punto di divergenza rispetto al resto della fisica. Dagli studi sulla natura della radiazione negli anni tra

l'*annus mirabilis* e le soglie della relatività generale, passando poi per lo sviluppo dei lavori di Bose sulla nuova statistica quantistica alla metà degli anni '20, il *leitmotiv* einsteiniano è il riconoscimento (riluttante!) che le interazioni quantistiche sono caratterizzate da una forma di dipendenza tra sistemi spazialmente separati che risulta estranea a qualsiasi teorizzazione precedente. Tale consapevolezza rappresenta l'autentico quadro di riferimento all'interno del quale collocare il dibattito Einstein-Bohr, uno dei più affascinanti capitoli della fisica contemporanea (e probabilmente di tutta la storia della scienza occidentale) la cui ricostruzione ufficiale è stata invece per lungo tempo affidata al resoconto di uno solo dei contendenti, per giunta il 'vincitore', vale a dire Niels Bohr: si tratta del contributo di Bohr al volume *Albert Einstein Scienziato Filosofo*, curato da P.A. Schilpp per la Library of Living Philosophers (1949) e intitolato *Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica* (Bohr 1979).

La versione di Bohr – divenuta quella 'ufficiale' – è però ben lontana dal rendere giustizia alle autentiche ragioni che sono alla base del dissenso di Einstein dalla dottrina poi risultata vincente. Per le prime due tappe fondamentali del confronto tra Einstein e Bohr – i due celebri Congressi Solvay del 1927 e del 1930 – è possibile dimostrare che della posizione di Einstein è stata fornita una rappresentazione molto parziale, che lascia sullo sfondo o addirittura omette elementi di primaria importanza per la consistenza degli argomenti. Per ogni singola tappa è possibile indicare la fonte utilizzata dalla versione ufficiale e la fonte che è stata invece lasciata sullo sfondo. Si scopre così che la posizione di Einstein è stata riportata in modo tutt'altro che fedele e che nel 1927 e nel 1930 è stata 'filtrata' ad opera di Bohr. Inoltre, questa infedeltà si è perpetuata negli studiosi successivi, dal momento che per lungo tempo la maggioranza degli interpreti ha riservato un'attenzione molto maggiore ai resoconti di Bohr che non agli scritti stessi di Einstein.

La versione ufficiale sulla posizione di Einstein nel dibattito con Bohr può essere riportata come segue. La comparsa delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg (febbraio 1927) avrebbe indotto Einstein, già scettico sugli aspetti irriducibilmente probabilistici della meccanica quantistica, a concentrarsi sul tentativo di costruire esperimenti mentali in grado di violare le relazioni di indeterminazione. Einstein avrebbe in questo modo perseguito l'obiettivo primario di dimostrare la *contraddittorietà* della meccanica quantistica³. Tale obiettivo sarebbe stato abbandonato dopo la

³ Einstein è stato uno dei fondatori della meccanica quantistica: la tesi che egli puntasse a mostrarne la contraddittorietà è naturalmente insensata ma dura a morire. Ne sia un

decisiva confutazione ad opera di Bohr, formulata durante il Congresso Solvay del 1930. Soltanto in questa fase Einstein, non essendo riuscito a dimostrare la contraddittorietà della teoria, si sarebbe allora concentrato sull'obiettivo di dimostrarne l'*incompletezza*. Una particolare attenzione viene allora posta nel formulare un criterio di realtà che risulti indipendente dalle alterazioni prodotte dal processo di misurazione, proprio quelle alterazioni la cui inevitabilità aveva vanificato gli esperimenti mentali del 1927 e del 1930. Il prodotto di questi sforzi è naturalmente l'articolo scritto con Podolsky e Rosen nel 1935 (quello che contiene la prima formulazione del cosiddetto *argomento EPR*, sul quale ci soffermeremo più avanti), la replica al quale, scritta poche settimane dopo, avrebbe chiuso la partita in favore di Bohr. Una formulazione chiara di questa versione si ritrova per esempio nell'influente libro *The Philosophy of Quantum Mechanics*, scritto dallo storico della fisica Max Jammer e divenuto riferimento obbligato per molti studiosi (Jammer 1974). Soltanto nei primi anni Ottanta del '900 la versione ufficiale viene messa in discussione. Il merito di averne stimolato una revisione filosofica – e non solo storica – si deve appunto in gran parte agli studi di Arthur Fine e Don Howard. Sulla base di questa revisione si possono trarre alcune conclusioni generali. Le riserve di Einstein nei confronti della meccanica quantistica sono precedenti alla formulazione delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg. Esse si concentrano sugli aspetti fortemente non classici che il formalismo della meccanica quantistica attribuisce alle interazioni tra sottosistemi di sistemi fisici composti e che si riassume nel fenomeno, noto come *entanglement*, che abbiamo introdotto nella sezione precedente. La trattazione quantistica di determinate interazioni introduce una dipendenza tra sottosistemi i quali, in una prospettiva puramente classica, sarebbero stati classificati come separati e indipendenti. La reale alternativa prospettata dagli esperimenti mentali di Einstein è allora l'alternativa tra completezza della descrizione fisica fornita dalla meccanica quantistica e quello che Einstein stesso, in una lettera a Schrödinger ha definito *principio di separazione* (*Trennungsprinzip*). Consideriamo un sistema di due particelle correlate mediante una legge di conservazione. In base al principio di separazione, una proprietà fisica vale o non vale per una particella del sistema composto indipendentemente da misurazioni o interazioni di qualsiasi tipo relative all'altra particella. La meccanica quantistica non rispetta sempre questo

esempio illuminante tra gli altri il fatto che tale tesi è ripetuta ancora una volta nel recente (e fortunatissimo!) volumetto di Carlo Rovelli *Sette brevi lezioni di fisica* (Rovelli 2014, p. 28).

principio. Ma dal momento che nella prospettiva einsteiniana il principio di separazione è fuori discussione, la meccanica quantistica risulta incompleta come conseguenza dell'impossibilità di mettere seriamente in questione il principio di separazione.

Nel processo che porta a questa conclusione, naturalmente, un ruolo importante è svolto dall'argomento di EPR del 1935. Si tratta della fase conclusiva del confronto tra Einstein e Bohr, svoltosi in uno scambio di articoli sulla celebre *Physical Review* nel 1935. Il centro del dibattito in questa fase è appunto il celebre argomento di Einstein, Podolsky e Rosen (EPR), che punta a dimostrare che la meccanica quantistica subisce – diciamo così – un'alternativa irriducibile tra una proprietà di *completezza* (intuitivamente, la capacità di rappresentare all'interno della teoria ogni proprietà fisicamente significativa) e una proprietà di *località* (intuitivamente, il fatto che non posso influenzare 'a distanza' le proprietà di un sistema fisico definito). Le discussioni su località e completezza implicite in questo lavoro sono state rese confrontabili con l'esperimento, almeno in linea di principio, dalla riformulazione nel 1951 dell'argomento originario di EPR dovuta al fisico britannico David Bohm.

Come noto l'argomento di EPR ha dato luogo a una (alquanto oscura) risposta di Bohr, nonché a innumerevoli discussioni centrate in particolare sull'adeguatezza della condizione di realtà. Uno degli elementi di maggior interesse del saggio di Howard del 1985 *Località e separabilità secondo Einstein* consiste nel mettere in luce la circostanza secondo cui l'argomento di EPR non è l'unico argomento sviluppato da Einstein per manifestare il suo punto di vista sul problema della completezza della meccanica quantistica. Grazie alle attente analisi di Howard (e Fine) è stato riscoperto un argomento di incompletezza dovuto al solo Einstein e contenuto in alcuni scritti successivi all'articolo con Podolsky e Rosen. In una lettera del 19 giugno 1935 a Schrödinger, che pochi giorni prima gli aveva manifestato il suo apprezzamento per le critiche alla formulazione corrente della meccanica quantistica espresse nell'articolo con Podolsky e Rosen, Einstein scrive:

Per ragioni di lingua, [l'articolo di EPR] è stato scritto da Podolsky, dopo molte discussioni. Ma ancora non è venuto così bene come vorrei; al contrario, il punto principale è stato, per così dire, soffocato dall'erudizione. (cit. in Howard 2015, p. 227)

Einstein non era cioè soddisfatto della versione finale dell'articolo firmato con Podolsky e Rosen, che non pareva rendere conto con sufficiente chiarezza della posizione di Einstein sulla questione dell'incompletezza

della teoria quantistica. Come l'analisi di Howard mostra puntualmente, Einstein propone in una serie di scritti successivi un proprio argomento di incompletezza, formulandone le premesse in modo più chiaro rispetto all'argomento di EPR e soprattutto evitando il ricorso alla nozione di elemento di realtà fisica. L'argomento viene proposto, con minime variazioni, oltre che nella citata lettera a Schrödinger del giugno 1935, in una lettera a Popper del novembre 1935, negli articoli *Fisica e realtà* (1936) e *Meccanica quantistica e realtà* (1948), nell'*Autobiografia scientifica* e nelle *Repliche* agli autori del volume *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (1949).

L'assunzione principale dell'argomento di Einstein è definito da Einstein stesso *principio di separazione*, ed è costituito dalla congiunzione di due 'sottocondizioni' che possono essere definite rispettivamente *separabilità* e *località*. La condizione di *separabilità* prescrive che sistemi spazialmente separati possiedano stati fisici reali e distinti, mentre la condizione di *località* prescrive che lo stato del sistema possa essere modificato soltanto in seguito ad interazioni locali. La formulazione della condizione di *completezza* in questo argomento è allora la seguente: la funzione d'onda Ψ della teoria quantistica è associata in modo biunivoco allo stato reale del sistema. Ora supponiamo che il sottosistema S_1 sia formato da un'unica particella. E' possibile scegliere di misurare la sua posizione o la sua quantità di moto: in relazione all'esito di questa scelta alla funzione d'onda di S_2 saranno associate rappresentazioni diverse, nel senso che la scelta sulla misura eseguita su S_1 determina predizioni statistiche diverse sulle misure da eseguire poi su S_2 . La separabilità stabilisce l'indipendenza relativa dei sottosistemi, mentre la località proibisce influenze istantanee tra i sistemi. Poiché viene contemplata un'associazione tra un unico 'stato reale' e un insieme di funzioni d'onda diverse, la descrizione quantistica della funzione d'onda risulta incompleta, secondo la definizione di completezza appena formulata. L'argomento di Einstein non contiene alcun riferimento alla nozione potenzialmente controversa di 'elemento di realtà fisica' (corrispondente alla nozione di 'proprietà oggettiva' che abbiamo usato qualche pagina indietro nella definizione della condizione di Realtà nell'argomento di EPR), e la centralità del principio di separazione, qui nella sua massima evidenza, permette di connettere le 'preoccupazioni' espresse dall'argomento con le analoghe preoccupazioni espresse da Einstein nel 1927 e nel 1930 (ma non soltanto) sul trattamento quantistico di alcuni sistemi composti di sottosistemi non interagenti. E' quindi ragionevole considerare questo argomento come l'espressione più chiara della posizione di Einstein sull'incompletezza della meccanica quantistica.

E' interessante notare inoltre come, sulla base di questa consapevolezza, possiamo ritrovare l'argomento di Einstein *dentro* l'argomento di EPR. Nella parte centrale dell'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen, gli autori illustrano come una funzione $\Psi(x_1, x_2)$, che descrive lo stato di un sistema composto di due sottosistemi dopo la misurazione di una grandezza fisica sul primo sistema, possa essere sviluppata nei termini di funzioni d'onda diverse per il secondo sistema a seconda del tipo di misurazione che si sceglie di effettuare sul primo sistema. Subito dopo, si legge il seguente passo:

Si vede pertanto che, in seguito a due misure diverse effettuate sul primo sistema, il secondo può essere lasciato in stati con due funzioni d'onda diverse. D'altra parte, poiché all'istante della misura i due sistemi non interagiscono più, il secondo sistema non può subire alcuna modificazione reale in conseguenza di operazioni effettuate sul primo sistema. Ciò, naturalmente, è solo un'espressione di ciò che s'intende per assenza d'interazione fra i due sistemi. *Pertanto è possibile assegnare due diverse funzioni d'onda ... alla stessa realtà* (al secondo sistema dopo l'interazione con il primo)” (Einstein 1988, p. 379).

La conclusione in corsivo equivale alla violazione della completezza *secondo Einstein*, alla quale segue l'esplicita costruzione dell'esempio nel quale le due funzioni d'onda diverse associate 'alla stessa realtà' sono autofunzioni di due operatori non commutanti. Il passo appena citato può essere considerato il contributo più propriamente einsteiniano all'articolo del 1935.

Questa particolare nozione di completezza fornisce infine un'ulteriore indicazione della profonda interconnessione di numerose tra le urgenze epistemologiche che preoccupavano Einstein, un'interconnessione magnificamente illuminata dalle analisi di Howard. Il requisito di completezza espresso in termini di corrispondenza 1-1 tra funzione d'onda e 'stato reale' appare infatti l'espressione di una precisa posizione sui compiti di una teoria fisica, un tema che è al centro dell'attenzione nel saggio di Howard sul tema dell'*univocità* (*Eindeutigkeit*), un tema sviluppato da Einstein nel corso del lungo processo che lo porterà a formulare le equazioni di campo della teoria della relatività generale. In questo processo, lungo il quale Einstein si imbatte in una delle implicazioni della teoria della relatività generale maggiormente discussi dai filosofi negli ultimi decenni – il cosiddetto *argomento del buco* – egli sviluppa la tesi secondo cui è ragionevole richiedere “che una teoria

determini *in modo univoco* ciò che si propone di descrivere, di qualsiasi cosa si tratti purché tale oggetto venga concepito come un qualche stato di cose presumibilmente reale, un aspetto di una realtà fisica esterna, o semplicemente come il volto che il mondo ci presenta nell'esperienza." (Howard 2015, p. 90). Questa richiesta di 'univocità', che secondo Einstein dovrebbe essere soddisfatta da qualunque teoria della gravitazione che si proponga di inglobare la covarianza generale, sembra poter assumere un ruolo anche nella discussione einsteiniana sui fondamenti della meccanica quantistica: una violazione della completezza come corrispondenza 1-1 tra funzione d'onda e stato reale potrebbe infatti essere considerata – sembra suggerire Howard – come una violazione di 'univocità' da parte della teoria quantistica.

Se dunque la centralità della condizione di separabilità viene da lontano, sviluppandosi e affinandosi ben oltre l'argomento di EPR, il saggio di Howard *Una sbirciata dietro il velo di Maya* (1997) ritorna infine – per così dire – alle origini, azzardando una suggestiva ipotesi di storia delle idee secondo cui la presenza del quadro di Schopenhauer nello studio berlinese di Einstein ha una sua precisa giustificazione. Nel richiamare le tesi schopenhaueriane su spazio, tempo e causalità discusse ne *Il mondo come volontà e come rappresentazione* (1859), Howard scrive infatti:

Ciò che conosciamo attraverso l'intuizione e l'esperienza – gli oggetti empirici – sono le cose che in natura costituiscono le ultime oggettivazioni della volontà. Le forme di base più necessarie di questa oggettivazione sono lo spazio e il tempo, il *principium individuationis*, attraverso il quale gli oggetti sono originariamente distinti l'uno dall'altro e così presentati a noi nell'esperienza (p. 51).

Non soltanto dunque, secondo Howard, "Schopenhauer potrebbe essere stata la fonte da cui deriva l'idea di separabilità spaziotemporale" (p. 28), il pensatore che con le sue tesi su spazio e tempo come *principium individuationis* contribuisce alla formulazione einsteiniana della separabilità come una sorta di condizione di 'pensabilità' degli oggetti fisici: da diverse angolature anche Schrödinger e persino Pauli "entrambi concentrati sul fallimento delle nozioni classiche di separabilità spaziale nella meccanica quantistica, furono avidi lettori di Schopenhauer, molto influenzati dal suo sguardo di unità presente dal lato della volontà, ovvero la cosa in sé" (pp. 75-6).

Alla luce dunque degli elementi su cui mi sono soffermato (soltanto una parte, peraltro, degli spunti di interesse contenuti nei lavori raccolti nel

volume), la pubblicazione del libro di Howard rappresenta davvero un'occasione da non perdere. Questo volume può svolgere un ruolo culturale generale di grande importanza nel valorizzare e, soprattutto, ricollocare la dimensione filosofica dell'opera di Einstein, una dimensione capace di fornire motivi di riflessione tuttora vivi non soltanto per la filosofia della scienza contemporanea ma anche per le frontiere stesse della fisica teorica: non c'è dubbio infatti che alcune delle sfide che l'attendono – prima fra tutte, la costruzione di una sintesi tra meccanica quantistica e relatività generale – abbiano a che fare per esempio con il problema della natura delle teorie fisiche, cioè con uno di quei problemi con i quali l'impiegato dell'ufficio brevetti di Berna ha dichiarato di essersi confrontato fin dagli anni della sua giovinezza intellettuale.

Bibliografia

- Bohr N. 1979, *Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica*, in A. Einstein, *Autobiografia scientifica* (con scritti di Pauli, Born, Heitler, Bohr, Margenau, Reichenbach Gödel), Boringhieri, Torino, pp. 104-147.
- Einstein A., Born M. & E. 1973, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino.
- Einstein A. 1988, *Opere scelte*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Heilbron J.L. 1985, *The earliest missionaries of the Copenhagen spirit*, "Révue d'Histoire des Sciences" **38**, pp. 195-230.
- Heisenberg W. 1983, *Encounters with Einstein*, Princeton University Press, Princeton.
- Howard D. 2004, *Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology*, "Philosophy of Science" **71**, pp. 669-682.
- Howard D. 2015, *Anche Einstein gioca a dadi. La lunga lotta con la meccanica quantistica*, Carocci, Roma.
- Jammer M. 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York.

Rovelli C. 2014, *Sette brevi lezioni di fisica*, Adelphi, Milano.

Aphex.it è un periodico elettronico, registrazione n° ISSN 2036-9972. Il copyright degli articoli è libero. Chiunque può riprodurli. Unica condizione: mettere in evidenza che il testo riprodotto è tratto da www.aphex.it

Condizioni per riprodurre i materiali --> Tutti i materiali, i dati e le informazioni pubblicati all'interno di questo sito web sono "no copyright", nel senso che possono essere riprodotti, modificati, distribuiti, trasmessi, ripubblicati o in altro modo utilizzati, in tutto o in parte, senza il preventivo consenso di Aphex.it, a condizione che tali utilizzazioni avvengano per finalità di uso personale, studio, ricerca o comunque non commerciali e che sia citata la fonte attraverso la seguente dicitura, impressa in caratteri ben visibili: "www.aphex.it". Ove i materiali, dati o informazioni siano utilizzati in forma digitale, la citazione della fonte dovrà essere effettuata in modo da consentire un collegamento ipertestuale (link) alla home page www.aphex.it o alla pagina dalla quale i materiali, dati o informazioni sono tratti. In ogni caso, dell'avvenuta riproduzione, in forma analogica o digitale, dei materiali tratti da www.aphex.it dovrà essere data tempestiva comunicazione al seguente indirizzo (redazione@aphex.it), allegando, laddove possibile, copia elettronica dell'articolo in cui i materiali sono stati riprodotti.

In caso di citazione su materiale cartaceo è possibile citare il materiale pubblicato su Aphex.it come una rivista cartacea, indicando il numero in cui è stato pubblicato l'articolo e l'anno di pubblicazione riportato anche nell'intestazione del pdf. Esempio: Autore, *Titolo*, <<www.aphex.it>>, 1 (2010).
