

PAOLO PECERE

FISICA QUANTISTICA E REALTÀ
CONSIDERAZIONI STORICO-FILOSOFICHE

Ora dopo aver tentato invano tutte le vie (così almeno si crede), si è diffuso un senso di nausea e un totale *i n d i f f e r e n t i s m o* : la qual cosa è madre del caos e della notte nelle scienze, ma al tempo stesso è anche l'origine, o per lo meno il preludio, di una loro prossima trasformazione e di un loro prossimo rischiaramento, se è vero che esse sono divenute oscure, confuse e inutilizzabili a causa di uno zelo impiegato male.

I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft* (1781)

INTRODUZIONE

Fin dalla sua primissima formulazione la meccanica quantistica si è presentata come una teoria di straordinaria efficacia predittiva, ma tale da risultare intelligibile solo a condizione di un chiarimento interpretativo che rimettesse in discussione i concetti fondamentali della conoscenza fisica, come ‘causalità’ e ‘esistenza’. Inoltre, a partire dagli anni '50, sono state formulate interpretazioni e teorie alternative (come la meccanica Bohmiana e i modelli di riduzione dinamica) che restano finora fondate sulle medesime evidenze sperimentali, ma ricevono crescente attenzione in nome di un'insoddisfazione rispetto al modo in cui la conoscenza fisica viene concepita nella teoria standard. Potrebbe dunque sembrare che il dibattito sulla fisica quantistica sia stato fin dal principio un dibattito intrinsecamente filosofico, cioè imperniato sui concetti fondamentali della conoscenza, piuttosto che un dibattito condotto mediante argomentazioni fisico-matematiche e sperimentali. Ciò ha condotto molti interpreti a identificare l'alternativa tra teorie differenti con una scelta tra prospettive filosofiche astrattamente definite, come empirismo, realismo, idealismo (si pensi all'ampio consenso degli odierni interpreti che si professano realisti intorno alla formula di Popper: «teoria quantistica senza osservatore»). In realtà, fintanto che il dibattito ha coinvolto gli scienziati impegnati nello sviluppo della teoria, le dispute sono state affrontate prevalentemente mediante argomenti fisici, mentre le interpretazioni filosofiche, per quanto importanti, sono rimaste a margine delle discussioni, senza ricevere mai una elaborazione rigorosa ed esaustiva. Nel complesso, si può mostrare che il dissenso tra sostenitori della teoria standard e sostenitori della necessità di nuove teorie non coincide con quello tra sostenitori di diverse concezioni filosofiche. Illustrerò nel capitolo I queste affermazioni considerando alcuni

episodi cruciali del dibattito tra i fisici teorici. Passerò in seguito (capitolo II) a considerare il dibattito tra i filosofi, mostrando come anche in tal caso, sia sul piano storico sia sul piano teorico, le alternative non si possano ridurre efficacemente a categorie come realismo e empirismo, ma richiedano lo sviluppo di un diverso sistema di riferimento concettuale, che molti fisici e filosofi hanno individuato nel kantismo (capitolo III). Alla luce dell'indagine storica, concluderò con alcune osservazioni sul dibattito attuale (capitolo IV).

I

IL DIBATTITO TRA I FISICI: COMPLETEZZA VS INCOMPLETEZZA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

È noto che agli albori della nuova meccanica Heisenberg e Schrödinger, benché presentassero due formulazioni matematicamente equivalenti, dissentirono nettamente riguardo all'interpretazione fisica del formalismo. Heisenberg elaborò una meccanica fondata sul concetto di osservabile, il cui formalismo rendeva perfettamente conto dei risultati sperimentali ma non si lasciava interpretare nei termini intuitivi di una rappresentazione classica della materia. Schrödinger, traendo ispirazione dall'ideale einsteiniano di riduzione della materia a onda, elaborò la nuova equazione differenziale del moto ipotizzando che la funzione di stato $\psi(t)$ (il cui modulo al quadrato esprime uno scalare) descrivesse la propagazione della densità di materia. Il dissenso tra i due sulla visualizzabilità dei sistemi fisici fu profondo e insanabile. Ma l'interpretazione di Schrödinger venne subito abbandonata *non* in base a considerazioni sul concetto di materia o sulla sua visualizzazione, bensì, come mostrò lo stesso Heisenberg nel 1927, perché si rivelò fisicamente inconsistente. Si trattò dunque di interpretare diversamente il significato della funzione d'onda¹.

L'interpretazione di Born (1926) muoveva inizialmente da una visualizzazione particellare e dallo studio di esperimenti di

¹ Per un'esposizione storica di questo momento del dibattito è ancora utile M. JAMMER, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York 1966, p. 271sgg., 283. Una variante dell'interpretazione di Schrödinger, che accosta quest'ultima alla teoria a molti mondi ed evita le obiezioni di Heisenberg, è proposta in V. ALLORI, S. GOLDSTEIN, R. TUMULKA, N. ZANGHÌ, *Many-Worlds and Schroedinger's First Quantum Theory*, «British Journal for the Philosophy of Science», 62/1 (2011), pp. 1-27.

collisione. Born considerò il modulo al quadrato della funzione d'onda ψ come la densità di probabilità di localizzare una particella in un dato luogo: ciò pone in evidenza il fatto che la funzione d'onda non si riferisce direttamente allo stato di un sistema, bensì ai risultati di osservazioni, e decreta il carattere irriducibilmente probabilistico della nuova meccanica. Questo risultato – che sotto il titolo di ‘regola di Born’ è poi entrato a far parte dei postulati della meccanica quantistica – alimentò il dibattito sui limiti di validità della nuova teoria, che, nell’interpretazione di Born, comportava la rinuncia al determinismo tipico della meccanica classica. Heisenberg intervenne con il suo celebre saggio del 1927 sul «contenuto intuitivo» della nuova meccanica, dove le questioni della conoscibilità degli stati fisici e dell’indeterminismo venivano chiarite in base a considerazioni fisico-matematiche. Egli ricavò dalla teoria le relazioni di indeterminazione, che stabiliscono un limite alla precisione con cui si possono determinare simultaneamente alcune coppie di variabili di stato, come posizione e momento. Da esse Heisenberg trasse delle fondamentali conseguenze filosofiche: la conoscenza della realtà (*Wirklichkeit*), contrariamente a quanto sostenuto da Schrödinger, può essere identificata con la descrizione matematica dei fenomeni sperimentali; quest’ultima comporta un elemento probabilistico, per cui Heisenberg preferisce parlare, piuttosto che di «pacchetto d’onde», di «pacchetto di probabilità» quale elemento fondamentale della nuova descrizione fisica; infine l’impossibilità di conoscere esattamente lo stato presente di un sistema rende impossibile applicare il classico principio di causalità allo studio dell’evoluzione del sistema stesso². Tuttavia l’analisi di Heisenberg comportava ancora una visualizzazione classica, in riferimento all’«effetto Compton» come fattore che impedirebbe di stabilire la traiettoria di un elettrone nell’osservazione sperimentale («un fotone

² W. HEISENBERG, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, «Zeitschrift für Physik», XLIII (1927), pp. 172-198; tr. it., *Indeterminazione e realtà*, a cura di G. Gembillo, Guida, Napoli 1991, pp. 35-67. (Quando non diversamente indicato le traduzioni sono mie.)

[*Lichtquant*] incontra un elettrone»³. Occorreva un chiarimento ulteriore sull'intreccio tra realtà e visualizzazione, per il quale Heisenberg, nell'*Aggiunta* in coda all'articolo del 1927, rimandò alle «più recenti ricerche» di Bohr.

Nello stesso periodo, infatti, Bohr stava sviluppando la sua celebre interpretazione della nuova meccanica, ed ebbe modo di discuterne con Heisenberg a Copenhagen prima che questi licenziasse le bozze del suo articolo. Bohr avanzò deciso sul terreno filosofico, introducendo il concetto di «aspetti complementari ma reciprocamente escludentisi della descrizione» fisica⁴. Le relazioni di indeterminazione, secondo Bohr, rifletterebero a livello matematico l'impossibilità teorica di applicare simultaneamente in fisica quantistica i concetti di coordinazione spazio-temporale (determinazione esatta della posizione/del tempo) e di connessione causale (determinazione esatta del momento/dell'energia). Bohr sostenne da subito che il concetto di complementarità tra diversi aspetti della descrizione trovava applicazione in altre scienze, come la biologia e la psicologia. Tuttavia, a sostegno della complementarità fisica, adduceva una ragione specificamente fisica: l'«interazione non trascurabile» tra strumento di misura e fenomeni atomici, che non renderebbe possibile ascrivere «una realtà indipendente nel senso fisico [...] né al fenomeno, né allo strumento di osservazione»⁵. Si discute ancora sul significato fisico di queste e analoghe formulazioni, che in ogni caso non venne mai sviluppato da Bohr⁶. Comunque egli considerò l'in-

³ *Ivi*, p. 174; tr. it. p. 40. Che la deduzione delle relazioni di indeterminazione usasse precisamente i «modelli classici» di rappresentazione venne rilevato da E. SCHRÖDINGER, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, «Die Naturwissenschaften», 23 (1935), pp. 807-812; 823-828; 844-849; tr. ingl. in J.A. WHEELER, W.H. ZURECK (eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Univ. Press, Princeton (N.J.) 1983, pp. 152-167:153-154.

⁴ N. BOHR, *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory*, «Nature», 121 (1928), pp. 580-590; tr. it in *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, Boringhieri, Torino 1961, p. 325.

⁵ *Ivi*, p. 324.

⁶ Sembra che Bohr intendesse correggere Heisenberg nella sua interpretazione a disturbo della misura, che presupponeva una rappresen-

terazione in questione «incontrollabile» e dunque non suscettibile di un'ulteriore analisi fisica, ricavandone in linea di principio la necessità di «rinunciare alla rappresentazione intuitiva in senso ordinario»⁷. Così le rappresentazioni ondulatoria e particellare della materia sono complementari, perché inseparabilmente associate a diversi contesti sperimentali, in cui si mira rispettivamente a mettere in evidenza diversi aspetti del sistema fisico. Le relazioni di indeterminazione di Heisenberg, da questo punto di vista, sarebbero «una semplice espressione simbolica della natura complementare della descrizione spazio-temporale e dell'esigenza della connessione causale»⁸. In generale, la meccanica quantistica avrebbe dunque posto dei limiti alle «possibilità di definizione» delle variabili fisiche. Negli anni seguenti Bohr riassunse la sua concezione della «indivisibilità» tra fenomeni atomici e apparati di misura rimarcando che il «fenomeno» quantistico è *per definizione* associato a un determinato contesto sperimentale. Alla base di questa definizione restava sempre il riferimento all'interazione fisica non analizzabile tra apparati e oggetti microscopici: essa costituisce dunque un cardine della filosofia dei “punti di vista” complementari, che Bohr sviluppò con diversi riferimenti dottrinali fino agli anni '50.

Muovendo dalla validità della nuova teoria, e presentandone le difficoltà interpretative nel senso di caratterizzazioni negative del processo conoscitivo, Heisenberg e Bohr, negli anni 1927-1928, gettarono le basi dell'interpretazione risultata dominante, nota a partire dagli anni '50 come *interpretazione*

tazione esclusivamente corpuscolare (senza traiettorie continue). Ma non è chiaro se la sua delimitazione della «definibilità» delle proprietà fisiche implicasse una teoria fisica della misura. È notevole la recente lettura di Don Howard, secondo cui Bohr, lungi dall'abbracciare il positivismo accennato da Heisenberg, con la «interazione non trascurabile» si sarebbe riferito *ante litteram* all'*entanglement*: D. HOWARD, *Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology*, «Philosophy of science», 71 (2004), pp. 669-682. Resterebbe oscuro, tuttavia, perché Bohr non riconoscesse questo fatto dopo che il termine, nel 1935, venne introdotto nel dibattito.

⁷ BOHR, *The Quantum Postulate*, cit., tr. it., p. 353.

⁸ *Ivi*, p. 350.

di Copenhagen. Questa conferiva alla meccanica quantistica il ruolo di teoria di riferimento per la conoscenza della natura microscopica e pietra di paragone per una rettifica di nozioni filosofiche come ‘oggetto’, ‘stato’ e ‘causalità’. Gli studi storici più recenti, tuttavia, hanno posto in evidenza con sempre maggiori dettagli la diversità di posizione nelle interpretazioni e nelle concezioni filosofiche dei fisici che, come Heisenberg e Bohr, ma anche Born, Pauli, Jordan, Dirac, Rosenfeld, si ritrovarono a fare fronte comune in difesa della validità della nuova meccanica contro le voci scettiche, e largamente minoritarie, di Einstein, Schrödinger, De Broglie, Bohm⁹. Diverse sono le tesi sui fattori storici, teorici e finanche psicologici che avrebbero contribuito alla definizione e alla diffusione dell’interpretazione “ortodossa”. Mi limiterò qui a due osservazioni relative al ruolo diverso svolto in questo processo dagli elementi filosofici e fisico-matematici.

In primo luogo va confutata l’opinione secondo cui l’interpretazione ortodossa si sarebbe consolidata intorno a un orientamento filosofico positivista. Questa opinione, storicamente e teoricamente scorretta, è particolarmente diffusa presso i critici di questa interpretazione. Per esempio Bell, in un celebre articolo del 1981, sostiene che molti fisici

influenzati da filosofie positiviste e operazioniste, pensarono che non solo fosse difficile trovare una rappresentazione coerente [dei fenomeni su scala atomica e subatomica], ma fosse sbagliato cercarne una: se non immorale, era certamente non professionale. Spingendosi ancora oltre, alcuni sostennero che le particelle atomiche e subatomiche non hanno alcuna proprietà definita prima di un’osservazione¹⁰.

⁹ Per un recente bilancio sulla ormai amplissima letteratura si veda K. CAMILLERI, *Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation*, «Perspectives on Science», 17 (2009), n. 1, pp. 26-57.

¹⁰ J. BELL, *Bertlmann’s Socks and the Nature of Reality*, «Journal de Physique», 42 (1981), suppl. n° 3, pp. 41-61; rist. in *Speakable and Un-speakable in Quantum mechanics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1987, 1993², tr. it. *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi, Milano 2010, p. 188.

L'articolo di Bell costituisce un ottimo esempio di come le nozioni filosofiche ed epistemologiche dei fisici, annidate di solito in affermazioni occasionali e poco sistematiche, sono state sovente confuse o fraintese a uso polemico. È dunque utile rileggere il modo in cui egli illustra la sua tesi riferendosi a Bohr, Heisenberg e Jordan:

Tra questi fisici vi era ad esempio Bohr, il quale, quando gli fu chiesto se l'algoritmo della meccanica quantistica rispecchiasse una realtà quantistica sottostante, una volta disse: «Non esiste un universo quantistico. Esiste solo una descrizione quantistica astratta. È sbagliato pensare che il compito della fisica sia quello di scoprire com'è la Natura. La fisica si occupa di ciò che noi possiamo dire sulla Natura».

Secondo Heisenberg (1958): «Negli esperimenti sugli eventi noi abbiamo a che fare con cose e fatti, con fenomeni che sono esattamente altrettanto reali quanto i fenomeni della vita quotidiana. Ma gli atomi e le stesse particelle elementari non sono altrettanto reali; formano un mondo di possibilità e di potenzialità piuttosto che un mondo di cose o di fatti».

E Jordan dichiarò con enfasi che le osservazioni non solo *disturbano* ciò che deve essere misurato, ma addirittura lo *producono*. Ad esempio, in una misura di posizione così come è eseguita con il microscopio a raggi gamma, «l'elettrone è costretto a una decisione. Noi lo obblighiamo ad assumere una posizione definita; prima esso non si trovava, in generale, né qui né là; non aveva ancora deciso una posizione ben definita [...] Noi stessi produciamo i risultati della misura»¹¹.

Vi è senza dubbio un nesso tra il concetto di 'osservabile', che qualifica le variabili della meccanica quantistica, e la negazione di una realtà fisica inaccessibile alla misurazione, che caratterizzò originariamente l'interpretazione di Heisenberg¹². Tuttavia, nonostante le molteplici connessioni teoriche

¹¹ *Ivi*, p. 189.

¹² Nel 1927 egli censurò effettivamente le speculazioni su un «mondo reale» trascendente rispetto ai limiti di esattezza prescritti dalla teoria, bollandole come «infruttuose e insensate» (W. HEISENBERG, *Über den anschaulichen Inhalt*, cit., p. 197).

e personali che legarono i fisici quantistici con il movimento neopositivista, non si può considerare il positivismo logico come filosofia ufficiale dei fisici di “Copenaghen” (cfr. par. II.1). Per restare agli esempi citati da Bell, valgano le seguenti considerazioni.

Innanzitutto bisogna osservare che la prima citazione proviene dalla testimonianza diretta di un allievo di Bohr, Aage Petersen, ma non trova riscontri letterali nei molti testi epistemologici di Bohr¹³. Le posizioni di Bohr, che fu certo generoso in materia di dichiarazioni filosofiche, non furono mai positiviste. Pur negando la realtà *indipendente* dei fenomeni quantistici, Bohr non ne negava la realtà *in genere*; piuttosto, sosteneva che l'applicazione del concetto di ‘realtà fisica’ a qualsiasi fenomeno richiedesse sempre la considerazione delle condizioni sperimentali del fenomeno stesso. Parallelamente, la «rinuncia alla rappresentazione intuitiva nel senso abituale» non significava rinuncia alla rappresentazione intuitiva in genere. Queste tesi non coincidevano con il criterio positivistico di negare significato al concetto metafisico di realtà, e si prestavano a inquadramenti filosofici diversi, come l'interpretazione “disposizionale” degli stati quantistici avanzata originariamente da Rosenfeld¹⁴ o quella kantiana intrapresa in diversi modi a

¹³ Bell la ricava da M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley Interscience, New York 1974, p. 204, che a sua volta rimanda ad A. PETERSEN, *Quantum Physics and the Philosophical Tradition*, M.I.T. Press, Cambridge (Mass.) 1968, p. 12. Si noti che Petersen, in questo volume, sosteneva che la fisica quantistica avrebbe sancito l'abbandono del «modo ontologico di pensare», cioè di ogni rappresentazione dell'essere in fisica, contrapponendo a essa l'«uso rigoroso del linguaggio» (pp. 128-129). Quest'affermazione esprimeva una concezione originale di Petersen, la quale, per quanto scarsamente sviluppata, potrebbe aver influito sulla sua rievocazione delle parole del maestro.

¹⁴ L. ROSENFELD, *Misunderstandings about the Foundations of Quantum Theory*, in S. KÖRNER (ed.), *Observation and Interpretation: A Symposium of Philosophers and Physicists*, “Proceedings of the Ninth Symposium of the Colston Research Society”, Butterworths Scientific Publications, London 1957, pp. 41-60. Cfr. la recente messa a punto di M. DORATO, *Disposition, Relational Properties and the Quantum World*, in M. KISTLER, R. GNASSONOV (eds.), *Dispositions and Causal Powers*, Ashgate, Aldershot 2007, pp. 249-270.

partire dagli anni '30 (v. cap. III.). Inoltre, come abbiamo già ricordato, il concetto di complementarietà era sviluppato attraverso congetture ipotetiche e finanche speculative in campi come la biologia e la psicologia. Bohr ne traeva ad esempio una difesa del libero arbitrio contro i programmi di spiegazione neurologica dei processi psichici¹⁵. Ma la chiamata in causa di un concetto come “libero arbitrio”, di nuovo, comportava dal punto di vista positivisticò uno sconfinamento nella metafisica. Così, nonostante l'adesione di Bohr a diverse iniziative dei filosofi neopositivisti, l'adozione del suo punto di vista produsse per questi ultimi cospicue difficoltà teoriche e la complementarietà non divenne mai l'interpretazione “ufficiale” del movimento.

Analoghe difficoltà dovette porre l'interpretazione di Jordan. Questi si dichiarava positivista, intendendo però con questo termine le posizioni di Bohr e Heisenberg. Il suo trattato del 1936, di fatto, includeva dichiarazioni di stretta osservanza positivisticò, per esempio l'affermazione secondo cui il mondo fisico sarebbe semplicemente un «sistema di pensiero, che facilita il nostro sguardo sulla pienezza dei fatti osservati». Allo stesso tempo, Jordan insisteva sul fatto che la nuova fisica avrebbe incoraggiato l'abbandono di ogni spiegazione meccanicistico-materialistica degli organismi e la conseguente rivalutazione del vitalismo e del finalismo in biologia, mentre «l'indeterminatezza acausale» dei processi atomici si riflettebbe nel «sentimento soggettivo della libertà del volere». Nel violare gli interdetti dei positivisti Jordan andava ben oltre Bohr, spingendosi per esempio a congetturare l'unità del «mondo interno» e del «mondo esterno» in base ai fenomeni telepatici e parapsicologici. In effetti, anche il passo citato da Bell mostra la tendenza idealistico-speculativa insita nel pensiero di Jordan, che non potè certo essere arruolato nel movimento della filosofia scientifica¹⁶.

¹⁵ Cfr. per es. N. BOHR, *The Quantum of Action and the Description of Nature* (1929), tr. it. in *Teoria dell'atomo*, cit., pp. 160-161.

¹⁶ P. JORDAN, *Anschauliche Quantentheorie*, Springer, Berlin 1936, pp. 280, 286-302, 309-316. Negli anni precedenti Jordan aveva presenta-

Per quanto riguarda Heisenberg, le dichiarazioni di stampo positivistico contenute nei celebri articoli del 1925-27 miravano di fatto a difendere la validità della nuova teoria in contrasto con i «consueti concetti cinematici». Ma egli mostrò ben presto un orientamento spiccatamente originale, elaborando un'interpretazione radicalmente diversa da quella dei neopositivisti, di cui – come dichiarò in seguito – non aveva mai condiviso l'impostazione. In primo luogo, fin dagli anni '30 Heisenberg fece propria una nozione di *a priori* di tipo kantiano, su cui avremo modo di tornare. Inoltre, proprio nel libro del 1958 citato da Bell, Heisenberg adottava il concetto aristotelico di *potentia* per descrivere il mondo quantistico. Egli adduceva dunque una nozione classica della metafisica per esprimere il carattere intrinsecamente probabilistico della teoria, su cui aveva insistito fin dall'inizio. Simili tesi non coincidevano col punto di vista di Bohr, ed è un'ironia della storia che esse abbiano trovato visibilità nel libro di Heisenberg che consacrò l'etichetta di “Copenhagen”¹⁷. Simili conciliazioni tra una metafisica probabilistica e la complementarietà, nel tentativo di esprimere la peculiarità della realtà atomica, vennero proposte da fisici come Born e Margenau¹⁸. Nella com-

to queste sue tesi in diverse sedi, tra cui la rivista dei neopositivisti «Erkenntnis» (ID., *Quantenphysikalische Bemerkungen zur Biologie und Psychologie*, «Erkenntnis», 4, (1934), pp. 215-252). Un tentativo di “adomesticare” le sue tesi è quello di E. ZILSEL, *P. Jordans Versuch, den Vitalismus quantenmechanisch zu retten*, «Erkenntnis», 5 (1935), pp. 56-64. Allo stesso problema, senza citare Jordan, si riferiva anche P. FRANK, *Zeigt sich in der modernen Physik ein Zug zu einer spiritualistischen Auffassung?*, *ivi*, pp. 65-80. Jordan non fu comunque ulteriormente coinvolto nelle iniziative del movimento neopositivista, forse anche a causa della sua convinta adesione al nazismo nel 1933.

¹⁷ Per un'esposizione complessiva dell'originale itinerario filosofico di Heisenberg si veda ora K. CAMILLERI, *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics. The Physicist as Philosopher*, Cambridge University Press, Cambridge 2009.

¹⁸ Per es. Born scrisse: «Io sostengo che le particelle sono reali, in quanto rappresentano delle invarianti nell'osservazione». E più avanti: «Il problema se le onde siano qualcosa di “reale” oppure un artificio per descrivere e predire fenomeni in maniera conveniente, è puramente un problema di preferenza. Personalmente, preferisco considerare un'onda

plessità delle posizioni assunte dai fisici, in generale, sarebbe difficile trovare un singolo sostenitore del “positivismo” descritto da Bell.

Veniamo dunque alla nostra seconda considerazione, ponendoci la domanda: quale fu il terreno su cui le posizioni dei fisici si consolidarono a formare un complesso omogeneo di nozioni? Questo terreno dovettero essere quei testi che meglio astravevano dai problemi filosofico-epistemologici della teoria, cioè i trattati e i manuali. Lo sviluppo matematico della teoria portò, fin dalle prime esposizioni complessive (Dirac nel 1930¹⁹; von Neumann nel 1932²⁰), alla formulazione dei postulati che sono ancora alla base di ogni esposizione canonica. I postulati sono i seguenti:

- associazione tra funzione Ψ e stato del sistema
- associazione tra osservabili e matrici hermitiane
- regola di Born: la funzione di stato descrive la probabilità degli esiti di misura
- riduzione del pacchetto d'onde: ogni osservazione elimina gli stati di sovrapposizione e a partire dall'istante dell'osservazione la funzione Ψ – se la misura non è distruttiva – ricomincia a evolvere a partire dallo stato rilevato

In base a queste regole fondamentali, la meccanica quantistica risulta capace di descrivere i risultati sperimentali con straordinaria esattezza, e come tale viene impiegata quotidianamente dai fisici. Riconoscere in un algoritmo, retto dai suddetti postulati, il nocciolo duro della teoria quantistica significa anche riconoscere che l'epistemologia dominante presso i

di probabilità, anche in uno spazio a $3N$ dimensioni, come una cosa reale, certamente come qualcosa di più che uno strumento per calcoli matematici» (M. BORN, *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Clarendon Press, Oxford 1949, tr. it. *Filosofia naturale della causalità e del caso*, Boringhieri, Torino 1962, pp. 132, 134).

¹⁹ P.A.M.. DIRAC, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford 1930.

²⁰ J. von NEUMANN, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, J. Springer, Berlin 1932.

fisici non è tanto una versione dell'interpretazione di Copenhagen, né il positivismo o il realismo, ma uno "strumentalismo" o "pragmatismo" filosoficamente disimpegnato, che trova nella coerenza e nell'efficacia predittiva del formalismo elementi sufficienti di soddisfazione teorica. Questa posizione comporta in genere un rifiuto di addentrarsi in questioni filosofiche, che è molto diverso dall'impegnativa assunzione neopositivista della non-sensatezza di tali questioni. Di fatto, dopo il periodo che va dagli anni '20 agli anni '50 – in cui i fisici avevano assunto diverse e anche complesse prospettive filosofico-epistemologiche – si deve registrare un impoverimento della dimensione filosofica del dibattito. Allo stesso tempo le molte interpretazioni alternative, e in genere il dibattito sui fondamenti, non ricevono oggi una grande attenzione presso la comunità scientifica.

È curioso che Bell, nella sua analisi della teoria quantistica, considerasse l'influsso della filosofia addirittura come un fattore di chiusura teorica. Le origini di questo giudizio si possono far risalire al dibattito che contrappose i sostenitori della teoria a Einstein. Quest'ultimo non cessò, fino ai primi anni '50, di contestare la validità descrittiva della nuova teoria, giudicandola incapace di descrivere gli stati fisici individuali – come deve fare una vera e propria teoria fisica –, dunque incompleta e da riferirsi a insiemi di particelle in analogia con la meccanica statistica classica. Nel difendere l'esigenza di cercare una nuova teoria, che egli credeva dover essere una teoria del campo continuo capace di dedurre le particelle, si appellò in varie occasioni a una intuizione o a un "istinto" cieco. Il fatto che Einstein non raggiungesse mai una teoria alternativa, unito alla citazione di alcuni suoi ormai celebri detti contro l'indeterminismo e il soggettivismo gnoseologico, può far credere che questa volta si trattasse veramente di un puro conflitto di ideali teoretici. Anche in questo caso, tuttavia, si può mostrare che gli argomenti decisivi di Einstein non poggiavano su tesi filosofiche, e che queste ultime, per quanto ispirassero l'interpretazione della teoria, non furono mai articolate in modo pienamente rigoroso. Di fatto, il riferimento di Einstein all'«istinto» voleva proprio rimarcare l'assenza di argomentazioni decisive a sostegno (e a discredito) della sua insoddisfa-

zione: queste argomentazioni sarebbero dovute provenire, infatti, da una teoria nuova e più potente.

Fin dal 1927, Einstein aveva cercato di sostenere la possibilità di esperimenti mentali capaci di mostrare la misurabilità simultanea di variabili unite dalle relazioni di indeterminazione, o “complementari”. Il dialogo che ebbe luogo con Bohr intorno ai suddetti esperimenti mentali costituisce un episodio appassionante della riflessione fisica, che non possiamo qui ricostruire nei dettagli²¹. Basti osservare che l’argomentazione si basava sui principi matematici della meccanica quantistica e – nel 1930 – della relatività generale, senza chiamare in causa altri piani del discorso. Infine Einstein non riuscì ad aggirare i limiti posti dalla teoria. In seguito, egli sviluppò un diverso argomento che mirava a dimostrare l’incompletezza della teoria. Questo argomento, pubblicato nel celebre articolo di Einstein, Podolski e Rosen del 1935, introdusse effettivamente un momento filosofico nella discussione con Bohr. Conviene citare il sommario proposto dagli autori nelle prime righe:

In una teoria completa si trova un elemento in corrispondenza a ciascun elemento della realtà. Una condizione sufficiente per la realtà di una grandezza fisica è la possibilità di prevederla con certezza senza perturbare il sistema. Nella meccanica quantistica, quando si hanno due grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano, la conoscenza dell’una preclude la conoscenza dell’altra. Allora, o è incompleta la descrizione della realtà fornita dalla funzione d’onda della meccanica quantistica, o non possono, queste due grandezze, essere simultaneamente reali. Studiando il problema di fare previsioni relative a un sistema sulla base di misure effettuate su un altro sistema, che abbia in precedenza interagito con il primo, si giunge alla conclusione che se il primo enunciato è falso, è falso anche il secondo. Se ne deduce che la descrizione della realtà fornita dalla funzione d’onda non è completa²².

²¹ Cfr. D. MURDOCH, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1987, pp. 155-178.20.

²² A. EINSTEIN, B. PODOLSKI, N. ROSEN, *Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality be considered Complete?*, «Physical Review», 47 (1935), pp. 777-80, tr. it. in A. EINSTEIN, *Opere scelte*, Borighieri, Torino 1988, pp. 374-82: 374 (d’ora in poi EPR).

Il criterio di indipendenza da qualsiasi perturbazione, pur presentandosi come condizione sufficiente ma non necessaria della 'realtà', in assenza di una «definizione esauriente di realtà» (come si legge poche righe dopo), serviva evidentemente a escludere l'ipotesi che la grandezza potesse essere determinata solo con il processo di misurazione. Ponendo la completezza della meccanica quantistica, in base al criterio secondo cui ogni elemento di realtà deve possedere un elemento corrispondente nella teoria, non resterebbe dunque che escludere la realtà simultanea delle variabili legate dalle relazioni di indeterminazione. Per impedire questa conclusione, ben diffusa presso i fisici quantistici, nella seconda parte dell'articolo viene studiato il caso di due sistemi in stato *entangled* e si mostra come la scelta di misurare l'una o l'altra delle variabili nel primo sistema determini un cambiamento nella funzione d'onda del secondo sistema, pur in assenza di interazione (si assume qui quel rifiuto dell'azione immediata a distanza che tornerà in discussione a partire dagli anni '60). Ciò rende possibile prevedere, mediante misure sul primo sistema, il valore di entrambe le grandezze corrispondenti nel secondo sistema. La possibilità di scegliere di misurare l'una o l'altra delle grandezze elimina la difficoltà posta dal fatto che esse non si possono misurare simultaneamente: importa che si possano entrambe misurare senza disturbo, il che implica per definizione che esse sono reali. In conclusione viene dunque sciolto il dilemma posto nelle prime righe del testo: dato che «grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano» sono simultaneamente reali, la descrizione della realtà fornita dalla funzione d'onda è incompleta.

Bohr replicò rapidamente, contestando «l'essenziale ambiguità» del criterio di realtà adottato da EPR²³. La locuzione «senza perturbare» sarebbe inappropriata, perché il contesto sperimentale modifica la determinazione delle variabili e dunque i due processi di misura ipotizzati da EPR non si possono

²³ N. BOHR, *Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality be considered Complete?*, «Physical Review», 48 (1935), pp. 696-702; poi in WHEELER, ZURECK (eds.), *Quantum Theory...*, cit., pp. 145-151:145.

porre sullo stesso piano come processi di determinazione della realtà. Einstein replicò a sua volta che la posizione di Bohr gli appariva logicamente possibile, ma «contraria al mio istinto scientifico». Il dibattito, ripreso in diverse occasioni, girò a vuoto fino a spegnersi. Nel 1948 Einstein ripresentò l'argomento di EPR – che non aveva mai abbandonato – nel numero monografico di «Dialectica» dedicato al concetto di complementarità²⁴. L'anno successivo Bohr, nella miscellanea curata da Schilpp in onore di Einstein, ripeté le sue obiezioni insistendo sulla definizione del concetto di «fenomeno» quantistico. Einstein dichiarò di non aver mai saputo formarsi una «esatta formulazione del principio di complementarità» e rigettò l'orientamento «positivistico» dei fisici quantistici²⁵. In effetti né Einstein né Bohr presentarono un'articolata teoria su realtà e fenomeno; d'altra parte, Bohr non riconobbe l'utilità dell'analisi di EPR per la comprensione fisica della teoria, mentre Einstein non individuò il punto fisico decisivo delle tesi di Bohr: l'«interazione incontrollabile» tra strumento di misura e sistema, racchiusa nel concetto di «indivisibilità»²⁶. Nel complesso lo spostamento del discorso sul piano filosofi-

²⁴ A. EINSTEIN, *Quanten-Mechanik und Wirklichkeit*, «Dialectica», 2, n. 3/4 (1948), pp. 320-324.

²⁵ Cfr. N. BOHR, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, pp. 201-241, e A. EINSTEIN, *Reply to Criticism*, p. 674 e 666 rispettivamente, in P.A. SCHILPP (ed.), *Albert Einstein Philosopher-scientist*, Open Court, La Salle 1949.

²⁶ Il testo di Bohr del '35 contiene diversi riferimenti a un'analisi fisica della complementarità: «l'interazione finita tra oggetto e apparati di misura, condizionata dalla stessa esistenza del quanto di azione – a causa dell'impossibilità di controllare la reazione dell'oggetto sull'apparato di misura se questo deve svolgere la sua funzione – comporta la necessità di una rinuncia all'ideale classico di causalità e di una radicale revisione della nostra attitudine rispetto al problema della realtà fisica» (BOHR, *Can Quantum-mechanical...*, cit., p. 146). Poiché l'interazione è «incontrollabile», l'attenzione è posta sulla «scelta» tra le procedure sperimentali, che comporta «un influsso sulle stesse condizioni che definiscono i possibili tipi di predizioni sul comportamento futuro del sistema» (p. 148). Fu Bell a riconoscere il valore dell'insistenza di Bohr sul contesto sperimentale, criticandone però la rinuncia a una spiegazione fisica della misura e l'oscurità nelle conclusioni filosofiche.

co coincise con l'incomprensione e rese sterile lo scambio tra i fisici.

Bisogna dire, d'altra parte, che Einstein non aveva smesso di elaborare argomenti fisici contro la completezza della meccanica quantistica. Per esempio già nel saggio *Physik und Realität* del 1936, che contiene un'approfondita esposizione delle sue vedute epistemologiche, egli presentava il seguente nuovo argomento contro la tesi secondo cui la funzione d'onda descriverebbe lo stato di un singolo sistema. Applicando per un tempo finito una piccola forza perturbatrice a un sistema, descritto dalla funzione ψ_1 , si ottiene una nuova ψ ; se quest'ultima descrivesse una «condizione reale del sistema», dovrebbe corrispondervi un valore di energia lievemente maggiore rispetto a quello associato alla ψ_1 ; ciò tuttavia, per valori sufficientemente piccoli della perturbazione, è in contrasto con i dati sperimentali, secondo cui «i valori di energia di uno stato intermedio fra due valori quantici contigui non esistono». Ne consegue che la funzione rappresenta solo una descrizione statistica, riferita a un insieme di sistemi, in cui sono espresse soltanto le probabilità relative ai diversi valori di energia del sistema²⁷.

Un secondo esempio si trova nella già citata *Reply to Criticism* della miscellanea Schilpp (1949). Qui Einstein discute il caso del decadimento di atomo radioattivo e dunque dell'emissione di una particella. La descrizione secondo la funzione d'onda ψ fornisce la probabilità della localizzazione della particella successivamente all'emissione, ma «non implica alcuna affermazione riguardo all'istante di tempo della disintegrazione dell'atomo radioattivo». Poiché è legittimo assumere che questo evento avvenga in un istante definito, ne consegue che la descrizione mediante la funzione ψ è incompleta. Einstein immagina qui la replica del «fisico quantistico», che consisterebbe nel negare la realtà di un processo che non può essere osservato se non mediante un disturbo sul sistema, in modo dunque da non permettere alcuna conclusione riguardo allo

²⁷ A. EINSTEIN, *Physik und Realität*, «Journal of the Franklin Institute», CCXXI (1936), 3, pp. 313-47; tr. it. in ID., *Opere scelte*, cit., pp. 528-563: 555-556.

stato del sistema non disturbato. Perciò l'obiezione in esame dipenderebbe dal fatto che «si postula qualcosa di non osservabile come reale»²⁸.

È significativo il fatto che Einstein, giunto quasi ai termini della sua attività scientifica, immaginasse un dialogo fittizio in cui, a un'obiezione *fisico-matematica* sulla meccanica quantistica, veniva opposta una replica *filosofica* poggiante sulle condizioni per definire la realtà. Questo atteggiamento allo stesso tempo di chiusura sul piano fisico della teoria quantistica e di spostamento del discorso sul piano filosofico coglie indubbiamente una tendenza dominante tra i fisici quantistici dell'epoca. Così, in seguito alla precedente discussione immaginaria (e riferendosi esplicitamente a Born, Pauli, Heitler, Bohr e Margenau, che erano presenti nella miscellanea), Einstein espresse senza mezzi termini la sua disapprovazione per la «fondamentale attitudine positivista» dei fisici quantistici, che coinciderebbe con l'*esse est percipi* di Berkeley²⁹. Queste pagine influenzarono probabilmente tutti i fisici che, come Bell, ne ripresero in seguito la lezione critica verso la meccanica quantistica standard. Tuttavia, come si chiariva più avanti nel testo, non si poteva trattare per Einstein di un conflitto ben definibile, e magari risolvibile, sul piano filosofico. L'insistenza di EPR sul concetto di realtà indipendente, che serviva ad arginare le suddette tendenze insite nella teorizzazione quantistica, non comportava che le sue posizioni potessero ridursi a un ben definito realismo filosofico. Commentando favorevolmente le ricostruzioni delle proprie vedute epistemologiche, svolte da Lenzen e Northrop, Einstein affermava che le sue «occasionalí affermazioni» in materia, così come quelle di qualsiasi fisico, non si possono sistematizzare rigorosamente e che il fisico, mosso dall'esigenza di perfezionare la sua teoria, si comporta su questo piano come un «opportunistá senza scrupoli», attingendo ora al realismo, ora al positivismo, ora all'idealismo, ora al platonismo³⁰. A conferma del fatto che

²⁸ ID., *Reply to Criticism*, cit., pp. 667-669.

²⁹ *Ivi*, p. 669. Il riferimento ai colleghi è a p. 666.

³⁰ *Ivi*, pp. 683-684.

non si trattava, con Bohr, di un aperto conflitto epistemologico si consideri ancora quanto, su questo piano, le posizioni di Einstein e Bohr fossero addirittura affini. Sottolineando il valore di «“categorie” o schemi di pensiero» per la costituzione di ogni oggettività, Einstein si avvicinava molto all'orientamento espresso da Bohr nel suo saggio, laddove si legge che la realtà deve essere concepita sempre secondo determinate «cornici formali»³¹. In effetti, come avremo modo di vedere nel cap. III, gli elementi comuni provenivano da un'ampia tradizione facente capo al nome di Kant.

L'atteggiamento di Einstein fu dunque quello, ben attestato nella tradizione della metodologia scientifica moderna, di trovare formulazioni fisico-matematiche per i problemi della teoria, senza spingersi sul piano dei principi filosofici. Se dunque accettò infine di spostare il dibattito su quest'ultimo piano, ciò dipese con ogni evidenza dall'atteggiamento di chiusura dei fisici quantistici: gli argomenti fisici di Einstein, dopo il 1935, non ricevettero dettagliate repliche; il primato da egli accordato al programma di una teoria del campo, quale alternativa alla teoria quantistica, venne liquidato come frutto di una adesione conservatrice alla prospettiva “classica”; l'ipotesi di una rivedibilità della teoria, per quanto occasionalmente riconosciuta dai fisici quantistici, non coincise mai con l'ammissione di significative debolezze nella sua formulazione. È opportuno, per comprendere pienamente il disagio di Einstein, ricordare come sia Bohr, sia Heisenberg dichiararono più volte che la nuova teoria fosse inevitabile e definitiva³². Questa fraseologia trovò un supporto matematico nella dimo-

³¹ *Ivi*, p. 673. N. BOHR, *Discussion with Einstein*, cit., in SCHILPP (ed.), *Albert Einstein...*, cit., p. 240.

³² Per una dettagliata esposizione di questo tema, nelle prime fasi della meccanica quantistica, si veda M. BELLER, *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*, Chicago Univ. Press, Chicago 1999, in part. pp. 191-194 (su Bohr). Ancora alla fine degli anni '60 Heisenberg ricordava: «Einstein non voleva riconoscere che la meccanica quantistica rappresentasse una descrizione definitivamente valida (*endgültig*), e ancora meno completa, di questi fenomeni [atomici]». (W. HEISENBERG, *Preface*, in *The Born-Einstein Letters*, Walker & Company, New York 1971, p. x).

strazione di Von Neumann (1932) dell'impossibilità di integrare la teoria con «variabili nascoste». Così, mentre Einstein si scontrava in un crescente isolamento e pessimismo con gli ostacoli matematici della sua teoria del campo generalizzato, alla fine degli anni '40 vi era diffuso accordo sul fatto che la meccanica quantistica potesse essere perfettibile nei dettagli, ma non sostituibile da alcuna teoria concettualmente alternativa di cui si intravedesse il profilo.

In questo contesto comparvero, nel 1952, gli articoli di Bohm in cui si proponeva una consistente teoria a variabili nascoste. Nel proporre la sua interpretazione, Bohm si richiamava alle tesi critiche di Einstein e affermava che l'interpretazione consueta, con la sua rinuncia descrittiva, era «coerente» ma non «necessaria»³³. Nonostante l'ispirazione esplicitamente antipositivistica delle sue considerazioni, Bohm sosteneva la sua interpretazione in base ad argomenti tipicamente fisico-matematici: l'inadeguatezza della prova di Von Neumann contro le variabili nascoste (essa non colpisce le variabili contestuali adottate da Bohm, che sono associate anche all'apparato di misura); la coerenza matematica e l'identica efficacia predittiva rispetto alla teoria standard; infine, la possibilità che la nuova teoria permettesse di risolvere le «insolubili difficoltà» affrontate dalla teoria standard per domini dell'ordine di grandezza uguali o minori a 10^{-13} cm. Tra questi argomenti avrebbe potuto decidere a favore della nuova teoria soltanto la maggiore efficacia esplicativa, ma questa rimaneva per ora una possibilità. Così Bohm raccomandava la nuova interpretazione per ragioni euristiche, in quanto essa lasciava immaginare modelli, modifiche matematiche e futuri riscontri sperimentali che la teoria standard escludeva in linea di principio³⁴. La nuova interpretazione rimaneva per ora a mezza strada tra la congettura metafisica e la fisica sperimentale: i sostenitori del-

³³ D. BOHM, *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables*, I-II, «Physical Review», 85 (1952), pp. 166-193; cfr. in WHEELER, ZUREK (eds.), *Quantum Theory*, cit., pp. 369-371.

³⁴ Questo punto, molto enfatizzato negli articoli del 1952, è riaffermato ancora in D. BOHM, *Causality and Chance in Modern Physics*, Routledge, London 1957, pp. 123-128.

l'interpretazione standard, come Heisenberg e Rosenfeld, poterono bollarla come un'ipotesi *ad hoc*, ispirata da una metafisica conservatrice, mentre lo stesso Einstein la ritenne un'ipotesi correttiva «troppo a buon mercato». Tuttavia, criticando con convinzione le restrizioni imposte da Heisenberg e Bohr alla teoria, e considerando le relazioni di indeterminazione come una «limitazione pratica» dovuta al «disturbo», Bohm riaccese l'interesse per il problema della misura.

Come è ben noto, i lavori di Bohm svolsero un ruolo decisivo nell'ispirare i massimi risultati di Bell nel campo dei fondamenti: la disuguaglianza che portò a stabilire sperimentalmente che ogni teoria compatibile con le previsioni della meccanica quantistica non rispetta il requisito di località (poi diversamente interpretato), e la critica del postulato di riduzione del pacchetto d'onde, fondata su un'interpretazione fisica del processo di misura. Sia la non-località, sia l'interpretazione a disturbo della misura erano già state trattate negli scritti di Bohm, che abbondavano inoltre di acute riflessioni filosofico-epistemologiche. Ancora una volta, però, l'incidenza dei lavori di Bell nel dibattito scientifico dipese dalla misura in cui egli diede uno sviluppo *fisico-matematico* ai problemi, rifuggendo esplicitamente dalla filosofia (per quanto proprio un'idea-guida realistica lo avesse spinto inizialmente a lavorare sulle teorie a variabili nascoste). Nel caso della misura, in effetti, Bell poneva in questione la consistenza logica del postulato di riduzione del pacchetto d'onde, rilevando la mancanza di una distinzione rigorosa tra 'apparato' di misura e 'sistema' quantistico, dunque tra realtà macroscopica e microscopica, e proclamava l'esigenza di una teoria fisica dell'interazione sperimentale. Secondo Bell questo costituiva il massimo problema teorico della meccanica quantistica, mentre la modifica del concetto di oggetto o l'indeterminismo, che erano stati al centro delle discussioni precedenti, apparivano come possibili conseguenze teoriche di una teoria in sé mal definita. Essa non è dunque soltanto rivedibile come qualsiasi teoria fisica, ma «porta in sé stessa i germi della sua distruzione»³⁵.

³⁵ J. BELL, M. NAUENBERG, *The Moral Aspect of Quantum Mechanics*, in A. DE SHALIT, H. FRESCHBACH, L. VAN HOVE (eds.), *Preludes in*

Riguardo alla soluzione del problema Bell non prese una posizione dogmatica. Considerò possibili, pur senza approvarle, le ipotesi interpretative che miravano a conservare la teoria postulando l'esistenza di molti mondi (Everett, DeWitt), mentre considerò decisamente avventata quella che introduce un'azione della mente nella riduzione del pacchetto (Wigner); sostenne a lungo la ragionevolezza e la semplicità della teoria di De Broglie-Bohm, senza nascondere però le difficoltà (a partire dalla generalizzazione relativistica); dichiarò infine la sua preferenza per modelli che modificassero l'equazione di Schrödinger in senso non-lineare e stocastico – come la teoria di Ghirardi-Rimini-Weber del collasso spontaneo della funzione d'onda (GRW) – per il fatto che in essi la riduzione del pacchetto d'onde viene descritta fisicamente e non postulata. Uno dei pregi dei lavori di Bell è proprio la considerazione del problema della misura come suscettibile di un'analisi fisica e non come un irriducibile conflitto di “attitudini filosofiche” dogmatiche. Del resto l'orientamento “realistico” di Bell era molto aperto a ipotesi che, per esempio, il “realista” Einstein aveva rigettato (come la non-località). Il punto dirimente, rispetto all'interpretazione “ortodossa” (pragmatismo o complementarietà), consisteva piuttosto nell'applicazione di un criterio regolativo epistemologico, che si può così formulare: includere nell'apparato ipotetico-deduttivo della teoria fisica quanti più elementi è possibile, riducendo al minimo distinzioni fisicamente indefinite e conseguenti postulati. In termini generali, qualsiasi fisico avrebbe convenuto con questo criterio, che appartiene all'essenza della fisica moderna: il punto dirimente stava appunto nella sua applicazione, cioè nella de-

Theoretical Physics, North-Holland, Amsterdam 1966 (pp. 279-286); poi in BELL, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, tr. it. cit., p. 37. Il volume contiene numerose analisi del problema della misura e delle relative distinzioni ‘sistema’-‘osservatore’ e ‘sistema’-‘apparato di misura’. Bell mostrò in diverse occasioni come questo problema si annidasse regolarmente nelle esposizioni dei manuali, proponendo di eliminare la stessa nozione di “misura” dalla teoria. Da ultimo si veda *Against ‘Measurement’* «Physics World», III (1990), in *Speakable and Unsayable*, cit., tr. it. pp. 286-311.

marcazione dei limiti dell'analisi. A tal fine, tra i fisici, la tesi dell'incompletezza della teoria standard è risultata la condizione necessaria e sufficiente alla riapertura del problema. Quest'ultima è certamente dipesa, a partire da Einstein, da diversi orientamenti sul concetto di realtà fisica, senza però che questi si esprimessero in definizioni e principi ampiamente condivisi (piuttosto, un lavoro di chiarimento concettuale è incominciato retrospettivamente, con la graduale diffusione di teorie alternative).

Proviamo dunque a riassumere e generalizzare le nostre considerazioni, che potrebbero essere ulteriormente puntualizzate attraverso l'analisi di altri momenti-chiave del dibattito. I fisici quantistici hanno condiviso in linea di principio un'epistemologia comprendente principi come la coerenza, la semplicità logica e l'evidenza sperimentale. Il dibattito si è concentrato su considerazioni elementari intorno al formalismo (le relazioni d'indeterminazione, l'evoluzione della funzione di stato, la distinzione strumento-oggetto nel postulato di riduzione del pacchetto d'onda). Il dissenso si è imperniato fin dal principio su una valutazione di completezza o incompletezza della nuova teoria (intesa come algoritmo riferito a osservazioni).

I due atteggiamenti assunti dai critici sono stati: modificazione del formalismo (variabili nascoste, nuovi termini non-lineari nell'equazione di stato) oppure ricerca di una teoria radicalmente diversa (come la teoria del campo di Einstein). Fatalmente, per il fatto di criticare la teoria empiricamente più efficace in nome di alternative sperimentalmente non superiori, se non più problematiche (o addirittura ancora non formulate), il fronte dei critici non ha scalfito la diffusione della teoria quantistica nella comunità scientifica. Di fatto, solo dopo gli esperimenti di Alain Aspect (a partire dal 1982) il lavoro di Bell ha ricevuto una diffusa attenzione e vi è stata maggiore apertura verso interpretazioni alternative. Accettare il formalismo e interpretarlo in modo soddisfacente, modificarlo dal suo interno o cercare una teoria diversa costituiscono oggi tre indirizzi presenti nella comunità scientifica e perseguiti dal punto di vista dell'analisi fisico-matematica e della ricerca sperimentale.

La sterilità del piano filosofico nel dibattito tra i fisici, su cui abbiamo lungamente insistito, non è dipesa tuttavia dalla

sua irrilevanza nelle questioni in gioco, ma dal modo in cui la filosofia è stata chiamata in causa. I fisici hanno cercato nella filosofia soprattutto argomenti a sostegno dell'una o dell'altra teoria fisica, in base a estrapolazioni dogmatiche aggiuntive, quindi un supporto estraneo alla metodologia scientifica in quei campi che la teoria non domina ancora, o dove è incerto che possa essere applicata. In questo modo la discussione ha perduto saldi punti di riferimento comuni e si è andati incontro ai più insolubili dissensi: alcune delle forti implicazioni metafisiche sostenute dagli uni, infatti, hanno costituito la pietra dello scandalo per altri (si pensi alla virtualità delle proprietà oggettive, al ruolo dell'osservatore, alle teorie cosmologiche sui molti universi). È mancato invece un richiamo alla filosofia in quanto atteggiamento critico verso le formulazioni dogmatiche (metafisiche e fisiche), che tematizza specificamente la limitatezza intrinseca della fisica in genere rispetto al campo della conoscenza e dell'esperienza umana. Fanno eccezione alcuni momenti della riflessione dei fisici, che sarà opportuno riconsiderare dopo aver acquisito uno sguardo d'insieme sul dibattito filosofico.

II

LE INTERPRETAZIONI FILOSOFICHE: ANALISI E CRITICA DELLA TEORIA QUANTISTICA

All'inizio degli anni '50, mentre il lavoro dei fisici nucleari e subnucleari si concentrava sulla teoria quantistica dei campi e su ambiziosi progetti sperimentali come quello del CERN, il dibattito sulla meccanica quantistica venne presentato da molti come una questione ormai puramente filosofica. Heisenberg, tracciando una storia dell'interpretazione di Copenhagen, sostenne che tutti gli oppositori vecchi e nuovi della teoria convergevano su un punto: «il ritorno al concetto di realtà della fisica classica, o, detto più in generale, all'ontologia del materialismo»³⁶. L'anno successivo Popper incluse Bohr e Heisenberg tra i bersagli della sua critica dello «strumentalismo» epistemologico, contrapponendo a esso la sua concezione realistica delle congetture e delle falsificazioni. Come Einstein – al quale si ispirava per la sua epistemologia – Popper accostava i fisici di “Copenhagen” al fenomenismo di Berkeley. Più severamente di Einstein, egli considerava il principio di complementarità come una premessa «*ad hoc* [...] la cui sola funzione è quella di evitare le critiche e di precludere la discussione delle interpretazioni fisiche»³⁷. Popper aveva

³⁶ W. HEISENBERG, *The Development of the Interpretation of the Quantum Theory*, in W. PAULI (ed.), *Niels Bohr and the Development of Physics. Essays dedicated to Niels Bohr of his 70th birthday*, Pergamon Press, London 1955, pp. 12-29; p. 17.

³⁷ K. POPPER, *Three Views Concerning Human Knowledge*, in H.D. LEWIS (ed.), *Contemporary British Philosophy*, Allen & Unwin, London 1956; poi come ch. III in ID., *Conjectures and Refutations*, Routledge & Kegan Paul, London 1963; tr. it. *Congetture e confutazioni*, Il Mulino, Bologna 1972, pp. 197-198.

già tra le mani il suo inedito *Poscritto alla Logica della scoperta scientifica*, in gran parte dedicato alla fisica quantistica, nel cui terzo e ultimo volume delineava uno «scisma» tra sostenitori di determinismo, realismo e oggettivismo (come Einstein, De Broglie, Schrödinger, Bohm) e sostenitori di indeterminismo, strumentalismo e soggettivismo (come Bohr, Heisenberg, Pauli)³⁸. In generale il dibattito epistemologico sulla fisica quantistica – nonostante i frequenti distinguo avanzati dai diversi autori – era ancora dominato da contrapposizioni tra strumentalismo o positivismo, per un verso, e realismo o materialismo, per l'altro, che avevano soprattutto la funzione polemica di denunciare nell'avversario una resistenza all'innovazione scientifica.

Abbiamo già osservato come simili coppie concettuali non fossero adeguate a catturare le posizioni dei fisici. Una conferma di questa tesi si ricava dall'introduzione di Redhead al problema dell'interpretazione della meccanica quantistica. Redhead premette che per interpretazione, in un primo senso, si intende il collegamento dell'algoritmo ai fatti mediante osservazioni sperimentali (si pensi al collegamento tra i postulati della teoria e i risultati letti sugli strumenti di misura, dunque a quanto ammesso pragmaticamente da ogni fisico). Accanto a questa si definisce un'interpretazione di secondo grado quale *spiegazione* dell'accordo tra il formalismo e i fatti. Riguardo alla funzione d'onda (che Redhead assume capace di fornire una descrizione completa dello stato di un sistema), in proposito si pone la questione fondamentale: «che cosa si può dire del valore di un'osservabile Q in meccanica quantistica quando lo stato del sistema non è un autostato di Q ?»³⁹. Redhead distingue tre tipi di risposta:

³⁸ ID., *Quantum Theory and the Schism in Physics. From the Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, ed. by W.W. Bartley III, vol. III, Unwin Heyman, London-Boston 1982; repr. Routledge, London-New York 1992, p. 174. Lo stesso Popper scrive (p. xvii) che questa parte del libro era pronta in bozze già nel 1957.

³⁹ M. REDHEAD, *Incompleteness, Non-locality, and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford 1989, p. 45.

- A. Q ha un valore distinto, ma sconosciuto (variabili nascoste).
- B. Q ha un valore indistinto (interpretazioni in base a potenzialità o propensità).
- C. Il valore di Q è «indefinito» o «privo di senso».

Si vede facilmente che queste tesi alternative – che peraltro escludono le ipotesi di modifica del formalismo – non si lasciano ridurre univocamente a categorie come quelle citate. La C corrisponde all'interpretazione standard, ma, poiché non si considera qui un pragmatismo neutrale, può corrispondere a orientamenti filosofici diversi (si pensi ai casi di Bohr, Jordan e Wigner). La A è associabile al realismo, ma in un certo senso anche la B, se si accoglie la risoluzione della realtà atomica in concetti come 'onda di probabilità' (Born), 'potenzialità' (Heisenberg) o 'latenza' (Margenau).

Proprio negli anni '50, all'epoca della comparsa delle prime interpretazioni e teorie alternative, venne meno di fatto quella corrispondenza tra interpretazione standard (dei fisici) e neopositivismo filosofico, che aveva dominato la prima fase del dibattito e che, avendo accompagnato la prima diffusione della teoria presso la comunità scientifica, condiziona ancora oggi l'indagine sui fondamenti. Un passaggio analogo è avvenuto sul piano filosofico. Nel seguito del capitolo, ripercorrendo alcuni momenti del dibattito filosofico, tenterò di mostrare che:

1. La convergenza tra meccanica quantistica "ortodossa" e neopositivismo, per quanto dotata di alcune ragioni e perciò considerata a lungo irresistibile, si è basata in realtà su una famiglia di interpretazioni, i cui presupposti filosofici sono stati ampiamente messi in discussione, a partire dagli anni '50, dagli stessi protagonisti del movimento.

2. Anche sul piano del realismo non vi è stata piena convergenza con un'interpretazione fisica, come mostra la posizione di Popper rispetto agli atteggiamenti di Einstein e Bohm. Inoltre, il realismo che Popper ha contrapposto all'interpretazione positivista non è mai stato assimilabile al materialismo ottocentesco di cui parlava Heisenberg, ma al contrario possiede alcuni significativi elementi in comune con l'epistemologia dei fisici di "Copenaghen".

3. A partire dagli anni '50, parallelamente alla diffusione delle alternative teoriche alla meccanica quantistica standard, vi è stata una significativa convergenza tra filosofi e storici sul riconoscimento del valore – irriducibile al “dato” empirico – dei concetti teorici, sia per la formulazione stessa della teoria, sia per il suo mutamento, graduale o rivoluzionario. Ciò ha reso opportuno un diverso inquadramento filosofico, che tuttavia non è stato intrapreso da subito, a causa del persistente pregiudizio secondo cui l'interpretazione consueta poteva valere come “fatto” alla base dell'interpretazione filosofica.

1. Interpretazione di Copenhagen e neopositivismo logico

Tra l'interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica e il movimento neopositivista vi furono una coincidenza cronologica e un'“affinità elettiva”, che insieme decretarono un sodalizio particolarmente solido tra il 1927 e gli anni '30. Gettiamo un rapido sguardo ad alcuni eventi salienti di questa vicenda. Nel 1927 comparvero gli articoli di Heisenberg e Bohr sulla “intuitività” e la “complementarietà” della nuova meccanica. Due anni dopo fu fondato, sotto la direzione di Moritz Schlick, il *Verein Ernst Mach* a Vienna. I mutamenti della fisica atomica furono fin dall'inizio considerati attentamente dal gruppo, soprattutto negli scritti dei membri di formazione fisica, cioè Philipp Frank e lo stesso Schlick, che era stato allievo di Planck. Benché la dura opposizione di Mach a Boltzmann sull'esistenza degli atomi fosse ormai superata, e lo stesso Schlick avesse ammesso in precedenza⁴⁰ l'esistenza delle entità «non percepite» come gli atomi mediante l'inferenza dai rispettivi effetti, la rottura epistemologica introdotta da Heisenberg e Bohr rispetto alla fisica precedente fu immediatamente salutata con favore. Tra i capisaldi dell'epistemologia del gruppo, in questa fase, vi erano come è noto il compito di un'analisi (e

⁴⁰ M. SCHLICK, *Allgemeine Erkenntnislehre*, Springer, Berlin 1918 (1925²), rist. della seconda ediz. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1979, pp. 233-255.

trascrizione) logico-formale delle teorie scientifiche, da condursi mediante la nuova logica matematica sviluppata in particolare da Frege e Russell, e l'interpretazione del formalismo in base alla coordinazione dei termini con le percezioni dei sensi. In questa prospettiva gli elementi essenziali della teoria fisica sono le percezioni dei sensi e il formalismo, che aiuta a collegare tra di loro queste ultime e a prevederne il decorso. Mediante la duplice operazione di analisi logica delle teorie e di collegamento dei termini alle percezioni elementari, le teorie fisiche verrebbero liberate da ogni elemento "metafisico" associato all'uso ambiguo di termini del linguaggio comune come 'realità', 'materia', 'causa'. Per il raggiungimento di tale obiettivo la nuova meccanica sembrò presentare un esempio straordinariamente efficace. I primi scritti di Heisenberg e Bohr, che ponevano fondamentali delimitazioni dell'oggettività fisica in base a criteri di osservabilità, fornivano già spunti interpretativi volti a eliminare ogni residuo metafisico dalla fisica atomica. In questi scritti si sostiene in effetti che sono i fatti sperimentali a imporre la delimitazione della conoscenza fisica, per cui non si tratterebbe nemmeno di una particolare interpretazione, ma di una trascrizione neutrale della relazione tra formalismo e osservazioni: per riprendere i termini di Redhead introdotti all'inizio del capitolo, le interpretazioni "di secondo grado", che spieghino tale relazione facendo ricorso a nozioni come realtà e oggetto, appartenerebbero dunque al dominio della metafisica⁴¹. Perciò non sorprende che gli stessi Heisenberg e Bohr non furono soltanto citati, ma direttamente invitati in diverse occasioni a partecipare alle iniziative del movimento per la filosofia scientifica: dalla rivista «Erkenntnis», che cominciò a comparire nel 1930, ai diversi Congressi per la filosofia scientifica, fino alla formazione del comitato per il grande progetto della *International Encyclopedia of Unified Science*.

⁴¹ Secondo Feyerabend (in una lettera a Kuhn del 1961) «l'idea fondamentale di Copenhagen» sarebbe che le relazioni di indeterminazione «sono la ripetizione di un fatto» (tr. it. in T. KUHN, *Dogma contro critica. Mondi possibili nella storia della scienza*, a cura di S. Gattei, Raffaello Cortina, Milano 2000, p. 276).

Un primo esempio del suddetto consenso teorico lo fornisce l'analisi dell'oggetto atomico. Nel manifesto di Hahn, Neurath e Carnap si legge che «la sostanza materiale è stata liquidata con la teoria atomica e la teoria del campo»⁴². Tenendo da parte la frettolosa e molto problematica inclusione della teoria del campo⁴³, il riferimento alla nuova teoria atomica presso i membri del gruppo va inteso nel modo seguente: negando in linea di principio la possibilità di caratterizzare gli oggetti microscopici in termini di particelle od onde, essa avrebbe eliminato il problema della rappresentazione oggettiva della materia tipica del meccanicismo e legata alla metafisica tradizionale (realismo o idealismo). Questa tesi aiutava i nuovi empiristi nel sostenere il progetto di un'analisi puramente fenomenistica della materia, che in anni recenti era stata intrapresa già da Whitehead⁴⁴ (1922), Russell⁴⁵ (1927) e dallo stesso Carnap⁴⁶ (1928). Come base per la formulazione di ogni proposizione scientifica vennero scelti negli anni '30 i termini del linguaggio osservativo macroscopico, come 'caldo' e 'rosso'. Questa prospettiva poteva trovare numerosi punti di contatto con le tesi di Bohr e Heisenberg (primato descrittivo del linguaggio classico, rinuncia alla visualizzazione dell'atomo), anche se ciò non favorì un'analisi critica della complementarità e dell'indeterminazione. Per esempio Frank, in un bilancio della situazione

⁴² H. HAHN, O. NEURATH, R. CARNAP, *Wissenschaftliche Weltauffassung. Der Wiener Kreis*, Artur Wolf Verlag, Wien 1929, tr. it. Laterza, Roma-Bari 1979, p. 88.

⁴³ Gli autori fanno riferimento probabilmente all'ipotesi della deduzione della massa dal campo elettromagnetico, che un decennio prima veniva data per acquisita da molti fisici. In realtà la questione era ancora aperta, e l'intera ipotesi venne scossa dalla scoperta di particelle massive neutre a partire dagli anni '30. Una ricostruzione equilibrata (che però non dà conto di quest'ultimo problema) si può trovare nelle lezioni di Schlick (M. SCHLICK, *Grundzüge der Naturphilosophie*, tr. it. in *Tra realismo e neo-positivismo*, Il Mulino, Bologna 1974, pp. 309-314).

⁴⁴ A.N. WHITEHEAD, *The Philosophical Aspects of the Principle of Relativity*, in «Proceedings of Aristotelian Society», XXII (1922), pp. 215-223

⁴⁵ B. RUSSELL, *The Analysis of Matter*, Kegan Paul-Trench-Trubner, London / Harcourt Brace, New York 1927.

⁴⁶ R. CARNAP, *Der Logische Aufbau der Welt*, Meiner, Hamburg, 1928.

scientifico-epistemologica del 1929, riferiva la spiegazione “a disturbo” dell’indeterminazione, senza coglierne l’estraneità rispetto al punto di vista positivistico; e ancora nelle *Foundations of physics* dell’incompiuta *International Encyclopedia of Unified Science* egli avrebbe sostenuto che la filosofia scientifica, in alternativa al materialismo e al realismo metafisico, propone una ricostruzione razionale della fisica adottando un «significato operativo» del concetto di materia che si applica soltanto a oggetti macroscopici, nel senso del «linguaggio quotidiano», ma non a concetti come «elettroni e fotoni»⁴⁷.

Il consenso dei neopositivisti fu massiccio anche riguardo all’indeterminismo quantistico – altro pilastro dello “scisma della fisica” secondo Popper. Nel 1930 Heisenberg stesso intervenne al congresso dei neopositivisti a Königsberg per ribadire il proprio punto di vista sulla causalità della fisica quantistica: le caratteristiche formali della teoria (indeterminazione della misura, previsioni statistiche) impedirebbero di applicare il principio classico di causalità, sia nella «concezione realistica» (descrizione corpuscolare o ondulatoria), sia come principio a priori in senso kantiano; inoltre, la «perturbazione» del sistema implicita in ogni osservazione comporterebbe che la nuova fisica non tratta più della «struttura della materia», ma del «processo osservativo» stesso, che a sua volta «non può essere oggettivato». Frank e Reichenbach, nella discussione, accolsero tutto questo come una «conferma» del punto di vista positivistico⁴⁸. Schlick intervenne nel 1931 precisando che la causalità quantistica, poiché non viola la prevedibilità dei risultati speri-

⁴⁷ Cfr., di P. FRANK, *Was bedeuten die gegenwärtigen physikalischen Theorien für die allgemeine Erkenntnislehre?*, «Erkenntnis», 1 (1930-31), pp. 126-157: 152-153; ID. *Foundations of Physics*, in O. NEURATH, R. CARNAP, C. MORRIS (ed. by), *Foundations of the Unity of Science*, 2 voll., Univ. of Chicago Press, Chicago 1955 (1ª ediz. 1938), in part. pp. 478-484.

⁴⁸ W. HEISENBERG, *Kausalgesetz und Quantenmechanik*, «Erkenntnis», 2 (1931), pp. 172-182. L’interessantissima discussione è trascritta qui alle pp. 183-188. È nel complesso evidente la difficoltà incontrata da Heisenberg per il fatto di tenere insieme l’interpretazione a “disturbo” delle relazioni di indeterminazione e la loro generalizzazione gnoseologica (pp. 186-187).

mentali, non comporterebbe comunque alcuna rottura con il principio di causalità in genere⁴⁹.

Ma la celebrazione del sodalizio fu senza dubbio il II Congresso internazionale per l'unità della scienza (*Das Kausalproblem*), che si tenne nel 1936 a Copenhagen presso la residenza di Niels Bohr e i cui atti furono pubblicati nel numero monografico di «Erkenntnis» di quell'anno. Apprendo i lavori con una relazione su *Kausalität und Komplementarität*, Bohr sottolineava l'omogeneità teorica tra il concetto di complementarità e l'epistemologia neopositivista. Frank, riprendendo la stessa tesi nel successivo intervento, provava a purificare la filosofia della complementarità dai possibili sviluppi metafisici associati alla sua estensione in biologia e psicologia⁵⁰. La relazione di Schlick, la cui morte improvvisa fu annunciata proprio all'inizio dei lavori, decretava in maniera perentoria la coincidenza delle due prospettive. La limitazione della conoscenza introdotta dalla meccanica quantistica non costituirebbe, secondo Schlick, una mancanza, ma una «proprietà obiettiva della natura»; «Il limite della conoscibilità [...] è al tempo stesso limite della regolarità della natura»; i nessi causali ignoti «non sussistono»; gli enunciati su stati «indeterminati» sono privi di senso⁵¹.

Ma proprio a partire dal 1936, come è noto, ebbe inizio la diaspora del movimento neopositivista, i cui principali esponenti si trasferirono negli Stati Uniti. Nel periodo americano venne meno il fitto dialogo con i fisici quantistici europei e ben presto l'accettazione della validità indiscussa della meccanica quantistica non corrispose più a un tentativo di assimilazione della difficile filosofia di Bohr. L'indirizzo di ricerca che mette in evidenza questo atteggiamento, già prefigurato nel-

⁴⁹ M. SCHLICK, *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik*, «Die Naturwissenschaften» 19 (1931), pp. 145-162, tr. it. in *Tra realismo e neopositivismo*, cit., p. 37-78.

⁵⁰ N. BOHR, *Kausalität und Komplementarität*, «Erkenntnis», 6 (1936), pp. 293-303; P. FRANK, *Philosophische Deutungen und Mißdeutungen der Quantentheorie*, *ivi*, pp. 303-317.

⁵¹ M. SCHLICK, *Quantentheorie und Erkennbarkeit der Natur*, «Erkenntnis», cit., pp. 317-326, tr. it. in *Tra realismo e neopositivismo*, cit., pp. 221-230: 223, 225, 226.

l'ultimo intervento di Schlick, è quello che prevedeva una logica speciale per la fisica quantistica. Le ricerche in tal senso erano state avviate già all'inizio degli anni '30. Un allievo di Frank, Martin Strauss, si era recato a Copenhagen per collaborare direttamente con Bohr e al Congresso del 1936 aveva proposto un'analisi del formalismo quantistico ispirata alle tesi della sintassi logica del linguaggio di Carnap⁵². Ma il tentativo più noto sarebbe stato quello di una logica a 3 valori proposta da Reichenbach nelle *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*⁵³. Reichenbach assumeva l'esigenza di riferirsi, nelle proposizioni scientifiche, anche ai valori non immediatamente osservabili delle grandezze fisiche, a quelli che egli chiamava «interfenomeni». Al tempo stesso egli assumeva la validità dell'algoritmo quantistico, il quale vieta di stabilire il valore esatto di determinate grandezze per descrivere lo stato presente di un sistema. Per dar conto dello statuto degli interfenomeni nella fisica quantistica, dunque, Reichenbach proponeva di modificare le tavole di verità della logica ordinaria, aggiungendo a 'vero' e 'falso' il valore 'indeterminato'. Ciò permette di includere nella descrizione fisica le grandezze sottoposte alle relazioni di indeterminazione, senza decretare l'insensatezza di parlarne. Ma da questo modo di procedere risulta una sorta di cristallizzazione della teoria quantistica, i cui elementi tradizionalmente più discussi, venendo assunti al livello di regole logiche, risultano esclusi da ogni possibile problematizzazione scientifica. La *opzione* di un calcolo logico speciale per la meccanica quantistica quale nuova logica venne da subito contestata, per esempio in base all'argomento che anche questo calcolo, insieme a tutta la teoria, si iscrive entro un orizzonte di pensiero logico in cui vale il principio del terzo escluso. Lo stesso Bohr, in ogni caso, non accolse le tesi della logica speciale, che negherebbe la necessaria validità descrittiva del linguaggio comune, e alla fine della sua carriera fi-

⁵² M. STRAUSS, *Komplementarität und Kausalität im Licht der logischen Synthax*, «Erkenntnis», cit., pp. 335-339. Strauss affermava di lavorare a una «logica della complementarità».

⁵³ Univ. of California Press, Berkeley-Los Angeles 1944.

nanche Carnap – pur insistendo tenacemente nella difesa dei capisaldi del progetto filosofico neopositivista – dichiarò con una certa diplomazia di «non saper vedere la necessità di un passo tanto radicale»⁴⁴. Ma il giudizio più severo, in proposito, lo emise Paul Feyerabend, il quale scrisse (1966) che la logica a 3 valori di Reichenbach consisterebbe in «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»⁵⁵.

Nonostante critiche come queste, che mettevano in evidenza un aspetto addirittura antiempirico della logica quantistica, l'idea di una logica quantistica a più valori continuò a venire apprezzata, per esempio da due dei maggiori filosofi americani legati all'insegnamento di Carnap e Reichenbach, ovvero Quine e Putnam. Il caso di Putnam è particolarmente significativo. Questi dichiarò che «la logica è tanto empirica quanto la geometria. Ha altrettanto senso parlare di “logica fisica” che di “geometria fisica”. Viviamo in un mondo con una logica non-classica»⁵⁶. Sviluppando quest'analogia, Putnam si spinse a paragonare le condizioni per la conservazione della logica classica in fisica quantistica al modo in cui si tenta di conservare la

⁵⁴ Cfr., rispettiv., N. BOHR, *On the Notions of Causality and Complementarity*, «Dialectica», II, (1948) 3/4, p. 317; R. CARNAP, *Philosophical Foundations of Physics*, ed. by M. Gardner, Basic books, New York 1966, p. 290.

⁵⁵ P. FEYERABEND, review to H. REICHENBACH, *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, cit. (repr. 1965), «The British Journal of the Philosophy of Science», 17 (1966), pp. 326-328. L'inservibilità della logica quantistica per l'interpretazione della teoria è affermata anche da esperti della disciplina. Cfr. per es. M.L. DALLA CHIARA-R. GIUNTINI, *La logica quantistica*, in G. BONIOLO (a cura di), *Filosofia della fisica*, Bruno Mondadori, Milano 1997, p. 642: «Sarebbe sbagliato cercare nella LQ uno strumento capace di risolvere in modo più o meno magico le difficoltà concettuali della teoria quantistica. Al contrario, la LQ risulta essere una parte essenziale di quelle difficoltà, in quanto è profondamente radicata nel formalismo e nella struttura matematica della teoria».

⁵⁶ H. PUTNAM, *Is Logic Empirical?*, “Boston Studies in the Philosophy of Science”, ed. by R.S. Cohen and M.W. Wartofsky, vol. 5, Reidel, Dordrecht 1968, pp. 211-241; rist. *The Logic of Quantum Mechanics*, in *Mathematics Matter and Method, Philosophical Papers*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1975, I, pp. 174-197: 184.

geometria euclidea di fronte alla teoria della relatività generale, mediante l'introduzione di «forze universali» *ad hoc*:

La situazione in meccanica quantistica può essere espressa così: noi potremmo conservare la logica classica, ma a un prezzo molto alto. Così come dobbiamo postulare misteriose “forze universali” se dobbiamo conservare la geometria euclidea “qualunque cosa accada”, così dobbiamo postulare agenti ugualmente misteriosi e davvero molto simili – per es. nella loro non individuabilità, nella loro violazione di tutte le regole causali naturali, nel loro carattere *ad hoc* – se dobbiamo riconciliare la meccanica quantistica con la logica classica mediante o i “potenziali quantistici” dei teorici delle variabili nascoste, o la metafisica di Bohr⁵⁷.

Come si evince da questa pagina Putnam escludeva che i fenomeni giustificassero l'assunzione di quelle violazioni delle leggi naturali che Reichenbach aveva chiamato «anomalie causali», riferendosi alla non-località. Questa tesi sarebbe stata smentita con gli esperimenti di Aspect. Così Reichenbach ebbe il merito di porre in evidenza la questione, ma influenzò il tentativo di interpretazione realistica di Putnam dirigendolo (a dispetto della successiva comparsa di teorie alternative) verso l'ipotesi di una modificazione della logica⁵⁸. Ma la posizione sostenuta da Putnam ci invita a una considerazione generale

⁵⁷ *Ivi*, p. 191. Sul carattere empirico della logica quantistica si vedano: D. GILLIES, *The Empiricist View of Logic* e relativa *Discussion* di P. PECERE, in C. CELLUCCI, E. GROSHOLZ, E. IPPOLITI (eds.), *Logic & Knowledge*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne (UK) 2011, ch. 8, pp. 175-196. Un ampio e aggiornato bilancio lo fa G. BACCIAGALUPPI, *Is Logic Empirical?*, in D. GABBAY, D. LEHMANN, K. ENGESSER (eds.), *Handbook of Quantum Logic*, Elsevier, Amsterdam 2009, pp. 49-78.

⁵⁸ Durante la revisione finale di questo saggio, grazie alla gentilezza del prof. Putnam, ho potuto leggere il suo articolo *The Curious Story of Quantum Logic* (conferenza dell'8 marzo 2011 al Computer Science Colloquium presso il Technion Israel Institute of Technology di Haifa), pubblicato nel frattempo nella raccolta di saggi *Philosophy in an Age of Science: Physics, Mathematics and Skepticism*, ed. by M. De Caro, D. Macarthur, Harvard Univ. Press, Cambridge (Mass.) 2012. In questo testo le tesi della logica quantistica sono abbandonate e la loro passata adozione, prima da parte di Reichenbach, poi dello stesso Putnam, viene spiegata in

sul sodalizio tra empiristi e fisici di Copenhagen. La disinvoltata attitudine ontologica e realistica ne mostra la distanza dal neopositivismo ortodosso; d'altra parte, l'interpretazione di Bohr è rifiutata senz'altro come «metafisica». Tutto questo è un esempio di come i punti fermi dell'interpretazione della meccanica quantistica lasciati in eredità dall'empirismo logico non fossero né l'antimetfisica, né la complementarità. Il vero tratto comune di queste interpretazioni, che rimase intatto anche presso molti dei suoi eredi americani, fu piuttosto l'assunzione della validità assoluta del formalismo quantistico, in quanto "fatto" indiscutibile che si analizza, ma non si critica.

Quest'assunzione, che divenne col tempo un pregiudizio, dipendeva da una visione troppo restrittiva del principio di osservabilità. I limiti della osservabilità e dell'esattezza della misura in meccanica quantistica erano evidenti e indiscussi. Tuttavia, Einstein aveva sostenuto che una teoria non statistica avrebbe potuto imporsi non mediante nuove conoscenze sperimentali, ma mediante deduzioni più efficaci, ricavate da principi «più semplici dal punto di vista logico», che permettessero anche di ricavare la meccanica quantistica come caso limite⁵⁹. Una posizione del genere, come abbiamo visto, fu sostenuta anche da Bohm, il quale sottolineò anche che nuove ipotesi avrebbero condotto a concepire nuovi esperimenti cruciali. Di fronte a obiezioni del genere i neopositivisti rimasero sordi, probabilmente perché esse rischiavano di mettere in

base allo stato della teoria prima dei lavori di Bell. Alla luce della disuguaglianza di Bell e degli esperimenti di Aspect, scrive Putnam, la non-località «cannot be transformed away by adopting a different theory, even one which uses a non-standard logic». Piuttosto che abbandonare la logica classica, dunque, Putnam ritiene che si debbano oggi prendere in seria considerazione le interpretazioni realistiche alternative: meccanica bohiana, modelli di collasso spontaneo della funzione d'onda (GRW), teoria a molti mondi: «I was wrong to think that a tenable realistic interpretation must give up classical logic. It was David Bohm, Hugh Everett, John Stewart Bell, Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini, Tullio Weber, Roderich Tumulka, and those who have continued and extended their investigations who have put us back on a sensible path».

⁵⁹ EINSTEIN, *Physik und Realität*, cit.; tr. it. in *Opere scelte*, cit., p. 559; *Considerations Concerning the Fundamentals of Theoretical Physics*, «Science», XCI (1940), pp. 487-492, tr. it. in *Opere scelte*, cit., p. 575.

gioco il loro programma filosofico. Ammettere la rivedibilità della meccanica quantistica, come pure a parole facevano, non doveva comportare la messa in discussione della teoria scientifica predittivamente più efficace, che costituiva la base analitica fondamentale per la ricerca di un criterio solido di significato e razionalità. Criticare la teoria e ammettere per contro la validità di ipotesi formulate su entità non osservabili poteva infatti aprire le porte a indirizzi di pensiero irrazionalistici e antiscientifici, come quelli che avevano tratto spunto tra la fine del secolo XIX e l'inizio del XX proprio dalla crisi della meccanica classica. Ma la neutralizzazione teorica di queste tendenze era proprio tra gli scopi che il movimento si era proposto originariamente di raggiungere.

Tuttavia, nello scambiare l'interpretazione di Copenhagen per un resoconto neutrale sui dati osservabili, i neopositivisti furono tratti in inganno. Abbiamo visto che sia Bohr, sia Heisenberg stabilirono i principi della propria interpretazione non mediante la semplice registrazione di un dato empirico – che come tale non godrebbe di validità universale – ma traendo dalla nuova meccanica l'indicazione di una ineliminabile (e inesplicabile) condizione di possibilità dell'esperienza (Popper parlò efficacemente di «miscela di positivismo e trascendentalismo»⁶⁰). Di fatto il principio di significanza, individuato in diversi modi nel collegamento con le osservazioni, presupponeva una neutralità del dato percettivo che si rivelò ben presto – come si vedrà nel par. 3 di questo capitolo – uno dei punti più problematici e tormentati dell'intera epistemologia neopositivista.

Un'altra conseguenza del rapporto scarsamente critico con l'interpretazione di Bohr e Heisenberg fu l'assumere la distinzione tra dominio macroscopico e dominio microscopico in quanto ambiti di validità di sistemi teorici differenti⁶¹. Costatare l'assenza di un criterio rigido di distinzione tra macroscopico e microscopico era un compito di analisi concettuale del-

⁶⁰ K. POPPER, *Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London 1959, *Appendix XI*, p. 453.

⁶¹ Cfr. M. SCHLICK, *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik*, cit., p. 72, P. FRANK, *Philosophische Deutungen*, cit., p. 318: il “taglio” tra descrizione classica e quantistica si trova tra elettrone e strumento di misura.

la teoria, che non richiedeva l'elaborazione di nuove ipotesi fisiche. In questo senso si può affermare che, aderendo troppo strettamente alle tesi di Bohr e Heisenberg, i filosofi empiristi non furono stavolta coerenti con i propri stessi principi. Nell'articolo programmatico *La svolta della filosofia*, sul primo numero di «Erkenntnis», Schlick descriveva la filosofia come «l'attività mediante la quale si chiarisce e si determina il senso degli enunciati. Dalla filosofia le proposizioni vengono esplicate, dalla scienza vengono verificate». Schlick paragonò in seguito questo compito esplicativo alla nobile arte dialettica di Socrate⁶². Ma Socrate non si era limitato ad analizzare le convinzioni dei propri interlocutori, bensì, esaminandone il presunto sapere, aveva spesso evidenziato la sua inadeguatezza alla luce di un autonomo criterio logico. Ironicamente, furono gli stessi fisici quantistici come Bohr e Pauli a rilevare la ristrettezza della concezione neopositivistica, consistente nel negare l'autonoma rilevanza della sfera concettuale per l'interpretazione di un formalismo efficace⁶³. Questo rilievo è valido, almeno, fino all'epoca in cui gli stessi protagonisti del movimento riconobbero l'irriducibilità dei termini teorici alle osservazioni e il movimento andò incontro alla propria metamorfosi.

2. Popper e le interpretazioni realistiche

L'interpretazione della teoria quantistica costituì sempre per Popper un oggetto privilegiato di analisi epistemologica,

⁶² M. SCHLICK, *Die Wende der Philosophie*, «Erkenntnis», 1 (1930/1931), pp. 4-11, tr. it. in *Tra realismo e neo-positivismo* cit., pp. 27-34: 31; ID., *L'École de Vienne et la philosophie traditionnelle*, in R. BAYER (ed.), *L'unité de la Science: la Méthode et les méthodes*, I^e Partie («Actualités scientifiques et Industrielles» N° 533), Travaux du IX^e Congrès International de Philosophie, Hermann et C^{ie}, Paris 1937, pp. 99-107, poi in SCHLICK, *Gesammelte Aufsätze 1926-1936*, hrsg. von F. Waismann, Gerold, Wien 1938, pp. 390sgg.

⁶³ Si legga la testimonianza di W. HEISENBERG, *Physics and Beyond. Encounters and Conversations*, Harper & Row, New York 1971, tr. it. *Fisica e oltre. Incontri con i protagonisti (1920-1961)*, Bollati Boringhieri, Torino 1984, pp. 225-231.

in quanto caso esemplare per argomentare il proprio dissenso rispetto alle tesi del neopositivismo. La *Logica della scoperta scientifica*, comparsa nel 1934 (in una collana diretta da Schlick), dedica alla meccanica quantistica un capitolo e numerose appendici, che sarebbero aumentate nella seconda edizione del 1959; lo stesso materiale aggiuntivo era destinato poi ad accrescersi fino a formare il citato ponderoso *Poscritto*, uscito in tre volumi nel 1982-3, gran parte del quale è attraversato dalla discussione della fisica quantistica. Nei suoi scritti Popper scosse tutti i pilastri principali che sostenevano l'adesione dei neopositivisti alla teoria, tuttavia non mise in discussione la validità di quest'ultima nella sua formulazione standard. Secondo l'epistemologia di Popper, infatti, soltanto una falsificazione sperimentale della teoria ne potrà rendere opportuno l'abbandono. Così, per quanto si discostasse dai neopositivisti nel sostenere che l'interpretazione di una teoria fisica data e la ricerca di nuove teorie possono sorreggersi su ipotesi puramente metafisiche, Popper restò in definitiva più prossimo all'impostazione interpretativa dei colleghi neopositivisti di quanto non fosse a quella del suo massimo referente scientifico Einstein.

La trattazione di Popper svolse comunque un ruolo storico cruciale per il dibattito successivo, per cui conviene esaminarne alcuni aspetti. Nel capitolo della *Logica della scoperta* dedicato al «Problema della base empirica», Popper contesta che una qualsiasi asserzione universale possa essere giustificata in base a un'«esperienza immediata». Ciò significa che i concetti non possono essere «ridotti a classi di esperienze», ma sono al contrario condizioni per l'ordinamento dei dati. Ciò è particolarmente evidente nel caso del pensiero scientifico, dove solitamente non si tratta di rilevare gruppi di «regolarità» immanenti alle comuni percezioni, ma di allestire esperimenti. In questo caso, «le osservazioni e i risultati sperimentali sono interpretazioni alla luce delle teorie»⁶⁴. A tutte queste considerazioni fa da sfondo un esplicito richiamo a

⁶⁴ K. POPPER, *Logic of Scientific Discovery*, cit., p. 95-107. Il riferimento è alla teoria della «costituzione» di Carnap e al successivo dibattito tra quest'ultimo e Neurath sulle proposizioni protocollari.

Kant. La concezione della conoscenza sperimentale avanzata da Popper è «la teoria kantiana dell'oggettività elaborata in modo coerente»⁶⁵. Di Kant, come era ormai consueto nel pensiero europeo, viene rimossa l'introduzione di verità valide a priori, che è sostituita dal metodo ipotetico delle congetture falsificabili; per il resto, il ruolo irriducibile dei concetti per l'interpretazione dei fenomeni naturali viene conservato. Molti anni dopo Popper affermò, con molta chiarezza, che si trattava di sostituire il motto di Kant: «il nostro intelletto non trae le proprie leggi (a priori) dalla natura, ma le impone alla natura», con il seguente: «l'intelletto non trae le proprie leggi dalla natura, ma cerca di imporre ad essa – con variabili possibilità di successo – le leggi che liberamente inventa»⁶⁶.

In base a queste premesse Popper procedeva alla sua critica dell'interpretazione di Heisenberg della meccanica quantistica. Egli sosteneva che le relazioni d'indeterminazione non concedono di dedurre una delimitazione epistemologica della conoscenza fisica in genere. Diverse considerazioni tecniche suggeriscono, al contrario, che la teoria quantistica debba essere intesa come teoria statistica, le cui leggi trattano di esperimenti su insiemi di particelle; le stesse relazioni di indeterminazione, dunque, riguarderebbero dispersioni statistiche dei valori in esperimenti su insiemi di particelle. In primo luogo Popper ricordava che, come aveva riconosciuto lo stesso Heisenberg, è possibile stabilire senza incertezza i valori di variabili nel *passato* di una particella osservata; il che, dal punto di vista positivistico, sarebbe già “metafisica”. Inoltre Popper tentava di dimostrare la possibilità di misurare in un medesimo contesto sperimentale i valori *simultanei* delle osservabili associate dalle relazioni di indeterminazione. L'esperimento mentale presentato a tal fine, che possiede una certa rassomi-

⁶⁵ *Ivi*, p. 109 nota.

⁶⁶ *Id.*, *On the Status of Science and of Metaphysics*, «Ratio», 1 (1958), 2, pp. 97-115; poi ch. 8, in *Conjectures and Refutations*, cit.; tr. it. p. 329. Il motto kantiano è in I. KANT, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können* (1783), in *Kant's gesammelte Schriften*, Akademie Ausgabe, Reimer, Berlin (de Gruyter, Berlin-New York) 1900-, IV (1903), § 36, p. 320.

gianza con quello di EPR pubblicato l'anno successivo, conteneva una scorrettezza formale che fu rilevata dallo stesso Einstein (in una lettera che Popper fece stampare in appendice alla seconda edizione della *Logica*)⁶⁷. Tuttavia, condividendo sostanzialmente le vedute critiche di Einstein sulla teoria quantistica, Popper restò persuaso per tutta la vita che il disturbo sperimentale non potesse mai offrire sostegno alla tesi dell'insensatezza di una completa determinazione meccanica degli oggetti microscopici. Continuò dunque a credere nella possibilità di misurare tutti i valori delle osservabili, sforzandosi di elaborare possibili conferme sperimentali della sua tesi⁶⁸.

In generale, Popper si trovava in perfetto accordo con l'epistemologia di Einstein e del resto, secondo la sua stessa testimonianza, era stata proprio la riflessione sulla teoria della relatività, intorno al 1919, a suggerirgli le sue prime idee di critica all'induttivismo neopositivistico. Un dissenso rispetto a Einstein sorse invece sul piano dell'elaborazione scientifica vera e propria. Mentre il fisico rimase alle prese fino alla fine con la ricerca di una teoria del campo alternativa alla meccanica quantistica, Popper prese atto delle difficoltà di questo tentativo e dell'assenza di alternative fisico-teoriche compiute, tentando dunque la via di una «interpretazione metafisica» della meccanica quantistica nella sua forma corrente⁶⁹. Si tratta dell'interpretazione fondata sul concetto di “propensità”, sviluppata al-

⁶⁷ K. POPPER, *Logic of Scientific Discovery*, cit., pp. 236-246 (esperimento di Popper); *App.* XII, pp. 457-460 (lettera di Einstein); in alcune note Popper riconosce l'errore, rilevato anche da altri fisici come C.F. von Weizsäcker e Heisenberg, e «ritira» l'esperimento (p. 236), mentre segnala la tesi «più debole, ma valida» di EPR (p. 244). Sia Popper (p. 220), sia Einstein (nella citata lettera) mostrano peraltro di aver chiaro che Heisenberg simpatizzava per un'interpretazione a “disturbo”.

⁶⁸ Una variante dell'esperimento di EPR è proposta in K. POPPER, *Quantum Theory*, cit., pp. 25-27. Per una critica di questo nuovo esperimento mentale si vedano: M. REDHEAD, *Popper and the Quantum Theory*, in A. O'HEAR (ed.), *Karl Popper: Philosophy and Problems*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (New York/Melbourne) 1996, pp. 163-176; G. GHIRARDI-L. MARINATTO-F. DE STEFANO (2007), *A Critical Analysis of Popper's Experiment*, arXiv:quant-ph/0702242.

⁶⁹ K. POPPER, *Quantum Theory*, cit., p. 93.

l'inizio degli anni '50 e poi rimasta sullo sfondo di tutte le successive indagini di Popper sulla teoria quantistica. L'idea di fondo di questa interpretazione consiste nell'assumere delle intrinseche «propensità», ovvero «misure della possibilità» o «probabilità oggettive», che stanno alla base del comportamento delle particelle previsto dalla teoria⁷⁰. Popper introduceva così un nuovo concetto fisico fondamentale: per giustificare quest'ardita mossa si appoggiava, oltre che sull'elemento probabilistico del formalismo, su diverse analogie tratte dalla storia della meccanica quantistica: per esempio l'ipotesi di Einstein e De Broglie di un campo associato alle particelle e l'onda di probabilità di Born⁷¹. L'interpretazione ammette dunque due concetti elementari, quello di particella e quello di propensità, e in base ad essi deve risolvere le principali difficoltà della teoria. Le propensità associate alle particelle sono responsabili del loro comportamento stocastico, che non avrebbe nulla a che fare con una presunta ignoranza dell'osservatore. Essendo le propensità legate al contesto sperimentale – il quale condiziona il calcolo delle probabilità che le particelle assumano determinati valori delle variabili – anche la modificazione della funzione d'onda a seconda dell'apparato sperimentale, per esempio nell'esperimento delle due fenditure, non comporterebbe alcun collasso non-lineare della funzione d'onda. Infine, poiché la funzione d'onda fornisce un'informazione su processi essenzialmente stocastici, anche la sua modificazione successiva alla misura non comporterebbe nessun processo fisico associabile al collasso della funzione d'onda. Per rimarcare l'importanza di quest'ultimo punto, Popper scrisse un celebre saggio dal titolo *Quantum Mechanics without "the Observer"*⁷², in cui criticava

⁷⁰ Per queste denominazioni equivalenti si veda, per es., K. POPPER, *The Open Universe. An Argument for Indeterminism. From the Postscript*, cit., vol. II (1982), rist. Routledge, London 1991, p. 104.

⁷¹ ID., *Quantum Theory*, cit., pp. 52, 81-84 (sul *Gespensterfeld* di De Broglie-Einstein), p. 130 (su Born).

⁷² ID., *Quantum Mechanics without "the Observer"* in M. BUNGE (ed.), *Quantum Theory and Reality*, ("Studies in the Foundation, Methodology and Philosophy of Science" vol. II), Springer Verlag, Berlin-New York 1967, pp. 7-44.

fermamente il concorso del processo di misura nella determinazione delle proprietà quantistiche.

L'interpretazione di Popper si fondava dunque su un realismo riguardo alle entità fisiche. Essa però non comportava un ingenuo referenzialismo (del resto, finanche Boltzmann aveva infine riconosciuto il carattere ipotetico del concetto di atomo), ma conferiva una funzione necessaria all'apparato concettuale ipotetico per il collegamento tra formalismo matematico e percezioni. Lo stesso concetto fondamentale di propensità non si lascia visualizzare direttamente, ma si definisce, come quello classico di campo, in base ai suoi effetti dinamici (Popper parla di «campi di propensità»). L'ambizione di Popper era di conciliare, mediante la sua interpretazione, i punti di vista controversi dei grandi fisici: la dipendenza delle propensità dal contesto sperimentale ne chiariva il carattere «relazionale» e nondimeno «reale», giustificando alcune intuizioni di Bohr. Il fatto che esse siano proprietà delle particelle conferiva tuttavia alla teoria quel carattere realistico che, pur in mancanza di una spiegazione delle particelle, avrebbe potuto forse soddisfare Schrödinger. Infine anche Einstein veniva invocato in quanto era stato «il primo a operare con probabilità di transizione, cioè con *probabilità singolari, riguardanti un singolo atomo*»⁷³. Il punto essenziale della strategia di Popper consisteva nel sostenere che, per quanto una teoria del campo (nel senso di Einstein) sarebbe preferibile filosoficamente, in quanto «offre la possibilità di spiegare la materia mediante qualcosa che non è materia», nondimeno la teoria quantistica è «una teoria particellare», le cui equazioni esprimono proprietà delle particelle, mentre queste ultime «non compaiono esplicitamente nel formalismo» e dunque sono postulate. Accanto alle particelle si ammette poi anche la realtà *sui generis* delle propensità: ne ri-

⁷³ Si veda (anche per i passi successivi) tutta la discussione in *Quantum Theory*, cit., pp. 125-130 e, per il richiamo a Einstein, p. 208. Si noti però che, nell'articolo citato da Popper, Einstein dichiarava la sua insoddisfazione per il fatto che la teoria quantistica della radiazione «lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari» (A. EINSTEIN, *Zur Quantentheorie der Strahlung*, «Physikalische Zeitschrift», XVIII (1917), pp. 121-128, tr. it. in *Opere scelte*, cit., p. 359).

sulta un dualismo oggettivo che sfugge al dilemma onda-particella e al vicolo cieco della complementarietà.

Considerando tutte queste caratteristiche dell'interpretazione di Popper, ci si domanda come mai quest'ultimo, escludendo ogni ipotesi di modificazione del formalismo quantistico, non prese mai in seria considerazione la teoria a variabili nascoste proposta da Bohm⁷⁴. La teoria di Bohm era fondamentalmente realistica e particellare: essa spiegava le traiettorie mediante una funzione d'onda che guiderebbe il moto delle particelle e muterebbe le loro traiettorie in modo non locale, al variare del contesto col quale essa interagisce; era predittivamente equivalente alla teoria standard ma, secondo il parere espresso da Bohm, poteva lasciar immaginare possibili esperimenti cruciali che in futuro la mettersero alla prova contro la teoria standard e la stessa relatività. Si trattava senz'altro di «idee ardite, anticipazioni ingiustificate e pensiero speculativo», proprio il genere di elementi che Popper considerava essenziali a ogni interpretazione della natura⁷⁵. Popper era ben consapevole di questa alternativa. Per esempio, nel 1957 Popper e Bohm parteciparono al Colston Colloquium di Bristol dedicato a *Observation and Interpretation*. Popper non poté essere presente e fece leggere a Feyerabend il suo testo sulla teoria delle propensità: Bohm reagì giudicandola inutile; Popper replicò negli Atti alle osservazioni degli altri relatori, contestando a Bohm la derivazione di una teoria probabilistica da una base deterministica, un tentativo che a suo parere sarebbe stato logicamente incoerente⁷⁶. Era il determinismo la ragione del dissenso di Popper, che dunque fu puramente filosofico. L'interpretazione di Popper, infatti, mirava a dare un'applica-

⁷⁴ Sulla scelta di interpretare piuttosto che modificare il formalismo standard cfr. *Quantum Theory*, cit., pp. 101, 125.

⁷⁵ K. POPPER, *Logic of Scientific Discovery* cit., p. 280.

⁷⁶ ID., *The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability, and the Quantum Theory*, in S. KÖRNER (ed.), *Observation and Interpretation*, cit., pp. 65-70 e 88-89. Bohm, in sede di dibattito, aveva criticato l'interpretazione di Popper sostenendo che essa «non risolve alcun problema della meccanica quantistica. La dualità onda-particella è altrettanto difficile se la si considera mediante le propensità che se la si considera in qualsiasi altro modo» (*ivi*, p. 79).

zione fisica al principio fondamentale dell'indeterminismo. A parità di condizioni iniziali, in base al concetto di propensità, non è possibile in linea di principio prevedere l'intero decorso dei valori cinematici di una singola particella. La meccanica a variabili nascoste di Bohm, al contrario, intende salvare, oltre alla visualizzabilità delle particelle, anche il determinismo rispetto all'evoluzione del loro stato; in linea di principio essa intende dare un fondamento oggettivo all'elemento statistico della teoria, tenendo ferma l'impossibilità pratica di prevedere i valori di tutte le variabili come in meccanica classica.

L'indeterminismo di Popper poggiava fin dall'inizio su argomenti extra-fisici, che peraltro mutarono con il passare degli anni. Inizialmente Popper sosteneva l'opportunità di un'interpretazione indeterministica della fisica quale antidoto al dualismo ontologico che deriva dall'assunzione del determinismo. Se infatti si assume che ogni fenomeno naturale potrebbe essere in linea di principio prevedibile, allora anche la comparsa di fenomeni culturali come le sinfonie di Mozart dovrebbe essere implicata nelle condizioni iniziali dell'universo. Un'analoga preoccupazione aveva spinto Kant, che assumeva il determinismo in fisica, a introdurre il fondamentale dualismo tra fenomeni e cose in sé per salvaguardare la possibilità del libero arbitrio e della morale. Al fine di arginare l'esito paradossale del determinismo, e al tempo stesso evitare il dualismo metafisico, Popper presentava una serie di argomenti contro la tesi del determinismo scientifico. Questi argomenti – che non conviene qui esaminare in dettaglio – erano fondati sulla fallibilità della conoscenza umana, sull'asimmetria tra passato e futuro, sull'imprevedibilità di fenomeni che includono teorie non ancora formulate: insomma, su considerazioni in parte o del tutto estranee alla fisica, che tuttavia avrebbero mostrato l'opportunità di sviluppare un'interpretazione non deterministica della fisica. La teoria delle propensità si presentava dunque come alternativa alle interpretazioni deterministiche della fisica, la cui ragion d'essere affondava nelle precedenti argomentazioni filosofiche⁷⁷.

⁷⁷ I suddetti argomenti sono sviluppati in ID., *The Open Universe*, cit. Qui si trova anche il riferimento critico a Kant e alle sue preoccupazioni «infondate» sull'incompatibilità tra fisica e morale (pp. 47-49, 79).

Negli anni '70 Popper si avvicinò gradualmente a una concezione ontologicamente pluralistica della realtà, rifiutando le tesi del riduzionismo attraverso un'intensa riflessione sul problema mente-corpo. Nella nuova sistemazione del suo pensiero si pone una distinzione di piano tra realtà fisica (Mondo 1), realtà psichica (Mondo 2) e realtà degli oggetti linguistici e culturali (Mondo 3), e si sostiene la tesi di un'interazione tra questi diversi domini della realtà. Popper sostenne che, in questa prospettiva, l'indeterminismo fisico «non è sufficiente». Ma si può aggiungere che, ormai, esso non è più necessario. Per negare che, come afferma il riduzionismo fisico, «nulla di intrinsecamente nuovo entra ai livelli superiori», una fisica indeterministica può essere di sostegno, ma non si può affermare che sia una condizione necessaria. Popper, infatti, negava esplicitamente la sola tesi che, sul piano scientifico, avrebbe reso possibile una spiegazione riduzionistica della mente, ovvero la teoria dell'identità tra fenomeni psichici e fisici, preferendo ad essa il dualismo e l'interazionismo di Descartes⁷⁸. Ma Descartes, grazie a queste tesi metafisiche, poteva conciliare la libertà del volere con un rigido determinismo in fisica. Viceversa, se si assume che i livelli della realtà siano ontologicamente autonomi, allora una fisica deterministica non comporta alcuna restrizione per la psicologia e le scienze storiche. Popper, dunque, non aveva più bisogno di sostenere l'ipotesi delle propensità, che lo aveva portato a rigettare la teoria di Bohm. Su questo punto, per una volta, il grande filosofo restò forse troppo affezionato alla sua congettura e si precluse uno sguardo spregiudicato sul dinamico stato della teoria quantistica. Vedremo tra breve come diverso, sulla scia di Popper, fu l'atteggiamento del suo allievo Feyerabend⁷⁹.

⁷⁸ Per una presentazione schematica si veda ID., *Scientific Reduction and the Essential Incompleteness of all Science*, in F.J. AYALA, T. DOBZHANSKY (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology: Reduction and Related Problems*, Univ. of California Press, Berkeley-Los Angeles 1974, pp. 259-284; rist. in POPPER, *The Open Universe*, cit., pp. 131-174: 155. Per la prossimità con l'interazionismo cartesiano si veda già *Quantum Theory* cit., p. 192 nota.

⁷⁹ Per maggiori particolari sulla vicenda accennata si veda P. PECERE, *Quantum Mechanics and Realistic Ontology. Historical and Critical*

Il caso di Popper offre comunque spunto a diverse importanti considerazioni. L'atteggiamento da egli assunto nei confronti della fisica quantistica condivide una caratteristica generale del pensiero filosofico e scientifico moderno, che nella cornice neopositivistica era negata: sul piano filosofico si possono trovare argomenti che orientino la scelta tra le alternative che abbiamo riscontrato sul piano fisico – tenere per vero il formalismo, modificarlo o abbandonarlo in cerca di una teoria del tutto diversa. Allo stesso tempo, un generico orientamento “realistico” non basta a determinare questa scelta, ma il piano metafisico può orientare in diversi modi l'interpretazione – com'è avvenuto anche in seguito⁸⁰. All'inizio degli anni '50, nel giro di pochi anni, tutte e tre le suddette alternative rispetto alla teoria – rappresentate rispettivamente da Popper, Bohm ed Einstein – trovarono espressione e si incrociarono in vari modi a Princeton. Nel 1950 Popper presentò una relazione di fronte a una platea in cui si trovava anche Einstein, accennando la sua nuova interpretazione indeterministica; Bohm aveva lavorato proprio a Princeton, a stretto contatto con Einstein, ma in seguito al suo drammatico arresto (si era rifiutato nel 1949 di rispondere ad alcune domande di fronte alla commissione McCarthy) fu licenziato e dovette lasciare l'Università nel 1951; l'anno successivo avrebbe pubblicato la sua proposta di modificazione del formalismo. Abbiamo detto del dissenso reciproco tra Popper e Bohm. Quanto allo stesso Einstein, questi per un verso non

Remarks, pp. 135-150, in N. GAVRILUȚĂ, P. DUNCA (eds.), *Knowledge and Action within the Knowledge Based Society*, Proceedings of the International Conference Baia Mare, 9-12 December 2010, Academia Română, Iasi 2011, pp. 47-58.

⁸⁰ Un esempio è il realismo di Shimony, fortemente connotato in termini metafisico-speculativi, che ha condotto quest'ultimo a prediligere le ipotesi di modificazione del formalismo in senso non-lineare e stocastico. Si veda per es. A. SHIMONY, *Search for a Worldview which Can Accommodate our Knowledge of Microphysics* (1989) in J. CUSHING, E. MULLIN (eds.) *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, Notre Dame Univ. Press, Notre Dame (Ind.) 1989; poi in ID., *Search for a Naturalistic World View*, Vol. I, *Scientific Method and Epistemology*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1993, pp. 62-76.

poteva apprezzare l'indeterminismo di Popper, che conservava di fatto la validità oggettiva della teoria quantistica rinunciando alla spiegazione delle particelle. In una lettera del 1952, inviata da Princeton all'amico Michele Besso, Einstein affermava ancora: «una teoria veramente razionale dovrebbe *dedurre* le particelle elementari (elettroni ecc.) e non porle in partenza»⁸¹. Per l'altro verso, nel 1953 egli respinse pubblicamente la teoria di Bohm, poiché essa salvava la teoria quantistica mediante assunzioni come l'azione a distanza⁸². Tornando a Popper, infine, questi considerò la teoria del campo cercata da Einstein e altri come un obiettivo ragionevole, ma «confutato» a partire dagli anni '30 da ogni scoperta di particelle neutre⁸³. Infine, dopo gli esperimenti di Aspect, Popper giunse fino a concedere con riluttanza la non-località dei fenomeni naturali, nondimeno restò chiuso a qualsiasi teoria deterministica come quella bohmiiana. Di fatto, con la sua teoria indeterministica dei campi di propensità, Popper risultava più prossimo alle posizioni probabilistiche dei fisici di Copenhagen⁸⁴.

⁸¹ Lettera a M. Besso del 10 agosto 1952, in A. EINSTEIN-M. BESSO, *Correspondance 1903-1955*, Hermann, Paris 1972; tr. it. in *Opere scelte*, cit., p. 698.

⁸² A. EINSTEIN, *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 Inc., New York 1953, pp. 33-40.

⁸³ Per le riserve sulla teoria delle particelle cfr. K. POPPER, *Quantum Theory*, cit., pp. 138-141. Per il particolare riferimento alla teoria elettromagnetica della massa vedi *ivi*, pp. 193-94 e ID., *The Open Universe*, cit., pp. 139-140.

⁸⁴ In *Quantum Theory*, cit., p. 189, Popper dichiarava il suo «debito» verso le «idee intuitive» di carattere probabilistico espresse nel classico articolo di N. BOHR, H.A. KRAMERS, J.C. SLATER, *The Quantum Theory of Radiation*, «Philosophical Magazine», 47 (1924), pp. 785-822. Come ricordava Popper stesso (p. 132), questo riferimento era condiviso da HEISENBERG, *The Development*, cit., p. 12 (uscito nel 1955). Per contro Popper osservava giustamente che l'idea di una «realtà» delle «onde di probabilità» è al massimo «implicita» nel testo citato e comunque non si trova nei «primi articoli» di Bohr e Heisenberg.

Come si vede, parlare di realismo non basta a definire la posizione alternativa a quella dei neopositivisti nel vivace dibattito del secondo Dopoguerra. Il tratto comune alle diverse interpretazioni realistiche è consistito nel ribadire il concorso di quelli che Popper chiamò «programmi di ricerca metafisici» per lo sviluppo e l'interpretazione della meccanica quantistica, per contrasto con il tentativo di eliminare il problema, effettuato dai neopositivisti nei primi decenni di storia della teoria.

3. *Apertura e mutamento teorico: paradigma vs proliferazione delle alternative*

Dopo l'emigrazione dei suoi membri principali, a partire dal 1936, il movimento neopositivista tentò di conservare una continuità istituzionale e progettuale intorno al progetto della *Encyclopedia of Unified Science*. L'ultimo numero di «Erkenntnis» uscì nel 1940 con il titolo di «Journal for the Unified Science». I congressi per la filosofia scientifica proseguirono, sul suolo americano, fino al 1941. Le prime monografie dedicate all'*Encyclopedia* cominciarono a uscire nel 1938, ma la pubblicazione si interruppe nel 1944, e la morte di Neurath, nel 1945, privò il progetto del suo principale organizzatore. Solo nel 1955 e nel 1970 uscirono i due volumi delle *Foundations of the Unity of Science*, destinati a non avere seguito. La dissoluzione del grande progetto fu condizionata dalle circostanze storiche, ma dipese certamente anche da ragioni intrinseche, in cui giocarono un ruolo anche le discussioni sulla fisica quantistica. La possibilità di un'interpretazione dei termini teorici del linguaggio scientifico mediante il riferimento a termini osservativi neutrali, che era tra le tesi fondamentali di Schlick e Carnap negli anni '20, era ancora una condizione del progetto enciclopedico di riduzione di tutte le scienze a un linguaggio fisicalistico. Le discussioni sulla fisica quantistica condussero dapprima a consolidare, poi a mettere in dubbio e a riconsiderare questo programma epistemologico. Tuttavia, una nuova interpretazione della teoria quantistica e della sua apertura a modificazioni non fu svolta dai membri storici del movimento neo-

positivistico, che rimasero fino in fondo legati alla loro concezione della meccanica quantistica quale “fatto” scientifico esemplare per il suo potere predittivo e dunque privo di alternative, pur ponendo le basi per un approccio diverso.

Prendiamo il caso di Carnap e della sua concezione dei termini scientifici⁸⁵. Dopo aver abbandonato le tesi de *La costruzione logica del mondo* (1928) sulla *definibilità* dei termini teorici mediante il riferimento a percezioni elementari (tenendo anche conto delle critiche di Popper all’induttivismo), egli riconobbe che alcuni termini della fisica non possono essere definiti esplicitamente e che, al fine di impiegarli correttamente, è necessario elaborare un metodo di «riduzione» dei termini stessi alle circostanze empiriche della loro applicazione (*Testability and Meaning* 1936-1937). Dopo questa rielaborazione Carnap, nel suo contributo all’*Enciclopedia* intitolato *Foundations of Logic and Mathematics*, sostenne ancora che l’«interpretazione» delle teorie fisiche consisterebbe nel collegamento dei termini teorici con termini osservativi mediante regole semantiche e che queste regole sarebbero sufficienti a comprendere le teorie anche in assenza di modelli intuitivi; questi ultimi avrebbero un valore esclusivamente didattico o euristico⁸⁶. Negli anni ’50, rispondendo a diversi critici (come Hempel e Quine), egli riconobbe che i termini teorici possono ricevere un’interpretazione «soltanto parziale» mediante termini osservativi⁸⁷. Inoltre, la significatività dei termini sarebbe sempre relativa a una data teo-

⁸⁵ Per un’aggiornata introduzione al dibattito sui termini teorici in Carnap e negli altri neopositivisti si veda T. MORMANN, *The Structure of Scientific Theories in Logical Empiricism*, in A. RICHARDSON, T. UEBEL (eds.), *The Cambridge Companion to Logical Empiricism*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2007, pp. 136-162. Sono ancora utili gli inquadramenti di F. BARONE, *Il neopositivismo logico*, Laterza, Roma-Bari 1986, e – per Carnap – di M. MONDADORI in R. CARNAP, *Analiticità, significanza, induzione*, Il Mulino, Bologna 1971, pp. 119-148.

⁸⁶ R. CARNAP, *Foundations of Logic and Mathematics* (1939), in *Foundations of the Unity of Science*, cit., pp. 200-210.

⁸⁷ R. CARNAP, *The Methodological Character of Theoretical Concepts*, in H. FEIGL, M. SCRIVEN (eds.), “Minnesota Studies in the Philosophy of Science”, Vol. I: *The Foundations of Science and the Concepts of Psychology and Psychoanalysis*, Univ. of Minnesota Press, Minneapolis 1956; tr. it. in ID., *Analiticità, significanza, induzione* cit., pp. 265-268.

ria scientifica. Entrambe queste tesi (interpretazione parziale; relatività dei concetti e delle rispettive ontologie al sistema scientifico) dipendevano dal riconoscimento dell'intrinseca molteplicità e molteplicità delle teorie fisiche, da cui anche la ricostruzione razionale non può prescindere. Nell'ultima opera di Carnap si trova un limpido bilancio della questione:

Un sistema di postulati in fisica non può avere, come le teorie matematiche, uno splendido isolamento dal mondo. I suoi termini assiomatici – 'elettrone', 'campo', e così via – devono essere interpretati mediante regole di corrispondenza che collegano i termini con i fenomeni osservabili. Questa interpretazione è necessariamente incompleta. Poiché essa è sempre incompleta, il sistema resta aperto in modo da rendere possibile aggiungere nuove regole di corrispondenza [come] accade continuamente nella storia della fisica⁸⁸.

Addirittura, Carnap giungeva a sostenere che l'interpretazione completa dei termini teorici, sebbene formalmente possibile (come nella proposizione di Ramsey), sarebbe dannosa per la teoria fisica, perché potrebbe «bloccare» il progresso scientifico⁸⁹. Le stesse leggi teoriche, d'altra parte, sono essenziali al progresso scientifico, poiché sono "ipotesi" che non si posso ricavare induttivamente e rendono possibili nuovi esperimenti: ne dà esempio, secondo Carnap, la teoria della gravitazione di Newton⁹⁰. A queste significative aperture rispetto al significato dei termini teorici si aggiungeva un rinnovato riconoscimento del loro valore ontologico, che permetterebbe una conciliazione tra i diversi «modi di parlare» dello strumentalismo e del realismo. Secondo Carnap, infatti, l'efficacia predittiva di una teoria comporta la sua verità e dunque la tesi secondo cui «le entità inosservabili di cui essa parla esistono». Gli esempi fondamentali di queste osservazioni erano proprio concetti fisici come 'protone', 'elettrone' e 'neutrone'⁹¹. Que-

⁸⁸ ID., *Philosophical Foundations of Physics*, cit., p. 236.

⁸⁹ *Ivi*, p. 238.

⁹⁰ *Ivi*, pp. 245-246.

⁹¹ *Ivi*, pp. 255-256.

sto atteggiamento poteva riflettere anche il fatto che, a partire dagli anni '30, il numero delle particelle elementari era progressivamente aumentato e – di conseguenza – l'ampliatività della teoria quantistica e del suo repertorio ontologico era più avvertita che nel periodo della sua prima diffusione. Tuttavia, contrariamente a quanto potrebbero far credere le ultime parole citate, l'ultima sistemazione teorica di Carnap non scosse tutte le fondamenta della sua epistemologia e non comportò di fatto una revisione sostanziale dell'interpretazione nel caso specifico della meccanica quantistica. La rivedibilità della teoria quantistica, per quanto «possibile», non era considerata da Carnap come un'eventualità in discussione. Il compito della filosofia rimaneva quello di chiarire i presupposti del dibattito tra i fisici mediante l'analisi logica e assiomatica⁹². Di conseguenza, anche l'analisi dell'ontologia associata alla fisica quantistica non poteva condizionare la valutazione della teoria stessa. Per Carnap restava inconcepibile che, in assenza di diverse predizioni, una congettura ontologica potesse giustificare la critica razionale e finanche l'abbandono di una teoria.

Un approccio diverso, sempre a partire dagli anni '50, venne avanzato da pensatori che, pur appartenendo al gruppo dei neopositivisti, rinunciarono al programma di stabilire un criterio di significanza dei termini teorici. Herbert Feigl, per esempio, scrisse che «entelechie, anime e spiriti devono essere esclusi *non* perché non sono direttamente e indipendentemente verificabili (condividono questo tratto con i concetti legittimi del campo magnetico, dell'atomo, del nucleone, ecc.)», ma perché «non aggiungono nulla al potere esplicativo delle teorie e leggi empiriche disponibili»⁹³. Particolarmente importante per lo sviluppo della nostra problematica fu l'opera di Hempel, il quale ritenne fuorviante lo iato tra la concezione delle teorie nell'approccio di Carnap e l'effettiva metodologia della cono-

⁹² *Ivi*, p. 284.

⁹³ H. FEIGL, *Existential Hypotheses*, «Philosophy of Science», 17 (1950), pp. 35-62; rist. in ID., *Inquiries and Provocations. Selected Writings 1929-1974*, ed. by R.S. Cohen, Reidel, Dordrecht-Boston 1981, pp. 192-223: 218-219.

scienza scientifica. La ricerca di un'aderenza della teoria alla pratica degli scienziati, che era stata tra gli obiettivi del movimento neopositivistico, conduceva insomma verso una nozione meno formalizzata del significato, che prendesse in considerazione, per esempio, il mutamento teorico quale elemento fondamentale del pensiero scientifico. A queste problematiche, come è noto, Kuhn dedicò la sua monografia *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Per quanto criticasse alcuni aspetti dell'originaria epistemologia del neopositivismo, il libro di Kuhn conservò l'atteggiamento del gruppo verso la fisica quantistica, portandone però alla luce alcuni aspetti problematici grazie alla sua prospettiva storiografica. È opportuno, per mostrarlo, cominciare da alcuni cenni sulle tesi generali di Kuhn.

Muovendo dall'analisi storica, Kuhn contestava la possibilità di riportare la formazione dei concetti scientifici a un linguaggio descrittivo neutrale. Lungi però dal negare l'importanza dei termini teorici in nome del pragmatismo, Kuhn considerava le teorie fisiche come diverse «incommensurabili maniere di guardare al mondo e di praticare la scienza in esso», tali da fornire dunque non soltanto descrizioni diverse di un medesimo materiale empirico, ma anche da porre problemi diversi, precedentemente inconcepibili⁹⁴. Kuhn recepiva in ciò la lezione dei grandi storici ed epistemologi della scienza moderna, come Koyré. Quest'ultimo, trattando della filosofia naturale moderna, aveva già insistito sul fatto che le innovazioni di prospettiva introdotte da autori come Galilei e Descartes avevano reso possibile concepire e dunque osservare «cose mai viste prima»⁹⁵. Così, per Kuhn, il passaggio dall'uno all'altro paradigma non poteva ridursi a un meccanico processo di verificaione o di falsificazione di teorie disponibili, ma richiedeva un cambiamento di prospettiva radicale. Mostrando come l'adozione dei paradigmi potesse condizionare il riconoscimento di anomalie sperimentali e la concezione di nuovi esperimenti, Kuhn – in al-

⁹⁴ T.S. KUHN, *The Structure of Scientific Revolutions*, Univ. of Chicago Press, Chicago 1962, 1970²; tr. it. Einaudi, Torino 1969, p. 22.

⁹⁵ A. KOYRÉ, *From the Closed World to the Infinite Universe*, The Johns Hopkins Press, Baltimore Maryland 1957, pp. 88 e sgg.

cuni passi – affermava che il mutamento paradigmatico non costituisce un atto giustificabile razionalmente, ma si fonda «più sulle promesse future che sulle conquiste passate», ed è perciò piuttosto una decisione presa sulla base della «fede»⁹⁶. D'altra parte, in periodi di «crisi riconosciuta», il richiamo all'analisi filosofica e l'invenzione di esperimenti mentali svolgono un ruolo determinante per mettere in discussione i vecchi paradigmi⁹⁷.

Per quanto il libro di Kuhn sia stato percepito spesso come rivoluzionario rispetto alla filosofia della scienza contemporanea, in particolare neopositivistica, esso rifletteva lo stato delle discussioni contemporanee interne al movimento. In primo luogo, paragonando le teorie a delle “reti” che vengono di volta in volta stese sul tessuto dei fenomeni, Kuhn riprendeva una metafora già usata da Carnap e Hempel per caratterizzare la discontinuità tra piano teorico e piano osservativo e il carattere “olistico” delle teorie⁹⁸. In effetti la nozione storiografica di ‘paradigma’ è teoricamente affine a quella epistemologica di ‘linguaggio’ elaborata da Carnap nella *Sintassi logica del linguaggio* (1934)⁹⁹ e la problematica del passaggio tra paradigmi dava risposta al problema astratto del passaggio tra diversi linguaggi teorici e le rispettive ontologie che lo stesso Carnap aveva affrontato nel 1950, presentandolo come un problema di efficacia «nella pratica»¹⁰⁰. A tal fine, Kuhn elaborava una serie di criteri che possono guidare la scelta tra paradigmi, come la diversa capacità di risolvere problemi, la semplicità o la bellezza¹⁰¹. Si capisce dunque come mai Carnap approvasse l'opera di Kuhn, senza percepirla come alternativa all'indiriz-

⁹⁶ *Ivi*, p. 190.

⁹⁷ *Ivi*, p. 115.

⁹⁸ *Ivi*, p. 181.

⁹⁹ R. CARNAP, *Logische Syntax der Sprache. Schriften zur wissenschaftlichen Weltauffassung*, J. Springer Verlag, Wien 1934.

¹⁰⁰ *Id.*, *Empiricism, Semantics and Ontology*, «Revue Internationale de Philosophie», 4 (1950), pp. 20-40, tr. it. in L. LINSKY (a cura di), *Semantica e filosofia del linguaggio*, Il Saggiatore, Milano 1969, pp. 261-284; 281-282. La continuità tra Kuhn e Carnap è sottolineata in molti studi recenti: si veda per es. M. FRIEDMAN, *Kuhn and Logical Empiricism*, in T. NICKLES (ed.), *Thomas Kuhn*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2003, pp. 19-44.

¹⁰¹ KUHN, *The Structure...*, cit., pp. 185-92.

zo neopositivistico, e, come abbiamo visto, potesse accogliere la problematica del mutamento storico nella sua ultima opera. D'altra parte, dedicando la dovuta importanza al ruolo svolto dalle metafisiche nel mutamento scientifico, Kuhn si avvicinava anche alla posizione di Popper. Pur criticando la teoria della falsificazione ed entrando perciò in polemica con Popper, Kuhn in realtà forniva una versione semplicata del procedimento di falsificazione, mentre si trovava di fatto in sostanziale accordo con la prospettiva popperiana¹⁰².

Kuhn sviluppò le sue idee anche attraverso intensi studi sulla fisica quantistica. Per quanto non intervenisse nel dibattito sull'interpretazione, la sua prospettiva storiografica lo portò ad affrontare il problema cruciale della definizione di un'interpretazione "ortodossa" della fisica quantistica. Kuhn doveva inquadrare lo *status* presente della teoria in base alla sua distinzione tra epoca di «scienza normale» e epoca di «crisi riconosciuta». Qual era, dunque, il paradigma dominante? La presenza di analisi filosofiche critiche, esperimenti mentali e nuove teorie – avanzati da Einstein, Popper, Bohm – non doveva forse far parlare di "crisi" in atto? Di fronte a questi problemi l'atteggiamento di Kuhn rimase legato alle prospettive del neopositivismo. In primo luogo egli accolse la comune considerazione del paradigma dominante, l'interpretazione di Copenhagen, senza entrare nel delicato problema di definirne esattamente le tesi. Ciò comportava che le posizioni di dissenso dovessero essere considerate come "deviazioni" e non come alternative credibili. Fin dalla monografia sulla rivoluzione copernicana Kuhn aveva insistito sul ruolo dei concetti, anche metafisici, per la critica della scienza "normale", la formazione di una nuova teoria e l'elaborazione di nuovi esperimenti¹⁰³.

¹⁰² *Ivi*, pp. 177-178. Per l'analisi fornita dallo stesso Popper si veda: K.R. POPPER, *Realism and the Aim of Science. From the Postscript*, cit., vol. I, ma pubbl. per ultimo nel 1983, repr. Routledge, London 1992, pp. xxxi-xxxv. Per un confronto tra Kuhn e Popper si veda S. GATTEI, *La rivoluzione incompiuta di Thomas Kuhn*, UTET, Torino 2007, pp. 27-33, 133-137.

¹⁰³ Cfr. T.S. KUHN, *The Structure...*, cit., p. 172. Cfr. KUHN, *The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Harvard Univ. Press, Cambridge Mass 1957.

Nel caso della meccanica quantistica, invece, Kuhn adottava un criterio rigorosamente positivistico: considerò solo le esperienze “anomale” quali condizioni per l’elaborazione di un’alternativa plausibile. Le anomalie si sarebbero manifestate nel periodo di crisi che caratterizzò la fisica a seguito della scoperta di Planck, ma questo sarebbe stato superato con la meccanica ondulatoria:

Il periodo durante il quale la luce era “talvolta un’onda, talvolta una particella” fu un periodo di crisi – un periodo in cui qualcosa non funzionava – ed esso ebbe fine soltanto con lo sviluppo della meccanica ondulatoria e la realizzazione che la luce era un’entità coerente, diversa sia dalle onde che dalle particelle¹⁰⁴.

Giudizio storico e criterio epistemologico si sovrapponevano in questo caso in modo problematico. La pagina che meglio esprime le vedute di Kuhn si trova nel capitolo in cui egli esamina gli argomenti a favore e contro l’idea di un progresso nella conoscenza:

Questi dubbi circa il progresso nascono [...] anche nelle scienze. Per tutto il periodo preparadigmatico, quando esiste una moltitudine di scuole in competizione tra loro, è difficile trovare una prova del progresso, tranne che all’interno delle singole scuole [...] Ed ancora, durante i periodi di rivoluzione, quando le dottrine fondamentali di un campo sono ancora una volta in discussione, vengono ripetutamente avanzati dubbi sulla possibilità di una continuazione del progresso qualora venga adottato questo o quello dei paradigmi che si fronteggiano. Coloro che rifiutavano il newtonianesimo proclamavano che la sua fiducia nelle forze innate avrebbe ricondotto la scienza ad epoche di oscurantismo. Quelli che si opponevano alla chimica di Lavoisier sostenevano che l’abbandono dei “principi” chimici a favore degli elementi di laboratorio equivaleva all’abbandono di una spiegazione chimica ormai raggiunta per rifugiarsi in un mero nome. Un sentimento analogo, sebbene espresso con maggiore moderazione, sembra stare al fondo dell’opposizione di Einstein, di Bohm e di altri alla dominante interpretazione probabilistica della mecca-

¹⁰⁴ *Ivi*, p. 143.

ca quantistica. In breve, è soltanto durante i periodi di scienza “normale” che il progresso sembra evidente e sicuro¹⁰⁵.

Questa pagina esprime a ben vedere una lieve incertezza. A giudicare dall'ultimo periodo, Kuhn sembra concedere che la rivoluzione quantistica non sia ancora pervenuta al periodo di scienza normale. D'altra parte, egli non ritiene che si debba parlare di “crisi”, ma piuttosto di resistenze al mutamento: le teorie alternative non prefigurano dunque, secondo Kuhn, un possibile progresso. Il carattere controverso di questo giudizio storico si chiarisce mediante alcuni cenni al dibattito in corso all'epoca in cui Kuhn scriveva. Kuhn sembrava riprendere le tesi di uno degli autori da lui citati quale fonte d'ispirazione, ovvero Norwood Hanson¹⁰⁶. Nel suo libro Kuhn commentava con interesse le tesi di Hanson sul mutamento teorico quale mutamento gestaltico del modo di vedere il mondo, esposte in *Patterns of Discovery* del 1958. Meno noto è il fatto che, nello stesso libro, Hanson dedicava particolare attenzione alla inconciliabilità tra le interpretazioni di Heisenberg, Bohr e Dirac da una parte, e le vedute alternative di De Broglie, Einstein e Bohm dall'altra, considerandola come caso esemplare di incompatibilità tra diverse visioni del mondo, analoga a quella che aveva diviso Tycho Brahe e Keplero nell'interpretazione dei fenomeni celesti¹⁰⁷. Benché nel suo libro Hanson ritenesse che «non esiste alcuna osservazione in grado di risolvere la disputa», in un articolo dell'anno successivo egli si schierava in modo perentorio in difesa dell'interpretazione di Copenhagen. Secondo Hanson, che si riferiva esplicitamente a Bohm, «certamente nessuna reinterpretazione già suggerita da filosofi o fisici fornisce un motivo per abbandonare le vedute di Bohr [...] non esiste un'alternativa efficace all'interpreta-

¹⁰⁵ *Ivi*, p. 197. La traduzione italiana citata contiene una grave svista: al posto di «Bohm» si legge «Bohr».

¹⁰⁶ L'analogia tra le tesi di Kuhn e Hanson è discussa in M. BELLER, *Quantum Dialogue*, cit., pp. 290-300.

¹⁰⁷ N. HANSON, *Patterns of Discovery*, Cambridge University Press, Cambridge 1958; tr. it. Feltrinelli, Milano 1978, pp. 18-31, 201-205.

zione di Copenhagen»¹⁰⁸. In definitiva Hanson presentava come un dato di fatto che vi fosse un conflitto tra visioni radicalmente contrapposte, ma prendeva posizione in favore della teoria dominante in base all'assenza di una sua confutazione empirica. Come Kuhn, dunque, anche Hanson non dava peso all'eventualità che le teorie alternative in campo, oltre a possedere diverse caratteristiche sul piano esplicativo, potessero un domani portare a nuovi risultati sperimentali.

La *vis* polemica dell'articolo di Hanson, come segnalava egli stesso, dipendeva dal fatto che l'interpretazione "ortodossa" era ormai oggetto di critica tra i fisici e soprattutto tra i filosofi¹⁰⁹. Tra i filosofi più impegnati in tal senso vi era Paul Feyerabend, che era da poco intervenuto a favore dell'«alternativa» bohmianna¹¹⁰ contro la feroce recensione che Rosenfeld aveva dedicato al primo libro "filosofico" di Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics*, comparso nel 1957. Rosenfeld, che era assistente di Bohr e tra i più convinti sostenitori della complementarietà, scriveva che Bohm, «disprezzando il metodo scientifico», avrebbe «assunto l'atteggiamento metafisico di costruttori di sistemi come Descartes»: la supposizione di livelli di realtà sub-quantistici, retti da una causalità deterministica, non era infatti supportata da «alcuna evidenza empirica». E pertanto concludeva:

Il vero carattere delle relazioni di causalità in fisica è stato completamente chiarito da Bohr e Heisenberg trent'anni fa, e tutto quello che da allora abbiamo imparato sugli atomi, sui nuclei e sulle altre forze della natura non ha fatto altro che rafforzare le conclusioni raggiunte allora¹¹¹.

¹⁰⁸ ID., *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics*, «American Journal of Physics», 27 (1959), pp. 1-15: 1, 5.

¹⁰⁹ Hanson parlava di «alcuni fisici e molti filosofi (fra cui Cassirer e Popper)» (*Patterns of Discovery*, cit., p. 201). Sul piano fisico, oltre alla proposta di Bohm, fece molto discutere l'intervento di E. SCHRÖDINGER, *Are there Quantum Jumps?*, «British Journal for the Philosophy of Science», III (1952), pp. 109-123.

¹¹⁰ P. FEYERABEND, *Prof. Bohm's Philosophy of Nature*, «The British Journal for the Philosophy of Science», 40 (1960), pp. 312-338.

¹¹¹ L. ROSENFELD, *Cause in Physics*, rec. a D. BOHM, *Causality and Chance in Modern Physics*, Routledge & Kegan Paul, London 1957,

Il livore polemico di Rosenfeld era determinato anche da elementi politico-ideologici. Egli considerava Bohr un realista e non condivideva la tendenza idealistica dell'interpretazione di Heisenberg; essendo inoltre sostenitore di una concezione politica marxista, Rosenfeld considerava con acuto disagio le critiche materialistiche alla complementarietà che erano state avanzate da diversi fisici sovietici ed era impegnato da alcuni anni a contrastarle, negando appunto il carattere idealistico della complementarietà¹¹². La polemica violenta contro l'interpretazione di Bohm (peraltro anch'egli marxista e vicino ad alcuni fisici sovietici) era cominciata già nel 1952 e ancora al menzionato congresso di Bristol del 1957 Rosenfeld si era trovato in minoranza di fronte a Bohm, Vigier, Popper e lo stesso Feyerabend: la polemica a distanza dell'anno successivo fu dunque una scia di quel dibattito.

Feyerabend ne informò Kuhn, allegando la recensione di Rosenfeld, in una lettera del 1961 che conteneva ampi commenti su una bozza de *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Egli affermava che la peculiarità della «scuola di Copenhagen», in quanto paradigma, risiedeva nel fatto che i suoi sostenitori ritenevano di aver perfezionato la fisica classica in base ai semplici «fatti» e che ormai la nuova teoria non avrebbe potuto più incorrere in una crisi: «non ci saranno più rivoluzioni, ci sarà solo accumulazione». Riguardo al gruppo di Copenhagen, adducendo l'esempio di Rosenfeld, Feyerabend ammoniva Kuhn che si trattava di «metafisici [...] ancora più dogmatici [poiché] credono che la loro metafisica sia effettivamente di tipo fattuale»¹¹³.

Questa caratterizzazione di Feyerabend metteva in luce polemicamente un aspetto dell'epistemologia quantistica do-

«Manchester Guardian» (28 June 1957), p. 10; tr. it. in T.S. KUHN, *Dogma contro critica*, cit., pp. 277-278.

¹¹² Per un recente bilancio storiografico su questa complessa vicenda, e in generale sulla figura di Rosenfeld, si veda A. JACOBSEN, *Léon Rosenfeld's Marxist Defense of Complementarity*, «Historical Studies in the Physical and Biological Sciences», 37 (2007), pp. 3-34.

¹¹³ P. Feyerabend, lettera cit. a Kuhn (vedi *supra* nota 41), tr. it. in KUHN, *Dogma contro critica*, cit., pp. 276-279.

minante, al prezzo però di semplificare notevolmente le discussioni dell'epoca. I principali interpreti della teoria riconoscevano spesso la provvisorietà della teoria e lo stesso Heisenberg aveva ormai affrontato esplicitamente la questione. Il punto decisivo stava, piuttosto, nel fatto che non si davano ancora solide alternative fisiche per metterla in discussione. Per tale ragione, probabilmente, Kuhn ritenne opportuno descrivere la situazione senza menzionare i “fermenti pre-rivoluzionari” in atto. Sul piano filosofico, tuttavia, la considerazione critica aveva ormai una tradizione consolidata, e Feyerabend non esitava a dare a Kuhn del «reazionario». Assumendo l'idea di Popper che la scienza si trovi in uno stato di «crisi permanente», Feyerabend divenne negli anni 1958-1964 – all'epoca della sua permanenza a Berkeley – il più vivace interprete della situazione di apertura della fisica quantistica tra i filosofi che si erano formati in diretto contatto con il gruppo storico e con gli insegnamenti degli empiristi viennesi. Le sue idee furono espresse peraltro in interventi molto eterogenei, che non si concentrarono su una proposta interpretativa, ma presentano interessanti intuizioni su un dibattito fisico che si stava cominciando a riaprire¹¹⁴.

Feyerabend aveva esordito lavorando a una critica del riduzionismo positivista, accostando quest'ultimo all'interpretazione di Bohr. Concepire il significato come mera trascrizione del dato, assumendo che quest'ultimo avesse una struttura determinata una volta per tutte, era una forma latente di «metafisica»¹¹⁵. Contro la tesi di una datità puramente fenomenolo-

¹¹⁴ Una nuova edizione degli scritti di Feyerabend sulla fisica quantistica è ora disponibile: P. FEYERABEND, *Physics and Philosophy. Philosophical Papers*, vol. 4, ed. by J. Agassi, S. Gattei, Cambridge University Press, Cambridge 2012.

¹¹⁵ P. FEYERABEND, *An Attempt at a Realistic Interpretation of Experience*, «Proceedings of the Aristotelian Society», 58 (1957-8), pp. 143-170; poi in ID., *Realism, Rationalism & Scientific Method. Philosophical Papers*, vol. 1, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1981, pp. 17-33:21. Più precisamente Feyerabend affermerà in seguito che se una teoria semantica sul nesso tra termini osservativi e mondo si presenta come necessaria allora essa è «sintetica a priori», come la fenomenologia husserliana: *Reply to Criticism. Comments on Smart, Sellars and Putnam* (1965), *ivi*, p. 125.

gica degli oggetti, Feyerabend insisteva sul ruolo di mediazione svolto dai concetti per l'interpretazione dei fenomeni, condividendo con Kuhn la tesi secondo cui le teorie corrispondono a modi di guardare al mondo e comportano diverse «ontologie»¹¹⁶. Inoltre, in accordo con Kuhn, egli dichiarava senz'altro che teorie successive sono concettualmente "incommensurabili" alle precedenti e che l'adozione di una nuova teoria non dipende semplicemente dall'estensione del dominio esplicativo. Tuttavia, fedelmente all'interpretazione di Popper, Feyerabend insisteva sulla possibilità di confrontare teorie diverse mediante un esperimento cruciale, costruendo all'interno della nuova teoria una versione isomorfa della vecchia teoria¹¹⁷.

La critica di Feyerabend all'invarianza dei termini osservabili (espressa nella nozione paradossale di «significati osservabili»), mirava soprattutto a denunciare la chiusura rispetto alle alternative teoriche, determinata esemplarmente dal sodalizio tra empiristi (come Carnap) e fisici quantistici (come Bohr). In base all'empirismo logico, che trascrive le teorie in termini riduzionistici, nessuna nuova teoria può sorgere senza nuovi esiti predittivi. Secondo questo criterio, la meccanica «più ampia» di Bohm e Vigier sarebbe inconcepibile. Ciò mostrerebbe come l'«empirismo moderno» possa condurre al punto che un determinato punto di vista (la complementarità) «si pietrifici in dogma essendo, in base all'esperienza, completamente sottratto a ogni concepibile critica». Abbiamo già verificato l'efficacia di questa analisi rispetto alle discussioni precedenti, ricordando l'intervento di Feyerabend contro la logica a 3 valori¹¹⁸.

¹¹⁶ ID., *Explanation, Reduction and Empiricism*, in H. FEIGL, G. MAXWELL (ed. by), "Minnesota Studies in the Philosophy of Science", Vol. III: *Scientific Explanation, Space, and Time*, Univ. of Minnesota Press, Minneapolis 1962, pp. 28-97; poi in FEYERABEND, *Philosophical Papers*, vol. I, cit., pp. 44-96:68.

¹¹⁷ *Ivi*, pp. 69-70. *Realism and Instrumentalism: Comments on the Logic of Factual Support*, in M. BUNGE, *The Critical Approach in Science and Philosophy*, Free Press of Glencol, London, New York 1964, pp. 280-308; poi in FEYERABEND, *Philosophical Papers*, vol. I, cit., pp. 176-202: 200-201; cfr. *Reply to Criticism: Comments on Smart, Sellars and Putnam*, *ivi*, pp. 104-126.

¹¹⁸ *Ivi*, pp. 49-54; 72-73. Il primo intervento contro la logica a 3 va-

In contrapposizione a questo atteggiamento, secondo Feyerabend, il filosofo non può più limitarsi a commentare i «risultati» delle teorie fisiche «accettate», ma deve anche «contribuire attivamente allo sviluppo della conoscenza fattuale»¹¹⁹. Nel caso della fisica quantistica, il conflitto tra fisici come Bohr e filosofi come Popper resta sterile e non si lascia appianare fintanto che non si trovi un'alternativa mediante argomenti fisici. In effetti, l'interpretazione della funzione d'onda di Bohr non segue un criterio strettamente positivisticò, ma trascrive sul piano del significato una lacuna espressa dal formalismo. Per confutare Bohr, e interpretare la funzione d'onda in termini realistici, «ci vuole una nuova teoria». Una tale teoria può essere sviluppata anche introducendo «congetture infondate che sono incompatibili con i fatti e con le teorie accettate e che, inoltre, danno l'impressione dell'assurdità»¹²⁰.

La meccanica di Bohm costituiva l'esempio più interessante di nuova teoria quantistica, in quanto alternativa alla teoria standard fondata sulla congettura di variabili nascoste. Feyerabend si spingeva fino a paragonare Bohm a Copernico¹²¹. Tra le apparenti «assurdità» della meccanica Bohmiana andavano considerati certamente i livelli di realtà deterministici criticati da Rosenfeld, ma anche l'azione a distanza, che già pensatori del calibro di Reichenbach, Popper e lo stesso Einstein avevano riconosciuto come possibile, per scartarla in base al disaccordo con i dati scientifici. In effetti le considerazioni di Feyerabend, in questi anni, non facevano che trarre le rigorose conseguenze dell'epistemologia di Popper, prescindendo dalla polemica filosofica di quest'ultimo contro il determinismo. L'opportunità di prendere in considerazione una teoria speculativa e predittivamente equivalente come quella di Bohm risiede infatti – secondo Feyerabend – nel suo valore euristico:

lori di Reichenbach è l'articolo *Reichenbach's Interpretation of Quantum Mechanics*, «Philosophical Studies», IX (1958), n° 40, pp. 49-59 (poi in *Philosophical Papers*, vol. I, cit., pp. 236-246).

¹¹⁹ Id., *Realism and Instrumentalism*, cit., in *Philosophical Papers*, vol. I, cit, p. 177.

¹²⁰ *Ivi*, pp. 185-188, 193.

¹²¹ *Ivi*, pp. 199-200.

«esistono infatti difficoltà potenziali di qualsiasi teoria che possono essere individuate soltanto con l'aiuto di ulteriori teorie». Nello stesso 1964 queste considerazioni si sarebbero rivelate corrette: prendendo sul serio la teoria di Bohm, Bell pubblicò la sua disequazione, aprendo nuovi campi di ricerca fisico-teorica e sperimentale che sono tuttora esplorati.

In generale, la «critica» del paradigma e la «proliferazione delle alternative» erano gli aspetti fondamentali della ricerca filosofica di Feyerabend, il quale solo occasionalmente si soffermò a sostenere o sviluppare una singola proposta. Che il determinismo e Bohm non costituissero la sola alternativa per la concezione filosofica di Feyerabend era implicito nelle sue stesse premesse; di fatto egli considerò una notevole quantità di proposte eterogenee. Nel saggio presentato al Colston Colloquium del 1957 aveva considerato la misura come una questione di «fisica applicata», che nella meccanica quantistica riceveva una teoria «incompleta», proponendone una soluzione basata sul disturbo; in diversi saggi degli anni '60 proponeva un'interpretazione relazionale degli stati quantistici, riabilitando le tesi di Bohr; mentre nel 1964 discuteva l'ipotesi che i fenomeni quantistici potessero comportare «l'esistenza di mutamenti individuali spontanei» e la corrispondente violazione delle leggi di conservazione «nei casi individuali»¹²². Simili tesi interpretative, di cui Feyerabend segnalava l'assenza di conforto sperimentale, erano state avanzate negli anni '50 da Popper e Landé, ma avrebbero in seguito trovato una nuova espressione fisica nei modelli del collasso spontaneo della funzione d'onda.

Le idee di Feyerabend sulla teoria quantistica continuarono a mutare negli anni successivi. Ma alla luce di questa breve esposizione degli scritti del periodo 1958-1964, in cui Feyera-

¹²² Il saggio del 1957, *On the Quantum Theory of Measurement*, in S. KÖRNER, *Observation and Interpretation*, cit., pp. 121-130, è ristampato in *Philosophical Papers*, Vol. I, cit., pp. 207-218; vedi pp. 207-216. L'interpretazione relazionale è proposta per es. in *On a Recent Critique of Complementarity*, «Philosophy of Science», 35 (1968), pp. 309-331; Part. II, 36 (1969), pp. 82-105; rist. in *Philosophical Papers*, cit., col titolo *Niels Bohr's World View*, pp. 247-97. Il terzo esempio è tratto da *Realism and Instrumentalism*, cit., p. 192-193.

bend si trovò a stretto contatto con Kuhn, possiamo concludere con due considerazioni generali sulle vicende attraversate in questo capitolo. In primo luogo, a partire dall'inizio degli anni '50, la riflessione di fisici e filosofi riportò gradualmente al centro delle discussioni il problema della misura. Tra le proposte alternative si pensi soltanto, oltre a Bohm, alle teorie fondate sulla irreversibilità da Günther Ludwig (1953) alla teoria a molti mondi di Hugh Everett (1957), alla teoria ergodica di Daneri-Loinger-Prosperi (1962), all'interpretazione fondata sull'interazione mente-corpo di Wigner (1962). All'inizio degli anni '60 il dibattito tra i fisici era nuovamente vivissimo e l'insoddisfazione per la teoria standard cominciava a essere dichiarata con sempre maggiore sicurezza¹²³. Per quanto le possibili interazioni tra elaborazioni filosofiche e nuove proposte fisiche siano da indagare caso per caso, è un fatto che la riapertura della questione dei fondamenti alla fine degli anni '50 coincise con la crisi del neopositivismo e con il riaffermarsi di cornici filosofiche alternative per la teoria quantistica, dunque anche di ipotesi metafisiche.

Il luogo di massima interazione tra ricerca fisica e speculazione metafisica fu la riconsiderazione del problema mente-corpo alla luce del problema della misura. La pietra dello scandalo era costituita in questo caso dalla presunta interazione tra osservatore e sistema fisico, che darebbe luogo al collasso della funzione d'onda. Seguendo tale linea interpretativa, espressa esemplarmente da London e Bauer ne *La teoria dell'osservazione in meccanica quantistica* (1939), alcuni sostenito-

¹²³ Per una ricostruzione generale di questa fase del dibattito è ancora utilissimo il libro di M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, cit. Un esempio della diffusa insoddisfazione di questo periodo è l'articolo di A. KOMAR, *Indeterminate Character of the Reduction of the Wave Packet in Quantum Theory*, «Physical review», 126 (1962), pp. 365-369, dove si legge (p. 369): «Sebbene la meccanica quantistica tratti adeguatamente della probabilità relativa dell'accadere di eventi, non esistono un meccanismo o una teoria fisica coerente con il formalismo della meccanica quantistica che possano render conto del fatto che gli eventi di fatto avvengono. Il fatto che gli eventi avvengano è una tacita assunzione fatta nel linguaggio che usiamo per interpretare i simboli che si trovano nel formalismo quantistico».

ri della teoria ritenevano opportuno elaborare un'interpretazione del processo di misura che facesse capo a un'interazione mente-corpo. Da qui prese le mosse Wigner, all'inizio degli anni '60, per riaprire la questione di una possibile rilevanza della meccanica quantistica per lo studio dei fenomeni biologici e psicologici¹²⁴. Abbiamo visto come Einstein e Popper preferissero evitare la non-località, che invece era considerata da Bohm, e più di recente dai teorici del collasso spontaneo, come una proprietà dei processi fisici, rendendo superfluo attribuire un ruolo all'osservatore nella determinazione delle proprietà oggettive. Anche Bell approvò simili orientamenti sul piano fisico, senza negare senz'altro la possibilità di porre la questione sul piano psico-fisico, ma ritenendola troppo complessa per una sua introduzione in fisica. Anche alla luce di teorie alternative a quella standard che spiegassero sul piano strettamente fisico la riduzione del pacchetto d'onde, alcuni filosofi hanno continuato a indagare le possibili ripercussioni filosofiche dell'interpretazione della teoria quantistica ai fini di una comprensione non dualistica della realtà. Su questo punto la teoria dell'identità degli stati psichici e mentali sostenuta da Feigl ha costituito un punto di riferimento essenziale per tutti gli eredi del movimento empiristico¹²⁵. Anche Feyerabend, Hanson e Kuhn, nelle opere che abbiamo discusso, mostrarono un grande interesse per i presupposti neurologici della conoscenza fisica. Questo genere di questioni è spe-

¹²⁴ F. LONDON, E. BAUER, *La théorie de l'observation en mécanique quantique*, Hermann et Cie., Paris 1939. E. WIGNER, *Remarks on the Mind-Body Problem*, in I.J. GOOD (ed.), *The Scientist Speculates: An Antology of Partly-baked Ideas*, Basic Books, London-New York 1962, pp. 284-302; *The Problem of Measurement*, «American Journal of Physics», 31 (1963), pp. 6-15; rist. in ID., *Symmetries and Reflections*, Indiana Univ. Press, Bloomington 1967, pp. 171-84, 153-70.

¹²⁵ Cfr. H. FEIGL, *The "Mental" and the "Physical"*, in H. FEIGL, M. SCRIVEN, G. MAXWELL (ed. by), "Minnesota Studies in the Philosophy of Science", vol. II, *Concepts, Theories and the Mind-Body Problem*, Univ. of Minnesota Press, Minneapolis 1958 (ristampato come volume a parte con aggiunte, presso il medesimo editore nel 1967). È da notare che Feigl rielaborava, in un mutato orizzonte filosofico e fisico, una concezione sostenuta già da Schlick prima della formazione del circolo di Vienna.

cificamente indagato in relazione alla fisica quantistica nei saggi (poco successivi) di Shimony, il quale, traendo ispirazione dalla metafisica monistica di Whitehead, si schierò a favore dei modelli di modifica non-lineare della funzione d'onda¹²⁶.

È possibile che simili esplorazioni metafisiche abbiano influenzato la ricerca e l'elaborazione delle prospettive scientifiche alternative che sono ancora in campo nella discussione attuale. Ma prima di azzardare qualche conclusione sul rilievo che le indagini metafisiche potrebbero possedere ancora oggi, occorre ancora attraversare una terza linea di riflessione filosofica, quella kantiana, che costituisce un possibile punto di riferimento sul dibattito, alternativo alle strettoie del realismo e del positivismo.

¹²⁶ A. SHIMONY, *Role of the Observer in Quantum Theory*, «American Journal of Physics», 31 (1963), pp. 775-773; poi in ID., *Search for a Naturalistic World View* cit., II, pp. 3-33. Per un ripensamento successivo alla comparsa del modello di Ghirardi-Rimini-Weber (1985) cfr. ID., *Desiderata for a Modified Quantum Mechanics Dynamics*, «Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association (PSA)», Vol. 2 (1990), pp. 49-59, poi in *Search for a Naturalistic World View*, cit., pp. 55-67.

III

KANTISMO E FISICA QUANTISTICA: IL DIBATTITO SULL'A *PRIORI*

Discutendo l'inadeguatezza delle categorie di realismo e positivismo, abbiamo riscontrato come nelle discussioni tra fisici e filosofi sia comparso in diverse occasioni un riferimento a Kant. Tra i fisici, Heisenberg pose in evidenza fin dal 1928 l'importanza di un confronto delle tesi sulla complementarità e l'indeterminazione con la riflessione di Kant sulle condizioni di possibilità della conoscenza scientifica e questo tema è stato ripreso e sviluppato fino ad anni recentissimi da sostenitori della teoria standard come Weizsäcker e D'Espagnat. D'altra parte, per citare il caso dei non "ortodossi", lo stesso Einstein si richiamò più volte all'importanza di riconsiderare le tesi di Kant sulle componenti non empiriche della fisica, allo scopo di contrastare l'indirizzo positivista dominante.

Nel campo dei filosofi si riscontra un'analogha convergenza intorno a Kant di autori altrimenti discordi. Protagonisti del neopositivismo quali Schlick, Carnap e Reichenbach, come è sottolineato dalla storiografia più recente, provenivano da un *background* kantiano, ben evidente nelle rispettive opere fino agli anni '20; non stupisce, dunque, che l'empirismo americano nei suoi esiti più recenti abbia variamente riaperto un confronto con la prospettiva kantiana in ottica sia storiografica che teorica. D'altra parte lo stesso Popper, come abbiamo rilevato, si richiamò proprio a Kant per illustrare la sua insistenza sul valore epistemico delle anticipazioni concettuali e il realismo suo e della sua scuola rimase sempre debitore di un confronto con le posizioni kantiane. Nel complesso i richiami a Kant, nelle discussioni intorno alla fisica quantistica, sono sta-

ti spesso vaghi e approssimativi – quando non storicamente sbagliati – e certamente la vaghezza ha reso possibile adattarli a diverse tesi. Il maggior tratto comune a tutti questi richiami risiede nel loro carattere critico: occorre *ripensare* la tesi di Kant secondo cui vi deve essere un elemento non empirico, o *a priori*, nelle scienze empiriche. Questo ripensamento ha reso possibile mettere in discussione i limiti dell'empirismo e di ogni interpretazione della fisica fondata sull'idea di un "dato" empirico puro e semplice, ma è stato fondamentale anche per chi – come Einstein e Heisenberg –, tentando di elaborare il significato della teoria fisica, si è imbattuto nel problema di definire le condizioni che permettono di parlare di 'realtà' e 'oggettività'. Ecco perché, per quanto Kant certamente nulla avrebbe potuto dire su una teoria come la meccanica quantistica e non esista una interpretazione kantiana della teoria, la prospettiva kantiana è risultata fondamentale in tutte le fasi del dibattito. Sul piano storiografico, una considerazione degli elementi kantiani nelle riflessioni sulla fisica quantistica è stata messa in luce in numerosi studi dedicati ai diversi protagonisti della vicenda e certamente non si potrà qui tentare una ricostruzione sintetica complessiva. Mi limiterò a richiamare alcuni momenti fondamentali di questa presenza del kantismo e a trarne elementi proficui allo scopo di una diagnosi della discussione attuale sui fondamenti, in cui – soprattutto tra i fisici – la memoria di questa prospettiva è ancora oscurata da quella secca dicotomia tra realismo e positivismo di cui abbiamo indagato le origini e i limiti.

Il diffuso riferimento critico a Kant, di cui si è appena detto, è dipeso inizialmente anche da circostanze culturali. I primi protagonisti del dibattito si formarono in un contesto filosofico e scientifico in cui era fortissima la presenza di orientamenti neokantiani e dove il proposito di ritornare a un Kant emendato e sottratto ai pregiudizi filosofici e scientifici del suo tempo era un motivo consueto, risuonato già a partire dalla metà del secolo XIX. Per esempio lo stesso Bohr, nel conferire da subito un significato epistemologico generale alla teoria quantistica, fu certamente influenzato dal suo maestro di filosofia Harald Høffding, che sostenne un'interpretazione di Kant influenzata

dal pragmatismo di James. Quando Bohr, per introdurre il concetto di complementarità, parlava di spazio, tempo e causalità come «forme di percezione», egli adottava una formula impiegata da Høffding a proposito della filosofia kantiana. Per quanto si trattasse di un riferimento molto libero – vi si sopprimeva la distinzione kantiana tra forme dell'intuizione e forme logiche – l'insistenza di Bohr sulle «condizioni di definibilità» delle variabili fisiche e dunque della stessa realtà oggettiva richiamava effettivamente una problematica kantiana¹²⁷.

Sul suolo continentale era stato un decano della fisica atomica come Arnold Sommerfeld a sostenere l'esigenza che «un nuovo Kant» intervenisse a sciogliere i nodi filosofici posti dalla nuova meccanica¹²⁸. A questo richiamo rispose Heisenberg, il quale, poco dopo essere tornato da Copenhagen (1926-1927), dove aveva discusso ampiamente con Bohr sulle questioni epistemologiche della nuova meccanica, pose la questione di ripensare alla luce di quest'ultima la nozione kantiana della «forma a priori» della conoscenza. Kant aveva notoriamente affermato che non tutta la conoscenza è ricavata dall'esperienza, anche se essa è possibile solo in riferimento all'esperienza. Heisenberg riteneva che la nuova meccanica, mostrando delle limitazioni nell'applicazione dei concetti della fisica classica, rendesse opportuna una riproposizione del problema kantiano:

Sarebbe un compito d'immenso interesse, ma anche molto difficile, esaminare ancora il problema fondamentale dell'episte-

¹²⁷ Si può vedere A. HØFFDING, *Den nyere Filosofis Historie*, 2 voll., P.G. Philipsen, København 1894-1895; tr. it. *Storia della filosofia moderna*, Sansoni, Firenze 1970, vol. II, p. 167, dove le categorie kantiane sono ridotte a quantità e causalità. Su Høffding e Bohr, in particolare riguardo alla sorprendente presenza di elementi kierkegaardiani nelle idee fisiche di quest'ultimo, si trovano interessanti cenni in M. JAMMER, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, cit., pp. 176sgg. Lo sfondo kantiano è esaminato da diversi interpreti: si vedano per es. D. MURDOCH, *Niels Bohr*, cit., pp. 229-231, e C. CHEVALLEY, *Niels Bohr's Words and the Atlantis of Kantianism*, in J. FAYE, H. FOLSE (eds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Kluwer, Dordrecht 1994, pp. 33-55.

¹²⁸ A. SOMMERFELD, *Zum gegenwärtige Stande der Atomphysik*, «Physikalische Zeitschrift», 28 (1927), pp. 231-239: 235.

mologia kantiana, incominciare per così dire da capo e tentare nuovamente di separare quanto nella nostra conoscenza è derivato dall'esperienza e quanto dalla nostra facoltà di pensare. La demarcazione di Kant si è rivelata insostenibile: ma è possibile tracciare un nuovo confine¹²⁹?

Oltre alla restrizione del principio di causalità, imposta dalle relazioni di indeterminazione, Heisenberg inquadrò in senso kantiano anche le considerazioni di Bohr sull'indispensabilità dei concetti classici per la descrizione degli esperimenti.

Qui il problema posto da Kant, e in seguito molto discusso, circa l'apriorità delle forme intuitive e delle categorie, è stato messo in nuova luce [...] Da una parte è risultato [con le relazioni di indeterminazione] che le forme della nostra intuizione spazio-temporale e la legge di causalità non sono indipendenti da ogni esperienza, nel senso che in tutti i tempi futuri esse debbano continuare ad essere un elemento costitutivo di ogni scienza fisica. D'altra parte, come ha messo in rilievo soprattutto Bohr, anche nella fisica moderna l'applicabilità di queste forme d'intuizione e della legge causale è la premessa di ogni esperienza scientifica obiettiva. Noi non possiamo infatti comunicare l'andamento e il risultato di una misurazione altrimenti che descrivendo le operazioni a ciò necessarie e la lettura della posizione degli indici dei nostri strumenti di misura come processi obiettivi, che si svolgono nello spazio e nel tempo della nostra intuizione, e dal risultato di una misurazione non potremmo dedurre le proprietà dell'oggetto osservato se la legge causale non garantisse un nesso univoco tra lo strumento e l'oggetto¹³⁰.

¹²⁹ W. HEISENBERG, *Erkenntnistheoretische Probleme in der modernen Physik*, conferenza tenuta all'Università di Lipsia nel 1927 e pubbl. nel 1928; poi in ID., *Gesammelte Werke*, hrsg. von W. Blum, H.-P. Dürr, H. Rechenberg, Piper, München 1984, Abt. C Bd. I, pp. 22-28: 28. Per una ricostruzione degli elementi kantiani nel pensiero di Heisenberg si veda K. CAMILLERI, *Heisenberg and the Transformation of Kantian Philosophy*, «International Studies in the Philosophy of Science», 19/3 (2005), pp. 271-287, ora riveduto in *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics*, cit., pp. 133-151.

¹³⁰ W. HEISENBERG, *Wandlungen der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft in jüngster Zeit*, «Angewandte Chemie», 47 (1934; rist.

Sul problema qui delineato di un ripensamento dell'*a priori* alla luce della fisica quantistica Heisenberg trovò modo di discutere a Lipsia, dove era stato nominato professore nel 1927, con Grete Hermann e Carl Friedrich von Weizsäcker, che ebbero un ruolo fondamentale nella formazione delle sue concezioni epistemologiche¹³¹. La Hermann, che era una matematica e filosofa di impostazione kantiana, sosteneva che la nuova meccanica non avrebbe contraddetto il principio di causalità nella formulazione data da Kant, in quanto essa non si sottrae alla necessaria connessione delle percezioni secondo una regola, senza la quale non sarebbe possibile una esperienza oggettiva della successione temporale. Hermann sosteneva inoltre che anche la teoria quantistica dell'oggettività, riconducendo le proprietà a relazioni, fosse in accordo con quella kantiana (ella presentava peraltro una critica alla prova di von Neumann contro la possibilità di una teoria a variabili nascoste, senza però trarne motivo di critica della teoria corrente)¹³². Weizsäcker – tentando una mediazione con Heisenberg – concedeva che vi fosse compatibilità tra la nuova fisica e le nozioni che costituiscono secondo Kant delle condizioni universali e necessarie della conoscenza, come quella di causalità, a patto però di riconoscere che i mutamenti scientifici possono modificare il significato esatto di queste condizioni e restringere il campo di validità dei significati precedentemente ammessi: così starebbero le cose nel caso della causalità e dell'oggettività quantistiche, perciò le obiezioni filosofiche contro la piena validità della teoria sarebbero fuori luogo. Infine i tre interlocutori delle discussioni di Lipsia si trovarono d'accordo sulla possibilità di appianare la disputa senza mettere in discussione la teoria.

anastatica in *Gesammelte Werke*, cit.), pp. 697-702: 700-1; tr. it. in ID., *Mutamenti nelle basi della scienza*, Boringhieri, Torino 1960, pp. 49-50.

¹³¹ Heisenberg scrisse a Bohr di aver discusso con Hermann e Weizsäcker «le “questioni generali”, sulle quali abbiamo tanto imparato da lei» (lettera del 17 giugno 1934, nell'«Archive for the History of Quantum Physics»). Una testimonianza diretta sui dialoghi che ebbero luogo a Lipsia si trova in W. HEISENBERG, *Physics and Beyond*, cit.; tr. it. pp. 138-146.

¹³² G. HERMANN, *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*, «Abhandlungen der Fries'schen Schule», 6 (1935), pp. 75-152.

Un significativo bilancio della questione si trova nell'ampio saggio di von Weizsäcker *Il rapporto della meccanica quantistica con la filosofia di Kant* (1941) in cui egli sostiene che Kant, in contrasto con gli empiristi e i metafisici dogmatici, avrebbe correttamente posto la precedenza logica di nozioni quali 'intuitività', 'causalità' e 'oggettività', rispetto a qualsiasi descrizione scientifica della realtà fisica, e in ciò avrebbe mostrato in via definitiva i limiti del positivismo e del realismo, intesi come ricostruzioni della conoscenza fondate rispettivamente sulla nozione di un puro dato dei sensi e su quella di una oggettività concepibile e considerabile indipendentemente dalle condizioni percettive e logiche della conoscenza¹³³. Ma Kant avrebbe inteso queste condizioni in modo troppo ristretto, riferendosi allo *status* della fisica del suo tempo. Così, alla luce della nuova meccanica, sarebbe possibile preservare il «realismo pratico» della fisica (secondo cui «esistono asserzioni oggettivabili sul mondo esterno ed esse soddisfano il dominio della nostra esperienza normale»), individuando però una limitazione nell'applicabilità dei concetti costitutivi dell'oggettività, limitazione che Kant non avrebbe potuto supporre e che confuterebbe le pretese del «realismo di principio» diffuso tra i fisici recenti, oltre che di quello «metafisico» già confutato dallo stesso Kant (quest'ultimo realismo sostiene, senza alcun riferimento all'esperienza, che «le cose esistono nella realtà»)¹³⁴.

Questo ragionamento poneva però, evidentemente, un problema di principio. Se infatti il piano dell'*a priori* doveva essere tenuto separato da quello della teoria fisica, come poteva la stessa meccanica quantistica, in quanto teoria empiricamente fondata e dunque rivedibile, costituire una pietra di paragone epistemologica per la riforma dello stesso *a priori*? A questo problema Weizsäcker cercava di rispondere elaborando

¹³³ C.F. VON WEIZSÄCKER, *Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants*, «Die Tatwelt», 17 (1941), 3, pp. 66-98; *ivi*, 18 (1942), 2, pp. 105-109; poi in ID., *Zum Weltbild der Physik*, Hirzel, Leipzig 1943, pp. 83-123.

¹³⁴ Per le tre nozioni di realismo, poi riprese da Heisenberg, si veda *Zum Weltbild*, cit., pp. 95-99.

una nozione di «*a priori* storico», che considerava la componente *a priori* della conoscenza come una funzione necessaria ma storicamente mutevole delle teorie scientifiche.¹³⁵ Così, tra le variabili dell'*a priori* si potevano collocare concetti come 'causalità' e 'oggettività'. Questa ipotesi doveva evidentemente moltissimo all'ampio dibattito sulla questione che si teneva da tempo tra i filosofi neokantiani, in particolare a partire dalla scuola di Marburgo formata negli ultimi decenni del secolo XIX intorno all'insegnamento di Hermann Cohen. Cohen aveva posto al centro delle sue ricerche la tesi secondo cui la conoscenza della natura non può derivare dalla semplice percezione, o da una presunta intuizione metafisica, ma deve avvenire sempre con la mediazione del pensiero logico. Con questa tesi Cohen aveva inteso modificare l'analisi kantiana delle condizioni dell'esperienza, negando la distinzione kantiana fra intuizione e pensiero. Per realizzare questo ambizioso programma Cohen, nella sua *Logica della conoscenza pura* (1902, 1914²), aveva esaminato il contenuto delle diverse categorie logico-epistemologiche attraverso lo sviluppo storico del sapere scientifico.

Riprendendo questo aspetto del programma di Cohen alla luce di un più severo rigore storiografico, Cassirer aveva affrontato in diverse occasioni la questione della validità del concetto di *a priori* rispetto ai più recenti mutamenti della fisica. In *Sostanza e funzione*¹³⁶ egli sosteneva che si possono definire delle categorie fondamentali del pensiero scientifico (come 'spazio', 'tempo', 'numero' e 'dipendenza') le quali assumono un contenuto diverso a seconda del mutare dei sistemi scientifici. Per giustificare la connotazione delle categorie logiche quali condizioni *a priori* della conoscenza, nonostante la loro variabilità, Cassirer individuava delle caratteristiche strutturali nello sviluppo storico delle scienze della natura (prestando particolare attenzione alla funzione svolta dai concetti – come

¹³⁵ *Ivi*, p. 118.

¹³⁶ E. CASSIRER, *Substanzbegriff und Funktionbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik*, Bruno Cassirer, Berlin 1910; tr. it. La Nuova Italia, Firenze 1999.

‘massa’ ed ‘energia’ – che rendono possibile la misura e con ciò l’applicazione delle categorie ai fenomeni). Il progresso da una teoria empiricamente efficace alla successiva non dipenderebbe da una maggiore corrispondenza di quest’ultima a un’oggettività data – e magari immaginata in termini intuitivi –, ma dalla sua capacità di assimilare e rendere più generali i collegamenti e le relazioni quantitative tra i fenomeni posti dalla precedente. Dunque lo sviluppo della conoscenza scientifica, pur nella sua apertura al limite infinita, mostrerebbe gradualmente che vi sono delle invarianti nella determinazione dell’oggettività. L’obiettivo filosofico di Cassirer era dunque di stabilire una «teoria delle invarianti dell’esperienza» in base alle graduali conferme offerte dallo studio dei sistemi scientifici. Entro questa teoria viene mostrato anche come il contenuto specifico delle categorie vari non in modo radicalmente discontinuo, ma secondo una regola di convergenza. Proprio questo garantirebbe la validità oggettiva del sapere scientifico: «la connessione e la convergenza della serie [dei sistemi scientifici] sostituiscono l’esterna unità di misura della realtà»¹³⁷. Nel caso specifico della fisica, le diverse teorie condurrebbero gradualmente verso il riconoscimento del carattere ideale dei «concetti di oggetto» (come ‘atomo’, ‘etere’, ‘campo’) e dunque dell’indipendenza della rappresentazione della materia dalla comune percezione. Riprendendo la critica di Cohen all’«atomismo materialistico», Cassirer concludeva la sua ricognizione della fisica più recente – che giungeva fino ai primi anni del secolo XX – affermando che sempre più distintamente «la materia stessa diventa idea, giacché sempre più chiaramente si limita alle concezioni ideali che vengono prodotte e confermate dalla matematica»¹³⁸.

¹³⁷ *Ivi*, (trad. modificata) p. 425. Cfr. anche pp. 203-204, 337-339.

¹³⁸ *Ivi*, p. 229; cfr. pp. 282-283, dove l’atomo è detto «idea (*focus imaginarius*)» in senso kantiano: esso è dunque un concetto razionale dotato di una funzione regolativa per l’unificazione e estensione delle conoscenze, che non può tuttavia essere fondatamente associato a un oggetto. Per maggiori dettagli sull’interpretazione del concetto di materia, anche nelle fasi discusse qui di seguito, rimando a P. PECERE, *La «dissoluzione» della materia in Cassirer*, «Quaestio. Archivio di storia della metafisica», 7 (2007), pp. 457-488.

Un caso esemplare per la verifica di queste tesi venne individuato da Cassirer, all'inizio degli anni '20, nella teoria della relatività generale di Einstein. Essa infatti conservava le relazioni «autonome e permanenti» della fisica classica, abbandonando però i rispettivi concetti di materia: il «corpo rigido» della meccanica nella sua «forma cosale (*Dingform*)» e l'etere¹³⁹. Uno dei punti problematici di questa interpretazione, come obiettò lo stesso Einstein in una lettera a Cassirer, era proprio la tesi di una «dissoluzione» della materia nel campo: un obiettivo perseguito effettivamente da autori come Hermann Weyl (Cassirer citava sempre con favore il suo *Raum Zeit Materie*, la cui prima edizione era stata pubblicata nel 1918)¹⁴⁰ e dallo stesso Einstein, ma che – come abbiamo già ricordato – non veniva dato per acquisito nemmeno dai suoi artefici e che di fatto questi ultimi non portarono a buon fine¹⁴¹. Questo episodio è un caso esemplare di come Cassirer fosse sospinto dalle sue premesse verso la ricerca di un coronamento scientifico delle tesi di matrice neokantiana contro l'intuizione immediata della realtà e contro il materialismo: questo tentativo comportava evidentemente un'interpretazione di aspetti ancora aperti e controversi delle teorie più recenti, in

¹³⁹ E. CASSIRER, *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, Bruno Cassirer, Berlin 1921; tr. it. Newton & Compton, Roma 1997, pp. 80-81, 108-110. Il riferimento ai «rapporti autonomi e permanenti» dell'esperienza proveniva dalla teoria kantiana della materia: «Ciò che noi conosciamo nella materia sono mere relazioni [...] ma tra di esse ve ne sono di autonome e permanenti, tramite cui ci viene dato un oggetto determinato»; KANT, *Kritik der reinen Vernunft* (1781) in *Kants gesammelte Schriften* cit., III, 229, tr. it. a cura di C. Esposito, Bompiani, Milano 2004, p. 515. Si noti che per la tesi della assimilazione delle teorie precedenti quali casi-limite, ripresa nello scritto su Einstein (*op. cit.*, pp. 54-55, 71), Cassirer rimandava anche agli scritti di quest'ultimo quali A. EINSTEIN, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)*, Vieweg, Braunschweig 1917; tr. it. in *Opere scelte*, cit., p. 441.

¹⁴⁰ H. WEYL, *Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen über allgemeine relativitätstheorie*, J. Springer Verlag, Berlin 1918.

¹⁴¹ La lettera di Einstein (del 16 marzo 1937) è ora in E. CASSIRER, *Nachgelassene Manuskripte und Texte*, Bd. 18, *Ausgewählter wissenschaftlicher Briefwechsel*, Meiner, Hamburg 2009, pp. 158-160. In proposito si ricordino anche le considerazioni di Popper (vedi *supra* nota 83).

cui le vedute epistemologiche degli stessi fisici erano considerate criticamente e selettivamente in base a un autonomo principio-guida filosofico.

In base a queste premesse Cassirer, a partire dalla seconda metà degli anni '20, intraprese uno studio della nuova meccanica quantistica. Le tesi di Bohr sulla "rinuncia alla visualizzazione" della nuova teoria gli apparvero da subito molto interessanti¹⁴². Ma egli non divenne un seguace dell'interpretazione di Bohr, bensì tentò di trovare più ampie convergenze nel complesso dibattito tra i fisici, dedicando al tema l'ampio studio *Determinismo e indeterminismo nella fisica moderna*, comparso nel 1937. Cassirer vi sosteneva che la nuova meccanica, in quanto probabilistica, non contraddiceva la nozione di causalità (intesa come connessione dei fenomeni secondo una regola) – una tesi, come abbiamo visto, già sostenuta in termini analoghi da Hermann contro la riduzione positivista della causalità a predicibilità. Egli rilevava invece un punto di rottura epistemologica della nuova teoria nel suo nuovo «concetto fisico di realtà». Le «leggi» che reggono la meccanica quantistica, come le relazioni di indeterminazione, comportano un abbandono del «concetto cosale» di atomo e dunque una rinuncia all'ideale metafisico di una «determinazione completa» dell'esistenza individuale¹⁴³. Provando su questo punto a smussare la durezza delle opposizioni tra i fisici, Cassirer sosteneva che l'evoluzione più recente della meccanica conservava una continuità rispetto al progresso storico precedente, in quanto la materia risulterebbe (sia pure in modi diversi) «dissolta» nel concetto di onda¹⁴⁴.

Questa trattazione di Cassirer aveva il difetto di fornire una visione eccessivamente conciliativa del dibattito tra i fisici, di cui venivano taciute le più aspre opposizioni. Ma in ciò

¹⁴² E. CASSIRER, *Philosophie der symbolischen Formen*, III, *Phänomenologie der Erkenntnis*, Bruno Cassirer, Oxford 1929; tr. it. La Nuova Italia, Firenze 1966, pp. 265-266.

¹⁴³ ID., *Determinismus und Indeterminismus in der neueren Physik*, «Göteborg Hogskolas Årsskrift» 42, 3, Wettergren & Kerber, Göteborg 1936; tr. it. La Nuova Italia, Firenze 1970, pp. 188-189; 276-277.

¹⁴⁴ *Ivi*, pp. 63, 230.

si mostrava nel modo più evidente quel distacco (di ispirazione kantiana) tra il piano della critica epistemologica e quello delle particolari interpretazioni dei fisici, che aveva già caratterizzato le indagini precedenti. Cassirer chiariva peraltro che la delimitazione degli enunciati (e dunque i nuovi concetti di causalità e realtà) dipenderebbe dall'inseparabilità di fatti e principi, e dunque, in questo caso particolare, sarebbe «relativa al principio della quantizzazione (*Quantenprinzip*) e al formalismo generale della meccanica quantistica», puntualizzando: «se ci fosse un solo fondamento empirico per abbandonare questo principio e sostituirlo con un'altra assunzione fondamentale, allora l'intera questione della "osservabilità" apparirebbe sotto una nuova luce»¹⁴⁵. Questa caratteristica cautela distingue nettamente l'inquadramento kantiano di Cassirer rispetto a quello adottato da Heisenberg e Weizsäcker, che ne furono certamente influenzati (quest'ultimo gli dedicò anche una recensione)¹⁴⁶. Per i due fisici la questione doveva risolversi diversamente poiché riguardava direttamente la validità dell'interpretazione fisica da essi sostenuta. Già nel 1934 Heisenberg aveva riconosciuto la possibilità che la nuova teoria potesse essere superata – indicando proprio nella distinzione tra gli apparecchi di misura e gli oggetti un possibile punto di superamento della meccanica quantistica – ma aveva replicato che il suo successo sperimentale forniva forti ragioni per vincere le resistenze e riconoscerne il «valore definitivo»¹⁴⁷. Weizsäcker affrontava la questione in dettaglio nel citato saggio su Kant e la fisica quantistica, elaborando una "relativizzazione" dell'*a priori* che salvaguardava la validità della fisica quantistica, pur senza sostenerne il valore definitivo.

¹⁴⁵ *Ivi*, p. 164.

¹⁴⁶ La recensione di C.F. WEIZSÄCKER a E. CASSIRER, *Determinismus und Indeterminismus*, comparve nella «Physikalische Zeitschrift», XXXVIII (1937), pp. 860-861. Heisenberg ricevette il libro da Cassirer, inviandogli un breve commento in cui affermava che le questioni filosofiche in gioco si sarebbero potute chiarire soltanto con il «compimento» della fisica nucleare (lettera del 24 marzo 1937, in CASSIRER, *Ausgewählte wissenschaftlicher Briefwechsel*, cit., p. 166).

¹⁴⁷ W. HEISENBERG, *Wandlungen*, cit., tr. it. pp. 43-47.

Secondo Kant – scriveva Weizsäcker – «una conoscenza a priori dovrebbe essere non solo presupposto, ma anche componente di ogni possibile scienza, relativamente ai rispettivi oggetti». L'indispensabilità descrittiva della fisica classica, affermata da Bohr, significava invece che i suoi «elementi a priori (*Aprioritäten*)» costituiscono

presupposti metodici, ma non componenti contenutistiche della meccanica quantistica; o meglio, sono componente contenutistica solo nella misura in cui la fisica classica resta un caso-limite della meccanica quantistica. Essi divengono dunque non falsi, ma – una possibilità non prevista da Kant – limitati nella loro applicazione¹⁴⁸.

Questa valutazione non comporta peraltro che si tratti di una situazione definitiva. Per descrivere la «situazione scientifica» è sufficiente affermare che, nella situazione attuale, la descrizione classica «è a priori rispetto alla meccanica quantistica». Ciò significa che il concetto di condizione *a priori* possiede un'intrinseca relatività. «In quanto l'«a priori» diviene un concetto di relazione, si può senza esitazioni designare una conoscenza, che sia a priori rispetto ad una seconda conoscenza, come empirica sotto un altro rispetto». Nella stessa fisica classica, l'elettrodinamica presuppone la meccanica classica, mentre quest'ultima a sua volta non è «né puramente empirica, né puramente a priori». La stratificazione qui accennata, che Weizsäcker sceglie di non approfondire nei dettagli, possiede un elemento di grande rilievo per la caratterizzazione del rapporto tra elementi *a priori* e *a posteriori* della conoscenza: «La conoscenza a posteriori spiega successivamente ciò che nella conoscenza a priori è già presupposto», per esempio «la possibilità dei corpi rigidi», che la meccanica classica postulerebbe e la meccanica quantistica invece spiegherebbe¹⁴⁹.

¹⁴⁸ WEIZSÄCKER, *Das Verhältnis der Quantenmechanik*, cit., p. 112.

¹⁴⁹ *Ivi*, p. 116. Quest'ultima affermazione va riferita alla spiegazione della stabilità dell'atomo. Una relativizzazione dei «principi» meccanici, che in successive fasi della teoria possono essere dedotti da altre proposizioni, si trovava già in H. HERTZ, *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*, hrsg. von P. Lenard, Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1894, p. 4; tr. it., Bibliopolis, Napoli 2011.

Nonostante questa storicizzazione del concetto di *a priori* Weizsäcker non rinunciava senz'altro alla «validità definitiva» della teoria. Egli riconosceva che la rivedibilità è intrinseca al sapere fisico, che dunque «non si può escludere sul piano del rigore logico», e si spingeva finanche a immaginare le caratteristiche di una teoria superiore, ritenendo però che una tale revisione fosse da escludere. Rispetto alle teorie fisiche egli concludeva che esse, fintanto che descrivono correttamente un determinato dominio di esperienze, sono «definitivamente valide» per quel dominio¹⁵⁰.

Heisenberg riprese la questione in un saggio di qualche anno dopo, dove si proponeva di giustificare la «pretesa di verità» della meccanica quantistica, criticando esplicitamente l'«illusione» coltivata nella cornice della teoria della relatività di racchiudere la fisica precedente entro un «sistema di concetti unitario»¹⁵¹. Egli avanzava la tesi secondo cui la fisica si presenterebbe storicamente in «teorie chiuse», dotate di differenti «domini empirici» di validità, entro i quali esse sono valide «per tutti i tempi»: ciò ne renderebbe opportuna la presentazione assiomatica, come nel caso dei *Principia* di Newton; una teoria successiva, applicabile a un più ampio dominio di fenomeni, non renderebbe la precedente “falsa”, anzi ne farebbe uso per la descrizione dei fenomeni (come nel caso della meccanica classica rispetto alla quantistica). Heisenberg concludeva paragonando le diverse teorie sorte nello sviluppo della fisica a diversi «cristalli» formati con l'interrogazione dell'esperienza, attraverso i quali si può diversamente contemplare il mondo¹⁵². Nel 1958, in *Fisica e filosofia*, Heisenberg rettificava in parte le sue tesi, concedendo che, in determinati casi, teorie successive possano essere in grado di includere le precedenti come “casi-limite”. Ma il cambiamento era dovuto al fatto che Heisenberg, negli anni '50, stava lavorando intensamente alla nuova «teoria unificata del campo» ispirata ai recenti sviluppi nella fisica delle particelle. La nuova teoria si fondava sulla

¹⁵⁰ *Ivi*, p. 94.

¹⁵¹ W. HEISENBERG, *Der Begriff “abgeschlossene Theorie” in der modernen Naturwissenschaft*, «Dialectica» 2 (1948), n. 3/4, pp. 331-336: 332-333.

¹⁵² *Ivi*, p. 336.

meccanica quantistica senza contestarne la validità, e ne conservava dunque tutti gli elementi messi in discussione dai detrattori come Einstein¹⁵³. Nel complesso le considerazioni di Weizsäcker e Heisenberg, nei saggi discussi, miravano a sottrarre la meccanica quantistica alla prospettiva di una futura relativizzazione storica, quale “caso-limite” di una nuova teoria, secondo quanto ipotizzato da Einstein in accordo con lo schema epistemologico neokantiano di Cassirer. La *chiusura* e la *molteplicità* delle teorie scientifiche, in Heisenberg, si opponevano alle costitutive *apertura* e *unità* della fisica sostenute da Cassirer ed Einstein. Come si vede dall’ultima sistemazione di Heisenberg, tuttavia, il dissenso non nasceva tanto da una marcata divergenza filosofica, quanto dalla *vexata quaestio* della validità della meccanica quantistica.

Nel complesso, come abbiamo già segnalato in precedenza, il richiamo filosofico a Kant si accompagnò lungo tutto il dibattito a considerazioni ambivalenti sulla teoria quantistica. Kant venne invocato ora per difendere la teoria “ortodossa”, ora per sostenere l’opportunità di un’interpretazione diversa, come nel caso di Popper, o di una teoria superiore, come per Einstein. Quest’ultimo, in seguito ai suoi numerosi scambi con filosofi come Cassirer e Popper, insistette sulla «grande scoperta di Kant» del valore costitutivo dei concetti per la definizione dell’oggettività. Soltanto mediante la «totalità dei concetti e delle relazioni concettuali che sono pensate indipendentemente dall’esperienza» noi «pensiamo fisicamente» e ci rappresentiamo un’oggettività. Procedere altrimenti sarebbe come «respirare nel vuoto». Einstein precisò infine di dissentire da Kant «solamente per il fatto che non concepiamo le “categorie” come inalterabili», ma come «libere convenzioni»¹⁵⁴. A ben vedere, proprio la congiunzione in spirito kantiano della tesi del valore costitutivo delle categorie con quella della modificabilità del loro contenuto ha reso possibile ora una difesa della teoria quantistica standard, mediante la revi-

¹⁵³ Il nuovo bilancio sulle diverse teorie scientifiche si trova appunto in ID., *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Harper and Row, New York 1958; tr. it. Il Saggiatore, Milano 1961, pp. 153-161.

¹⁵⁴ EINSTEIN, *Reply to Criticism*, cit., pp. 673-674.

sione dell'apparato concettuale, *ora* la ricerca di una teoria diversa, fermo restando il contenuto precedente delle categorie applicate alla fisica. Il dilemma che si è così posto per una teoria dell'*a priori* «storico», o «relativizzato» è rimasto al centro delle discussioni successive.

Lo stesso dilemma era stato affrontato esplicitamente già da Reichenbach negli anni '20 in riferimento all'interpretazione della teoria della relatività generale. Reichenbach, affrontando il problema della geometria del mondo fisico, aveva sostenuto che la possibilità alternativa di adottare una modificazione della geometria non-euclidea o piuttosto di introdurre particolari «forze universali» o altre anomalie della causalità capaci di salvare la geometria euclidea, avrebbe confutato la teoria kantiana dell'*a priori*¹⁵⁵. Come abbiamo visto (cap. II par. 1), un ragionamento analogo venne svolto dallo stesso Reichenbach e da Putnam riguardo alla meccanica quantistica; in questo caso, però, modificare la logica era ritenuto preferibile a postulare processi fisici non-locali. Di fatto, anche i tentativi successivi di interpretare in senso kantiano la situazione della fisica quantistica sono stati dominati da un orientamento di questo genere, benché esso non sia in alcun modo imposto da tale cornice.

Il simposio in onore dei 70 anni di Dirac, tenutosi a Trieste fra il 18 e il 25 settembre 1972, fornisce un'utile istantanea su come l'accennato problema fosse presente ai fisici filosoficamente più impegnati. Weizsäcker intervenne sostenendo che, nello spirito di Kant, l'epistemologia deve indagare in che misura «le assunzioni elementari della teoria quantistica e della ven-

¹⁵⁵ H. REICHENBACH, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, de Gruyter, Berlin-Leipzig 1928, §§ 3, 12; tr. it. Feltrinelli, Milano 1977, pp. 36-39, 92. Nella nota a p. 92 Reichenbach ricordava di aver già confutato la teoria dell'*a priori* in *Relativität und Erkenntnis a priori*, Springer, Berlin 1920. In realtà, in questo libro egli aveva proposto di salvare un aspetto della teoria kantiana, distinguendo due sensi dell'*a priori* kantiano: in primo luogo, come «apoditticamente valido» o «valido per tutti i tempi», in secondo luogo come «costitutivo del concetto dell'oggetto» (tr. it. Laterza, Roma-Bari 1984, p. 101). Reichenbach sosteneva dunque, attraverso l'esempio della teoria della relatività, come il secondo senso dell'*a priori* conservasse validità anche alla luce della teoria della relatività e del ruolo in essa svolto dalla geometria riemanniana.

tura teoria delle particelle elementari siano già determinate dalle condizioni dell'esperienza». Secondo Weizsäcker la definizione del "fatto" come evento irreversibile e la distinzione temporale tra fatto (presente e passato) e possibilità (futura) permetterebbero di interpretare il formalismo predittivo quantistico come una fedele descrizione delle relazioni empiriche. A tal fine egli elaborava una «logica temporale» per la teoria quantistica. In conclusione, dunque, il modello di Kant veniva seguito nel cercare una fondazione concettuale della teoria quantistica standard in base alle stesse condizioni dell'esperienza¹⁵⁶.

Nel suo intervento D'Espagnat sosteneva che le verifiche sperimentali dei risultati di Bell imponevano l'assunzione della «non-separabilità» della realtà e il conseguente abbandono della concezione «moltitudinista» secondo cui «la realtà è essenzialmente costituita da un immenso numero di piccoli elementi che posseggono ciascuno un certo numero di proprietà determinate». D'Espagnat, dunque, cercava delle condizioni metafisiche dalla teoria, riferendone dunque le caratteristiche – analoga-mente a Weizsäcker – a un principio superiore alla fisica e – a differenza di Weizsäcker – a un dominio di «Realtà» trascendente. Egli ipotizzava che, mentre la forma della teoria sembra incoraggiare la disarticolazione della realtà fisica in una molteplicità di entità parziali, queste parti potrebbero essere soltanto un «riflesso delle nostre possibilità di azione» (l'attività sperimentale), mentre la natura sarebbe in sé un «tutto» omogeneo in senso spinoziano. A conclusione del suo intervento D'Espagnat si richiamava a Bell (presente anch'egli al simposio con il saggio *Subject and Object*) riconoscendo l'urgenza di affrontare sul piano fisico il problema della misura; ma egli sarebbe rimasto in seguito poco incline a sostenere le teorie alternative, come la meccanica bohmiiana, in quanto esse non permetterebbero comunque di tornare a una metafisica di tipo classico¹⁵⁷.

¹⁵⁶ C.F. VON WEIZSÄCKER, *Classical and Quantum Description*, in J. MEHRA (ed.), *The Physicist's Conception of Nature*, Reidel, Dordrecht-Boston 1973, pp. 635-667, in part. 663-664. Il richiamo alla «metafisica della natura» di Kant è qui argomentato in un intervento meno tecnico: *Physics and Philosophy*, pp. 736-746: 742.

¹⁵⁷ B. D'ESPAGNAT, *Quantum Logic and Non-separability*, in J. MEH-

D'Espagnat ha elaborato, a partire dagli anni '70, un ampio inquadramento filosofico della teoria quantistica mediante un'originale interpretazione di ispirazione kantiana del concetto di realtà. La teoria quantistica sarebbe *intrinsecamente* operativa, e dunque descriverebbe soltanto la «realtà empirica», equivalente ai fenomeni in senso kantiano; d'altra parte, l'incerto esito degli esperimenti (il *no* opposto dalla natura alle ipotesi sbagliate) proverebbe che occorre ammettere una «realtà indipendente», un «Reale in sé» che sta alla base dell'esperienza, e che è colto soltanto in modo «vago» e «indecifrabile» mediante le leggi fisiche. Di questa cosa in sé in senso kantiano, per esempio, si potrebbe dire in base ai risultati di Bell che essa *non è separabile* (nel senso della località quantistica)¹⁵⁸. Queste tesi ammettevano una nozione positiva del noumeno di Kant, riproponendo una vecchia questione esegetica in esplicita opposizione alle interpretazioni neokantiane, che negano la realtà del noumeno considerandolo un'astrazione e un «concetto-limite» che fa da termine ideale all'inconcludibile indagine scientifica. In proposito è in corso un acceso dibattito tra D'Espagnat e filosofi neokantiani come Michel Bitbol, il quale ha difeso la tesi di un «a priori mobile» e costitutivo nel senso di Cassirer, criticando le speculazioni di D'Espagnat su una realtà che trascende ogni esperienza¹⁵⁹. In effetti l'impiego fatto da D'Espagnat dei concetti kantiani è problematico, non soltanto per il fatto di ammettere la positività del concetto di noumeno (cosa che i testi kantiani in qualche misura concedono). Il punto cruciale è che qualsiasi giu-

RA (ed.), *op. cit.*, pp. 714-735, in part. le conclusioni: 730-735. (Il contributo di Bell è alle pp. 687-690.)

¹⁵⁸ Si veda la recente sistemazione in B. D'ESPAGNAT, *Traité de physique et de philosophie*, Fayard, Paris 2002; tr. ingl. *On Physics and Philosophy*, Princeton University Press, Princeton (N. J.) 2006, in part. pp. 238-239, 362, per le citate qualificazioni della realtà «velata»; 284-88, per il confronto tra il fenomenismo kantiano e quello dell'autore, fondato sul carattere operativa della meccanica quantistica; 452, per un riepilogo degli argomenti a sostegno della tesi di un «fondamento delle cose».

¹⁵⁹ M. BITBOL, S. LAUGIER (éds.), *Physique et réalité*, Frontières, Paris 1997. Le repliche di D'Espagnat sono in *On Physics and Philosophy*, cit., pp. 376-402; cfr. *ivi* pp. 282-311 per l'interpretazione di Kant e Cassirer.

dizio sul noumeno deve essere riferito per definizione a una realtà non spaziale e non temporale, cosicché per formulare tale giudizio mancano gli elementi essenziali alla rappresentazione di un oggetto della conoscenza empirica. Proprio per questa ragione lo stesso Kant, dopo aver cercato a lungo una spiegazione metafisica delle proprietà dello spazio muovendo da un'analisi delle leggi dinamiche, riconobbe infine l'impossibilità di principio di un tale tentativo, traendone una demarcazione irriducibile tra pensare e conoscere¹⁶⁰. D'Espagnat, per risolvere questo problema, concede che le determinazioni della «Realtà» trascendente sono «negative». Ma la non-separabilità, per quanto suoni come una proprietà negativa e sia in parte indeterminata, presuppone la nozione di distanza spazio-temporale.

Più in generale, la distinzione interna al concetto di realtà proposta da D'Espagnat mira a realizzare una conciliazione tra la teoria del «fenomeno» di Bohr e l'indipendenza della «realtà fisica» di Einstein, e più in generale tra lo strumentalismo della teoria, riferito alla realtà empirica, e il realismo, riferito alla realtà in sé. Ma la realtà «velata», nel senso definito da D'Espagnat, sfugge *necessariamente* a qualsiasi accertamento teoretico e non corrisponde certo alla nozione di realtà fisica, indipendente e conoscibile, sostenuta da realisti come Einstein e Popper. La ricostruzione di D'Espagnat si conclude di fatto con un severa delimitazione delle pretese del sapere scientifico e con la sua equiparazione al sapere poetico, in linea con certo idealismo speculativo postkantiano¹⁶¹. Nondimeno l'articolazione interna al concetto di realtà ha sollecitato, anche tra i critici, un recupero delle analoghe distinzioni kantiane. Questo recente dibattito permette di trarre due conclusioni sulla presenza del kantismo nel dibattito teorico sulla fisica quantistica. In primo luogo, una cornice filosofica kantiana si mostra in grado di assimilare criticamente le diverse nozioni di positivismo e realismo che hanno dominato le pri-

¹⁶⁰ Per un'esposizione particolareggiata rimando a P. PECERE, *La filosofia della natura in Kant*, Edizioni di Pagina, Bari 2009, pp. 34-153.

¹⁶¹ D'ESPAGNAT, *On Physics and Philosophy*, cit., pp. 463-464.

me fasi del dibattito. D'altra parte, nonostante questo vantaggio analitico, essa non possiede strumenti per decidere del valore di varianti o teorie alternative e, come tutte le altre prospettive filosofiche rispettose del metodo sperimentale, è spinta a presupporre come punto di partenza la teoria corrente, col rischio di elevarne dogmaticamente alcuni aspetti allo *status* di verità definitiva. Quest'ultimo rischio, tuttavia, è stato tematizzato approfonditamente sul piano storiografico, nel quale si sono avuti almeno dei tentativi di elaborare criteri per risolvere il suddetto dilemma dell'*a priori* e dell'innovazione teorica (se modificare le categorie oppure la teoria).

Il dibattito storiografico, rispetto a quello fisico, è stato più significativamente caratterizzato da una componente kantiana. Jammer e Kuhn, per esempio, riconobbero esplicitamente un debito teorico verso Cassirer e la tradizione kantiana¹⁶². Riconoscendo il valore ontologico delle teorie scientifiche, ne *La struttura*, Kuhn adottava formulazioni marcatamente kantiane, affermando per esempio che i paradigmi sono parte integrante non soltanto della scienza, ma anche «della natura»¹⁶³. Così Kuhn, indagando la mutevolezza dei paradigmi (poi «lessici») scientifici, ritrovava anche il problema dell'*a priori* «storico». Esso assumeva una particolare urgenza perché la nozione di incommensurabilità tra i paradigmi poneva a rischio secondo diversi critici (come Popper) la nozione stessa di oggettività scientifica, in nome del relativismo culturale. Kuhn riteneva di poter salvaguardare l'idea di progresso scientifico senza adottare la prospettiva realistica di una descrizione sempre più accurata di una realtà data. Secondo Kuhn il sapere scientifico evolve sempre a partire da una situazione iniziale, in modo analogo al modo in cui evolvono le specie nel darwinismo. La

¹⁶² T.S. KUHN, *The History of Science*, in *International Encyclopedia of the Social Sciences*, Macmillan, New York 1968, pp. 74-83; poi in ID., *The Essential Tension. Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago Univ. Press, Chicago and London 1977, p. 108. E si veda di M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, cit., pp. 198-199, dove l'autore accoglie le tesi di Cassirer sull'interpretazione relazionale degli stati e sul primato del tutto sulla parte quali caratteristiche della fisica del secolo XX.

¹⁶³ KUHN, *The Structure*, cit.; tr. it. p. 138 sgg.

presenza di anomalie sperimentali dà luogo, in determinate fasi dello sviluppo storico, alla formazione di nuove teorie organicamente diverse dalle precedenti. Il vantaggio di una simile concezione consisteva nel fare a meno dell'assunzione realistica di una oggettività in sé, *indipendente* dai concetti scientifici, la cui posizione porterebbe a una contraddizione con le condizioni stesse della conoscenza. Questa idea di una oggettività «in sé» resterebbe perciò a margine dell'intero discorso filosofico e scientifico. Si trattava di un classico argomento kantiano. Infatti Kuhn riconobbe che la sua prospettiva poteva considerarsi una riformulazione del kantismo:

La posizione che sto sostenendo è quella di un kantismo post-darwiniano. Al pari delle categorie kantiane, il lessico fornisce la condizione preliminare di possibili esperienze. Le categorie lessicali, però, a differenza dei loro predecessori kantiani, possono mutare, e in effetti lo fanno, sia nel tempo sia con il passare da una comunità all'altra [...] Alla base di tutti questi processi di differenziazione ci deve essere, naturalmente, qualcosa di permanente, di fisso e di stabile. Come per la kantiana *Ding an sich*, però, questo qualcosa è ineffabile, indescrivibile, indiscutibile. Posta al di fuori del tempo e dello spazio, questa fonte di stabilità kantiana costituisce il tutto da cui sono stati prodotti sia gli esseri viventi sia le loro nicchie, tanto il mondo "interno" quanto quello "esterno". L'esperienza e la descrizione sono possibili solo se il descritto e il descrittore sono separati, e la struttura lessicale che segna questa separazione può farlo in modi diversi, ognuno dei quali dà luogo a una forma di vita differente, anche se mai completamente diversa. Alcuni modi sono più adatti a certi scopi, altri sono più adatti ad altri. Nessuno deve essere accettato come vero o rifiutato come falso; nessuno fornisce un accesso privilegiato a un mondo reale, opposto a uno inventato. I modi di "essere nel mondo" forniti da un lessico non sono candidati per il vero e il falso¹⁶⁴.

Tra le molteplici allusioni filosofiche contenute in questa densa pagina, era soprattutto il darwinismo a segnare la di-

¹⁶⁴ ID., *The Road Since Structure*, in «Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association», vol. 2 (1990), pp. 3-13; tr. it. in *Dogma contro critica*, cit., pp. 155-156.

stanza tra questo kantismo e quello sostenuto da Cassirer, in cui si cercava una legge di continuità nel progresso delle teorie scientifiche. Ciò comportava che il giudizio epistemologico sulla situazione scientifica risultasse singolarmente disarmato e affidato a una sorta di fatalismo storicistico (in tal senso Feyerabend aveva paragonato Kuhn a Hegel). Un tentativo di contrastare questo possibile esito delle tesi kuhniane, risalendo mediante Kuhn alle radici kantiane del movimento neopositivistico, è stato intrapreso negli anni successivi da Michael Friedman. Questi ha proposto un ripensamento storico e teorico del concetto di «*a priori* relativizzato», che riserva un ruolo specifico alla filosofia nel passaggio – graduale o rivoluzionario – tra le diverse teorie scientifiche¹⁶⁵. Friedman ha dunque proposto una griglia concettuale per l'analisi delle teorie scientifiche, distinguendo tre tipi di principi:

(1) «leggi empiriche di natura, come la legge newtoniana di gravitazione universale o le equazioni einsteiniane del campo gravitazionale, che affrontano direttamente e con precisione il “tribunale dell'esperienza” mediante un processo rigoroso di sperimentazione empirica»;

(2) i «principi costitutivamente *a priori*», tra cui vi sono le leggi fondamentali della geometria e della meccanica, che costituiscono ciò che Kuhn chiama “paradigmi” e sono soggetti a sostituzione nelle epoche di «profonde rivoluzioni concettuali»;

(3) i «meta-paradigmi filosofici» che svolgono un «ruolo indispensabile» in queste epoche, «servendo come fonte di suggerimenti e da guida – per così dire, da orientamento – nel motivare e sostenere il passaggio da un paradigma o cornice concettuale ad un altro»¹⁶⁶.

¹⁶⁵ M. FRIEDMAN, *Dynamics of Reason*, Open Court, Chicago 2001. Lo stesso Kuhn, sollecitato da Friedman a commentare la nozione di *a priori* proposta da Reichenbach (vedi *supra* nota 155), ha concesso che la sua nozione di lessico «assomiglia all'*a priori* di Kant, quando questo è preso nel suo secondo significato, quello relativizzato. Entrambi sono costitutivi dell'*esperienza possibile* del mondo» (T.S. KUHN, *Afterwords*, in P. HORWICH (ed.), *World Changes: Thomas Kuhn and the Nature of Science*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1993, p. 331.

¹⁶⁶ FRIEDMAN, *Dynamics of Reason*, cit., pp. 45-46.

La tesi di Friedman è che la filosofia (non solo quella dei filosofi, ma anche e soprattutto quella di grandi scienziati come Descartes, Newton, Einstein) possa svolgere un ruolo cruciale nella elaborazione razionale di nuovi principi di coordinazione *a priori* per le teorie scientifiche in discussione. Questo ruolo consiste non soltanto nel proporre nuovi «spazi di possibilità», ma anche nel cercare una continuità e una convergenza nella serie dei principi *a priori*, in modo da salvaguardare l'unità della razionalità di fronte al “fatto” del mutamento scientifico, e arginare le tesi del relativismo epistemologico (l'esempio discusso è Quine). Il riferimento chiave di Friedman, per l'elaborazione di questo programma, è proprio il pensiero di Cassirer e la sua ricerca di una «teoria delle invarianti dell'esperienza» avanzata per la prima volta in *Sostanza e funzione*¹⁶⁷.

I lavori di Friedman hanno contribuito, sul piano storiografico, ad archiviare definitivamente la contrapposizione tra neopositivismo e kantismo, di cui abbiamo rilevato la precarietà anche sul piano delle discussioni sulla fisica quantistica. Quest'ultimo campo, tuttavia, è rimasto quasi del tutto escluso dalle analisi di Friedman, che si sono concentrate prevalentemente sulla meccanica classica e relativistica. Riguardo alla meccanica quantistica, Friedman lamenta che essa fin dall'inizio «non è stata integrata in una tradizione meta-scientifica in corso», come invece è accaduto con la teoria della relatività di Einstein rispetto alle indagini sui fondamenti della geometria e della fisica di Helmholtz, Mach e Poincaré¹⁶⁸. Inoltre, la fisica quantistica non avrebbe influito sul dibattito filosofico successivo, così come invece sarebbe accaduto con la relatività che ha svolto un ruolo fondamentale nella genesi dell'empirismo logico. Friedman ha nondimeno so-

¹⁶⁷ *Ivi*, p. 65.

¹⁶⁸ *Ivi*, p. 121. Ciò ha comportato secondo Friedman che gli interventi filosofici nel dibattito – come il ricorso alla potenzialità di Heisenberg, i richiami a Kant associati alla complementarità, i collegamenti con il dualismo mente-corpo di Wigner o con la teoria leibniziana dei mondi possibili nella teoria di Everett – siano stati «estemporanei» (o «venuti fuori dal nulla»: *out of the blue*).

stenuto l'opportunità di svolgere indagini per individuare i «principi costitutivi» della meccanica quantistica, suggerendo di concentrarsi sul principio di complementarità e sulla logica a più valori. Riguardo a quest'ultimo caso, Friedman sostiene che esso costituisce «il giusto tipo di intervento dal livello filosofico»: esso infatti si ricollega a un «altro lavoro di possibile rilevanza nella fondazione delle scienze», ovvero ai fondamenti della matematica, e permette di riconciliare la meccanica quantistica con la relatività (lasciando da parte il problema della non-località)¹⁶⁹. Abbiamo già rilevato più volte come questa strada sembri piuttosto inibire che promuovere e orientare il mutamento scientifico. Le considerazioni epistemologiche di Friedman, d'altra parte, potrebbero ricevere una diversa applicazione al caso della fisica quantistica attraverso uno studio approfondito del ruolo che i “meta-paradigmi” filosofici hanno avuto nel dibattito scientifico, e viceversa: il presente saggio, considerando i casi di ‘positivismo’, ‘realismo’ e ‘kantismo’, intende fornire un contributo in tal senso.

In ogni caso, come mostrano gli ultimi esempi citati, è attualmente in corso una discussione sugli elementi filosofici della fisica in cui sembra possibile una convergenza tra posizioni inizialmente distinte come positivismo, realismo e kantismo¹⁷⁰. La ragione per cui la filosofia kantiana ha potuto e può costituire un punto di riferimento per fisici e filosofi di orientamento tanto diverso risiede in alcuni elementi di consenso che abbiamo incontrato nel corso della nostra esposizione storica. A conclusione di questo capitolo voglio provare a elencare gli elementi di consenso di matrice kantiana intorno ai quali si è formata di caso in caso la suddetta convergenza¹⁷¹.

¹⁶⁹ *Ivi*, pp. 122-123.

¹⁷⁰ Tra i più recenti documenti di questo dibattito mi limito a citare: M. BITBOL, P. KERSZBERG, J. PETITOT (eds.), *Constituting Objectivity: Transcendental Perspectives on Modern Physics*, Springer, Berlin 2009; M. DOMSKI, M. DICKSON (eds.), *Discourse on a New Method: Reinvigorating the Marriage of History and Philosophy of Science*, Open Court, Chicago 2010, con un lungo saggio di Friedman in cui è riesaminata la nozione di *a priori* relativizzato.

¹⁷¹ Presento di seguito un elenco di tesi che dovrebbero essere diversamente attestate e argomentate mediante uno studio dei testi kantia-

1) *La posizione di una dimensione di concetti e principi a priori della conoscenza, propri di una nuova metafisica, contro l'assunzione empiristica e positivistica del "puro fatto".*

Questa classica tesi di Kant, abbandonata dal neopositivismo in nome della dicotomia 'verità analitiche'-'enunciati osservativi', è stata gradualmente recuperata da molti filosofi di formazione empiristica. Come si è visto, essa ha ricevuto consensi presso i maggiori protagonisti del dibattito fisico sulla teoria quantistica.

2) *La fondazione della metafisica in base a un principio di significanza individuato non semplicemente nell'intuizione dei sensi, ma nell'intero sistema dei concetti della scienza della natura.*

Kant sosteneva che la metafisica potesse conferire «senso e significato» ai propri concetti, cioè «realizzarli», soltanto in riferimento all'intuizione della materia nello spazio. Ma questa intuizione – per es. quella del corpo, che equivale al concetto di sostanza – non costituisce un mero dato dei sensi, bensì si accompagna a un'indagine filosofica sui presupposti concettuali della costruzione fisico-matematica, che Kant ha intrapreso nei *Principi metafisici della scienza della natura* (1786) e nell'incompiuto *Opus postumum* (cominciato nel 1796). Il neokantismo ha gradualmente sostituito il tentativo kantiano di elaborare un sistema completo dei principi metafisici con il riconoscimento della funzione di un *a priori* storicamente mutevole. Come si è visto, anche questa revisione è stata ampiamente recepita da eminenti fisici teorici impegnati nella ricerca sulla meccanica quantistica.

3) *La distinzione di diversi sensi della realtà, non tutti riducibili alla realtà oggettiva indagata dalle scienze.*

Pur conferendo «realtà oggettiva» soltanto ai concetti della scienza della natura, Kant accorda realtà a tutte le percezioni, in quanto si accompagnano alla coscienza. (Per esempio, per Kant, lo stesso Io esiste, in quanto è dotato di un grado di coscienza, ma

ni. Per una ricostruzione dettagliata di questi temi – talora controversi – di esegesi kantiana mi limito a rimandare a P. PECERE, *La filosofia della natura in Kant*, cit.

non è possibile farne un oggetto in senso scientifico). Il neokantismo ha ampliato questa concezione conferendo una realtà *sui generis* agli oggetti delle “scienze dello spirito”. La filosofia delle forme simboliche di Cassirer ne è un esempio. Fisici come Bohr, Heisenberg, D’Espagnat, Penrose, si sono mostrati particolarmente aperti verso questo genere di considerazioni (cfr. *infra* cap. IV, par. 2).

4) *La critica dell’atomismo meccanicistico d’impostazione classica, in favore di una spiegazione della materia indipendente dai presupposti della percezione comune, e fondata sui concetti della teoria fisica (come ‘forza’ e ‘campo’).*

Kant aveva criticato l’atomismo della meccanica classica, sostenendo che esso si fondava su una rappresentazione dell’«immaginazione» che restava svincolata dalle leggi di natura. Perciò egli, come altri newtoniani della sua generazione, sostenne il primato filosofico di un «metodo dinamico di spiegazione», che riconducesse l’estensione fisica della materia all’azione di forze attrattive e repulsive. Un analogo tentativo è stato intrapreso, in un mutato orizzonte fisico, dalle teorie del campo di Einstein e Weyl, che Cassirer celebrò come raggiungimenti di una «dissoluzione della materia». Benché il problema sia ancora aperto, quasi tutte le interpretazioni della fisica quantistica – alla luce dell’intero orizzonte della fisica attuale – riconoscono che la rappresentazione particellare della materia costituisce un postulato bisognoso di chiarimenti e ulteriori indagini e non un principio fondato su una forma di evidenza intuitiva, empirica o metafisica.

La diffusione di queste tesi non è omogenea presso i fisici, ma rende plausibile una ricognizione filosofica del dibattito attuale che aggiorni il tentativo svolto già da Cassirer negli anni ’30, senza peraltro pretendere – in accordo con lo spirito della filosofia kantiana – la soluzione metafisica di tutti i punti di dissenso relativi all’elaborazione e all’interpretazione della meccanica quantistica. Qualche suggerimento in tal senso verrà offerto nell’ultimo capitolo.

IV
NOTE SU 'REALTÀ' E 'REALISMO'
NEL DIBATTITO ATTUALE

1. *Metafisica/fisica*

La ricognizione storica ci ha introdotto gradualmente agli aspetti dominanti nella riflessione attuale sulla fisica quantistica. Per un verso, la “fisica dei fisici” è fondata su un saldo pragmatismo, giustificato dall’efficacia predittiva della teoria, che si accompagna a diversi atteggiamenti di indifferenza, dogmatismo o prudente apertura riguardo alla ricerca sui fondamenti teorici. Questa separazione di piani, tipica di tutta la fisica matematica almeno dalla fine del secolo XVIII, risulta utile allo sviluppo dottrinale e tecnico di un sapere estremamente specializzato, lasciando spazio, almeno teoricamente, per la riflessione e l’innovazione. Parallelamente, con il tramonto del neopositivismo, i filosofi che si occupano della fisica sono meno impegnati nella formalizzazione e assiomatizzazione del fatto scientifico e più aperti a un ripensamento delle questioni concettuali (o, nel senso che questo termine ha assunto nel secolo XVIII in filosofi come D’Alembert e Kant, metafisiche) della scienza. Ciò pone le condizioni per una fertile riflessione interdisciplinare: così, quella parte della comunità dei fisici quantistici che lavora sulla ricerca di teorie alternative a quella standard, o su suoi perfezionamenti sostanziali, si rivolge oggi alla filosofia (compresa quella dei grandi fisici di un secolo fa) non tanto per procurare rigorose assiomatizzazioni della teoria o liquidazioni argomentative dei suoi problemi, quanto piuttosto per ricevere chiarimento e supporto circa la possibilità di avventurarsi verso ipotesi inesplorate.

Una diagnosi filosofica sullo stato della fisica quantistica, che tenga conto di queste circostanze e della loro storia, deve provare a tenere insieme il rispetto della complessità disciplinare e il distacco critico: il primo, per evitare di ignorare o fraintendere i contenuti del sapere fisico, il secondo, per non perdere di vista l'inevitabile apertura concettuale che rende possibile insieme la comprensione della teoria e l'escogitazione delle alternative, senza confondere la specializzazione disciplinare con una presunta autonomia teorica. Questi criteri sono posti alla base delle ricerche sulla *metafisica della fisica*, che hanno dato luogo negli ultimi venti anni a una nutritissima letteratura in cui il riferimento alla meccanica quantistica ha un ruolo essenziale. Mentre la tesi neopositivista di cercare nella fisica un criterio *generale* di significanza è caduta in disgrazia, si riconosce in genere l'esigenza che la libera elaborazione di ipotesi sulla natura, per non condurre verso la soppressione di quei criteri di prudenza empirica e critica che sono propri della scienza moderna, debba sottoporsi al vaglio delle più efficaci teorie fisiche: solo così si potrà ottenere una selezione tra le ipotesi metafisiche, che provano a qualificare le strutture fondamentali della natura. Questo problema è solitamente inquadrato nei termini di un realismo congetturale che assume senz'altro l'obietività del mondo fisico. Si legga la dichiarazione programmatica di Tim Maudlin, che è tra i filosofi più impegnati nello sviluppare l'indagine metafisica in riferimento alla meccanica quantistica:

La metafisica, o ontologia, è la più generale trattazione su ciò che esiste, e poiché la nostra conoscenza di ciò che esiste nel mondo fisico si basa sull'evidenza empirica, la metafisica deve essere riformata mediante la scienza empirica¹⁷².

Per esempio, Maudlin (come già D'Espagnat) individua nella non-località quantistica un criterio per negare validità alle metafisiche che, come quella di Lewis, concepiscono la

¹⁷² T. MAUDLIN, *The Metaphysics within Physics*, Oxford University Press, Oxford-New York 2007, p. 78.

realtà come un composto di enti separati¹⁷³. Questo principio metodico, che si suole riferire oggi a una *metafisica naturalizzata*, era stato già teorizzato da Popper sostanzialmente negli stessi termini. Secondo Popper, ferma restando l'opportunità di sviluppare «ardite congetture» metafisiche, si può e si deve porre un criterio di demarcazione tra possibilità metafisica e possibilità fisica: questo risiede nella falsificabilità, o almeno nella testabilità, delle teorie di riferimento¹⁷⁴. Tuttavia, come hanno osservato diversi critici, il carattere olistico e teoricamente plastico delle teorie fisiche permette di ignorare una falsificazione sperimentale: ciò pone in questione il suddetto criterio di demarcazione. Per stabilire la possibilità di un'ipotesi, si pone infatti il dilemma se prescindere dalla validità di una specifica teoria fisica – col rischio di perdere ogni demarcazione tra metafisica e scienza – oppure invece fondarsi su una teoria data – vincolando così il campo delle ipotesi ai limiti di questa stessa teoria. Questo dilemma – strettamente imparentato con quello che abbiamo rilevato nella discussione sull'*a priori* – è risultato particolarmente importante nella discussione sulla teoria quantistica. Abbiamo visto infatti che la stessa plausibilità delle ipotesi alternative è stata spesso criticata a partire dalla teoria standard e dal criterio di oggettività in essa posto: un caso esemplare è il dibattito Bohr-Einstein. Lo sviluppo della fisica quantistica ha posto dunque in evidenza le seguenti questioni: è possibile stabilire un criterio di significanza per la metafisica, indipendentemente dallo stato della teoria fisica? E come si devono intendere, di conseguenza, le nozioni di 'realtà empiric'a e di 'oggetto fisico'? In base alla dicotomia disciplinare tra metafisica (ipotetica) e fisica, oggi dominante, queste domande restano sospese inevitabilmente al suddetto dilemma e dunque alla contingenza storica del sapere scientifico.

¹⁷³ *Ivi*, pp. 50-77.

¹⁷⁴ Sul criterio di demarcazione si veda K.R. POPPER, *The Demarcation between Science and Metaphysics*, in P.A. SCHILPP (ed.), *The Philosophy of Rudolf Carnap*, Open Court, La Salle (Ill.) 1964, pp. 183-226; poi in *Conjectures and Refutations* cit., tr. it. pp. 431-498. In particolare sulla «possibilità fisica» cfr. già ID., *Logic of Scientific Discovery*, App. X (1959), p. 429. Cfr. la discussione di T. MAUDLIN, *op. cit.*, pp. 171, 184-191.

L'intera questione dell'*applicazione* della metafisica alla fisica discende storicamente dai sistemi di metafisica tra l'età cartesiana e il criticismo kantiano. Nella prospettiva di Kant, che progettò ma non scrisse mai una «metafisica della natura» separata, è possibile svolgere una considerazione critica sulla corrente distinzione disciplinare tra metafisica e fisica. Gettando le basi del suo «realismo empirico», Kant poneva spazio, tempo e categorie quali condizioni per la «sintesi del molteplice» percettivo che rende possibile la rappresentazione di oggetti. Questo criterio di significanza empirica serviva ad arginare le ambizioni del «realismo trascendente» proprio della vecchia metafisica, che pretende di riferirsi alla realtà pensando già costituita a prescindere dalle condizioni dell'intuizione (spazio e tempo) e del pensiero (categorie) che permettono di conoscerla. Ma lo stesso criterio non bastava ancora a stabilire una teoria dell'oggetto fisico, cioè, per dirla con Kant, a «mostrare» la realtà oggettiva di un concetto – per esempio, quello di sostanza, che designa ciò che permane identico nel mutamento dei fenomeni. Il riferimento alle percezioni spazio-temporali, infatti, deve collegarsi a tal fine all'individuazione di specifiche leggi fisiche di connessione dei fenomeni. Nel tentativo di collegare la metafisica alla scienza della natura, dunque, Kant concluse che, mentre la metafisica come scienza non sussiste indipendentemente dal riferimento alla fisica, la stessa fisica *si compone* di elementi metafisici, matematici ed empirici. Egli sostenne dunque che la fisica matematica, in quanto separata dalla metafisica (come cominciava ad essere comunemente alla fine del secolo XVIII), non era capace di giustificare i propri principi e concetti, giungendo fino ad auspicare che la «parte pura» della scienza della natura fosse inserita nei trattati di fisica newtoniana¹⁷⁵. Lo stesso oggetto fisico (all'epoca: corpo discreto o materia continua) non si potrebbe infatti considerare a prescindere dal sistema dei concetti dinamici (forze motrici) definiti mediante l'applica-

¹⁷⁵ Per le affermazioni qui discusse si veda in part. I. KANT, *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1786), in *Kants gesammelte Schriften*, cit., IV, pp. 472-476, 478; tr. it. Bompiani, Milano 2004, pp. 107-119, 123.

zione delle categorie. Si capisce dunque come mai, al termine del tentativo kantiano di elaborare una nuova «metafisica della natura» sistematica riferita agli oggetti dell'esperienza, metafisica della natura e fisica razionale venissero identificate, in quanto l'una coincide con gli elementi concettuali della seconda, i quali d'altra parte non sono validi senza entrare nel campo empirico e sperimentale della fisica.

Questa tendenza del pensiero kantiano si ritrova nei teorici dell'*a priori* storico, secondo i quali diviene esplicito che non soltanto la *validità*, ma lo stesso *contenuto* delle forme fondamentali della conoscenza oggettiva (spazio, tempo e categorie) si può stabilire esclusivamente attraverso una teoria fisica. Nella prospettiva storica secondo cui la scienza della natura non cresce per semplice accumulo di dati, ma anche mediante rivoluzioni teoriche che modificano il contenuto dei concetti fondamentali e dunque la stessa nozione di oggetto, il dilemma della reciproca dipendenza tra metafisica e fisica deve trovare soluzione mediante criteri metateorici che inducano a preferire l'una o l'altra teoria: un tema fortemente indagato, per esempio, da Cassirer e Kuhn.

Nel caso della meccanica quantistica, il dilemma ha riguardato finora teorie alternative predittivamente equivalenti. In questo caso, i criteri per la scelta tra le diverse teorie andranno cercati in considerazioni euristiche, poiché la pari efficacia descrittiva e predittiva delle alternative impedisce di stabilire un verdetto fondato sul criterio della validità empirica. Già nel caso del dissidio tra Einstein e Bohr sulla completezza della teoria, l'assenza di divergenze empiriche impedisce di decidere sul piano empirico se avesse ragione Bohr, nel sottoporre la determinabilità dell'oggetto fisico alle condizioni sperimentali, o Einstein, a pretendere una determinazione completa dell'oggetto fisico. Non a caso il dissidio si arenò intorno a due diverse definizioni concettuali di 'fenomeno' e 'realtà fisica', entrambe coerenti con diverse valutazioni della teoria e del suo contenuto empirico. Dal punto di vista metateorico, soprattutto alla luce del dibattito successivo, si può invece rilevare la debolezza dell'ipotesi di un valore definitivo della meccanica quantistica rispetto a un atteggiamento più cauto (cfr. par. 3).

Lo stesso Einstein, che non possedeva un'alternativa teorica, prendeva atto di questa *impasse* della conoscenza fisica quando (nel 1935) – riecheggiando inconsapevolmente una problematica che dall'*a priori* kantiano rimanda indietro al pensiero platonico – scriveva a Schrödinger:

La vera difficoltà sta nel fatto che la fisica è un tipo di metafisica; la fisica descrive “la realtà”. Ma noi non sappiamo cosa sia la “realtà”, se non attraverso la descrizione fisica che diamo di essa¹⁷⁶.

2. *Ontologia, limiti della descrizione fisica, realtà della coscienza*

Una seconda considerazione può prendere le mosse da un chiarimento sui termini ‘ontologia’ e ‘metafisica’, che abbiamo incontrato più volte nel corso della nostra ricostruzione. L'uso oggi dominante è di considerare la metafisica come disciplina che studia la struttura generale della realtà e l'ontologia come sottodisciplina che studia le entità di un particolare dominio. Storicamente, al contrario, l'ontologia è stata introdotta nella scolastica del secolo XVI come equivalente della filosofia prima o metafisica generale; mentre nel secolo XVIII filosofi legati alla tradizione scolastica come Wolff e Kant hanno suddiviso la metafisica in una parte generale (identificata con l'ontologia) e in diverse metafisiche “speciali”, che si occuperebbero di particolari generi di enti (tra queste Kant poneva anche la sua «fisica pura»). Anche gli autori che abbiamo incontrato nella nostra storia non usano i due termini secondo significati rigidi. Popper riabilitò il termine ‘metafisica’ per indicare il campo delle congetture ipotetiche e non usò quasi mai quello di ‘ontologia’; quest'ultimo venne invece preferito dall'antimetafisico Carnap per indicare una disciplina semantica

¹⁷⁶ Lettera di Einstein a Schrödinger citata in V. ALLORI, M. DORATO, F. LAUDISA, M. ZANGHI, *La natura delle cose. Introduzione ai fondamenti e alla filosofia della fisica*, Carocci, Roma 2005, p. 13.

associata a linguaggi determinati ed è rimasto dominante in tal senso negli studi americani (si pensi a Quine e Putnam). Al di là di come si vogliono definire i termini disciplinari, alla luce dell'odierno revival metafisico e delle tante speculazioni che attraversano il dibattito sulla fisica quantistica sembra utile rimarcare una distinzione tra enti in generale e oggetti empirici, al fine di conservare una suddivisione interna al concetto di realtà e parallelamente definire il dominio della fisica (valido ma limitato) nell'ambito del pensiero e dell'esperienza.

Il pensiero di Kant costituisce, ancora una volta, un esempio degno di riconsiderazione, anche per individuare l'origine di alcune riflessioni comparse nel dibattito sulla fisica quantistica. Criticando insieme il realismo metafisico e l'empirismo (che si ricombinano nell'odierna metafisica naturalizzata), Kant sostenne con decisione l'impossibilità di separare qualsiasi *oggettività* dall'attività sintetica delle facoltà conoscitive. Così, in primo luogo, egli distinse l'ente in genere dell'ontologia wolffiana (che oggi si direbbe piuttosto metafisica), che in quanto semplice pensiero non può essere considerato come un oggetto di conoscenza, dall'oggetto vero e proprio, che è definito sempre in riferimento a condizioni dell'esperienza. In secondo luogo, egli distinse la categoria di «realtà» (*Realität*), che designa il semplice contenuto empirico senza ancora stabilirne il riferimento a un oggetto, dalla più ristretta «realtà oggettiva», stabilita mediante i principi della conoscenza scientifica. In base a queste suddivisioni, per esempio, lo spazio non è né reale né oggettivo (è un ente ideale, la cui rappresentazione si accompagna sempre a quella di qualcosa di reale); il corpo materiale è reale e – in caso di una spiegazione della sua impenetrabilità tramite leggi dinamiche – anche oggettivo; infine le semplici percezioni dei sensi, i sentimenti morali, il piacere estetico e in generale la coscienza sono reali, ma non oggettivi. La lezione kantiana ha condotto alcuni tra i massimi filosofi del secolo XX (si pensi a Husserl, Cassirer, Heidegger) a definire la realtà dell'oggetto fisico come un dominio interno alla più vasta realtà dell'esperienza: un dominio delimitato a colpi di astrazione e, per quanto esemplare dell'attività conoscitiva umana, non identificabile con la 'realtà' in senso generale, che sarebbe indagata dall'ontologia o metafisica.

Cassirer, negli anni '20, realizzò un'interessante rielaborazione sistematica del concetto di realtà, aggiornando la prospettiva kantiana. Egli riconobbe che sussiste nella conoscenza scientifica una non sradicabile tendenza al realismo, che tende a far identificare la realtà fisica con una realtà in senso assoluto, quale viene considerata insieme dal senso comune e dalla vecchia metafisica¹⁷⁷. Per impedire lo sconfinamento del fondato realismo dei fisici – quel «realismo pratico», sempre sul punto di divenire dogmatico, di cui parlerà poi Weizsäcker –, Cassirer aveva proposto di inserirlo nella cornice di una più ampia concezione filosofica della conoscenza empirica. Egli aveva dunque proposto di distinguere diverse «forme simboliche» mediante cui viene organizzata l'esperienza, come «il linguaggio, la conoscenza scientifica, il mito, l'arte, la religione», che posseggono tutte una relativa validità in quanto espressioni dell'attività sintetica o «formatrice» dell'esperienza¹⁷⁸. Tra queste forme, la conoscenza scientifica è quella capace di stabilire un'oggettività universale, ma non per questo è capace di “tradurre” perfettamente i contenuti delle precedenti, quasi che essa descrivesse la realtà *vera e propria*.

Tra i risultati significativi dell'inquadramento di Cassirer per il caso della fisica quantistica si può citare la distinzione tra la casualità (introdotta dall'indeterminismo) e la libertà del vo-

¹⁷⁷ «Fino a quando la riflessione filosofica si riferisce solamente all'analisi della pura *forma conoscitiva* e si limita a questo compito, non può essere distrutta del tutto neppure la forza della visione ingenuamente realistica del mondo. L'oggetto della conoscenza può magari in qualche modo essere determinato e informato in essa in virtù della sua legge originaria, ma deve tuttavia, come sembra, esistere ed esser dato, anche fuori di questa relazione con le categorie fondamentali della conoscenza, come qualcosa di per sé stante». (E. CASSIRER, *Philosophie der symbolischen Formen*, Teil I, *Die Sprache*, Bruno Cassirer, Berlin 1923; tr. it. La Nuova Italia, Firenze, 1987, p. 12.

¹⁷⁸ *Ivi*, pp. 9-13. La pluralità delle forme dell'essere era già centrale nell'ontologia di Husserl, che rappresentò certamente un modello esemplare (peraltro più sistematicamente articolato) per queste elaborazioni di Cassirer. Un inquadramento dettagliato delle questioni quantistiche nell'ampia cornice dell'ontologia husserliana oltrepassa i limiti di questo lavoro.

lere. Era stato già Schlick a porre in evidenza l'eterogeneità delle due nozioni¹⁷⁹. Rielaborando le considerazioni di Schlick in base alla sua concezione della causalità come legalità fisica in genere, Cassirer scrisse:

La meccanica quantistica non ha abbandonato in alcun modo il concetto della legalità della natura, ma piuttosto ne ha dato una nuova versione. Se dunque un tale concetto costituisse una minaccia per l'idea di libertà morale, a quest'ultima non potrebbe venire alcun soccorso neppure da parte della meccanica quantistica [...] Al concetto supremo di *determinazione* non possiamo rinunciare in nessuno dei due casi, né nella costruzione del mondo fisico, né in quella del mondo etico. Ma nel regno dell'essere la determinazione ha luogo secondo altre categorie che non in quello del dovere. Tali categorie non entrano in contrasto perché appartengono a "dimensioni" della considerazione affatto diverse¹⁸⁰.

Le considerazioni di Cassirer, che facevano capo alla tesi secondo cui l'articolazione linguistica determina le diverse forme dell'esperienza e dell'oggettività scientifica, esercitarono una probabile influenza sui molti fisici che conobbero i suoi scritti, come Einstein, Born e Heisenberg. Tra i sostenitori dell'interpretazione standard della meccanica quantistica, che avevano tematizzato la limitatezza della conoscenza fisica, particolare attenzione fu prestata al fatto che la realtà è "definita dal linguaggio". L'interpretazione di Copenhagen, in base al primato della descrizione classica, non si accordava però con le tesi di Cassirer secondo cui il linguaggio della fisica quantistica comporterebbe un'interpretazione dell'oggettività ormai

¹⁷⁹ M. SCHLICK, *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik*, cit.; tr. it., p. 77.

¹⁸⁰ E. CASSIRER, *Determinismus und Indeterminismus*, cit.; tr. it. pp. 300, 302-303. Venti anni dopo, Popper raggiunse la medesima conclusione in base a un argomento diverso. La molteplicità delle dimensioni ontologiche (che Popper articolerà nella distinzione tra Mondo 1, 2 e 3) dipende dalla limitatezza della nostra conoscenza: «Siamo 'liberi' [...] non perché siamo soggetti al caso piuttosto che a rigorose leggi naturali, ma perché la progressiva razionalizzazione del mondo – il tentativo di catturare il mondo nella rete della conoscenza – ha dei limiti» (K. POPPER, *The Open Universe*, cit., p. 81).

svincolata dai presupposti della comune percezione¹⁸¹. Born, staccandosi su questo punto dall'«ortodossia», accolse l'identificazione di Cassirer della realtà fisica con le «invarianti dell'osservazione», riconoscendo la differenza tra le proprietà degli oggetti macroscopici e quelle degli elettroni¹⁸². Ma fu Heisenberg, nei suoi scritti epistemologici, a collegare i limiti della descrizione fisica con la plurivocità della realtà. Riprendendo molte delle osservazioni di Einstein sull'incompletezza della fisica, egli riconobbe l'apertura del sapere scientifico e la dipendenza di quest'apertura dal fatto che la descrizione della natura «necessariamente usa parole e concetti che sono soltanto vagamente definiti». Questa constatazione si accompagnava a una critica della concezione neopositivistica della conoscenza, che cercava nell'edificio logico della teoria scientifica un criterio per il significato di proposizioni facenti uso di termini come 'cosa' e 'esistenza'. Infatti, scriveva Heisenberg, l'organizzazione di una teoria scientifica secondo «un sistema chiuso di concetti ed assiomi [...] nello sviluppo delle scienze della natura costituisce piuttosto l'eccezione che la regola»¹⁸³. Inoltre, quando pure si realizzi tale organizzazione, l'intera teoria può risultare in disaccordo con l'esperienza e dunque comportare il riconoscimento che la sua applicazione possiede una validità limitata e che i suoi concetti non siano stati «ben definiti». Heisenberg applicava questo ragionamento a una rinnovata difesa della meccanica quantistica – che avrebbe mostrato i limiti di applicabilità dei concetti classici come la causalità – ma riconosceva anche i limiti di validità di quest'ultima rispetto alla «teoria delle particelle elementari» ancora

¹⁸¹ Si veda p. 86 nella recensione cit. di WEIZSÄCKER a CASSIRER, *Determinismus und Indeterminismus*, in cui difendeva in proposito il punto di vista della complementarità.

¹⁸² M. BORN, *Natural Philosophy*, cit.; tr. it., pp. 131-134. Peraltro Born parlava di «dualità» della rappresentazione ondulatoria e particellare, poiché entrambe sarebbero indispensabili a descrivere ogni «fenomeno quantistico reale». Cfr. la lettera di Born a Cassirer del 19 marzo 1937, in CASSIRER, *Ausgewählter wissenschaftlicher Briefwechsel*, cit., p. 160-162.

¹⁸³ W. HEISENBERG, *Physics and Philosophy*, cit.; tr. it. p. 104.

mancante¹⁸⁴. Si trattava della teoria quantistica del campo cui Heisenberg lavorava negli anni '50 e che avrebbe potuto condurre ai risultati auspicati un tempo da Einstein: l'«intelligenza completa dell'unità della materia» (intesa come energia) mediante la deduzione delle sue diverse forme (le particelle elementari) come soluzioni di equazioni¹⁸⁵. A prescindere dalla specifica valutazione sullo stato della teoria quantistica – che per Heisenberg era valida nel suo ambito, e comportava un'ontologia della “potenzialità”, mentre per Einstein era solo utile a descrivere i fenomeni e comportava una rinuncia alla stessa nozione di oggettività – Heisenberg riconosceva dunque i limiti di validità di *ogni teoria fisica* rigorosamente assiomaticizzata.

Da quest'assunzione Heisenberg ricavava una sorprendente ipotesi ontologica sul linguaggio comune. Considerando il carattere idealizzato e la validità limitata a determinati ambiti di fenomeni che sono propri dei concetti scientifici, si rileva per contrasto che i concetti del linguaggio naturale, benché vaghi e al limite contraddittori, sono più stabili e posseggono «una connessione immediata alla realtà»¹⁸⁶. Il riferimento alla realtà non era del tutto perspicuo e articolato: Heisenberg si riferiva in un caso alla realtà quotidiana di «cose e fatti», contrapponendola al «mondo di possibilità e potenzialità» delle particelle elementari; altrove si riferiva a concetti del linguaggio comune (e della metafisica) come 'anima' e 'Dio', sottolineando che anche questi «toccano la realtà»¹⁸⁷. Egli aveva comunque colto (riecheggiando inconsapevolmente Kant) una distinzione tra 'realtà oggettiva', in quanto riferimento della fisica, e 'realtà' in genere, in quanto mero contenuto empirico, pur senza articolarla adeguatamente sul piano filosofico.

Grazie alla sua particolare attenzione al valore ontologico del linguaggio comune, Heisenberg intrattenne negli anni '50 un dialogo con Heidegger, il quale era particolarmente inte-

¹⁸⁴ *Ivi*, p. 121.

¹⁸⁵ *Ivi*, p. 195.

¹⁸⁶ *Ivi*, pp. 323-333.

¹⁸⁷ *Ivi*, pp. 217-233.

ressato a denunciare la ristrettezza dell'immagine scientifica del mondo. Nella filosofia continentale successiva – tra fenomenologia, neokantismo, “teoria critica” della scuola di Francoforte – è rimasta fondamentale l'indagine sui limiti della “razionalità strumentale” della scienza¹⁸⁸. Il dialogo tra fisici e filosofi, tuttavia, è stato dominato dal modello delle ontologie analitiche, in cui il problema dell'irriducibilità dell'esperienza alla descrizione fisica, complice la persistenza dell'ideale riduzionistico di Carnap e Neurath, è stato meno sviluppato. Sarebbe interessante riconsiderare questa problematica dello iato tra realtà in genere (oggetto dell'ontologia o metafisica che dir si voglia) e realtà oggettiva della fisica, abbandonando ogni accento anti-scientifico, alla luce di un dibattito scientifico attuale in cui i fisici più filosoficamente impegnati usano concedere la provvisorietà della meccanica quantistica e in genere l'inadeguatezza della descrizione fisica rispetto a una più ampia concezione della realtà¹⁸⁹.

3. *Oggettività, visualizzabilità, ricerca di modelli alternativi*

Tra gli equivoci prodotti dalla polemica ‘realismo’-‘positivismo’ intorno alla meccanica quantistica vi è stata la sovrapposizione tra la questione della ‘realtà’ e quella della ‘visualizzabilità’. L'abbandono di una visualizzazione meccanicistica classica della materia, in quanto composta essenzialmente di particelle indistruttibili, si è già consumato, nella seconda metà del secolo XIX, per opera di scienziati e filosofi come Helmholtz, Hertz, Poincaré, Mach e Duhem. In particolare, il riconoscimento del carattere ideale e astratto della rappresentazione fisica della materia ha condotto a identificare l'oggetti-

¹⁸⁸ Per le relazioni tra Heisenberg, Heidegger e Habermas si veda l'utile ricostruzione storica di C. CARSON, *Science as Instrumental Reason: Heidegger, Habermas, Heisenberg*, «Continental Philosophy Review», 42, (2010) 4, pp. 483-509.

¹⁸⁹ Si pensi, per esempio, alle considerazioni di R. PENROSE, *The Road to Reality*, Knopf, New York 2005; tr. it. Rizzoli, Milano 2005, pp. 1027-1029.

vità con una struttura teorica invariante, che nelle diverse fasi storiche della teoria è associata a immagini diverse. Poincaré svolse una tale considerazione all'inizio del secolo XX in reazione alle tesi sulla "bancarotta della scienza", che facevano leva sulla crisi del meccanicismo e sulla mutevolezza delle teorie scientifiche. Prendendo l'esempio delle equazioni della teoria elettromagnetica, Poincaré scrive che queste ultime

esprimono dei rapporti e, se le equazioni restano vere, significa che tali rapporti conservano la loro realtà. Esse ci insegnano, ora come allora, che vi è un certo rapporto tra qualcosa e qualcosa d'altro; solo che questo qualcosa lo chiamavamo un tempo *movimento* mentre ora lo chiamiamo *corrente elettrica*. Ma queste denominazioni non erano che immagini sostituite agli oggetti reali che la natura ci nasconderà in eterno. I veri rapporti tra questi oggetti reali sono la sola realtà che potremmo raggiungere, e la sola condizione è che sussistano gli stessi rapporti tra questi oggetti e tra le immagini che siamo costretti a mettere al loro posto. Se questi rapporti ci sono noti, non ha alcuna importanza se giudichiamo comodo sostituire un'immagine con l'altra¹⁹⁰.

Generalizzando una simile concezione, come abbiamo visto, Cassirer formulò la sua tesi sull'oggetto come «invariante dell'esperienza»¹⁹¹. Fino ai suoi ultimi scritti, Cassirer non cessò di insistere sul fatto che il linguaggio della fisica si andava distinguendo in modo sempre più marcato da quello della comune esperienza percettiva. Inoltre, egli ebbe buon gioco nel

¹⁹⁰ H. POINCARÉ, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris 1902; tr. it. Bompiani, Milano 2003, pp. 241-243.

¹⁹¹ L'accostamento tra lui stesso e Poincaré, proposto da Cassirer, andrebbe discusso. Nel dibattito epistemologico contemporaneo le tesi di Poincaré sono comunemente associate alla tesi del realismo strutturale. Il collegamento tra Cassirer e il realismo strutturale è discusso per es. in B. GOWER, *Cassirer, Schlick and 'Structural' Realism*, «British Journal for the History of Science», 8 (2000), pp. 71-106. Sul nesso tra kantismo e realismo strutturale si possono vedere: S. FRENCH, J. LADYMAN, *Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure*, «Synthese», 136 (2003), 1, pp. 31-56; H. LYRE, *Structural Realism and Abductive-transcendental Arguments*, in M. BITBOL et al. (eds.), *Constituting Objectivity*, cit., pp. 491-501.

constatare come – al di là degli occasionali verdetti sulla insensatezza della questione della realtà quantistica – quasi tutti i fisici che si sono occupati di interpretare la meccanica quantistica hanno convenuto su questo punto. Pur riconoscendo che una visualizzabilità in senso classico sarebbe ormai irrecuperabile, Cassirer ribadiva con chiarezza che la visualizzazione dell'atomo ha svolto e possiede pur sempre un'intrinseca «funzione euristica» in fisica¹⁹². La stessa considerazione fece Bohm, nel sostenere che l'interpretazione ortodossa comporterebbe una «limitazione nel tipo di teorie che si desiderino prendere in considerazione», rischiando di produrre una «catena chiusa di ipotesi circolari» e rinunciando a uno degli scopi della teoria fisica, che non è soltanto quello di «collegare i risultati di osservazioni che sappiamo già come effettuare», ma anche di «suggerire il bisogno di nuove specie di osservazioni e predire i loro risultati»¹⁹³.

Una prospettiva diversa si accompagnava all'interpretazione di Bohr. Tipico del paradigma “ortodosso” inaugurato da Bohr è stato il fatto di non proporre un'interpretazione, omogenea alle altre, ma qualcosa come una meta-interpretazione, capace di fondare una teoria “definitiva” e con essa stabilire dei limiti permanenti di conoscibilità. Bohr collegava questa tesi, oltre che all'analisi del formalismo, all'impiego di immagini corpuscolari e ondulatorie nella interpretazione degli esperimenti e alla necessità di far uso del linguaggio comune per descrivere questi ultimi. Ciò comportava un verdetto di definitività anche nel campo della visualizzazione e dunque escludeva la possibilità che si adottasse un sotto-linguaggio diverso per descrivere la realtà delle percezioni e la realtà quantistica. Di fatto, a partire dagli anni '50, esistono interpretazioni e teorie alternative – monistiche o dualistiche, deterministi-

¹⁹² E. CASSIRER, *Determinismus*, cit.; tr. it. pp. 209-10, 218. Per una rassegna sull'epistemologia del secolo XIX e un bilancio sul dibattito in fisica quantistica si veda pure ID., *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*, 4.Bd., W. Kohlhammer, Stuttgart 1957 (pubbl. prima in tr. ingl. Yale Univ. Press, New Haven-London 1950), pp. 88-124.

¹⁹³ D. BOHM, *A Suggested Interpretation*, cit., pp. 372; 391-392.

che o stocastiche – che posseggono diversi gradi di visualizzabilità. Gli argomenti filosofici di Bohr non sembrano dunque sufficienti a stabilire la particolare interpretazione della complementarità, che non gode oggi di un diffuso consenso presso i fisici. Per giustificare la “duplicità” rappresentativa della teoria, ad esempio, Lévy-Leblond¹⁹⁴ ha proposto di chiamare gli oggetti quantistici «quantoni» e più in generale Bell ha insistito sull’esigenza di esaminare le teorie quantistiche in termini di «esseribili» piuttosto che di «osservabili», per elaborare una concezione univoca dell’oggettività quantistica.

Su questa sovrapposizione di filosofia e fisica nelle tesi di Bohr cadde in errore lo stesso Cassirer, secondo il quale la «sovrapposizione» («Überlagerung») di aspetti particellari e ondulatori, in fisica quantistica, rispecchierebbe la più generale «collaborazione» (*Zusammenarbeit*) di tutte le funzioni simboliche nella determinazione del concetto di realtà¹⁹⁵. Ma la “complementarità” – se così la si vuol chiamare – che collega le diverse forme dell’esperienza è ben diversa da quella postulata da Bohr, che collega due forme di rappresentazione interne alla medesima sfera della conoscenza fisica. La prima, tuttavia, non pone alcun vincolo a nuove interpretazioni dei concetti scientifici, mentre la seconda introduce un limite insuperabile.

La riflessione di Bohr sulla fisica quantistica ha avuto comunque il merito di rilevare la necessità, imposta dalla teoria, di riconsiderare lo iato tra la descrizione condotta nel linguaggio comune e la realtà fisica. Questo iato è ben avvertito nelle indagini più recenti sull’ontologia associata alla teoria quantistica. Sono attualmente in esame teorie monistiche che assumono la funzione d’onda come descrizione della realtà (per esempio le teorie a multi-mondi), eventualmente introducendo in essa delle modifiche (come i modelli GRW) e teorie che rielaborano l’idea del dualismo onda-particella. Il problema

¹⁹⁴ J.-M. LÉVY-LEBLOND, *Neither Waves, nor Particles, but Quantons*, «Nature», 334 (1988), pp. 19-20; ID., *On the Nature of Quantons*, «Science & Education», 12 (2003), pp. 495-502.

¹⁹⁵ E. CASSIRER, *Determinismus*, cit.; tr. it. p. 313. Per una concezione diversa, che accoglie il valore metateorico dell’interpretazione di Copenhagen, si veda il saggio di N. Argentieri in questo volume.

dell'interpretazione ontologica della teoria è complicato dal fatto che un medesimo formalismo può essere talvolta interpretato mediante concezioni dell'oggetto spazio-temporale («ontologie primitive») differenti. Gli studi più recenti stanno indagando gli elementi ontologici comuni e divergenti tra le teorie alternative¹⁹⁶.

In ogni caso – come abbiamo già accennato nel par. 1 –, il dibattito contemporaneo si deve considerare ancora interno al medesimo paradigma: l'assenza di divergenze predittive rende necessario cercare diversi valori metateorici per stabilire eventuali preferenze tra le alternative in campo. La filosofia non può risolvere la disputa, ma può discutere alcuni di questi valori, come la semplicità o la regolarità estetica. Per restare ai valori euristici, pare che due siano i criteri intorno ai quali potrebbe giocarsi il prevalere di una nuova teoria:

- possibilità di connessioni con altri campi già stabiliti della fisica;
- possibilità di connessione con altri campi dell'esperienza.

Riguardo al primo punto, è in discussione l'unificazione della meccanica quantistica con le altre dottrine fondamentali della fisica. I primo luogo vi è il problema della compatibilità con la teoria relativistica, che ha incontrato notevoli difficoltà tecniche, ma che sta trovando di recente risultati positivi. So-

¹⁹⁶ La tesi secondo cui ogni formalismo della meccanica quantistica non possiede un'ontologia ovvia, insieme a un esame della questione nelle varie teorie e interpretazioni alternative, si trova in H. PUTNAM, *Quantum Mechanics and Ontology*, intervento al convegno "Analysis and Interpretation in the Exact Sciences. A Workshop in Honour of William Demopoulos", 2-4 maggio 2008, London, Ontario, Canada (ora nella miscellanea *Philosophy in an Age of Science*, cit.). Per una panoramica più tecnica sulla questione si veda: N. ZANGHÌ, *Chiarezza ontologica e meccanica quantistica*, «Giornale di Fisica», 50 (2009), pp. 75-85. Qui compare anche la citata nozione di 'ontologia primitiva'. Per un esemplare confronto tra meccanica bohiana e modelli del collasso spontaneo si veda V. ALLORI, S. GOLDSTEIN, R. TUMULKA, N. ZANGHÌ, *On the Common Structure of Bohmian Mechanics and the Ghirardi-Rimini-Weber Theory*, «British Journal for the Philosophy of Science», 59 (2008), pp. 353-389.

no interessanti anche le connessioni con altri concetti e principi della fisica talvolta associate a particolari interpretazioni o teorie alternative: come esempio del primo caso si può citare l'argomento a favore della teoria a molti mondi, secondo cui in ottica cosmologica non si può distinguere tra strumento e sistema di misura per introdurre il collasso della funzione d'onda; come esempio del secondo caso, le ipotesi di collegamento delle modifiche non lineari della funzione d'onda con la teoria della gravitazione¹⁹⁷. Analoghi interessi posseggono le *divergenze* rispetto a fondate parti della teoria fisica, tra cui si può citare la violazione del principio di conservazione dell'energia che in modi diversi riguarda sia le teorie a molti-mondi, sia (in maniera esplicita) i modelli del collasso spontaneo. Il dibattito su tutti questi temi ha ricevuto un'intensificazione negli ultimi anni, riportando in evidenza l'instabilità del paradigma quantistico.

Riguardo alle interazioni con altri campi della conoscenza, come abbiamo visto, numerosi sono stati fin dagli anni '20 gli interventi a favore di una connessione tra la meccanica quantistica e i problemi della biologia e della psicologia. Bohr sostenne che la teoria darebbe in proposito indicazioni *negative*, fornendo l'esempio di aspetti della realtà che la scienza non potrebbe descrivere in modo univoco. Un simile punto di vista, al di là delle tesi della complementarità, è stato assunto da autori diversi come Heisenberg, Cassirer, D'Espagnat. Ma molti altri fisici e filosofi, come abbiamo visto nel corso dell'esposizione, hanno ipotizzato che la meccanica quantistica potrebbe fornire indicazioni *positive* sui problemi di altre discipline scientifiche, incoraggiando lo sviluppo di nuove ipotesi (ora a favore, ora contro il progetto di riduzione di tutti gli aspetti della realtà a un determinato modo di descrizione fisica). Il carattere ampiamente speculativo della questione, tipico delle questioni di frontiera della scienza, rende difficile trarre

¹⁹⁷ Su quest'ultimo caso si vedano per esempio: R. PENROSE, *On Gravity's Role in Quantum State Reduction*, «General Relativity and Gravitation», 28 (1996), pp. 581-600; S.L. ADLER, A. BASSI, *Is Quantum Theory Exact?*, «Science», 325 (2009), pp. 275-276.

una qualche conclusione sul dibattito e gli stessi fisici sono oggi molto prudenti¹⁹⁸.

Si può fare però un'osservazione di metodo, che rimanda alle considerazioni dei due paragrafi precedenti: la stessa posizione di questo problema dipende da un chiarimento sul senso dei concetti quantistici, a cominciare da quello di 'oggetto'. Molti interpreti, tra cui lo stesso Heisenberg, hanno sostenuto che la fisica quantistica avrebbe decretato il definitivo tramonto della metafisica materialistica ottocentesca associata alle rappresentazioni particellare o ondulatoria della materia, e dunque avrebbe consolidato dall'interno della fisica l'esigenza che la descrizione scientifica della realtà non possa essere effettuata mediante un linguaggio unico. Un tale giudizio si potrebbe accostare a quello che negli stessi anni della rivoluzione quantistica venne emesso riguardo alla psicologia da Freud, il quale riconobbe l'irriducibilità dei fenomeni psichici al linguaggio della fisiologia e della chimica e l'indispensabilità di una descrizione fondata anche sul linguaggio «figurato della psicologia»¹⁹⁹. Tuttavia, se si vogliono riprendere simili considerazioni per collocare la meccanica quantistica nel campo più vasto della conoscenza umana, ciò può avvenire solo a condizione di chiarire il senso dell'oggettività che essa, in quanto teoria fisica, mira intrinsecamente a definire. Anche per tale ragione, nell'attuale situazione di apertura del paradigma quantistico, è da accogliere con favore l'intensificarsi degli studi sull'ontologia delle diverse teorie. È auspicabile che queste indagini vengano generalizzate in una cornice ontologica massimamente generale, che, tenendo conto anche

¹⁹⁸ Per farsi un'idea sulle vedute dei fisici riguardo a questo vasto territorio congetturale sono ancora utili le interviste a Aspect, Bell, Wheeler, Peierls, Deutsch, Taylor, Bohm, Hiley contenute in P.C.W. DAVIES, J. R. BROWN (eds.), *The Ghost in the Atom: a Discussion of the Mysteries of Quantum Physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1986.

¹⁹⁹ Si tratta della difficoltà di principio di una spiegazione «energetica» dei fenomeni psichici, in quanto essa comporta il passaggio tra due linguaggi eterogenei. S. FREUD, *Jenseits des Lustprinzips*, Intern. Psychoanalytischer Verlag, Leipzig-Wien-Zürich (1920); tr. it. *Al di là del principio del piacere*, in *Opere*, Boringhieri, Torino 1967-1979, vol. IX, pp. 189-249: 245sgg.

delle tradizioni kantiana e fenomenologica circoscriva il concetto di ‘oggettività’ all’interno di quello più ampio di ‘realtà’ e chiarisca se e come i concetti di ‘oggetto’ delle diverse teorie quantistiche possano essere collegati a quei campi dell’esperienza in cui si tratta di ‘oggetto’ in senso completamente diverso, o addirittura non si hanno ‘oggetti’ veri e propri.

In questa prospettiva, la rinuncia alla visualizzazione o le tesi della complementarità appaiono oggi come delle conclusioni premature, che impediscono direzioni di indagine ancora aperte. Negli studi più recenti sulle ontologie quantistiche – che si concentrano soprattutto su meccanica bohmliana, teorie a molti mondi, modelli del collasso spontaneo della funzione d’onda, oltre che su sviluppi della teoria standard come la teoria quantistica dei campi – non si stabilisce se la teoria nel suo stato provvisorio possieda una verità definitiva, né se essa possa mai acquisire un tale stato. Ma l’analisi filosofica è capace di distinguere questioni cui la presente teoria quantistica può dare un contributo e altre che rimangono escluse dal suo orizzonte, in quanto non sono formulabili al suo interno.