

L'ULTIMO ASSOLUTO DELLA RELATIVITÀ

ABSTRACT

It is shown how the famous dispute between Einstein and Bohr concerns the philosophical concepts of reality behind their relative physical reality's conceptions; consequently, a significant connection among Copenhagen theory and Einstein's relativity is suggested. While on one side Bohr considered QM a complete description of reality, on the other Einstein (despite the significant contribute to its birth) kept looking for a deterministic theory. When in 1935 Einstein, Podolsky and Rosen published the famous EPR, Bohr replied focusing the attention on the reasonable criterion of reality proposed by the authors: a lawfulness of a constitutive "unknowable"'s independent existence was claimed. Physics, through the great epistemological lesson – as Bohr used to say – represented by QM, was facing an old philosophical question: what is reality? A juxtaposition of Einstein's simultaneity's problematization and Bohr's measurements' reciprocal character is suggested, which could finally lead to the dismissal of the last absolute – after time and space, reality.

Si mostra come la celebre disputa tra Einstein e Bohr riguardi i concetti di realtà retrostanti le loro relative concezioni della realtà fisica; conseguentemente, viene suggerita una significativa connessione tra le teorie di Copenhagen e la relatività einsteiniana. Bohr considerava la descrizione della realtà offerta dalla meccanica quantistica completa; Einstein, al contrario (nonostante il contributo apportato alla sua nascita), continuava a cercare una teoria deterministica. Quando nel 1935 Einstein, Podolsky e Rosen pubblicarono il famoso EPR, Bohr replicò centrando l'attenzione sul ragionevole criterio di realtà proposto dagli autori, rimarcando l'inconsistenza concettuale dell'esistenza indipendente di un costitutivo "inconoscibile". La fisica, attraverso la grande lezione epistemologica – come era solito dirne Niels Bohr – rappresentata dalla MQ, si trovava di fronte ad una capitale questione filosofica: che cosa è la realtà? Viene infine suggerita una giustapposizione della problematizzazione einsteiniana del concetto di simultaneità e del carattere reciproco delle misurazioni quantomeccaniche esposto da Bohr, che suggerisce l'abbandono dell'ultimo grande assoluto: una realtà assoluta.

1. EPR

Nello scritto del 1935 «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?», passato alla storia con l'acronimo EPR, Einstein propone, insieme a Podolsky e Rosen, un esperimento mentale che nelle sue intenzioni deve mostrare come la meccanica quantistica conduca ad un paradosso; in particolare, si denuncia una incompletezza intrinseca alla descrizione della realtà fornita dalla scuola di Copenhagen. Si legge in EPR: «the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical*

theory»¹. In meccanica quantistica, rilevano gli autori, in presenza di grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano («complementari», dirà Bohr) la conoscenza di una preclude la conoscenza dell'altra: il tutto entro le coordinate concettuali di quello che gli autori chiamano un «ragionevole criterio di realtà» («any serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates»²).

Considerando due sistemi isolati A e B che hanno interagito, è possibile attribuire al sistema B dei valori esatti a partire da quelli misurati su A – in maniera, cioè, indiretta. Se, ad esempio, si misura la quantità di moto del sistema A, il relativo principio di conservazione ci consente di determinare la quantità di moto del sistema B, senza misurarlo direttamente (e quindi “perturbarlo”). La quantità di moto di B deve dunque essere ciò che gli autori chiamano un «elemento di realtà fisica»; il medesimo ragionamento può essere applicato alla determinazione della posizione di B. Essi vogliono con ciò mostrare che il sistema B possiede simultaneamente un valore esatto sia per la posizione che per la quantità di moto, e che l'indeterminazione è pertanto propria della (incompleta, appunto) teoria quantistica, e non della realtà. Volontariamente, l'esperimento mentale non si propone di misurare contemporaneamente entrambe queste grandezze: aggirando le difficoltà poste dal principio di indeterminazione, gli autori ritengono nondimeno di aver mostrato come entrambe le quantità siano “elementi di realtà” senza una controparte definita nella teoria. Benché, infatti, la determinazione degli “elementi di realtà” avvenga tramite due diverse e successive (non simultanee) misurazioni, gli autori si mostrano convinti che dopo l'interazione possa esistere un solo stato fisico del sistema B: «since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system»³. È questo il paradosso EPR: la realtà del secondo sistema non può dipendere dal procedimento

1. Einstein - Podolsky - Rosen 1935, p. 777. «La seguente condizione sembra essere necessaria per la completezza di una teoria: ogni elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica». Le traduzioni dai testi originali sono mie, salvo dove esplicitamente indicato; il corsivo all'interno della citazione è sempre dell'autore.

2. *Ivi*, p. 778. «Ogni serio esame di una teoria fisica presuppone la distinzione tra la realtà obiettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera».

3. *Ivi*, p. 779. «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».

di misura adottato per il primo sistema; «no reasonable definition of reality could be expected to permit this»⁴.

2. L'ESPERIMENTO MENTALE IN LABORATORIO

Nel 1964 John Steward Bell, recuperando un'idea dei primi anni Cinquanta di David Bohm, presenta in un articolo la descrizione di una procedura sperimentale nella quale la fondamentale idea di EPR è riproposta in modo che l'esperimento abbia per oggetto gli spin di due particelle: l'intenzione, ambiziosa, è quella di dirimere la contesa tra Einstein e Bohr su un piano empirico, forzando una situazione in cui i due approcci prevedano risultati differenti. «Il dibattito fra Bohr e Einstein era terminato lasciando gli interlocutori ognuno convinto di avere ragione, perché non c'era modo di sottoporre la controversia a un test che, sul piano sperimentale, desse ragione all'uno o all'altro»⁵. La versione di Bohm è più semplice perché riduce le due proprietà considerate in EPR (quantità di moto e posizione) ad una soltanto: lo spin. L'intuizione di Bell (che provava per la MQ la medesima repulsione di Bohm e Einstein⁶) consiste nell'ideazione di una procedura sperimentale in cui i contrastanti punti di vista conducano a previsioni empiricamente diverse circa la correlazione dello spin dei due sistemi A e B. Il “Teorema di Bell”, come passa poi alla storia, afferma che qualunque teoria a variabili nascoste locale (“einsteiniana”) condurrebbe a correlazioni di spin che generano numeri, chiamati coefficienti di relazione, compresi tra -2 e +2; invece, per certe orientazioni dei rivelatori di spin, la meccanica quantistica predice coefficienti di correlazione che trascendono tale intervallo, divenuto in seguito noto come “disuguaglianza di Bell”.

Soltanto nel 1972, 8 anni dopo, due giovani fisici di Berkeley (Clauser e Freedman) mettono alla prova la “disuguaglianza di Bell”. Invece di elettroni, come prevedeva l'esperimento mentale su cui Bell aveva impostato il teorema, i due fisici usano nei loro esperimenti coppie di fotoni correlati, più facilmente riproducibili in laboratorio: la polarizzazione dei fotoni svolge, ai fini della verifica in esame, il medesimo ruolo dello spin quantistico. Clauser e Freedman riscaldano atomi di calcio fino a far loro acquistare energia suf-

4. *Ivi*, p. 779. «Nessuna definizione accettabile di realtà potrebbe consentire ciò».

5. Cini 1994, p. 84.

6. Isaacson 2008, p. 442.

ficiente perché un elettrone salti dallo stato fondamentale a un livello energetico più elevato: quando l'elettrone ricade nello stato fondamentale, lo fa in due fasi ed emette una coppia di fotoni che si muovono lungo percorsi opposti. In uno dei due percorsi, a intervalli del tutto casuali, è inserito un cristallo birifrangente il quale, una volta che un fotone interagisce con esso, può deviarlo oppure lasciarlo proseguire; agli estremi di ogni tragitto è posto un rivelatore di fotoni. I due trovano così che la correlazione tra il comportamento dei fotoni viola la “disuguaglianza di Bell”. A causa tuttavia della scarsa precisione dei rivelatori e di alcuni altri difetti, negli anni seguenti altri test avrebbero fornito risultati contrastanti. Quando però il francese Alain Aspect ripeté, tra l'81 e l'82, gli esperimenti all'università di Parigi – utilizzando stavolta laser e computer – diviene ormai chiaro che la “Disuguaglianza di Bell” è stata sistematicamente violata. Ulteriori perfezionamenti hanno poi condotto ad una definitiva conferma degli originari risultati di Aspect e alla relativa destituzione del “principio di località”: nel momento in cui il cristallo birifrangente inserito lungo un percorso produce la deviazione di un fotone, evidenziata dal rivelatore posto alla fine del percorso stesso, anche l'altro fotone, che prosegue in direzione opposta (senza alcun elemento che ne possa influenzare la traiettoria), istantaneamente subisce una deviazione: si verifica cioè un *effetto istantaneo a distanza*.

Tali risultati sperimentali sono generalmente presentati come la prova che «l'esperienza ha dato torto a Einstein»⁷. Il dibattito tra Einstein e Bohr è dunque archiviato? Per nulla. Le risultanze sperimentali hanno confutato il principio di località: la “fantomatica azione a distanza”, come diceva Einstein, è effettivamente una caratteristica reale del mondo fisico (*entanglement*). L'argomento posto da EPR cade, ma per il motivo sbagliato: non fu mai la località l'oggetto del contendere, bensì il “ragionevole criterio di realtà”. Sono gli stessi autori a ripeterlo in continuazione nei loro scritti: pochi mesi dopo EPR, Bohr pubblica una risposta recante il medesimo titolo, in cui dichiara esplicitamente: «the apparent contradiction discloses only an essential inadequacy of the customary viewpoint of natural philosophy», «a radical revision of our attitude towards the problem of physical reality is needed»⁸; nessun accenno all'*entanglement* quale caratteristica “reale” del sistema. Bohr, d'altronde,

7. Cini 1994, p. 89.

8. Bohr 1936, p. 696. «l'apparente contraddizione mostra semplicemente una fondamentale inadeguatezza del consueto punto di vista della “filosofia naturale”», «vi è bisogno di una radicale revisione del nostro atteggiamento verso il problema della realtà fisica».

amava ripetere come la meccanica quantistica rappresentasse una «grande lezione epistemologica»⁹, e il suo allievo Heisenberg sosteneva fosse stato «in primo luogo un filosofo e non un fisico»¹⁰. Einstein, da parte sua, è ancora più trasparente: «al cuore del problema non c'è tanto la questione della causalità bensì la questione del realismo»¹¹; altrove: «Warum sollte es also nicht auch für den Physiker das Wichtigste sein, das Philosophieren dem Philosophen zu überlassen? Nicht aber in einer Zeit, in welcher das ganze Fundament der Physik problematisch geworden ist, wie gegenwärtig»¹². Ma se si pretende di dirimere la questione dimostrando l'entanglement quantistico, dov'è la grande lezione epistemologica, dove il filosofare dei fisici? La posta in gioco – e Einstein e Bohr se ne rendevano conto – è affatto diversa: l'interpretazione di Copenaghen propone di sganciare la conoscenza fisica dall'ultimo assoluto residuo dopo la relatività: la realtà assoluta.

Il dibattito tra Einstein e Bohr riguarda la natura della realtà; gli esperimenti sulla “Disuguaglianza di Bell” si riferiscono a una caratteristica fisica (l'entanglement quantistico): si vede come l'interpretazione secondo la quale «l'esperienza ha dato torto ad Einstein», diffusissima nella letteratura scientifica contemporanea, sia fortemente insufficiente. Garanzia di tale ragionamento sia il fatto che, paradossalmente, a ciò che dovrebbe “dare ragione a Bohr” – l'entanglement – non credeva nemmeno lo stesso Bohr. Gli esperimenti mentali di Einstein hanno al contrario avuto il merito di allontanare sempre più, dalle argomentazioni di Copenaghen, il concetto di “perturbazione”. In EPR, chiarisce il danese, «a mechanical perturbation of the system under examination is not involved»¹³; Bohr, cioè, conveniva che «non c'era alcuna perturbazione meccanica della particella B dovuta a un'osservazione della particella A. Come EPR, anche lui escludeva la possibilità di una qualsiasi forza fisica, repulsiva o attrattiva, che agisse a distanza»¹⁴.

Ma se, come pare evidente, non è la “fantomatica azione a distanza” l'oggetto del contendere... cosa lo è?

9. Riportato dal collaboratore Abraham Pais in Pais 1993, pp. 419-437.

10. *Ivi*, p. 421.

11. Einstein 1988, p. 729.

12. Einstein 1936, p.313. «Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il filosofare? Non può essere la cosa migliore in un'epoca in cui, come quella attuale, gli stessi fondamenti della fisica sono diventati problematici»

13. Bohr 1936, p. 698. «Non è coinvolta una perturbazione meccanica del sistema sotto esame».

14. Kumar 2010, p. 303.

3. LA REALTÀ ASSOLUTA DI EINSTEIN

Einstein era un convinto realista¹⁵, cioè riteneva ci fosse, per dirla con le sue parole, “una reale situazione di fatto” che esiste “indipendentemente dalle nostre osservazioni”; scrisse all’amico Solovine: «spero di sbaragliare i moderni fautori del misticismo e della probabilità e la loro avversione all’idea di realtà nell’ambito della fisica»¹⁶. Come spiegò Pauli a Born, insomma, «il punto di partenza di Einstein è piuttosto “realistico” che “deterministico”. Il suo pregiudizio filosofico è cioè un altro»¹⁷.

Il “pregiudizio filosofico” di Einstein consisteva nella credenza in una realtà oggettiva, indipendente, assoluta: il mondo deve essere fatto in un determinato modo che a noi spetta scoprire. Egli credeva fermamente che tutto fosse frutto di una creazione, di un disegno dai tratti definiti: «i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale, ossia le rappresentazioni degli oggetti stabilite dalla fisica aspirano a un’ “esistenza reale” indipendente dai soggetti della percezione»¹⁸; «anche se gli assiomi della teoria sono imposti dall’uomo, il successo di una tale costruzione presuppone un alto grado d’ordine del mondo oggettivo»¹⁹. È evidente come Einstein non avrebbe mai potuto essere soddisfatto di una qualsiasi teoria non deterministica in senso classico: la meccanica quantistica, con il suo esclusivo riferimento alle possibilità di osservazione, «gioca a mosca cieca con l’idea della realtà», cosa contro la quale il suo istinto «si ribella in modo incoercibile»²⁰. Al di là della questione religiosa (benché secondo Isaacson «per lui la fede nell’esistenza di una realtà fondamentale aveva una connotazione religiosa»²¹) la credenza di Einstein in un “disegno” manifesta come egli pensasse ad un mondo che doveva essere determinato, “fatto in un modo”, che a noi spettasse scoprire: «Dio non gioca a dadi»; «la fisica per lui era un tentativo di afferrare la realtà com’è, indipendentemente dall’osservazione»²².

Il punto, insomma, non è tanto l’“azione a distanza” tra i due sistemi A e B: ciò che turba Einstein è piuttosto l’affermazione che fino al momento della misura-

15. Uso il termine “realista” per non appesantire l’esposizione, ma a rigore andrebbe inteso come “realista-corrispondentista” o “trascendentista”, e non meramente come opposto ad un “anti-realismo” alla Goodman.

16. Einstein 1988, P. 733.

17. Pais 1993, p. 326.

18. Einstein 1988, p. 721.

19. *Ivi*, pp. 740-741.

20. *Ivi*, p. 724.

21. Isaacson 2008, p. 447.

22. Kumar 2010, p. 258.

zione una particella non abbia delle caratteristiche definite, che la “realtà” possa dipendere dalla nostra conoscenza: «era proprio la scomparsa di una realtà indipendente, oggettiva, e non la probabilità, il fatto che Dio giocasse a dadi, che Einstein trovava inaccettabile»²³. Lo afferma limpidamente egli stesso: «è fondamentale per la fisica presupporre un mondo reale che esista indipendentemente da qualsiasi atto di percezione. Ma di questo non abbiamo conoscenza»²⁴. Un mondo al di là della conoscenza umana, determinato e deterministico in senso classico: in questo Einstein non poté mai smettere di credere. La descrizione della realtà fornita dalla MQ, al contrario, prescindeva totalmente dal riferimento a questa “realtà assoluta” sconosciuta in cui Einstein aveva fede: una fisica degli osservabili che giocava a mosca cieca con la “vera realtà”, quella oggettiva, indipendente. I fisici di Copenaghen credevano fosse possibile destituire di senso tale “realtà assoluta” di cui, come ammetteva lo stesso Einstein, «non abbiamo conoscenza»: il loro ragionamento è – ironia della sorte – analogo a quello che portò Einstein all’abbandono dei due assoluti della fisica newtoniana, spazio e tempo (tanto che Pauli giunse a chiamare la MQ “teoria della complementarità”).

La determinazione della velocità della luce doveva inevitabilmente aprire uno spazio nel concetto di simultaneità: come stabilire che due eventi avvengono nello stesso momento se per averne notizia deve passare un certo intervallo di tempo? E se i due eventi si muovono in due sistemi di riferimento differenti? Se l’osservatore si sposta in questo intervallo? Einstein scoprì la relatività della simultaneità, attraverso la quale destituì di senso lo spazio e il tempo assoluti. Non esistono uno spazio o un tempo “assoluti”, indipendenti dagli osservatori; è del tutto insensato cioè fare riferimento ad uno spazio o ad un tempo senza specificarne il sistema di riferimento. Analogamente, i fisici di Copenaghen ritengono ingiustificata la continua tematizzazione di una “realtà assoluta”, cioè letteralmente “sciolta” da qualsiasi sistema di riferimento: la specificazione di un osservatore, insomma, è indispensabile non soltanto nella determinazione di uno spazio e di un tempo, ma anche nella definizione stessa di una realtà.

4. UN’ALTRA REALTÀ A COPENAGHEN

Nonostante il grande sforzo che la relatività richiede alle nostre capacità di astrazione, essa, precisò Bohr, «si attiene ancora rigorosamente alla concezione della realtà oggettiva dei fenomeni osservati [...]». Dopo la scoperta del quanto d’a-

23. *Ivi*, p. 268.

24. Pais 1993, p. 146.

zione, sappiamo però che non è possibile raggiungere nella descrizione dei fenomeni atomici tale ideale classico»²⁵. Bohr intende cioè spingere fino alle estreme conseguenze il ragionamento della relatività: come si mostrò ingiustificato il riferimento degli spazi ad un misterioso spazio assoluto, e dei tempi ad un altrettanto fantasmatico tempo assoluto, così Bohr vuole problematizzare la nozione di “realtà obiettiva” quale punto fisso a cui la transiente conoscenza scientifica deve costantemente rapportarsi, cercando di corrisponderle. Scrive: «nella questione della connessione causale dei fenomeni atomici, il carattere reciproco dei risultati delle misurazioni non è più trascurabile in effetti di quanto lo sia la loro relatività nella questione della simultaneità»²⁶. Egli propone quindi di svincolare la realtà fisica dall’aprioristico riferimento ad una irrintracciabile realtà assoluta: che senso può avere parlare di una realtà “determinata” senza esplicitare secondo chi? Come può essere determinata senza essere inserita in un sistema di riferimento? Se, cioè, appare in un modo all’interno di un sistema di riferimento e in un altro diversamente, quale sarebbe la natura “vera” di questo “mondo puro”, non tradotto-tradito dalla conoscenza? Si vede come, senza il riferimento a un sistema di coordinate, la questione perda totalmente di senso. Per quale motivo allora continuare ad estenuare la conoscenza scientifica nello svilente riferimento ad una impossibile conoscenza piena, definitiva, assoluta?

Bohr, Heisenberg, e tutti gli altri fisici che insieme a loro animavano il Kopenhagener Geist chiarirono che è «soltanto nel momento in cui l’osservazione è effettuata che la scelta è divenuta una realtà fisica»²⁷. Ha scritto Heisenberg nei suoi *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie* che «la speranza di rintracciare l’accadere oggettivo nello spazio e nel tempo con nuovi esperimenti non sarebbe più giustificata della speranza di trovare l’estremità ultima del mondo nelle zone inesplorate dell’Antartide»²⁸. Nessuna “realtà assoluta” a cui i “concetti fisici” debbono approssimarsi, insomma: una relatività della realtà. In Einstein è salda la credenza in una realtà determinata ma coperta da un «velo»²⁹, a cui il più possibile la nostra fisica deve cercare di corrispondere: Bohr replica esplicitando l’insensatezza insita nel postulare una “vera realtà” indipendente dalla realtà che conosciamo, l’impossibilità di attribuirle l’esistenza e delle proprietà (completezza, determinatezza, ecc.) se non in maniera ingiustificatamente

25. Bohr 2012, p. 7.

26. *Ivi*, p. 8.

27. Heisenberg 1948, p. 126.

28. *Ivi*, p. 49.

29. Zeilinger 2005, p. 87.

aprioristica; «per Bohr non c'era alcuna realtà fisica fondamentale che esistesse indipendentemente dal dispositivo di misura»³⁰. Questo è il punto, non l'azione a distanza che la violazione della “disuguaglianza di Bell” ha messo in luce; per quanto interessante, tale risultanza sperimentale non ha nulla a che vedere con il nocciolo del dibattito tra Einstein e Bohr; in particolare, mi pare evidente come la questione sia di natura filosofica e non fisica (e quindi irrisolvibile su questo piano): non sono in gioco le caratteristiche di una realtà in senso ingenuo, ma più originariamente la natura stessa della realtà, la risposta alla domanda «che cosa è la realtà?». Lo chiarisce lo stesso Bohr: «ritroviamo qui, in una nuova luce, il problema dell'oggettività dei fenomeni, che ha sempre attirato su di sé tanta attenzione nelle discussioni filosofiche»³¹.

Quando ci chiediamo «cosa caratterizzi il mondo concettuale della fisica», ha scritto Einstein, «viene subito alla mente il fatto che i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale»³², a cui devono cercare di corrispondere quanto più possibile. È il mito della scienza come riproduzione trasparente delle “sensazioni semplici” dell'empirismo inglese: in questo modo, nota Cassirer, «dietro il mondo delle nostre esperienze sorge un regno di sostanze assolute, che sono esse stesse una specie di cose e rimangono tuttavia inaccessibili ai mezzi conoscitivi con cui cogliamo le cose dell'esperienza. In questa maniera il mondo dell'esperienza immediata si riduce a un'ombra; mentre d'altro lato ciò che otteniamo in cambio di esso ci sta dinanzi come un enigma eternamente incomprensibile»³³. È possibile, al contrario, intendere la “cosa obiettiva” non più come parte di una realtà assoluta e costitutivamente ignota all'uomo (a causa del suo modo di conoscere attraverso i “sensi imperfetti”), ma come il modo stesso del comprendere umano; l'identità e la continuità dell'oggetto, che certo non possono apparire ai sensi, non sarebbero più considerate proprietà di quei misteriosi “oggetti veri” nascosti, ma strumenti logici con cui si attua la conoscenza: «che cosa sia la “cosa” nel senso assoluto, al di fuori delle circostanze d'osservazione, è una domanda che non riceve più nessuna risposta. Se cerchiamo di carpire a forza una risposta simile invece di un oggetto determinato assolutamente ci resta in mano solo un'ombra. Se viceversa accettiamo le condizioni della meccanica quantistica, la rinuncia alla determinazione assoluta reinstaura il maximum di determinazione relativa»³⁴. Il realismo einstei-

30. Kumar 2010, p. 312.

31. Bohr 2012, p. 4.

32. Einstein 1988, p. 721.

33. Cassirer 1973, p. 223.

34. Cassirer 1970, p. 281.

niano, lo ammetteva Einstein stesso, poneva in essere «un mondo reale di cui non abbiamo conoscenza». Al contrario, «Niels Bohr [...] avrebbe sostenuto che, finché non viene effettuata un'osservazione o una misurazione, un elettrone non esiste da nessuna parte. Tra una misurazione e la successiva esso non ha alcun tipo di esistenza al di fuori delle possibilità astratte della funzione d'onda»³⁵. D'altronde, come ha osservato Geymonat, «l'indagine critica sulle nostre conoscenze non ci rivela alcun'altra realtà superiore cui la realtà ordinaria, della quale veniamo in possesso mediante le conoscenze comuni e scientifiche, debba in qualche modo approssimarsi»³⁶. Einstein accusava tale concezione di «giocare a mosca cieca con l'idea della realtà»³⁷: di bendarsi, e fare finta che non vi fosse nulla dietro; a Copenaghen propongono tuttavia di ribaltare la questione: non dovrebbe essere il realista a dimostrare che vi è effettivamente qualcosa dietro? E se non può farlo – e non può farlo – che senso ha parlarne? Perché gli oggetti della scienza fisica dovrebbero essere copie sbiadite, filtrate dai concetti e dai sensi umani, di misteriosi veri oggetti indipendenti? Il vizio metodologico dell'empirismo à la Bacone sta nel considerare i fatti come entità isolate che i nostri concetti devono semplicemente riprodurre nel modo più fedele possibile: come ha evidenziato Poincaré³⁸, il puro fatto grezzo è un mito, la misurazione stessa di un oggetto o un fatto fisico richiede che prima vengano fissate unità di misura che si postulano costanti, cosa per la quale bisogna vedere in esse determinate proprietà fisiche a cui, tuttavia, potremmo giungere soltanto dopo aver iniziato a misurare; «la spiegazione secondo la quale noi perveniamo alle leggi confrontando e misurando i singoli fatti si rivela ormai un circolo vizioso»³⁹. Il dato non viene successivamente adattato a una qualche forma concettuale, ma diviene oggetto della conoscenza proprio attraverso questa forma. Il mito delle “sensazioni semplici” è anche il mito della scienza come riproduzione trasparente di esse: la scienza allora deve rinunciare a postulare dietro il mondo delle percezioni una nuova esistenza, della quale le (supposte) pure impressioni semplici sarebbero la copia per statuto imperfetta. Noi non conosciamo dunque delle manifestazioni fenomeniche, sbiadite, dei veri oggetti, bensì conosciamo oggettivamente, ovvero innalzando il dato – entro il contesto di nozioni e relazioni per cui è tale – allo stadio di “oggetto”. La “cosa” non è più intesa come una realtà costitutivamente ignota all'uomo a causa del suo

35. Kumar 2010, p. 217.

36. Geymonat 1953, p. 92.

37. Einstein 1988, p. 729.

38. Poincaré 2003, p.119.

39. Cassirer 1973, p. 199.

modo di conoscere attraverso i “sensi imperfetti”, ma essa esprime il modo stesso del comprendere umano; l'identità e la continuità dell'oggetto, che certo non può apparire ai sensi in quanto tale, non sono caratteristiche degli oggetti nascosti, bensì strumenti logici con cui si attua la conoscenza: «in ciò consiste il più generale e il più radicale significato dell'idea di relatività: [...] che noi solo attraverso la categoria di relazione possiamo giungere alla categoria di cosa»⁴⁰. Einstein non era disposto ad accettare che “il più radicale significato dell'idea di relatività” potesse coinvolgere la realtà stessa; come spiegò Schrödinger ad Einstein, per Bohr «è come se noi stessimo tentando di costringere la natura ad accettare la nostra idea preconcepita di “realtà”»⁴¹.

Questo è il punto di EPR: Bohr parlava di realtà fisiche senza riferirle ad una “realtà assoluta”, oggettiva e indipendente dalla conoscenza a cui dovessero corrispondere; secondo Einstein ciò era paradossale. Chi aveva ragione?

5. LA DISPUTA (IR)RISOLTA

La questione epistemologica posta da Einstein e Bohr viene oggi fortemente fraintesa e trasportata (svilita) su un piano interamente fisico, all'interno del quale un esperimento può decidere quale delle due interpretazioni della meccanica quantistica è “vera”: ma come può un risultato sperimentale rivelare le caratteristiche della realtà se non si è prima d'accordo su che cosa sia la realtà? A quale realtà cioè si dovrà riferire il determinato risultato sperimentale ottenuto? Anton Zeilinger, che si è occupato specificamente della “Disuguaglianza di Bell”, nel 2003 scrive: «bisogna verificare quale tra le due teorie è verificata dagli esperimenti»⁴². Gli fa eco Manjit Kumar (2007): «John Stewart Bell aveva scoperto ciò che non era riuscito ad Einstein e Bohr: un teorema matematico in grado di decidere tra le loro opposte visioni del mondo»⁴³; ancora Cini (1994): «l'esperienza ha dato torto a Einstein»⁴⁴. Ora: la “disuguaglianza di Bell” si fondava su due presupposti: realismo (esiste una realtà definita indipendente dall'osservatore) e località (nessuna “fantomatica azione a distanza”). I risultati di Aspect indicano che uno di questi due presupposti deve essere abbandonato. Bell, rinunciando alla località

40. *Ivi*, pp. 405-406.

41. Pais 1993, p. 247.

42. Zeilinger 2005, pp. 79-80.

43. Kumar 2010, p. 321.

44. Cini 1994, p. 89.

(come avrebbe fatto Einstein, del resto), commentò: «uno vuole poter avere una visione realistica del mondo, poterne parlare come se fosse veramente lì, anche quando non viene osservato»⁴⁵. Quando morì, nel 1990, Bell era ancora convinto che «la teoria quantistica è solo un espediente temporaneo»⁴⁶. Non mi è chiaro come l'esperienza avrebbe dimostrato che «Einstein aveva torto». Così la pensa anche Roger Penrose: «mi allineo decisamente con Einstein riguardo al suo credo in una realtà submicroscopica, e alla sua convinzione che l'attuale meccanica quantistica sia fundamentalmente incompleta»⁴⁷. Ma l'esperienza non aveva dimostrato che Einstein aveva torto? Bell non aveva forse scoperto un teorema in grado di decidere tra le due opposte visioni del mondo? La letteratura contemporanea è evidentemente insoddisfacente.

Se è ancora oggi possibile sostenere che la MQ quantistica è incompleta è perché la disputa non riguarda affatto le caratteristiche della descrizione, bensì la natura della realtà da descrivere: Bohr e Einstein abbracciano due differenti concetti di realtà (rispondono in modo diverso alla domanda «che cosa è la realtà?»). È evidente, insomma, come la questione non possa essere risolta sul terreno di un'impostazione “località o entanglement?”: come ha notato Dummett, «nessuna osservazione degli oggetti o processi fisici potrà dirci se essi esistono indipendentemente dal nostro osservarli. La tesi del realismo non è un possibile oggetto di scoperta sullo stesso piano delle proposizioni che propone di interpretare: è una dottrina concernente lo status di tali proposizioni»⁴⁸. L'obiettivo di EPR è mostrare come la MQ non riesca a rendere conto della “realtà obiettiva”; Bohr replica che non ha senso postulare una realtà indipendente dai soggetti e costitutivamente inconoscibile: in questa disputa la confutazione della località non ha diritto di cittadinanza. L'esperimento mentale di Einstein, certo, si dimostra fallace; ma niente gli avrebbe impedito di formularne uno analogo che tenesse conto dell'entanglement: tant'è vero che ancora oggi esistono teorie delle variabili nascoste che forniscono una descrizione in senso deterministico-classico della realtà fisica, mantenendo quindi ben saldo ciò che più interessava ad Einstein: il riferimento ad una realtà assoluta⁴⁹. Non esiste, insomma, alcun esperimento

45. Kumar 2010, p. 339.

46. *Ivi*, p. 339.

47. *Ivi*, p. 347.

48. Dummett 1996, p. 23.

49. Il realismo locale è la commistione della località con l'assunto realistico che tutti gli oggetti possiedano dei valori preesistenti ad ogni possibile misurazione: la violazione della “disuguaglianza di Bell” spezza questa alleanza e costringe il fisico ad optare *aut*

che possa mostrare che Einstein ha torto e Bohr ragione, o viceversa; i due differenti concetti di realtà sono più originari delle esperienze che poi, tramite essi, vengono inserite in un sistema di conoscenze – a seconda, copie sbiadite di una vera realtà oppure le unità di misura dell'unica oggettività possibile. Come ha sostenuto Poincaré in *La science et l'hypothèse*, l'esperienza non potrà mai indicarci se sia “più vera” la geometria euclidea o quella riemanniana perché non esiste alcun “puro fatto grezzo” a cui fare riferimento. Gli esperimenti sulla “disuguaglianza di Bell”, insomma, non risultano affatto decisivi nella disputa tra le due interpretazioni della MQ; la differenza risiede piuttosto nelle implicazioni che un concetto di realtà comporta (nel modo, direbbe Poincaré, in cui una volta adottata una geometria, si riesce a rendere conto del mondo che ci circonda). «E», direbbe Amleto, «qui è l'incaglio»⁵⁰. Un concetto di realtà di stampo einsteiniano è sempre obbligato a fare riferimento a una inarrivabile “realtà assoluta”, qualcosa di «elusivo, intangibile, inesplicabile» – come dirà lui stesso. Posti di fronte ai concreti risultati della meccanica quantistica, ad esempio, non si potrà che avere un atteggiamento dogmatico – anche se tutto ciò che vediamo è questo, ci deve essere dell'altro⁵¹; si legge in *Fisica e realtà*: «[QM] ist nämlich nach meiner Ansicht eine unvollständige Darstellung der wirklichen Gebilde, wenn auch die einzig zutreffende»⁵². E infatti Einstein non si rassegnò mai: fino alla morte continuò a sostenere la necessità della scoperta di un livello più profondo della teoria, un livello al quale si potesse, come per la teoria classica, parlare dei fenomeni in maniera indipendente dalle osservazioni. «Cercando di penetrare con i nostri mezzi limitati i segreti della natura si scopre che, dietro tutte le leggi e le connessioni discernibili, rimane qualcosa di elusivo, intangibile e inesplicabile»⁵³; inoltre, a Max Born: «la meccanica quantica 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»⁵⁴.

per la località *aut* per il realismo. La questione, però, è che attraverso una rinuncia alla località si può agilmente continuare ad appoggiare una interpretazione classico-realista della realtà fisica; vedasi la cosiddetta “interpretazione di Bohm”.

50. «Ay, there's the rub». Hamlet, III.i. 65.

51. Il ragionamento vale per qualsiasi teoria che non abbia i tratti deterministico-classici di un disegno compiuto: la meccanica quantistica ne è solo un esemplare caso.

52. Einstein 1936, p. 339. «[La MQ] è una rappresentazione *incompleta* degli oggetti reali, anche se è l'unica che può essere edificata».

53. Estratto da una conversazione con l'ateo Alfred Kerr riportata in Kessler 1971, p. 157 [trad. mia].

54. Einstein 1988, p. 709.

Bohr, e questo è il punto, non affermava che la “vera” natura fosse entangled, bensì che riteneva assurdo parlare di una “vera” natura trascendente, al di là delle possibilità di osservazione, postulando aprioristicamente una realtà diversa da quella che si dischiudeva per osservazione e analisi fenomenica. Come la relatività aveva destituito di senso le fondamenta di spazio e tempo assoluti, a cui si tenevano saldamente agganciati lo spazio e il tempo della conoscenza, così il danese mostra quanto insensato sia il continuo riferimento ad una realtà assoluta, indipendente, immobile: questa è la proposta di Bohr, questa la «grande lezione epistemologica», e non riguarda affatto – come invece gli esperimenti – la natura entangled delle particelle; lezione che il fisico sperimentale ha ignorato come il supplementare e poco igienico esercizio filosofico di uno scienziato, onde avrebbe al contrario potuto ottenere un decisivo spunto per l’interpretazione epistemologica dei fondamenti della conoscenza scientifica.

6. UNA RELATIVITÀ DELLA REALTÀ

Abbiamo visto come la letteratura scientifica contemporanea dichiara risolutivo un esperimento che non ha risolto alcunché (valgano le testimonianze di chi tuttora ritiene incompleta la MQ); l’equivoco, come mi appresto a dimostrare, deriva dal totale fraintendimento della portata filosofica della questione. Il dibattito tra le due interpretazioni della MQ viene presentato come se concernesse una singolare caratteristica confinata nel mondo atomico. Scrive Cini: «è possibile conciliare la convinzione nell’oggettiva concretezza del mondo macroscopico circostante con l’ambiguità delle proprietà del mondo quantico»⁵⁵; concorda Zeilinger: «esistono oggetti le cui proprietà e la cui esistenza dipendono dal fatto che li osserviamo o no, e da come li osserviamo. Certo si tratta di oggetti molto, molto piccoli, ma è pur sempre un fatto sorprendente»⁵⁶. La questione, come chiariscono peraltro Einstein e Bohr nei loro scritti, è invece molto più filosofica e universale: soltanto occasionata dalla MQ e dal particolare esperimento mentale, riguarda al contrario la realtà in generale (e non solo gli «oggetti molto, molto piccoli»).

Einstein tentò di spiegare a Schrödinger – che condivideva la sua avversione per la chimerica MQ (come la disegnò a fronte della sua copia di *Atomtheorie und Naturbeschreibung* di Bohr) – cosa lo turbava: gli chiese di immaginare due scatole chiuse, delle quali una soltanto conteneva una pallina. Sollevare il coperchio di una scatola equivaleva a “compiere un’osservazione”. Prima di guardare den-

55. Cini 1994, p. 108.

56. Zeilinger 2005, p. 3.

tro la prima scatola, la probabilità che essa contenesse la pallina era $\frac{1}{2}$; dopo che la scatola era stata aperta, tuttavia, la probabilità collassava a 1 o 0 (la pallina aut c'era aut non c'era): ma, e questo era il punto, in realtà la pallina era fin dall'inizio in una delle due scatole. A suo avviso, cioè, la MQ si accontentava di una descrizione probabilistica ove in realtà vi era sin dall'inizio una situazione determinata. Ma con i quanti la questione è differente; non perché in ambito quantistico ci siano "proprietà" diverse: la questione è l'inconoscibilità⁵⁷. In ambito macroscopico, quotidiano, noi possiamo alzare il coperchio e guardare dentro la scatola: il nostro concetto di "oggetto macroscopico" ha evidentemente delle proprietà di continuità che noi gli attribuiamo. Se nascondo una pallina dentro una scatola, ritengo che essa continui ad esistere nascosta dentro la scatola perché alzando il coperchio la vedo ancora lì, o almeno posso farlo. La questione è precisamente la possibilità di osservare, di controllare. Non è che gli oggetti microfisici abbiano proprietà particolari; è che in fisica quantistica non si può "alzare il coperchio della scatola" e controllare. È un problema filosofico di critica della conoscenza, non fisico: non ha affatto a che vedere con la "grandezza" considerata, ma con il principio. La questione è la medesima sia in ambito quantistico che in ambito macroscopico: l'inesistenza di una realtà trascendente. Mentre in ambito macroscopico, tuttavia, abbiamo costantemente la possibilità di osservare – e ha dunque senso attribuire a un oggetto una continuità e una definitezza "quotidiane" – in ambito quantistico non ce l'abbiamo. Sotto tale punto di vista, per tutti gli oggetti vale quanto scrive Kant nella sua Critica della ragion pura: «reale è tutto ciò che sta in un contesto con una percezione secondo le leggi del processo empirico»⁵⁸; per tutti gli oggetti, cioè, l'esistenza dipende dal fatto di "essere osservati". Il principio è il medesimo: non è coinvolta alcuna strana proprietà fisica del mondo subatomico, ma solo una rigorosa critica della conoscenza.

Quando Bohr sosteneva che la descrizione statistica fornita dalla meccanica dei quanti non era una ammissione di ignoranza, non stava assolutamente sostenendo che la "vera realtà" fosse effettivamente casuale, ma che non esiste una "vera realtà" indipendente: come può non apparire paradossale che dei risultati dimostrino

57. In questo, Bohr non fu mai particolarmente chiaro né, soprattutto, rigoroso. Nella formulazione del suo principio di corrispondenza, in particolare, egli autorizza l'interpretazione secondo la quale nel mondo quantistico ci siano proprietà diverse. Dalla grande maggioranza dei suoi scritti, tuttavia, emerge con chiarezza l'esigenza di portare alla luce il significato filosofico e generale di critica della conoscenza che non può, evidentemente, rimanere ascritto ad un particolare ambito microfisico. Un filosofo come Cassirer – cfr. per es. Cassirer 1937 – è molto più rigoroso e coerente; ritengo comunque che la posizione di Bohr sulla natura della realtà non ne sia inficiata.

58. Kant 2004³, p. 521.

che la realtà “sta effettivamente” come sosteneva Bohr? Dove sarebbe la caduta dell’ultimo “assoluto”: dopo il tempo e lo spazio, la realtà? Sarebbe allora soltanto una questione di natura fisica, un bisticcio tra sperimentatori: che ne è della «grande lezione epistemologica»? Il problema di Bohr e Einstein non era quale fosse il particolare valore assunto da una particella prima della misura, ma se di un tale valore avesse senso parlare e in definitiva se esistesse indipendentemente dall’osservatore; per dirla nei termini del famoso esperimento mentale di Schrödinger, la questione non è se il gatto sia “effettivamente” vivo/morto oppure se sia “effettivamente” in una mescolanza di stati: la questione è al contrario proprio la possibilità di parlare di un modo “effettivo” in cui sono le cose indipendentemente da noi. La proposta di Copenaghen è tanto rivoluzionaria quanto inascoltata: una applicazione rigorosa del principio di relatività che investa, infine, anche la realtà stessa. Nessuna realtà assoluta: eppure a tutt’oggi il fraintendimento è scoperto; Cini commenta così: «non siamo dunque più costretti a rinunciare alla certezza che il mondo sta là anche se non lo guardiamo, una certezza alla quale dopotutto siamo molto affezionati»⁵⁹. La lezione di Bohr e Heisenberg non è stata capita.

7. CONCLUSIONI

Riflettere sui fondamenti epistemologici della propria disciplina può essere pericoloso per lo scienziato. Il rischio è allontanarsi dal proprio lavoro, e finire tanto fuori strada da ritrovarsi «soli nel deserto»⁶⁰. Può esistere tuttavia una feconda collaborazione tra scienza e filosofia: utile ai filosofi, accusati di ripercorre battutissime questioni che hanno ormai perso ogni connessione con il mondo; utile agli scienziati, perché non si tratta solo di fare cose da scienziato, ma anche di pensare da scienziato.

Fino al Settecento si è dato per scontato⁶¹ che esistesse un mondo indipendente dalla conoscenza umana: un mondo “assoluto”. Nel 1781 Kant compì, secondo le sue stesse parole, una «rivoluzione copernicana in filosofia»: come Copernico aveva completamente ribaltato la questione, sostenendo non fossimo noi immobili ad osservare un sole peregrinante, ma esso immobile e noi attorno a lui rotanti, così Kant volle ribaltare la questione soggetto-oggetto: non c’è più un oggetto lì da cercare di conoscere per “come è davvero”, ma è il soggetto a costituire con le sue possibilità

59. Cini 1994, pp. 101-102.

60. Einstein 1988, p. 713.

61. Nonostante le certamente note eccezioni nella storia della filosofia, ritengo che solo con Kant si possa considerare maturo il “rivolgimento copernicano” in oggetto.

di conoscenza l'oggetto; l'oggetto è tale soltanto in quanto "oggetto di conoscenza" di un soggetto. Fino al Novecento si è dato per scontato che due eventi fossero o simultanei o non simultanei; al di là della effettiva e sempre imperfetta misurazione umana, i due eventi devono pur essere avvenuti o contemporaneamente o no! Einstein ebbe l'impertinenza di chiedere: "secondo chi?". Che senso può avere, cioè, chiedersi se i due eventi siano simultanei senza specificare in quale sistema di riferimento? Che cos'è quel "tempo assoluto", per tutti uguale (ma sconosciuto e inconoscibile), a cui tutti così disinvoltamente riferivano la simultaneità dei due eventi? Ha davvero senso continuare a parlarne come se esistesse? E il medesimo si può dire per gli spazi... La filosofia, agli occhi di Bohr, aveva già suggerito la soluzione dell'intero enigma: «ritroviamo qui, in una nuova luce, il problema dell'oggettività dei fenomeni, che ha sempre attirato su di sé tanta attenzione nelle discussioni filosofiche»⁶². Non rimaneva allora che da compiere l'ultimo passo: la medesima sorte toccata a spazio e tempo, doveva toccare anche alla realtà.

Non esiste un esperimento – né un ragionamento – che permetta di decidere chi ha ragione: quale delle due "visioni della realtà" sia giusta. Il realista a là Einstein potrà sempre sostenere che esiste una realtà oggettiva di cui non abbiamo conoscenza, e continuerà ad essere impossibile dimostrare che essa non esiste. Il fatto è che, del pari, non si può "dimostrare" che non esiste un tempo assoluto, che scorre uguale per tutti: si può soltanto mostrare quanto il riferimento ad esso sia del tutto ingiustificato; ed è quanto appunto ha fatto la scuola di Copenaghen nei confronti della realtà. Conclude così Niels Bohr la sua risposta ad EPR: «the dependence on the reference system, in relativity theory, of all readings of scales and clocks may even be compared with the essentially uncontrollable exchange of momentum or energy between the objects of measurements and all instruments defining the space-time system of reference, which in quantum theory confronts us with the situation characterized by the notion of complementarity. In fact this new feature of natural philosophy means a radical revision of our attitude as regards physical reality, which may be paralleled with the fundamental modification of all ideas regarding the absolute character of physical phenomena, brought about by the general theory of relativity»⁶³. Bohr è chiarissimo:

62. Bohr 2012, p. 4.

63. Bohr 1936, p. 702. «La dipendenza dal sistema di riferimento, nella teoria della relatività, di tutte le letture delle scale di misura e degli orologi potrebbe anche essere paragonata allo scambio, incontrollabile, di momento o di energia, tra gli oggetti di misura e tutti gli strumenti che definiscono il sistema spazio-tempo di riferimento, che nella teoria quantistica ci mette di fronte alla caratterizzata dalla nozione di complementarità. Infatti questa nuova caratteristica della filosofia naturale significa una radicale revisione del nostro atteggiamento per quanto riguarda la realtà fisica, che potrebbe essere messo

il riferimento non è affatto ad una singolare proprietà microfisica, bensì ad una irrintracciabile “realtà assoluta”, la cui posizione è tanto ingiustificata quanto lo erano quelle di spazio e tempo assoluti.

Abbracciare un concetto di realtà di stampo einsteiniano⁶⁴ significa cercare teorie necessariamente deterministiche, che corrispondano quanto più possibile a quella “realtà assoluta” sotto il velo: andare in cerca, direbbe Heisenberg, delle estremità ultime del mondo. Ma, soprattutto, è in gioco lo statuto ontologico che si attribuisce agli oggetti della fisica: per un concetto di realtà di stampo einsteiniano vale quanto scrive Quine in *Due dogmi dell’empirismo*: «dal punto di vista del fondamento epistemologico, gli oggetti fisici e gli dei di Omero differiscono solo quanto al grado, e non quanto al genere»⁶⁵; gli fa eco Bellone: «gli umani, con la loro evoluzione culturale, non approdano mai a rappresentazioni per sempre vere di quel qualcosa che sta là fuori»⁶⁶. All’interno di una tale concezione, in effetti, non vedo via d’uscita. Bohr, al contrario, ha in mente degli oggetti fisici che costituiscono il vero e proprio metro della realtà, epistemologicamente diversi da Afrodite e Atena: non più «postulati culturali» – così si legge –, «utili intermediari» tra noi e una realtà assoluta, ma il vero e proprio paradigma dell’unica oggettività.

Einstein diceva che non poteva credere che Dio giocasse a dadi: gli esperimenti sulla “disuguaglianza di Bell”, al posto che abolire Dio (cioè la realtà assoluta), ne hanno fatto un giocatore di dadi. La lezione di Bohr, tuttavia, potrebbe essere più profonda: ci chiede di pensare che non esista alcuna realtà assoluta; che la “realtà in sé”, non pervertita dai sensi, è una realtà vuota: è nulla; il sogno avito di una *epistémè*, così, sfumerebbe: ma piuttosto che condannarci a un totale relativismo, continuando a riporre la nostra conoscenza sul piatto di una bilancia che sull’altro pesa la conoscenza assoluta, ci è data la possibilità di considerare questa nostra conoscenza umana, cangiante, organica, l’unica possibile; l’ennesima forma in cui il pensiero ci ricorda chi siamo.

Andrea Roselli

Università degli Studi di Milano
andrea.roselli@studenti.unimi.it

in parallelo con la fondamentale modifica di tutte le idee riguardanti il carattere assoluto dei fenomeni fisici, portata avanti dalla teoria generale della relatività».

64. Il concetto di realtà “einsteiniano” potrebbe essere definito “realista-trascendentista”, quello di Bohr “critico-idealista”; ho preferito non appesantire l’esposizione.

65. Quine 2004, p. 62.

66. Bellone 2011, p. 56.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bellone 2011 E. Bellone, *Qualcosa, là fuori. Come il cervello crea la realtà*, Torino, Codice Edizioni, 2011.
- Bohr 1936 N. Bohr, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, «Physical Review», ser. 2, 48 (1936), pp. 696-702.
- Bohr 2012² N. Bohr, *Il quanto d'azione e la descrizione della natura*, in P. Gulmanelli (a cura di), *I quanti e la vita*, Torino, Bollati Boringhieri, 2012².
- Born - Heisenberg 1928 M. Born - W. Heisenberg, *Electrons et Photons*, «Comptes Rendus 5ème Conseil Solvay», Paris, Gauthier Villars, 1928.
- Cassirer 1970 E. Cassirer, *Determinismo e indeterminismo nella fisica moderna*, a cura di G.A. De Toni, La Nuova Italia, Firenze 1970.
- Cassirer 1973 E. Cassirer, *Sostanza e funzione* Sulla teoria della relatività di Einstein*, a cura di G.A. de Toni, Firenze, La Nuova Italia, 1973.
- Cini 1994 M. Cini, *Un paradiso perduto. Dall'universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Milano, Feltrinelli, 1994.
- Dummett 1996 M. Dummett, *La base logica della metafisica*, tr. it di E. Picardi, Bologna, Il Mulino, 1996.
- Einstein - Podolsky - Rosen 1935 A. Einstein - B. Podolsky - N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, «Physical Review» ser. 2, 47 (1935), pp. 777-780.
- Einstein 1936 A. Einstein, *Physik und Realität*, «Journal of the Franklin Institute» 221, 3 (1936), pp. 313-347.
- Einstein 1988 A. Einstein, *Opere scelte*, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988.
- Geymonat 1953 L. Geymonat, *Saggi di filosofia neorazionalistica*, Torino, Einaudi, 1953.
- Heisenberg 1948 W. Heisenberg, *I principi fisici della teoria dei quanti*, a cura di M. Ageno, Torino, Einaudi, 1948.
- Isaacson 2008 W. Isaacson, *Einstein. La sua vita, il suo universo*, a cura di T. Cannillo, Milano, Mondadori, 2008.
- Kant 2004³ I. Kant, *Critica della ragione pura*, a cura di A. M. Marietti, Milano, Biblioteca Universale Rizzoli, 1998, 2004³.

- Kessler 1971 H. G. Kessler, *The diary of a cosmopolitan*, Londra, Weidenfeld and Nicolson, 1971.
- Kumar 2010 M. Kumar, *Quantum. Da Einstein a Bohr, la teoria dei quanti, una nuova idea della realtà*, a cura di T. Cannillo, Milano, Mondadori, 2010.
- Pais 1993 A. Pais, *Il danese tranquillo. Niels Bohr, un fisico e il suo tempo*, a cura di D. Canarutto, Torino, Bollati Boringhieri, 1993.
- Poincaré 2003 J. H. Poincaré, *La scienza e l'ipotesi*, a cura di C. Sinigaglia, Milano, Bompiani, 2003.
- Quine 2004 W.V.O. Quine, *Da un punto di vista logico. Saggi logico-filosofici*, a cura di P. Valore, Milano, Raffaello Cortina, 2004.
- Zeilinger 2005 A. Zeilinger, *Il velo di Einstein. Il nuovo mondo della fisica quantistica*, a cura di L. Lilli, Torino, Einaudi, 2005.