

La meccanica quantistica tra positivismo e realismo: origine e sviluppi di una controversia

di *Paolo Pecere*

8.1

Uno “scisma” nella fisica?

La meccanica quantistica è una delle teorie più efficaci della storia della fisica e uno dei pilastri dell'attuale conoscenza scientifica, ma al tempo stesso è occasione, fin dai tempi della sua comparsa, di accese controversie interpretative. Com'è noto, i grandi fisici del secolo scorso si divisero tra chi – come Heisenberg, Bohr e Born – difendeva la piena validità della nuova teoria e chi invece – come Einstein e Schrödinger – sosteneva che essa presentasse alcuni aspetti teoricamente insostenibili, come l'indeterminismo e l'impossibilità di principio di determinare i valori di alcune variabili fisiche prima dell'atto di misurazione. Nessuno dei protagonisti di questo dibattito metteva in dubbio l'efficacia del nuovo formalismo matematico per la descrizione dei risultati sperimentali; il dissenso riguardava piuttosto la capacità della teoria canonica di offrire una valida e completa spiegazione dei fenomeni quantistici, che i critici contestavano sostenendo che solo una teoria diversa, ma tale da includere tutte le previsioni della meccanica quantistica, avrebbe fornito una descrizione soddisfacente dei fenomeni microfisici. La difesa della teoria si è basata in genere – e si basa ancora – sulla tesi secondo cui il successo sperimentale imporrebbe di prendere sul serio i risultati della teoria e di conseguenza modificare la rappresentazione della realtà fisica come particella o onda che dominava la fisica precedente, mentre i critici non riuscirebbero a rinunciare agli aspetti intuitivi della fisica classica, combattendo una battaglia di retroguardia analoga a quella intrapresa in passato dai critici della relatività ristretta¹.

1. Alla fine degli anni Sessanta Heisenberg ricordava: «Einstein non voleva riconoscere che la meccanica quantistica rappresentasse una descrizione definitivamente vali-

In base al suddetto dissenso, tra gli anni Trenta e gli anni Cinquanta del secolo scorso, si consolidò l'idea che le controversie tra i fisici sottintendessero l'opposizione tra diverse concezioni filosofiche, che fungendo da dogmi avrebbero preso il sopravvento sulle discussioni fisiche. Per esempio Heisenberg scrisse nel 1955 che gli oppositori della teoria convergevano su un punto: «il ritorno al vecchio concetto di realtà della fisica classica, o, detto più in generale, all'ontologia del materialismo» (Heisenberg, 1955, p. 17). Il riferimento era a fisici come Einstein e Bohm, che ancora di recente avevano contestato il positivismo di coloro che difendevano il valore definitivo della teoria quantistica, sostenendo l'esigenza di una nuova teoria che eliminasse il processo di misura dalla descrizione della realtà fisica. L'anno successivo Popper – che condivideva questo obiettivo – reagì includendo Bohr e Heisenberg tra i sostenitori dello strumentalismo epistemologico, una concezione che rinunciava alla «vera descrizione del mondo» e che aveva caratterizzato l'opposizione di illustri esponenti del clero ai risultati di Galilei e Newton. Popper concludeva: «Pochi, o nessuno, tra i fisici che oggi hanno accettato la concezione strumentalista di Bellarmino o del vescovo Berkeley realizzano che hanno accettato una concezione filosofica» (Popper, 1956, p. 99). Nel manoscritto del *Poscritto* alla *Logik der Forschung*, redatto nello stesso periodo, Popper sosteneva che fosse in atto uno «scisma» nella fisica: da una parte c'erano i sostenitori di indeterminismo, strumentalismo e soggettivismo, dall'altra quelli di determinismo, realismo e oggettivismo (Popper, 1982b, p. 174). Si consolidò così un luogo comune che non ha smesso di influenzare le discussioni successive: la posizione di Bohr e Heisenberg, che difendevano la piena validità e la completezza della meccanica quantistica, cominciò a essere ascritta all'«interpretazione di Copenhagen», bollata dai critici come espressione di un positivismo o di uno strumentalismo epistemologici, che di fatto servivano a negare i limiti della teoria e a precludere la possibilità di un progresso scientifico; le voci dei sostenitori di ipotesi alternative vennero invece

da [*endgültig*] e ancora meno completa, di questi fenomeni [atomici]» (Heisenberg, 1971a, p. x). L'argomento della nuova intuizione quantistica e dell'attaccamento dei critici all'intuizione classica, molto diffuso nelle prime discussioni sulla teoria (cfr. PAR. 8.2), è rimasto patrimonio comune tra i fisici e domina ormai le molte esposizioni divulgative della teoria (cfr., per esempio, Lederman, Hill, 2011, trad. it. p. 19).

ritenute espressione di un pregiudizio filosofico realistico, che rendeva incapaci di accettare il significato innovativo della nuova teoria.

Ma questa antinomia filosofica tra positivismo (o strumentalismo) e realismo, che talvolta è adottata ancora oggi per inquadrare le diverse interpretazioni della meccanica quantistica, non è adeguata a caratterizzare le controversie che effettivamente hanno avuto luogo, sia nel campo della fisica, sia in quello della filosofia. Per apprezzare l'indubbio peso che le idee filosofiche hanno avuto in queste discussioni occorre prima di tutto abbandonare questa dicotomia, rintracciando i precisi contesti polemici in cui essa ha avuto origine e la varietà di prospettive che in essi vennero aperte.

8.2

Il dibattito tra i fisici e il ruolo della filosofia

8.2.1. LA GIUSTIFICAZIONE DELLA TEORIA E IL MITO DELL'“INTERPRETAZIONE ORTODOSSA”

Per quanto riguarda i fisici, un esame dei momenti fondamentali delle discussioni sulla teoria quantistica mostra che, mentre sono stati sempre argomenti fisico-matematici a produrre risultati condivisi, le posizioni filosofiche ed epistemologiche non sono state nettamente distribuite tra difensori e critici della completezza della teoria.

Come è noto Heisenberg e Schrödinger presentarono due formulazioni matematiche equivalenti della nuova meccanica, ma dissentirono vivamente sull'interpretazione fisica del formalismo. Heisenberg basò la sua interpretazione sul concetto di osservabile, sostenendo che la nuova teoria imponesse di abbandonare la rappresentazione classica della materia fondata sul movimento di particelle nello spazio. Schrödinger, traendo ispirazione dall'ideale di Einstein e de Broglie della riduzione della materia a un'onda di radiazione, elaborò la nuova equazione del moto ipotizzando che la funzione di stato $\psi(t)$ descrivesse la propagazione della densità di materia. Il dissenso tra i due sulla visualizzabilità dei sistemi fisici fu profondo e insanabile².

2. Su questo primo momento della controversia cfr. Jammer (1966, in part. pp. 271 ss., 283 ss.).

L'interpretazione di Schrödinger fu molto ben accolta dai fisici della vecchia generazione (come Sommerfeld, Planck ed Einstein), ma la reazione del gruppo di fisici che avevano collaborato con Heisenberg, raccolti a Göttingen intorno a Max Born, non si fece attendere. Subito dopo che Born (1926) avanzò la sua interpretazione, secondo cui il modulo quadro della funzione d'onda designava invece la densità di probabilità di localizzare una particella in un dato punto (la cosiddetta "regola di Born"), Heisenberg pubblicò (nel marzo 1927) il celebre saggio sul «contenuto intuitivo» della nuova meccanica. Egli affermava subito che la «comprensione intuitiva» della teoria coincide con la descrizione matematica dei risultati sperimentali e che questa comporta l'abbandono dei «consueti» concetti di «traiettoria» e «forma» dell'oggetto fisico. Istituiva dunque un paragone con l'abbandono dei «consueti concetti intuitivi di spazio e tempo» nella relatività di Einstein – poi ripreso innumerevoli volte da Bohr, Born, Pauli e da molti filosofi – che colpiva al cuore i difensori dell'interpretazione ondulatoria (Heisenberg, 1927, p. 172). L'elemento probabilistico della teoria era dunque irriducibile: Heisenberg preferiva parlare di «pacchetto di probabilità», piuttosto che di «pacchetto d'onde» (ivi, p. 186). Dal formalismo Heisenberg ricavava anche le relazioni d'indeterminazione, che stabilivano un limite alla precisione con cui si possono determinare simultaneamente alcune coppie di variabili di stato, come posizione e momento. Dall'impossibilità di conoscere esattamente i valori di tutte le variabili nello stato presente di un sistema discendeva l'impossibilità di applicare il principio di causalità nella sua forma classica. I concetti di realtà (*Wirklichkeit*), di causalità e di visualizzabilità classici, che Schrödinger aveva cercato di mantenere, venivano dunque respinti. Tuttavia Heisenberg confutò con successo l'interpretazione di Schrödinger *non* in base a considerazioni filosofiche, bensì con un argomento fisico-matematico, mostrando che essa, contrariamente all'evidenza empirica, prevedeva una dispersione dell'onda materiale in tutto lo spazio (ivi, p. 185). Nell'ottobre dello stesso anno tutti i maggiori fisici impegnati nella ricerca sulla teoria quantistica si riunirono al quinto congresso Solvay di Bruxelles e le posizioni si assestarono: da una parte, i difensori della nuova teoria, dall'altra i critici, come Einstein, che non possedevano al momento una compiuta teoria alternativa.

Questi primi episodi permettono già di individuare alcuni aspetti generali dell'intera controversia. Heisenberg difese la teoria adottando la metodologia matematico-sperimentale tipica della fisica moderna.

Ma questa – come era chiaro fin dai tempi di Newton – non implicava senz'altro la validità di una particolare interpretazione oggettiva del formalismo³. Perciò ai critici come Schrödinger ed Einstein restava chiaro che le riserve mosse da considerazioni extrafisiche non erano escluse in linea di principio e che la ricerca di modelli alternativi poteva andare avanti; specularmente, la difesa della teoria richiedeva una integrazione epistemologica, tale da giustificare perché occorresse una volta per tutte rinunciare alle rappresentazioni del passato.

Per un chiarimento teorico di questo tipo lo stesso giovane Heisenberg aveva rimandato nel suo celebre articolo alle «più recenti ricerche» di Bohr, che proprio al congresso Solvay duellò con Einstein e divenne per molti anni il difensore del valore definitivo della nuova fisica. Bohr sembrò in effetti avanzare decisamente sul terreno filosofico con il suo concetto di complementarità, quando cioè – nella celebre *Como lecture* e poi al congresso Solvay – presentò la sua tesi secondo cui la nuova meccanica comportava «aspetti complementari ma reciprocamente escludentisi della descrizione» fisica (Bohr, 1928, pp. 54-5). Secondo Bohr le relazioni di indeterminazione esprimevano sul piano matematico la generale impossibilità di applicare simultaneamente ai fenomeni quantistici i concetti classici di coordinazione spazio-temporale (determinazione esatta della posizione/del tempo) e di causalità (determinazione esatta del momento/dell'energia), concetti che d'altra parte erano necessari alla descrizione dei risultati sperimentali.

La ventennale controversia tra Bohr ed Einstein, che ebbe inizio a partire da queste tesi, presenta un altro caso esemplare del ruolo talvolta fuorviante che l'adozione di tesi filosofiche giocò nel dibattito fisico. Einstein propose numerosi esperimenti mentali per sostenere prima l'incoerenza e poi l'incompletezza della teoria, senza riuscire a convincere Bohr, le cui repliche avevano sempre la medesima struttura: per misurare una determinata grandezza la meccanica quantistica deve sempre far riferimento a contesti sperimentali alternativi (come apparati rigidi o mobili). Piuttosto che basarsi su un concetto di realtà fisica indipendente dal processo di misura bisogna allora modificare questo concetto stesso,

3. Si pensi alle diverse posizioni che fisici e filosofi del XVIII secolo – pur convenendo sulla piena validità della descrizione matematica che Newton aveva dato dei fenomeni gravitazionali – assunsero su concetti fisici fondamentali come forza, materia e azione a distanza. Cfr. l'ancora efficacissimo profilo di Heilbron (1982, capp. 4-6) e Casini (2015).

nel senso della complementarità, che esprime l'indissolubile correlazione tra le operazioni dal soggetto e le proprietà manifestate dall'oggetto. Einstein ne concluse che il dissidio dipendeva dall'adozione di un punto di vista «positivistico» da parte dei difensori della teoria, che assimilò infine alla celebre formula «esse est percipi» di Berkeley (Einstein, 1949, p. 669). Anche da queste pagine ebbe origine il mito, poi diffuso da Popper e Bell, di un dissidio essenzialmente filosofico-dogmatico tra i difensori dell'interpretazione ortodossa – l'interpretazione di Copenhagen formulata da Heisenberg e Bohr – e i “ribelli”, guidati da Einstein, ispirati da un'ontologia realistica legata alla fisica classica.

Tuttavia le posizioni filosofiche dei due gruppi non erano così ben definite da giustificare pienamente il reciproco escludersi dei punti di vista. Il caso di Bohr, che è all'origine di questa dimensione filosofica del dibattito, è ancora esemplare di alcune ambiguità mai del tutto dissipate, e non a caso continua a ricevere molta attenzione in sede storiografica. L'interpretazione di Copenhagen, che di fatto sanciva la validità oggettiva della teoria sviluppata da Heisenberg e Born (il quale avrebbe dato il nome alla meccanica quantistica), sarebbe stata canonizzata dalle lezioni che Heisenberg tenne negli Stati Uniti e poi pubblicò in molte lingue, parlando di uno «spirito di Copenhagen» (Heisenberg, 1930, p. x). Heisenberg vi accoglieva la «complementarità» identificandola effettivamente con una sorta di positivismo in cui veniva esclusa la realtà di grandezze non osservabili. Ma questa assimilazione nascondeva una complessità delle tesi di Bohr che non era sfuggita ai protagonisti del dibattito. Bohr aveva in effetti affermato che «nella nostra descrizione della natura, l'obiettivo non è svelare l'essenza reale dei fenomeni, ma solo ritracciare, per quanto possibile, le relazioni tra i molteplici aspetti della nostra esperienza» (Bohr, 1929, p. 18). Ma questo non significava ancora – come avrebbe voluto il rigoroso positivismo attribuitogli poi da Popper – che la realtà manifestata dai fenomeni quantistici coincidesse senz'altro con le percezioni dell'osservatore o che fosse insensato parlarne. Piuttosto Bohr aveva sostenuto che, nel processo di misura delle proprietà di oggetti atomici, «l'interazione non trascurabile con gli apparati [*agencies*] di misura» non si potrebbe controllare oltre un determinato margine di precisione (Bohr, 1928, p. 54): lo «scambio discontinuo di energia e quantità di moto durante l'osservazione» (ivi, p. 63), previsto dalla teoria quantistica, porrebbe dei limiti all'accuratezza con cui si può stabilire la posizione all'istante dell'esperimento (e viceversa, la fissazione

di una posizione porrebbe dei limiti all'accuratezza con cui si può misurare la quantità di moto). Tutto ciò renderebbe impossibile ascrivere «una realtà *indipendente* nel senso fisico» sia agli oggetti sia agli strumenti di osservazione (ivi, p. 54). L'«inseparabilità» tra la conoscenza fisica e i diversi «contesti sperimentali», che Bohr raccoglieva sotto il concetto di «fenomeno» quantistico, comporterebbe dunque l'esigenza di «rinunciare alla rappresentazione intuitiva *in senso ordinario*» (ivi, p. 90, corsivi miei). Realtà oggettiva e rappresentazione intuitiva erano quindi negate in senso condizionato e non assoluto.

Ma proprio su questo punto gli scritti di Bohr possedevano una notevole ambiguità. Per un verso, egli negava in linea di principio la possibilità di analizzare in termini fisici il processo di misura, caratterizzandolo con un concetto, quello di complementarità, che si applicava anche al di fuori del campo della fisica per designare un aspetto generale della conoscenza, valido anche per i fenomeni biologici e mentali. Si è scritto molto sui modi «profetici» con cui Bohr condusse la sua instancabile campagna a sostegno della complementarità. Lo stesso Einstein parlò della «religione di Bohr», il quale in effetti assunse talvolta toni oracolari e di certo rappresentò per molti fisici più giovani una figura il cui insegnamento andava oltre la fisica⁴. Per un altro verso, tuttavia, le tesi epistemologiche di Bohr non escludevano il riferimento all'interazione tra oggetti osservati e apparati di osservazione, che poteva rimandare a un consueto fenomeno di disturbo o comunque a un'ulteriore analisi fisica della questione. Questa possibilità fu esclusa dallo stesso Bohr, quando egli replicò alle tesi di Einstein, Podolski e Rosen sulla incompletezza della meccanica quantistica insistendo sul fatto che la scelta del procedimento sperimentale influenzasse «le condizioni che definiscono i tipi possibili di predizioni sul comportamento futuro del sistema» (Bohr, 1935, p. 700). In altri termini: non si poteva parlare della realtà di determinate proprie-

4. Su questo aspetto dei primi anni di storia della meccanica quantistica è ancora fondamentale Heilbron (1985), il quale riporta numerose testimonianze epistolari sull'impegno apologetico di Bohr e sull'influenza psicologica che questi ebbe su fisici come Heisenberg, Pauli e Jordan. Secondo Heilbron il binomio di entusiasmo e rinuncia, portato avanti da Bohr a difesa della nuova meccanica, sarebbe da collegarsi agli anni di infruttuosa ricerca che egli stesso aveva condotto per stabilire un modello classico dell'atomo. Heilbron è tornato di recente a indagare i motivi psicologici che caratterizzarono le ricerche di Bohr in Aaserud, Heilbron (2013).

tà fisiche a prescindere dai diversi contesti sperimentali con cui queste possono essere misurate. Come hanno sottolineato alcuni interpreti, tuttavia, Bohr sembrerebbe aver modificato un iniziale approccio basato sul disturbo per sfuggire alle obiezioni di Einstein (Fine, 1986, p. 35; Fine, Beller, 1994). In ogni caso, posto che Bohr escludesse la possibilità di una teoria alternativa, sono state offerte diverse ricostruzioni storiche dell'interpretazione che egli dava della meccanica quantistica e dei limiti da essa imposti, che non corrisponderebbe al positivismo attribuitogli da Einstein e Popper – secondo cui tutto ciò che esiste è ridotto ai dati percettivi descritti dal formalismo –, ma comporterebbe una più specifica presa di posizione sul rapporto tra la realtà fisica (indipendente dalla mente) e la conoscenza umana. Mentre questi lavori, attingendo al vasto *corpus* di articoli e carteggi, hanno portato alla luce l'innegabile complessità delle vedute filosofiche ed epistemologiche di Bohr, restano ancora dubbi sul significato e sulla coerenza della sua posizione definitiva⁵. Alcuni interpreti della teoria, tentando di emendare l'ambiguità della sua teorizzazione, hanno suggerito che l'insistenza sulla indivisibilità tra contesto sperimentale e determinazione di proprietà di un sistema potesse alludere al carattere di “relazionalità” delle proprietà fisiche messo in luce dalla teoria, che al di fuori del linguaggio della complementarità sarebbe ulteriormente analizzabile in termini tecnici, permettendo di introdurre un aspetto realistico nell'interpretazione canonica⁶.

5. La tesi del realismo di Bohr è stata sostenuta da Folse, secondo cui Bohr avrebbe creduto nella realtà oggettiva «indipendente» dei sistemi quantistici (Folse, 1985, p. 239). Anche Murdoch (1987) mette in evidenza gli elementi realistici delle diverse prese di posizione di Bohr. Faye (1991) conviene con questi studiosi nel distinguere le tesi di Bohr dal fenomenismo e dall'idealismo, ma sottolinea che esse si devono caratterizzare piuttosto come un «anti-realismo oggettivo», nel senso che Bohr sostenerrebbe al tempo stesso l'esistenza dei sistemi fisici indipendente dalla mente, ma la dipendenza della verità delle nostre conoscenze dalle nostre facoltà cognitive. Questo tipo di lettura assimila di fatto la prospettiva di Bohr a una specie di kantismo, che era peraltro molto diffusa all'epoca. Su questo punto, sottolineato esplicitamente da molti storici, torneremo tra breve. Per un bilancio aggiornato delle discussioni cfr. Faye (2014).

6. Bohr scriveva che «la dipendenza dal sistema di riferimento, in teoria della relatività, di ogni lettura di regoli e orologi, si potrebbe perfino paragonare allo scambio incontrollabile di momento ed energia tra gli oggetti della misura e tutti gli strumenti che definiscono il sistema spazio-temporale di riferimento, che nella teo-

Bohr rimase comunque fermo alle sue formulazioni originali: si capisce perciò come mai Einstein potesse concludere di non aver mai saputo formarsi una «esatta formulazione del principio di complementarità» (Einstein, 1949, p. 674) e come mai la stessa difficoltà fosse poi lamentata da altri critici di Bohr⁷, spingendoli a considerare l'intera difesa della teoria quantistica come conseguenza del positivismo.

Più in generale, come la ricerca storica ha messo in evidenza negli ultimi anni, le posizioni di tutti i fisici «alleati» di Bohr furono molto diversificate, al punto che si parla ormai di un «mito dell'interpretazione di Copenhagen» (intesa come singola posizione coesa), costruito e poi consolidatosi nel corso delle polemiche sulla teoria⁸.

Chi propose senz'altro un'interpretazione positivista della nuova meccanica fu Pascual Jordan, altro protagonista della rivoluzione quantistica e collaboratore di Heisenberg e Born. Ma Jordan fu un positivista *sui generis*, poiché per un verso affermava (ispirandosi esplicitamente a Mach) che il mondo fisico è un mero «sistema di pensiero, che facilita il nostro sguardo sulla pienezza dei fatti osservati», per altro verso dimostrava una tendenza idealistico-speculativa quando affermava che «noi stessi produciamo i risultati della misura»⁹ e, soprattutto, quando trovava nella complementarità un supporto per tesi di sicuro significato metafisico, come l'impossibilità di una spiegazione meccanicistica della vita in biologia, la dimo-

ria quantistica ci porta a confrontarci con la situazione caratterizzata dalla nozione di complementarità» (Bohr, 1935, p. 702). Prendendo spunto da questo passaggio Feyerabend (1968-69) ipotizzò – in polemica con Popper – che Bohr avesse inteso proporre un'interpretazione degli stati quantistici in quanto relativi ai contesti sperimentali, che si poteva formulare in termini realistici. Molti fisici, a partire da Bell, hanno concesso che le idee di Bohr meritavano di essere sviluppate sul piano fisico. Di recente Rovelli ha elaborato una teoria relazionale delle proprietà quantistiche «coerente con le tesi di Bohr» (Rovelli, 1997, p. 17).

7. Per esempio Bell (1987, p. 155) e Shimony (1985, p. 109).

8. Sul contesto dialogico delle prime discussioni e sulle vicende che portarono all'egemonia delle tesi sul valore «definitivo» della teoria cfr. Beller (1999). Sul «mito dell'interpretazione di Copenhagen» cfr. Howard (2004) e, per un primo bilancio, Camilleri (2009b).

9. Jordan (1936, p. 280). Che l'atto di osservazione innescherebbe un processo di «oggettivazione» fu poi affermato anche da London, Bauer (1939, pp. 252, 258-9) e ancora da Wigner.

strazione della «libertà del volere» in psicologia e finanche l'unità di mondo interno ed esterno manifestata dai fenomeni parapsicologici¹⁰. In effetti lo sconcerto sollevato dal modo stravagante in cui Jordan generalizzò la complementarità sembrerebbe aver giocato un ruolo cruciale per la scelta di Bohr di avvicinarsi al gruppo dei neopositivisti (cfr. PAR. 8.3).

L'esigenza di chiarire le idee di Bohr portò a soluzioni diverse e originali anche alcuni tra i suoi stretti collaboratori. Léon Rosenfeld, assistente di Bohr che fu tra i più impegnati difensori della complementarità, sviluppò le sue idee sostenendo una concezione «disposizionale» delle proprietà quantistiche (Körner, 1957, pp. 41-60). Lo stesso Heisenberg inizialmente si limitò a scrivere che le speculazioni su un «mondo reale» trascendente, indipendenti dalle condizioni imposte dalla teoria, fossero «infruttuose e insensate» (Heisenberg, 1927, p. 197), ma successivamente adottò una nozione di «potenzialità» che, esplicitamente ricalcata su quella aristotelica, implicava l'esigenza di qualificare positivamente la peculiare natura degli oggetti atomici (Heisenberg, 1958). Diversa e mutevole fu anche la posizione di Born, il quale dichiarò una propensione a considerare un'«onda di probabilità, anche in uno spazio a $3N$ dimensioni, come una cosa reale, certamente qualcosa di più che uno strumento per calcoli matematici» (Born, 1949, p. 134). Nella lezione per il conferimento del Nobel, Born proponeva a suo modo di generalizzare le tesi della complementarità risolvendo il concetto di oggetto nell'«invariante» che resta costante tra gli «innumerevoli aspetti» degli oggetti della percezione (Born, 1954, p. 266)¹¹.

10. Cfr. Jordan (1934; 1936, pp. 286-302, 309-16). Su questi aspetti dell'attività scientifica di Jordan e le polemiche cui essi dettero luogo cfr. Heilbron (1985, pp. 210-9), che conclude: «Il caso di Jordan mostra la difficoltà di estendere le idee di Bohr» rimanendo al «modesto livello epistemologico» del fenomenismo. Su Jordan cfr. ora il bilancio critico di Howard (2013). Nonostante lo scarso successo delle sue speculazioni Jordan continuò a interessarsi alle implicazioni extrafisiche della nuova meccanica, occupandosi in particolare di psicanalisi. Un caso analogo è quello di Pauli, altro agguerrito sostenitore di Bohr, che come è noto sviluppò un forte interesse per un'altra disciplina estranea all'orizzonte del positivismo, come la psicanalisi di Jung.

11. «Io prediligo enfaticamente la conservazione dell'idea di particella. Naturalmente, è necessario ridefinire che cosa questa significhi. A tal fine, sono disponibili concetti ben sviluppati che compaiono in matematica sotto il nome di invarianti di

Nell'ampia varietà di posizioni assunte (e talvolta solo abbozzate) dai presunti sostenitori dell'interpretazione di Copenhagen, di cui si sono dati solo alcuni esempi, si possono individuare almeno due tratti generali. Il primo è che tutti i fisici citati rifiutavano l'ontologia meccanicistica della fisica classica, il secondo è che, allo scopo di eliminare quest'ultima, essi non si contentavano di rifiutare *qualsiasi* ontologia in nome del mero collegamento tra le percezioni realizzato attraverso lo strumento della matematica, come sarebbe dovuto avvenire in base a un positivismo pienamente conseguente.

Questo può spiegare il fatto, a lungo trascurato in nome dell'antinomia realismo vs positivismo, che molti di loro si avvicinarono a posizioni di tipo kantiano, tali cioè da conferire alla meccanica quantistica un valore per la comprensione delle condizioni a priori della conoscenza. Certo il kantismo corrispondeva, nuovamente, a una famiglia di posizioni diverse, come del resto capitava in genere nel mondo filosofico e scientifico tedesco dell'epoca¹². In ogni caso, era in linguaggio kantiano – appreso verosimilmente dal maestro Harald Høffding – che Bohr parlava di «forme di percezione», in riferimento a spazio, tempo e causalità, e di «condizioni di possibilità» degli esperimenti (cfr. Chevalley, 1994). Dal canto suo Heisenberg si propose esplicitamente di ricavare dalla nuova meccanica una nuova risposta al «problema posto da Kant» circa «l'apriorità delle forme intuitive e delle categorie» (Heisenberg, 1934, pp. 700-1): il riferimento era alla limitazione del principio di causalità e alla necessità della rappresentazione classica per la descrizione degli esperimenti¹³.

trasformazioni. Ogni oggetto che percepiamo appare in innumerevoli aspetti. Il concetto dell'oggetto è l'invariante di tutti questi aspetti. Da questo punto di vista il sistema di concetti attualmente universale, in cui particelle e onde compaiono simultaneamente, può essere pienamente giustificato».

12. Sul kantismo diffuso tra gli scienziati dell'epoca cfr. Ferrari (2006, p. 183) dove si ricorda come Einstein, in occasione di un dibattito sulla relatività a Parigi nel 1922, affermò: «ogni scienziato ha il suo proprio Kant». Per un resoconto più approfondito del kantismo nel dibattito sulla fisica quantistica rimando a Pecere (2012, pp. 135-59).

13. Questa elaborazione in senso kantiano delle idee di Bohr risultò, secondo la testimonianza di Heisenberg, dalle discussioni avute a Lipsia, a partire dal 1927, con Grete Hermann e Karl von Weizsäcker. Anche questi ultimi avanzarono interpretazioni secondo cui la nuova meccanica avrebbe modificato concetti fondamentali dell'apriori kantiano, come la causalità, senza contraddirne la funzione generale, ma

Per Heisenberg il ricorso a Kant corrispondeva esplicitamente all'esigenza di stabilire la validità permanente della teoria, circoscritta entro il suo determinato «dominio di esperienza» distinto da quello della fisica classica (Heisenberg, 1948). D'altra parte – come abbiamo visto – Born rinunciava al primato della rappresentazione classica abbracciando una teoria dell'oggettività come «invariante dell'esperienza» che di fatto riprendeva letteralmente quella elaborata dal filosofo neokantiano Ernst Cassirer nei primi decenni del secolo. Della complessità di questo insieme di “kantismi”, qui solo accennata, basti rilevare che della dottrina di Kant essi mantenevano una tesi fondamentale: i concetti e i principi della conoscenza umana, che le teorie scientifiche moderne aiutano a stabilire, hanno una funzione costitutiva per la definizione di ciò che chiamiamo “oggetto”, che non si può ricavare dal semplice assemblaggio delle percezioni. In questo senso una *koinè* kantiana accomunò i grandi fisici teorici dell'epoca con la loro ambizione filosofica di comprendere la realtà quantistica molto più del positivismo, che a quella comprensione avrebbe rinunciato.

In effetti questa *koinè* epistemologica includeva anche il fronte degli oppositori: come emerse dal loro ultimo scambio pubblico, che chiuse idealmente la prima stagione di discussioni, Bohr ed Einstein convergevano su molte idee della tradizione kantiana. Bohr affermava che «nessun contenuto può essere afferrato senza una cornice formale» (Bohr, 1949, p. 240); Einstein insisteva sulla «grande scoperta di Kant», secondo cui soltanto mediante una «totalità dei concetti e delle relazioni concettuali che sono pensate indipendentemente dall'esperienza» noi «pensiamo fisicamente» e ci rappresentiamo un'oggettività (Einstein, 1949, p. 673). Tuttavia, mentre per Bohr (come per Heisenberg e altri) il kantismo serviva a stabilire la *definitività* della teoria quantistica, per Einstein, che considerava i concetti fisici come libere «convenzioni» per catturare sempre meglio la realtà, esso serviva a rimarcarne la *provisorietà*. Era qui, ancora una volta, il vero dissidio irriducibile tra i fisici. Le interpretazioni in difesa della teoria furono invece diverse e non coincisero quasi mai con una qualsiasi versione di positivismo, che del

specificandone il contenuto per l'applicazione a un nuovo dominio di oggettività, in un modo che sarebbe rimasto valido anche alla luce di un futuro progresso della fisica. Fu Weizsäcker (1941, p. 118) a parlare, in tal senso, di un «a priori storico». Sul kantismo di Heisenberg cfr. Camilleri (2009a, pp. 133-51).

resto, sottoponendo ogni giudizio ai dati sperimentali, non avrebbe potuto in linea di principio decretare il successo definitivo di una teoria.

8.2.2. LA RICERCA DI MODELLI ALTERNATIVI E L'“ORTODOSSIA PRAGMATICA”

Per quanto Einstein sia rimasto il campione delle interpretazioni realistiche nemmeno la sua posizione si può far risalire a una univoca prospettiva epistemologica di tipo realistico. Egli postulò effettivamente la «realtà» di una grandezza fisica, determinabile a prescindere dalla «perturbazione» del sistema (Einstein, Podolski, Rosen, 1935, p. 777); ma precisò che il suo argomento non dipendeva da una «definizione esauriente di realtà», bensì dall'esigenza di escludere che i valori delle grandezze potessero essere determinati dal processo di misura¹⁴. Questa condizione, come abbiamo appena visto, non era la conseguenza logica di un approccio realistico, poiché – come poi di fatto è avvenuto – possono darsi resoconti realistici della meccanica quantistica che attribuiscono un ruolo decisivo al processo di misura. Lo stesso Einstein riconobbe del resto, verso la fine della sua carriera scientifica, che le sue «occasionalmente affermazioni» epistemologiche erano piuttosto eterogenee e orientate da un fondamentale «opportunismo» (Einstein, 1949, pp. 683-4).

Si trattava in fondo di un dissenso – non pienamente giustificato sul piano razionale – intorno alla scelta tra diversi programmi di ricerca scientifica, come Einstein riconobbe implicitamente quando, contro la tesi «logicamente non contraddittoria» del valore definitivo della meccanica quantistica, invocò il suo «istinto scientifico» (Einstein, 1936, p. 342). L'idea che una teoria fisica potesse imporre definitivamente una determinata immagine della realtà era del resto estranea a Einstein fin dall'inizio del dibattito. Quando Heisenberg gli disse – nel 1926 – che l'idea che ogni conoscenza fisica deve limitarsi alle quantità osservabili era presa dalla sua relatività, egli replicò che è la teoria a decidere che cosa è osservabile (Heisenberg, 1963). Seguendo questo principio, fino alla fine della sua attività scientifica Einstein si impegnò nel programma di ricerca di una teoria del campo entro la quale dedurre, in base a «fondamenti logici più semplici» (che a suo

14. Per una approfondita analisi delle idee einsteiniane che stavano dietro la formulazione del celebre argomento EPR citato nel testo si veda Howard (2015).

parere dovevano essere equazioni differenziali), tutte le previsioni di quella che chiamava limitativamente la «meccanica quantistica statistica» (cfr. Einstein, 1940, p. 492).

Simili considerazioni valgono per la nuova meccanica presentata da Bohm nel 1952 che, riprendendo un'ipotesi già formulata da de Broglie nel 1926, costituiva un'alternativa deterministica alla meccanica quantistica standard, mantenendone tutte le predizioni. Bohm considerava le tesi di Copenhagen come «coerenti», ma «non necessarie», presentando un'alternativa che ripristinava una rappresentazione particellare deterministica. Sul piano filosofico, la teoria di Bohm non fu respinta soltanto da difensori della teoria standard, come Heisenberg e Rosenfeld, ma anche dai maggiori sostenitori di interpretazioni realistiche, cioè Einstein e Popper (cfr. PAR. 8.4). D'altra parte lo stesso Bohm raccomandò la sua teoria *non* perché realistica, ma per ragioni interne alla metodologia fisica. Essa tentava di superare l'«intrinseca mancanza di precisione» (Bohm, 1952, p. 168) della teoria canonica, risultando euristicamente fertile: suggeriva infatti modifiche matematiche e futuri riscontri sperimentali che la teoria standard escludeva in linea di principio (Bohm, 1957, pp. 123-8). In effetti le ricerche di Bohm, che considerava le relazioni di indeterminazione come semplice effetto di un «disturbo», contribuirono a riaccendere il dibattito sul processo di misura, dando occasione tra gli anni Cinquanta e Sessanta alla comparsa di numerose interpretazioni alternative argomentate in modo tecnico¹⁵.

I lavori che hanno contribuito più di tutti a conferire dignità scientifica a questo dibattito sono stati quelli di John Bell. Con la formulazione della sua disuguaglianza (1964), successivamente confermata sperimentalmente (a partire dal 1982), Bell dimostrò la non-località della meccanica quantistica e di ogni teoria predittivamente equivalente. In diversi scritti egli chiarì di essere arrivato al suo risultato riflettendo sui tentativi di interpretare la teoria in senso realistico, come quelli di Einstein e Bohm, e criticò il modo in cui Bohr, invece di affrontare le contraddizioni della teoria, aveva avanzato una «filosofia», che Bell assimilava a una «visione del mondo romantica» fisicamente inservibile (Bell, 1987, pp. 189-90). E tuttavia anche nel caso di Bell l'opposizione tra positivismo e realismo ha giocato un ruolo

15. Su queste teorie alternative è ancora utile il profilo di Jammer (1974).

parzialmente fuorviante nell'inquadramento dei problemi posti dalla teoria. In un celebre articolo Bell sostenne che molti fisici «influenzati da filosofie positiviste e operazioniste, pensarono che non solo fosse difficile trovare una rappresentazione coerente [dei fenomeni su scala atomica subatomica], ma fosse sbagliato cercarne una» (ivi, p. 142). Come esempi di questo atteggiamento Bell ricordava alcune affermazioni di Bohr, Heisenberg e Jordan. Ma come abbiamo visto sopra questa lettura non corrispondeva ai fatti, mentre la vera opposizione di Bell a questi autori riguardava l'atteggiamento rispetto a modelli fisico-matematici alternativi.

Il contributo positivo di Bell, d'altra parte, non dipese tanto da argomentazioni filosofiche in favore del realismo, quanto da considerazioni interne alla metodologia fisica: oltre a stabilire matematicamente la non-località, Bell sosteneva che la teoria presentasse nella sua versione standard una formulazione vaga e inesatta del postulato sul collasso della funzione d'onda, poiché non specificava rigorosamente come distinguere tra oggetti e apparati di misura. Pertanto egli considerava con favore tutte le interpretazioni che favorivano un'interpretazione fisica del processo di misura, come la nuova meccanica bohmiiana, l'interpretazione a molti mondi o i modelli del collasso spontaneo della funzione d'onda. Rifiutava, invece, l'interpretazione di Copenhagen, in quanto non permetteva tale analisi, ma la distingueva da un avversario ormai più forte, e cioè la «concezione pragmatica» diffusa «coscientemente o inconsciamente» tra i fisici, che consiste nel riscontrare il semplice accordo dell'algoritmo quantistico con gli esperimenti – il fatto che esso «funziona» – rinunciando a una formulazione precisa della teoria (ivi, pp. 188-9).

Quest'ultima considerazione di Bell si può estendere retrospettivamente alle prime fasi della discussione. Nonostante gli sforzi di Bohr, Born e altri di chiudere i ranghi per difendere la teoria dai suoi critici, la complementarità di fatto attecchì poco in Inghilterra (per esempio non convinse un difensore della teoria come Dirac) e quasi per nulla negli Stati Uniti, senza venire mai pienamente assimilata dalla comunità scientifica. La vera "ortodossia", invece, si formò silenziosamente attraverso le sistemazioni manualistiche, in cui il processo di misura compariva come un postulato non problematico (cfr. Dirac, 1930; von Neumann, 1932). È questa l'ortodossia secondo cui si sono formate generazioni di scienziati e che è stata pienamente assimilata dalla comunità scientifica. La filosofia, che i fondatori della teoria quantistica

considerarono necessaria per articolare ed esaminare diversi orientamenti di ricerca non pienamente giustificabili sul piano scientifico, è oggi percepita come un esercizio estrinseco al dominio ben recintato del sapere e della pratica scientifica. Perciò, se oggi le teorie alternative vengono spesso associate all'influsso sedizioso di una filosofia realistica, ciò non accade in nome di una filosofia opposta, ma di un disimpegno teorico dominante¹⁶. D'altra parte, come vedremo nei prossimi paragrafi, anche le posizioni dei filosofi sulla meccanica quantistica non hanno mai costituito un blocco omogeneo.

8.3

Vienna-Copenaghen-Los Angeles: il neopositivismo logico e la nuova meccanica

Il collegamento tra formulazione standard della teoria e una prospettiva filosofica unanime ha un'origine storica precisa. L'epoca della formulazione della meccanica quantistica coincise con la formazione dell'ampio movimento per la filosofia scientifica che si sviluppò soprattutto tra Berlino e Vienna in aperto contrasto alla diffusione, nel primo dopoguerra, di filosofie chiuse, se non ostili, rispetto al sapere scientifico. La rivista del gruppo, "Erkenntnis", dedicò perciò grande attenzione alla nuova teoria difesa da Bohr e Heisenberg, che furono presenti a congressi internazionali legati alla filosofia scientifica negli anni Trenta. In particolare, i filosofi di formazione fisica, come Schlick, Frank e Reichenbach, tentarono subito di leggere nella nuova fisica una conferma della loro epistemologia verificazionista. Per esempio Schlick, in un articolo presentato (subito dopo la sua morte) al secondo congresso internazionale per l'unità della scienza, che si aprì presso la residenza di Bohr a Copenaghen nel 1936, scrisse che la limitazione della conoscenza introdotta dalla meccanica quantistica non avrebbe costituito una mancanza, ma una «proprietà obiettiva della natura». «Il limite della conoscibilità [...] è al tempo stesso il limite della regolarità della natura»; i nessi causali ignoti «non sussistono»;

16. Per esempio Lederman e Hill (2011, p. 17) attribuiscono la resistenza alla formulazione standard a «qualche fisico un po' ribelle [...] spinto dal tifo di un certo tipo di filosofi».

gli enunciati sugli stati che in base alla funzione d'onda risultano «in-determinati» sono privi di senso (Schlick, 1936, trad. it. pp. 223, 226). Più che il positivismo berkeleyano di cui avrebbe parlato Einstein, si trova in queste righe quella che Popper (a proposito dell'interpretazione di Copenhagen) definì efficacemente una «miscela di positivismo e trascendentalismo» (Popper, 1959, p. 453).

Bohr, incalzato dal fisico e filosofo Philipp Frank, iniziò a collaborare con il gruppo dei neopositivisti verosimilmente per reagire alle impopolari speculazioni di Jordan sulla complementarità¹⁷. Heisenberg ricordava, d'altra parte, alcune conversazioni con Bohr e Pauli avvenute nel 1952, proprio a partire dal ricordo di quel convegno di Copenhagen, nelle quali i tre avevano lamentato la ristrettezza della filosofia neopositivista, che non avrebbe attribuito il giusto peso alla sfera concettuale per l'interpretazione del formalismo (Heisenberg, 1971b, pp. 205-17), e da parte sua, come abbiamo visto, scelse in questi anni la via di un'interpretazione kantiana. In ogni caso l'alleanza di Vienna e Copenhagen durò pochissimo. Con la morte di Schlick e la diaspora dovuta alla minaccia nazista l'epistemologia originale del Circolo di Vienna si diramò in molteplici sviluppi.

I due massimi esponenti del gruppo Carnap (nel 1935) e Reichenbach (nel 1938) approdarono negli Stati Uniti, dove avrebbero entrambi concluso la loro carriera a Los Angeles. Negli scritti di Carnap il postulato di «definibilità» dei termini teorici in base alle percezioni (che, presentato nell'*Aufbau* del 1928, riecheggiava di fatto le parole usate da Bohr a Como nel 1927) fece strada negli anni Trenta alla più moderata esigenza di «interpretazione» delle teorie mediante il collegamento tra termini teorici e termini osservativi, istituito mediante regole semantiche; infine Carnap, negli anni Cinquanta, riconobbe che i termini teorici possono ricevere un'interpretazione «soltanto parziale», che determina l'apertura della teoria rispetto a possibili nuovi sviluppi (cfr. PAR. 1.2). Questa "liberalizzazione" della teoria comportò una posizione più prudente rispetto alla scelta di un'inter-

17. Su Jordan cfr. nota 10. Jordan pubblicò le sue idee sulla complementarità in biologia e psicologia su "Erkenntnis" (1934) e nel numero successivo comparvero interventi dedicati alla confutazione del suo vitalismo (Ziessel) e spiritualismo (Frank). L'adesione di Jordan al partito nazista, nel 1933, costituì certamente un'altra ragione di scandalo per i neopositivisti, molti dei quali erano animati da una ideologia internazionalista e socialista.

pretazione privilegiata. Nella «logica della scienza» teorizzata da Carnap l'obiettivo di una fondazione epistemologica in senso tradizionale veniva meno, e si trattava semplicemente di esaminare i linguaggi della scienza, basando la scelta tra interpretazioni strumentalistiche o realistiche su un criterio di opportunità pragmatica. Così Carnap, per un verso, difese fino alla fine il primato teorico dell'algoritmo standard e, considerandolo il solo punto di riferimento disponibile per l'analisi filosofica, mantenne la critica dell'esigenza di visualizzazione (il cui ruolo sarebbe solo euristico). Ma queste posizioni erano ormai lontane da quelle dei fisici di Copenhagen, sia perché Carnap – considerando l'efficacia predittiva come equivalente alla verità – accoglieva un realismo sulle entità atomiche, sia perché tutte queste implicazioni non escludevano che un superamento della fisica quantistica fosse «possibile», benché – secondo Carnap – improbabile¹⁸.

Un diverso sviluppo dell'analisi logica delle teorie provenne dalle ricerche sulla logica quantistica. Questa ipotesi, studiata già ai tempi dei contatti tra i filosofi viennesi e Bohr, trovò una formulazione esemplare nelle *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics* (1944) di Reichenbach. Per dar conto dei valori non osservabili delle grandezze, fatto salvo l'algoritmo quantistico, Reichenbach proponeva di modificare le tradizionali tavole di verità introducendo il valore “indeterminato”. Bohr stesso respinse l'ipotesi, sottolineando l'indispensabilità del linguaggio classico per la descrizione degli esperimenti (Bohr, 1948, p. 317) e molti anni dopo Feyerabend (1966) la attaccò senza riserve, definendola «un tentativo di conservare una teoria rispetto a istanze di rifiuto con un intelligente allestimento di ipotesi *ad hoc*», il cui esito sarebbe di «rimuovere dalla vista i difetti della teoria». L'ipotesi venne successivamente difesa da Putnam per respingere gli agenti «misteriosi» postulati da chi pretendeva di salvare la logica classica «mediante o i “potenziali quantistici” dei teorici delle variabili nascoste, o la metafisica di Bohr» (Putnam, 1968, p. 191). Si trattava però di un'interpretazione ormai realistica, come si

18. Cfr. Carnap (1966, pp. 236-8: apertura delle teorie scientifiche; pp. 255-6: realismo sulle «entità inosservabili»; p. 284: analisi della scienza e «possibile» modifica della teoria quantistica). Le ultime posizioni di Carnap sul mutamento teorico furono probabilmente influenzate dall'esigenza di rispondere alle tesi di Kuhn (1962) sulle rivoluzioni scientifiche, che comparve originariamente nell'*International Encyclopedia of Unified Science* dei neopositivisti.

evince dalle parole di Putnam: «viviamo in un mondo con una logica non-classica». L'orizzonte filosofico, nel nuovo contesto statunitense, era cambiato: mentre Carnap cercava di tenere ferma una concezione disimpegnata sul piano epistemologico (mentre sconfessava la logica quantistica, ritenendola non necessaria, Carnap, 1966, p. 290) e l'originaria ideologia fisicalista del Circolo di Vienna era rielaborata alla luce del pragmatismo americano, la comparsa di alternative teoriche (come quella bohmniana) dava luogo ad accesi dibattiti sempre più dominati da un orientamento realistico¹⁹.

8.4

Al crocevia del realismo: interpretazioni e teorie alternative

Una decisa opposizione al sodalizio tra Copenhagen e filosofia scientifica venne portata avanti fin dagli anni Trenta da Popper. Nella *Logik der Forschung* Popper contestava le basi teoriche induttive dell'epistemologia neopositivista, sottolineando il ruolo irriducibile delle teorie per l'organizzazione dei dati empirici. Popper dichiarava di trarre ispirazione, per questa prospettiva, dai lavori di Einstein: come quest'ultimo egli considerava la meccanica quantistica una teoria statistica, rifiutando le tesi di Heisenberg sui limiti della conoscenza delle particelle. Popper propose anche un esperimento mentale per provare che si potessero misurare in un medesimo contesto sperimentale i valori simultanei di osservabili associate dalle relazioni di indeterminazione e, quando Einstein e altri gli fecero osservare alcune inesattezze, lo ritirò e rimandò alla tesi «*più debole, ma valida*» del paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen (EPR; Popper, 1959, pp. 236-46). Continuò poi, per tutta la vita, a sostenere la possibilità di una conoscenza completa degli stati microscopici e a denunciare i paradossi della concezione canonica della misura, coniando una formula destinata ad accomunare fino a oggi un'intera comunità di ricercatori impegnati

19. Lo stesso Putnam (2012) ha successivamente cambiato la sua posizione, esprimendo apprezzamento per le nuove interpretazioni e teorie alternative, come la meccanica bohmniana o i modelli del collasso spontaneo della funzione d'onda, che avrebbero mostrato la possibilità di una formulazione realistica della teoria.

nella revisione della teoria: «meccanica quantistica senza l'osservatore» (Popper, 1967).

Tuttavia, l'unità del fronte filosofico realista si limitava a questo generico livello programmatico. L'«interpretazione metafisica» (Popper, 1982b, p. 93) proposta e difesa da Popper a partire dagli anni Cinquanta era un tentativo di conciliare le posizioni dei fisici in conflitto diverso da quello delle altre interpretazioni realistiche. Popper introduceva un «campo di propensità», associato alle particelle e variabile con il mutare delle condizioni sperimentali, dichiarando di essersi ispirato a un'ipotesi di Einstein e de Broglie accolta anche da Born, e proponendo pertanto una conciliazione tra il realismo «non ortodosso» e il probabilismo di Copenhagen (ivi, pp. 52, 81-4, 189). L'ipotesi si basava sulla scelta – coerente con gli orientamenti del Circolo di Vienna – di interpretare il formalismo canonico senza scommettere sull'invenzione di teorie alternative (ivi, pp. 101, 125). Al contrario di Bohm, dunque, Popper conservava l'aspetto stocastico della teoria, introducendo come nuove proprietà le «propensità», cioè «probabilità oggettive» associate alle particelle. L'indeterminismo era motivato, secondo Popper, anche da considerazioni filosofiche indipendenti, come la difesa di un universo «aperto» in cui fosse possibile una libertà del volere concepita sul modello cartesiano (Popper, 1982a, p. 155; 1982b, p. 192n). Proprio questo aspetto della sua interpretazione indusse Popper a rifiutare la nuova meccanica di Bohm, che per altri versi poteva ben rispecchiare i suoi orientamenti epistemologici: la derivazione dell'indeterminismo su basi deterministiche sarebbe stata infatti logicamente incoerente (Körner, 1957, pp. 65-70, 88-9). Analogamente Popper aveva affermato che il programma di teoria del campo di Einstein era privo di sbocco e, riferendo i suoi ultimi colloqui con il grande scienziato a Princeton, ne aveva criticato la concezione «parmenidea» e deterministica (Popper, 1982a, pp. 1-3, 89-92). A sua volta Einstein, oltre a rifiutare l'interpretazione di Popper – sia nei suoi aspetti tecnici, sia per l'indeterminismo – liquidò la teoria bohmiana in quanto non-locale (Einstein, 1953). Infine Bohm, dopo aver proposto la sua modifica del formalismo deterministica e non-locale, dovette prendere atto delle diverse posizioni di Einstein, mentre affermò contro Popper che la teoria delle propensità non risolveva «alcun problema della meccanica quantistica» (Körner, 1957, p. 79). Così, nei primi anni Cinquanta, Einstein, Bohm e Popper rappresentavano *tre alternative realistiche* – reciprocamente incompatibili – alla teoria quantistica standard.

La comparsa della teoria di Bohm diede inizio a vivaci dibattiti, che misero in luce le articolazioni interne alle tesi di difensori e critici della teoria canonica. Per esempio Rosenfeld l'aveva attaccata pesantemente, presentando la supposizione di livelli di realtà sub-quantistici e deterministici come il frutto di un «atteggiamento metafisico tipico dei costruttori di sistemi come Descartes», non confortato da «alcuna evidenza empirica» (Rosenfeld, 1957, p. 10). Ma Rosenfeld non si limitava a difendere i risultati definitivi raggiunti da Bohr e Heisenberg «trent'anni fa», bensì avanzava anche sul terreno di un'interpretazione della complementarità ispirata al materialismo dialettico, in aperta polemica con il positivismo di Heisenberg²⁰.

Intervenendo in difesa di Bohm, d'altra parte, un filosofo come Feyerabend non insisteva tanto sull'esigenza di una teoria realistica, quanto sull'importanza di negare l'inevitabilità della teoria standard, tenendo aperta la possibilità di alternative euristicamente promettenti (Feyerabend, 1960). Il punto essenziale, per Feyerabend, era denunciare i difensori della tradizione di Copenhagen laddove questi, pretendendo di evitare qualsiasi metafisica, si rivelano «metafisici [...] ancora più dogmatici [poiché] credono che la loro metafisica sia effettivamente di tipo fattuale» (Hoyningen-Huene, 1995, p. 380).

La discussione sulle alternative coinvolse anche storici e filosofi della scienza, come Hanson e Kuhn, che confrontarono la controversia in atto con altre contese scientifiche del passato. Secondo Hanson, nonostante le tesi di fisici e filosofi come Bohm e Popper, bisognava riconoscere che «non esiste un'alternativa efficace all'interpretazione di Copenhagen» (Hanson, 1959, pp. 1, 5) e anche Kuhn sostanzialmente considerava la teoria standard come il vero paradigma rivoluzionario (e ormai dominante), che gli oppositori contestavano in virtù dell'incapacità di accogliere il probabilismo (Kuhn, 1962, p. 163). Questo genere di posizioni presupponevano che il nuovo paradigma si fondasse su una formulazione omogenea e sperimentalmente fondata e che le voci discordi si basassero su argomentazioni puramente filosofiche, mentre si taceva sulla moltiplicazione delle posizioni tra i fisici intorno al problema della misura, che ebbe luogo tra gli anni Cinquanta e gli anni Sessanta. Soltanto diversi anni dopo, quando gli interventi di Bell presentarono il postulato della misura come intrinsecamente incoerente,

20. Sulla complessa figura di Rosenfeld e sul contesto politico del dibattito sulla teoria cfr. Jacobsen (2012).

la ricerca sulle interpretazioni alternative della misura ricevette una rinnovata attenzione, che a sua volta incoraggiò – a partire dagli anni Novanta – un chiarimento filosofico sulle molteplici varianti del realismo.

8.5

La realtà (quantistica) si dice in molti modi: aspetti del dibattito contemporaneo

8.5.1. FUNZIONE D'ONDA E ONTOLOGIE

Ferma restando la diffusione di un certo strumentalismo disimpegnato, i fisici sono divenuti sempre più consapevoli della moltiplicazione delle interpretazioni della meccanica quantistica, al punto che – oltrepassando l'immagine dello scisma – si è parlato dei convegni sui fondamenti come di città sante in pieno tumulto, sconvolte da una «guerra santa» tra i sacerdoti di diverse religioni²¹. D'altra parte questa proliferazione teorica ha ricevuto l'attenzione dei filosofi, rendendo necessarie nuove e più sottili analisi delle alternative in campo. Per descrivere questa complessa situazione, al di là delle metafore, le vecchie dicotomie polemiche risultano insufficienti. Chi sostiene che la funzione d'onda non designi nulla di reale, ma esprima semplicemente un veicolo di conoscenza, lo fa più spesso adottando una determinata ontologia – come quella particellare o quella fondata sulla teoria dell'informazione – piuttosto che rievocando le vecchie formule di Copenhagen. D'altra parte le posizioni realistiche non sono individuate semplicemente dall'adozione di una delle tre principali alternative, cioè la meccanica bohmiiana, la teoria a molti mondi e i modelli di riduzione dinamica. Per tutte queste opzioni resta aperta la scelta fra l'assunzione di un "realismo sulla funzione d'onda" – cioè la tesi che l'espressione matematica ψ corrisponda essa stessa a un'entità fisica fondamentale: una nuova specie di campo – e diverse "ontologie primitive" che, lasciando alla ψ una funzione meramente predittiva, associano a essa l'esistenza di particolari entità nello spazio-tempo²².

21. Fuchs (2002). Per un resoconto critico sulle alternative più accreditate nella comunità scientifica cfr. il saggio di Bassi (CAP. 7).

22. Una raccolta di saggi aggiornata sulle opzioni attualmente in campo è Ney, Albert (2013).

L'ipotesi del realismo della funzione d'onda, come abbiamo visto (PAR. 8.2.1) era già stata accennata da diversi fisici agli albori della meccanica quantistica (per esempio de Broglie e Born), ma venne rilanciata da Bell (1987, p. 128) e oggi è sviluppata da filosofi come David Albert (1996). Essa ha il vantaggio di prendere alla lettera il formalismo matematico, attribuendo realtà allo spazio delle configurazioni che compare nell'equazione di Schrödinger. Si tratta di un'ipotesi generale, che può essere applicata a tutte e tre le maggiori interpretazioni realistiche della teoria. Il suo primo problema, tuttora insoluto, consiste nel dover ricavare i fenomeni ordinari dello spazio tridimensionale in base a una realtà a $3N$ dimensioni (dove N è il numero delle particelle del sistema, che in questa interpretazione sono entità derivate). Inoltre, nelle versioni relativistiche della teoria, si pone il problema che il numero di particelle cambia nel tempo e con esso, dunque, cambierebbe anche la dimensionalità della funzione d'onda. I difensori di questa ipotesi, comunque, insistono sulla necessità di abbandonare le intuizioni classiche sulla realtà fisica, riprendendo in ciò alcune tesi di Copenhagen.

Da questo punto di vista, le ricerche sulle ontologie primitive riaffermano invece l'esigenza di recuperare una «tradizione di chiara comprensione» conservando «ingredienti che hanno avuto successo nelle teorie classiche» (Allori, 2013, p. 73). Anche in questo caso vi è un'ampia ramificazione di ipotesi in contrasto. La meccanica bohmiana, nella sua versione canonica, comporta una «ontologia primitiva» caratterizzata dalle particelle, senza considerare la funzione d'onda come un «elemento della realtà fisica». Gli interpreti discutono sulla maniera più opportuna di connotare la ψ come una «legge» (o «entità nomologica»), per distinguere questa tesi da quelle che la considerano un'entità fisica come le particelle. Anche in questo caso si pongono diversi problemi epistemologici e matematici²³.

Le interpretazioni della teoria del collasso spontaneo della funzione d'onda o GRW (dalle iniziali degli autori, Ghirardi, Rimini e Weber), ferma restando la loro spiegazione stocastica del collasso, possono essere collegate a due ontologie alternative: l'ontologia "a flash" (GRW_f), che già Bell (1987, p. 205) fece propria, stabilisce l'esistenza di soli

23. Cfr. Dürr, Goldstein, Zanghì (1997) per una presentazione di queste tesi ontologiche e la discussione di alcune difficoltà.

eventi locali discreti, che come costellazioni costituiscono la materia; invece la formulazione GRW_m associa la funzione d'onda a un campo che determina la diffusione della massa, recuperando in una nuova veste stocastica l'originaria intuizione "ondulatoria" di Schrödinger (Bassi, Ghirardi, 2003).

Anche l'interpretazione a molti mondi ha ricevuto una sottointerpretazione di quest'ultimo tipo, nota come S_m (Allori *et al.*, 2011). Questa interpretazione implica il determinismo, l'assenza del collasso e il notevole impegno ontologico delle altre teorie a molti mondi, cui aggiunge un'ontologia di tipo classico associando la ψ alla distribuzione della densità di massa.

Un problema generale rilevato da alcuni studiosi consiste nel fatto che la teoria fisica non sembra in grado di determinare una scelta tra tutte le suddette alternative. Come osservano Dorato e Laudisa (2014), per esempio, il realismo sulla funzione d'onda a $3N$ dimensioni non possiede al momento basi empiriche, mentre le teorie che definiscono la funzione d'onda come legge o la fondano su disposizioni delle singole particelle finiscono con il «convergere» e formare una contrapposizione «puramente verbale». In diverse occasioni French (2013) ha osservato che la proliferazione di ipotesi ontologiche realistiche, sia che esse ammettano oggetti estesi come i campi, sia che pongano «qualità istanziate» nei punti dello spazio-tempo, comporta alternative insolubili, e questa situazione favorisce a sua volta un'«umiltà ontologica» e un ritorno all'empirismo (come nel caso di van Fraassen, 1989). Di fronte a questo scenario tornano in mente le considerazioni di Carnap, secondo cui la comparsa della meccanica quantistica avrebbe portato alla luce la necessità, già implicita ma non evidente nella fisica classica, di rinunciare a «comprendere intuitivamente» i concetti del formalismo fisico (Carnap, 1939, pp. 67-9), per cui la scelta tra i diversi linguaggi metafisici resterebbe una questione meramente pragmatica.

Un tentativo di uscire da questa impasse, salvando il realismo, è individuato da diversi filosofi nella tesi del «realismo strutturale ontico»²⁴. L'idea, che riprende alcune tesi della tradizione neokantiana, consiste nel considerare reali le strutture matematiche invarianti individuate dalla teoria, senza attribuirle a ipotetici oggetti spazio-tempo-

24. Per un profilo teorico e bibliografico aggiornato cfr. Ladyman (2014).

rali analoghi a quelli della percezione, la cui assunzione ha uno scopo euristico. Si tratta di un approccio puramente filosofico, che mira a evitare di leggere nella teoria posizioni ontologiche che potrebbero essere superate con il progresso della scienza. Si tratta però di una scelta solo apparentemente “economica” sul piano metafisico, che anzi possiede un’evidente tendenza al platonismo e che finora non è stata raccolta dai fisici.

L’intero dibattito filosofico ruota dunque sulla definizione del lessico ontologico e sulla scelta di criteri metateorici, come la semplicità e la parsimonia, che non sembrano comunque sufficienti a decidere tra le alternative. In questo contesto la comunità filosofica guarda nuovamente alla fisica in cerca di nuovi elementi. Un esempio che ha ricevuto notevole attenzione è l’interpretazione relazionale di Rovelli (1997), che propone di eliminare il concetto di stato quantistico assoluto, indipendente dall’osservatore situato in un determinato sistema di riferimento, sostituendolo con un concetto di stato «che fa riferimento alla relazione tra sistemi fisici». Rovelli riprende esplicitamente considerazioni già comparse nelle prime discussioni sulla teoria, a cominciare dall’analogia con l’analisi della simultaneità assoluta nella relatività speciale, che come abbiamo visto era stata proposta da Heisenberg e Bohr. Il risultato è una riformulazione della meccanica quantistica «in termini di teoria dell’informazione», che lascia aperta la necessità di un’interpretazione filosofica. Secondo Laudisa e lo stesso Rovelli (2007) la teoria comporta che «la struttura fisica del mondo è identificata con una rete di relazioni», e questo sembra incoraggiare una lettura in senso kantiano²⁵. Ma non sono mancate discussioni da un punto di vista empiristico (van Fraassen, 2010) e tentativi di recuperare un resoconto realistico dei sistemi isolati, considerandone le proprietà come «disposizioni» (Dorato, 2013).

Una selezione tra le diverse versioni della teoria sembra poter provenire dal lavoro intorno alle formulazioni relativistiche (che include il tentativo di collegarle con i fenomeni gravitazionali) e dalla progettazione di esperimenti cruciali. In mancanza di una rivoluzione in fisica

25. Lo stesso Rovelli (1997) ricorda che per Kant le proprietà delle sostanze fenomeniche «consistono interamente in relazioni». Questo riferimento renderebbe opportuno un chiarimento sulle ragioni di questo relazionismo rispetto a quello kantiano.

teorica, il dibattito filosofico potrebbe ricevere orientamento dalle ricerche di laboratorio²⁶.

8.5.2. INDETERMINISMO E DIMENSIONI DELLA REALTÀ

Nel dibattito contemporaneo – concentrato sulle teorie alternative – è passato in secondo piano il tema dell'indeterminismo, che aveva dominato i primi anni delle discussioni filosofiche. Tuttavia non è mai venuta meno la riflessione sul modo in cui le proprietà fisiche messe in luce dalla meccanica quantistica si possono collegare con quelle dell'esperienza comune, di cui quel tema fu la prima occasione. Nel caso dell'indeterminismo, infatti, si poneva il problema di stabilire se questa proprietà della teoria fisica possedesse un'importanza per stabilire, o almeno per non precludere, la libertà del volere.

Che l'indeterminismo quantistico si potesse collegare con il fenomeno della decisione libera fu sostenuto, in modi differenti, da diversi protagonisti della rivoluzione quantistica, come Bohr, Jordan (cfr. PAR. 8.2.2) e Hermann Weyl (1927). In generale, una limitatezza intrinseca della conoscenza fisica serviva a lasciare spazio per una dimensione etica dell'esperienza. Si trattava di congetture, ispirate da diverse ed eterogenee letture filosofiche²⁷, il cui tratto comune stava nel ricavare dal formalismo quantistico un resoconto complessivo dell'esperienza umana. Simili estrapolazioni erano senz'altro estranee allo spirito anti-metafisico dei neopositivisti; così, a segnalare il salto logico che esse nascondevano, intervenne Moritz Schlick in persona, il quale – tenendo certamente presente la separazione tra descrizione scientifica e dimensione etica del *Tractatus* di Wittgenstein – richiamò la distinzione tra due concetti completamente eterogenei: quello fisico della causalità (in questo caso espressa in termini probabilistici) e quello etico della libertà

26. Lo *status quaestionis* sulle teorie alternative è discusso negli ultimi anni in occasione degli incontri Quantum Theory Without Observers. L'incontro che si è tenuto a Bielefeld il 22-26 aprile 2013 ha dedicato ampio spazio alle prospettive sperimentali che sono in via di progettazione (<<http://www.uni-bielefeld.de/%28en%29/ZIF/AG/2013/04-22-Blanchard.html>>).

27. Mentre Bohr sarebbe stato ispirato da Kierkegaard e James (Jammer, 1974, pp. 172 ss.), Weyl si richiamò a Leibniz e Fichte (Sieroka, 2007). Si trattava sempre di interpretazioni piuttosto libere o, per meglio dire, di suggestioni filosofiche sviluppate originalmente.

(Schlick, 1931, trad. it. p. 77). Si trattava in realtà di una questione già posta più volte a proposito della meccanica classica e che l'emergenza dell'indeterminismo in fisica non fece che riaccendere. Le radici della distinzione posta da Schlick affondavano infatti in un lungo dibattito in cui, contro le ambizioni metafisiche del materialismo e dell'idealismo, l'esigenza di distinguere diversi "domini" dell'esperienza era stata avanzata da filosofi e scienziati sia empiristi sia kantiani. A inserire il dibattito sulla nuova fisica in questa più vasta cornice storica fu Cassirer, il quale propose che, senza nulla togliere all'indagine fisica sulla legalità della natura (che peraltro non avrebbe mai realizzato un determinismo metafisico come quello ipotizzato da Laplace), si trattava di distinguere tra mondo fisico e mondo etico in quanto «dimensioni» categoricamente incommensurabili, in cui il concetto di «determinazione» assume un senso diverso (Cassirer, 1937, pp. 237-55). Anche Heisenberg (1942) aderì a una distinzione di «livelli di realtà» e, in generale, la distinzione tra piano fisico e piano etico divenne sempre più ampiamente condivisa da interpreti di diversa ispirazione filosofica²⁸.

La questione tuttavia rimase implicita nel fisicalismo di molti filosofi della scienza e si è riproposta, nel naturalismo più recente, con le discussioni sul "riduzionismo" e sulla "sopravvenienza" tra le teorie scientifiche²⁹. Alcuni scienziati, del resto, hanno rilanciato in diversi modi l'ipotesi che l'indeterminismo quantistico possa giocare un ruolo per comprendere l'emergenza della coscienza in quanto condizione della decisione libera³⁰. Di fronte a questo genere di tesi molti filosofi hanno continuato (o ricominciato) a sottolineare che, a prescindere dalla validità di determinati modelli fisici, la vera e propria riduzione di proprietà (o leggi) psicologiche o etiche a proprietà (o leggi) micro-fisiche non è imposta dal sapere scientifico. Da questo punto di vista

28. Nella sua recensione del libro di Cassirer già Ernst Nagel (1938, p. 230) affermava che «è solo la terminologia e pietà kantiana a distinguere Cassirer da molti pragmatisti naturalistici ed empiristi logici che si sono occupati di simili temi». Dal punto di vista del realismo, una simile distinzione di piano fu poi proposta da Popper (1982a; 1982b) con la sua teoria dei mondi 1, 2 e 3. Si trattava però di una teoria molto impegnativa sul piano ontologico che comportava un dualismo di tipo cartesiano (e così facendo rendeva forse superfluo l'impegno di Popper in favore di una formulazione indeterministica della teoria).

29. Su queste discussioni cfr. il saggio di De Caro e Marraffa (CAP. 14).

30. Cfr., per esempio, Stapp (1993) e Hameroff, Penrose (1996).

la contrapposizione non divide – di nuovo – positivisti e realisti, ma piuttosto sostenitori di un realismo scientifico che ammette un solo piano di realtà (eliminando gli altri come epifenomenici), e sostenitori di un realismo che ammette più livelli irriducibili di realtà (Ladyman *et al.*, 2007). Quest'ultima posizione comporta l'assunzione congiunta di tesi che in passato hanno caratterizzato diverse versioni del neopositivismo (le teorie scientifiche predittivamente più efficaci sono riferimento privilegiato per l'elaborazione concettuale dell'esperienza), del realismo (l'esistenza degli oggetti fisici è indipendente da quella degli osservatori) e del kantismo (le proprietà con cui si qualificano gli oggetti empirici e scientifici dipendono in parte dalle condizioni della percezione e dell'attività mentale dell'uomo). Anche alla luce di questi sviluppi contemporanei, dunque, appare obsoleta la rigida disgiunzione di queste tradizioni, che si sono intrecciate lungo l'intero dibattito sulla meccanica quantistica.

Riferimenti bibliografici

- AASERUD F., HEILBRON J. (2013), *Love, Literature and the Quantum Atom. Niels Bohr's 1913 Trilogy Revisited*, Oxford University Press, Oxford.
- ALBERT D. Z. (1996), *Elementary Quantum Metaphysics*, in J. T. Cushing *et al.* (eds.), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, pp. 277-84.
- ALLORI V. (2013), *Primitive Ontology an the Structure of Fundamental Physical Theories*, in Ney, Albert (2013), pp. 58-75.
- ALLORI V. *et al.* (2011), *Many-Worlds and Schrödinger's First Quantum Theory*, in "British Journal for the Philosophy of Science", 62, 1, pp. 1-27.
- BASSI A., GHIRARDI G. C. (2003), *Dynamical Reduction Models*, in "Physics Reports", 379, pp. 257-426.
- BELL J. (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- BELLER M. (1999), *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*, Chicago University Press, Chicago.
- BITBOL M. (2007), *Physical Relations or Functional Relations? A Non-Metaphysical Construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics*, in "Philosophy of Science Archive", <<http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003506/>>.
- BOHM D. (1952), *A Suggested Interpretation of Quantum Mechanics in Terms of "Hidden" Variables. I-II*, in "Physical Review", 85, pp. 166-93.

- ID. (1957), *Casuality and Chance in Modern Physics*, Routledge, London.
- BOHR N. (1928), *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory*, in “Nature”, 121, pp. 580-90, ora in Id., *Atomic Theory and the Description of Nature*, Oxbow Press, Woodbridge 1987, pp. 52-91 (si tratta della celebre *Como lecture* del 1927).
- ID. (1929), *Introductory Survey*, in “Danish Yearbook of Copenhagen University”, ora in Id., *Atomic Theory and the Description of Nature*, Oxbow Press, Woodbridge 1987, pp. 1-24.
- ID. (1934), *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge (ora Oxbow Press, Woodbridge 1987).
- ID. (1935), *Can Quantum-Mechanical Description of Nature Be Considered Complete?*, in “Physical Review”, 48, pp. 696-702.
- ID. (1948), *On the Notions of Causality and Complementarity*, in “Dialectica”, 2, 3-4, pp. 312-9.
- ID. (1949), *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, in P. S. Schilpp (ed.), *Albert Einstein Philosopher-Scientist*, Open Court, La Salle, pp. 199-241.
- BORN M. (1926), *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, in “Zeitschrift für Physik”, 37, 12, pp. 863-7.
- ID. (1949), *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford University Press, Oxford.
- ID. (1954), *The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics. Nobel Lecture, 11 December 1954*, in *Nobel Lectures. Physics 1942-1962*, Elsevier, Amsterdam 1964, pp. 256-67.
- CAMILLERI K. (2009a), *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics. The Physicist as Philosopher*, Cambridge University Press, Cambridge.
- ID. (2009b), *Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation*, in “Perspectives on Science”, 17, pp. 26-57.
- CARNAP R. (1939), *Foundations of Logic and Mathematics*, University of Chicago Press, Chicago.
- ID. (1966), *Philosophical Foundations of Physics*, ed. by H. Gardner, Basic Books, New York.
- CASINI P. (2015), *Newton e la “philosophia naturalis” nel Settecento*, in P. Pecere (a cura di), *Il libro della natura. I. Scienze e filosofia da Copernico a Darwin*, Carocci, Roma, pp. 109-37.
- CASSIRER E. (1937), *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Wettergren & Kerbers, Göteborg, ora in Id., *Gesammelte Werke*, vol. XIX, Meiner, Hamburg 2004.
- CHEVALLEY C. (1994), *Niels Bohr's Words and the Atlantis of Kantianism*, in J. Faye, H. Folse (eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, pp. 33-55.

- DIRAC P. A. M. (1930), *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford.
- DORATO M. (2013), *Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming*, <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1309/1309.0132.pdf>>.
- DORATO M., LAUDISA F. (2014), *Realism and Instrumentalism about the Wave Function. How Should We Choose?*, in S. Gao (ed.), *Protective Measurements and Quantum Reality: Toward a New Understanding of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 119-34.
- DÜRR D., GOLDSTEIN S., ZANGHÌ N. (1997), *Bohmian Mechanics and the Meaning of the Wave Function*, in R. S. Cohen, M. Horne, J. Stachel (eds.), *Experimental Metaphysics*, in "Boston Studies in the Philosophy of Science", 193, pp. 25-38.
- EINSTEIN A. (1936), *Physik und Realität*, in "Journal of the Franklin Institute", 221, 3, pp. 313-47.
- ID. (1940), *Considerations Concerning the Fundamentals of Theoretical Physics*, in "Science", 91, pp. 487-92.
- ID. (1949), *Reply to Criticism*, in P. S. Schilpp (ed.), *Albert Einstein Philosopher-Scientist*, Open Court, La Salle, pp. 663-88.
- ID. (1953), *Elementare Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik*, in AA.VV., *Scientific Papers Presented to Max Born on His Retirement from the Tait Chair of Natural Philosophy in the University of Edinburgh*, Hafner Publishing Company, New York, pp. 33-40.
- EINSTEIN A., PODOLSKI B., ROSEN N. (1935), *Can Quantum-Mechanical Description of Nature Be Considered Complete?*, in "Physical Review", 47, pp. 777-80.
- FAYE J. (1991), *Niels Bohr: His Heritage and Legacy. An Antirealist View of Quantum Mechanics*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- ID. (2014), *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics*, in "Stanford Encyclopedia of Philosophy", <<http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/>>.
- FERRARI M. (2006), *Il Kant degli scienziati: immagini della filosofia kantiana nel tardo Ottocento tedesco*, in "Rivista di storia della filosofia", suppl. 4, pp. 183-201.
- FEYERABEND P. (1960), *Prof. Bohm's Philosophy of Nature*, in "British Journal for the Philosophy of Science", 40, pp. 312-38.
- ID. (1966), Recensione di Reichenbach (1944 [repr. 1965]), in "British Journal of the Philosophy of Science", 17, pp. 326-8.
- ID. (1968-69), *On a Recent Critique of Complementarity*, in "Philosophy of Science", 35, pp. 309-31 (parte I), 36, pp. 82-105 (parte II).
- FINE A. (1986), *The Shaky Game. Einstein, Realism and the Quantum Theory*, University of Chicago Press, Chicago (1996²).

- FINE A., BELLER M. (1994), *Bohr's Response to EPR*, in J. Faye, H. Folse, *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 1-31.
- FOLSE H. (1985), *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity*, North-Holland, Amsterdam.
- FRAASSEN B. VAN (1989), *Quantum Mechanics. An Empiricist Approach*, Oxford University Press, Oxford.
- ID. (2010), *Rovelli's World*, in "Foundations of Physics", 40, 4, pp. 390-417.
- FRENCH S. (2013), *Wither Wave Function Realism?*, in Ney, Albert (2013), pp. 76-90.
- FUCHS C. A. (2002), *Quantum Mechanics as Quantum Information (and Only a Little More)*, <arxiv.org/abs/quant-ph/0205039>.
- HAMEROFF S. R., PENROSE R. (1996), *Conscious Events as Orchestrated Spacetime Selections*, in "Journal of Consciousness Studies", 3, 1, pp. 36-53.
- HANSON N. (1959), *The Copenhagen Interpretation of Quantum mechanics*, in "American Journal of Physics", 27, pp. 1-15.
- HEILBRON J. (1982), *Elements of Early Modern Physics*, University of California Press, Berkeley.
- ID. (1985), *The Earliest Missionaries of the Copenhagen Spirit*, in "Revue d'Histoire des Sciences", 38, 3-4, pp. 195-230.
- HEISENBERG W. (1927), *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, in "Zeitschrift für Physik", 43, pp. 172-98.
- ID. (1930), *The Physical Principles Quantum Theory*, University of Chicago Press, Chicago.
- ID. (1934), *Wandlungen der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft in jüngster Zeit*, in "Angewandte Chemie", 47, pp. 697-702.
- ID. (1942), *Ordnung der Wirklichkeit* [manoscritto senza titolo], ora in Id., *Gesammelte Werke*, Abteilung C, vol. 1, Piper Verlag, München, pp. 217-306.
- ID. (1948), *Der Begriff "abgeschlossene Theorie" in der modernen Naturwissenschaft*, in "Dialectica", 2, 3-4, pp. 331-6.
- ID. (1955), *The Development of the Interpretation of Quantum Theory*, in W. Pauli (ed.), *Niels Bohr and the Development of Physics. Essays Dedicated to Niels Bohr on His 70th Birthday*, Pergamon Press, London, pp. 12-29.
- ID. (1958), *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Harper & Row, New York.
- ID. (1963), Intervista di Thomas Kuhn del 15 febbraio 1963, in "Archive for the History of Quantum Physics", reel 49a.
- ID. (1971a), *Introduction*, in Id., *The Bohr-Einstein Letters*, Walker & Company, New York, pp. VII-X.
- ID. (1971b), *Physics and Beyond. Encounters and Conversations*, Harper & Row, New York.

- HOWARD D. (2004), *Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology*, in "Philosophy of Science", 71, pp. 669-82.
- ID. (2013), *Quantum Mechanics in Context. Pascual Jordan's 1936 Anschauliche Quantentheorie*, in M. Badino, J. Navarro (eds.), *Research and Pedagogy. A History of Quantum Physics through Its Textbooks*, Open Access, Berlin, pp. 261-79, <<http://www.edition-open-access.de/media/studies/2/Studies2.pdf>>.
- ID. (2015), *Anche Einstein gioca a dadi. La lunga lotta con la meccanica quantistica*, Carocci, Roma.
- HOYNINGEN-HUENE P. (ed.) (1995), *Two Letters of Paul Feyerabend to Thomas Kuhn on a Draft of the Structure of Scientific Revolutions*, in "Studies in History and Philosophy of Science", 26, 3, pp. 353-87 (il curatore data le due lettere a dopo la primavera del 1961).
- JACOBSEN A. S. (2012), *Léon Rosenfeld. Physics, Philosophy and Politics in the Twentieth Century*, World Scientific Publishing, Singapore.
- JAMMER M. (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York.
- ID. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley Interscience, New York.
- JORDAN P. (1934), *Quantenphysikalische Bemerkungen zur Biologie und Psychologie*, in "Erkenntnis", 4, pp. 215-52.
- ID. (1936), *Anschauliche Quantentheorie*, Springer-Verlag, Berlin.
- KÖRNER S. (ed.) (1957), *Observation and Interpretation*, Butterworth Scientific Publications, London.
- KUHN T. S. (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago 1970² (1962¹).
- LADYMAN J. (2014), *Structural Realism*, in "The Stanford Encyclopedia of Philosophy", <<http://plato.stanford.edu/entries/structural-realism/>>.
- LADYMAN J. et al. (2007), *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford University Press, Oxford.
- LAUDISA F., ROVELLI C. (2007), *Relational Quantum Mechanics*, in "The Stanford Encyclopedia of Philosophy", <<http://plato.stanford.edu/entries/qm-relational/>>.
- LEDERMAN L. M., HILL C. T. (2011), *Quantum Physics for Poets*, Prometheus, Amherst (NY) (trad. it. *Fisica quantistica per poeti*, Bollati Boringhieri, Torino 2013).
- LONDON F., BAUER E. (1939), *La théorie de l'observation en mécanique quantique*, Hermann, Paris (trad. ingl. con aggiunta di un paragrafo *The Theory of Observation in Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1982).
- MURDOCH D. (1987), *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.

- NAGEL E. (1938), Recensione di Cassirer (1937), in "Philosophy of Science", 5, 2, pp. 230-2.
- NEUMANN J. VON (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer, Berlin.
- NEY A., ALBERT D. Z. (2013), *The Wave Function. Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, Oxford.
- PECERE P. (2012), *Fisica quantistica e realtà. Considerazioni storico-filosofiche*, in N. Argentieri, A. Bassi, P. Pecere, *Meccanica quantistica, rappresentazione, realtà. Un dialogo tra fisica e filosofia*, Bibliopolis, Napoli, pp. 67-178.
- POPPER K. (1956), *Three Views Concerning Human Knowledge*, in Id., *Conjectures and Refutations*, Basic Books, New York 1962, pp. 97-119 (ed. or. in H. D. Lewis (ed.), *Contemporary British Philosophy*, Allen & Unwin, London, pp. 355-88).
- ID. (1959), *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchison, London (ed. rivista, con aggiunte, della *Logik der Forschung*, Springer, Wien 1934).
- ID. (1967), *Quantum Mechanics without the "Observer"*, in M. Bunge (ed.), *Quantum Theory and Reality*, Springer, Berlin, pp. 7-44.
- ID. (1982a), *The Open Universe. An Argument for Indeterminism*, in Id., *Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, vol. II, ed. by W. W. Bartley III, Unwin and Heyman, London.
- ID. (1982b [1957]), *Quantum Theory and the Schism in Physics*, in Id., *Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, vol. III, ed. by W. W. Bartley III, Unwin and Heyman, London (Popper scriveva qui, p. xvii, che questa parte del libro era pronta in bozze già nel 1957).
- PUTNAM H. (1968), *Is Logic Empirical?*, in "Boston Studies in the Philosophy of Science", 5, pp. 211-41, ripubblicato con il titolo *The Logic of Quantum Mechanics*, in Id., *Mathematics, Matter and Method. Philosophical Papers*, vol. I, Cambridge University Press, Cambridge 1975, pp. 174-97.
- ID. (2012), *The Curious Story of Quantum Logic*, in Id., *Philosophy in an Age of Science*, Harvard University Press, Cambridge (MA), pp. 162-77.
- REICHENBACH H. (1944), *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, University of California Press, Berkeley.
- ROSENFELD L. (1957), *Cause in Physics*, recensione a Bohm, in "Manchester Guardian", June 28, p. 10.
- ROVELLI C. (1997), *Relational Quantum Mechanics*, arXiv:quant-ph/9609002v2 (ed. rivista dell'articolo omonimo pubblicato in "International Journal of Theoretical Physics", 35, pp. 1637-78, 1996).
- SCHLICK M. (1931), *Die Kausalität in der Gegenwärtigen Physik*, in "Die Naturwissenschaften", 19, pp. 145-62 (trad. it. in Id., *Tra realismo e neo-positivismo*, il Mulino, Bologna 1974, pp. 35-78).
- ID. (1936), *Quantentheorie und Erkennbarkeit der Natur*, in "Erkenntnis", 6, pp. 317-26 (trad. it. in Id., *Tra realismo e neo-positivismo*, il Mulino, Bologna 1974, pp. 219-30).

- SHIMONY A. (1985), Recensione di Folse (1985), in "Physics Today", 38, pp. 108-9.
- SIEROKA N. (2007), *Weyl's "Agens Theory" of Matter and the Zurich Fichte*, in "Studies in History and Philosophy of Science", part A 38, 1, pp. 84-107.
- STAPP H. P. (1993), *A Quantum Theory of the Mind-Brain Interface*, in Id., *Mind, Matter, and Quantum Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 145-72.
- WEIZSÄCKER K. F. VON (1941-42), *Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants*, in "Die Tatwelt", 17, 1941, pp. 66-98; 18, 1942, pp. 105-9, ora in Id., *Das Weltbild der Physik*, Hirzel, Leipzig 1943, pp. 83-123.
- WEYL H. (1927), *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft*, Oldenbourg, München.