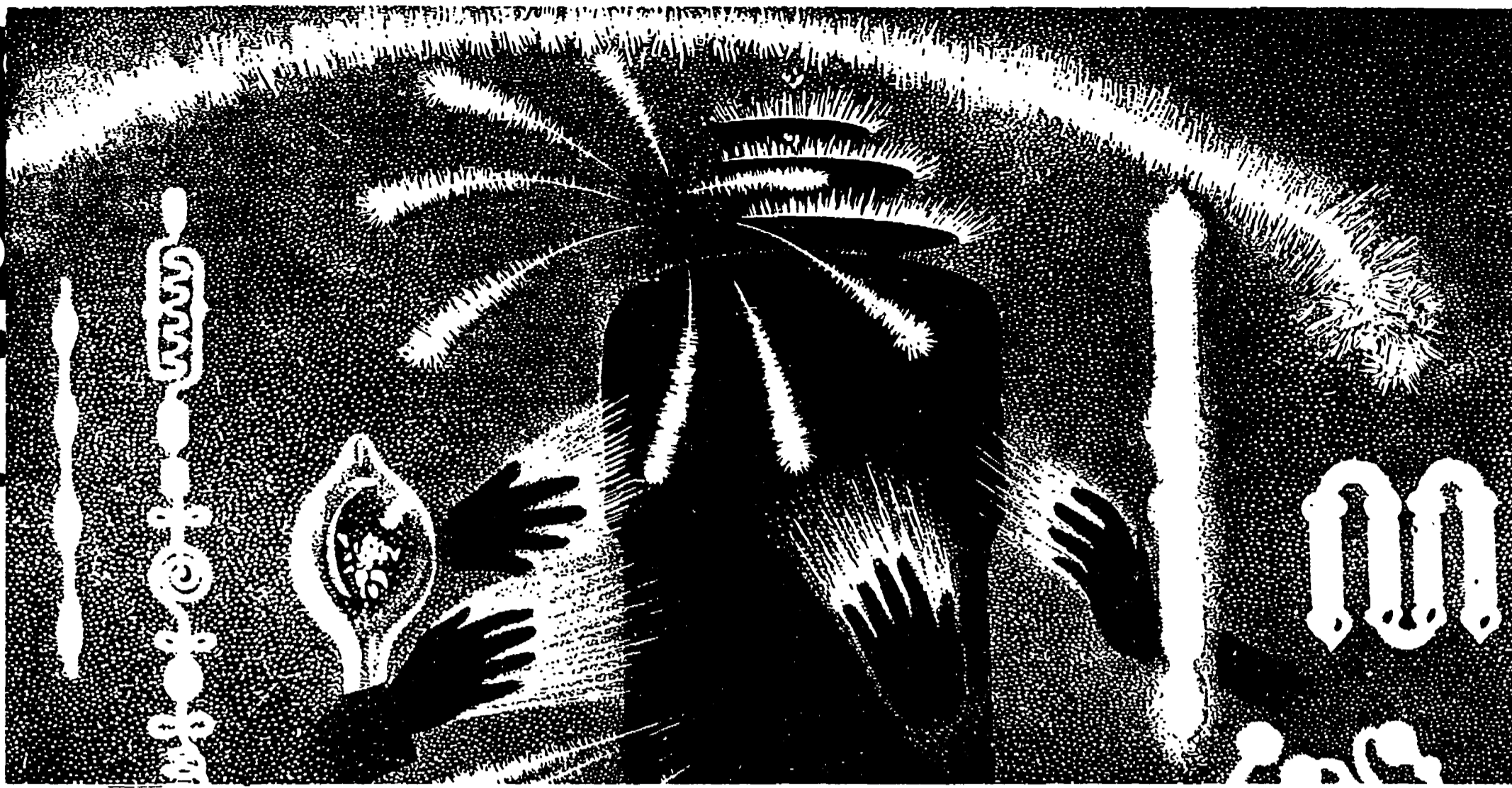




L'alta tensione  
e i tubi Geissler in  
una stampa dell'800.  
Sotto, Niels Bohr e Einstein



Il dibattito tra Einstein e Niels Bohr appassionò, a cavallo degli anni Trenta, il mondo della fisica. A Cesena un convegno fa il punto su una disputa che ancora divide gli studiosi. Ecco di che si parlerà

# Il gioco dei grandi Vecchi

Da oggi a sabato, a Cesena, si svolge un convegno nazionale sul tema: «Il paradosso della realtà fisica», promosso dal Comune di Cesena con patrocinio della Provincia di Forlì e della società italiana di storia e filosofia delle scienze. L'occasione è la coincidenza del centenario della nascita di Niels Bohr, uno dei padri fondatori della fisica moderna, e del cinquantesimo anniversario del Paradosso di Einstein-Podolski-Rosen. C'è uno stretto rapporto fra i due termini del convegno (unico in Italia), nel senso che entrambi fanno riferimento all'«origo» del «presunto indeterminismo e probabilismo della «realtà»». Il grande fisico danese lo fa derivare dalla validità della nuova teoria quantistica, mentre per Einstein e soci tutto dipende solo dalla sua incompletezza.

Il dibattito si allargò assai presto e impegnò fisici, storici e filosofi in esperimenti, considerazioni e riflessioni, e proprio nel nostro Paese trovò il suo sviluppo più avanzato. E anche perché al convegno cesenate interverrà il gotha, una ventina di nomi, degli esperti in materia: grandi matematici del calibro di un Antonio Pignodoli; principi della fisica come Giuliano Toraldo di Francia; e big della filosofia come Marcello Cini.

Sull'argomento pubblichiamo in questa pagina due contributi di Pasquale Tucci, docente di Fisica generale applicata all'Università di Milano e di Giuseppe Marchesini, docente di Fisica superiore all'Università di Parma.

**C**APITA piuttosto di rado che gli scienziati mettano in discussione i criteri ai quali le loro teorie debbono obbedire per essere giudicate soddisfacenti. E più frequentemente, invece, nella storia della scienza, il dibattito sui risultati delle teorie e sulla loro capacità di fornire risposte attendibili sulla base di criteri dati, a problemi che la comunità scientifica considera rilevanti. In conseguenza di questa prassi le teorie si avvicinano con un ritmo più rapido dei criteri con i quali esse vengono giudicate. Ciò consente alle teorie di poter esprimere in un quadro di valori stabili nel tempo, tutte le loro potenzialità conoscitive. Laddove un rapido avvicinamento dei valori di riferimento interromperebbe prematuramente la crescita di ipotesi teoriche prima che esse abbiano potuto fornire i frutti che sono in grado di produrre.

Nel '600, ad esempio, insieme alla proposizione di una nuova teoria — la Meccanica — si riformularono i criteri che dovevano presiedere alla valutazione della bontà delle conoscenze scientifiche che si andavano acquisendo. Lo stesso dibattito scientifico — quello autentico, naturalmente, e non quello strumentale a qualche tesi preconfezionata — sulla teoria darwiniana dell'evoluzione, fu in larga misura incentrato sui requisiti che doveva possedere una teoria perché potesse essere considerata scientificamente valida. Per molti versi la stessa di-

scussione, a cavallo degli anni '30, tra Einstein da una parte e i fisici quantisti dall'altra — Bohr, Heisenberg, Born, ecc. — aveva per oggetto i criteri di valutazione ai quali doveva essere assoggettata la meccanica quantistica perché potesse essere considerata soddisfacente dal punto di vista conoscitivo. Einstein, insieme a Podolski e a Rosen, nel 1935, pubblicò un articolo dal titolo «Può essere considerata completa la descrizione della realtà fisica fornita dalla meccanica quantistica?». La perentoria risposta alla provocatoria domanda era un secco «no»; così come fu senza sfumature la risposta di Bohr alla stessa domanda: «Sì». Con questo articolo Einstein intendeva argomentare in maniera esplicita e compatta le tesi che da un decennio lo vedevano contrapposto a Bohr e ai fisici che concordavano sulla cosiddetta «interpretazione di Copenaghen» della meccanica quantistica.

La contrapposizione tra Einstein e Bohr era totale: innanzitutto Einstein provava un istintivo fastidio per il tono ispirato con il quale la nuova teoria veniva presentata come «tranquillizzante filosofia (o «religione?»). Einstein, inoltre, rivolgeva serrate critiche non solo a certi aspetti fisico-matematici della teoria, ma soprattutto al suo status logico-epistemologico e filosofico. La controversia, infatti, si incentrava sui criteri di valutazione della teoria. Per Einstein una teoria, per essere considerata scientifica, doveva obbedire ai seguenti requisiti: innanzit-



to doveva essere corretta, nel senso che doveva esserci accordo tra le conclusioni alle quali perveniva la teoria e l'esperienza umana. La teoria, inoltre, doveva essere completa. Sulla base di quest'ultimo criterio ogni elemento della realtà fisica, considerata indipendentemente dai sistemi concettuali usati per descriverla, doveva avere un corrispettivo nella teoria. Basta leggere le prime righe del lavoro di Einstein e altri per rendersi conto del livello al quale lo scienziato tedesco intendeva porre le questioni che sollevava contro la meccanica quantistica: «Ogni seria considerazione di una teoria fisica deve prendere in considerazione la distinzione tra realtà oggettiva, che è indipendente da ogni teoria, e i concetti fisici con i quali la teoria opera. Questi concetti sono intesi corrispondere alla realtà oggettiva, e per mezzo di questi concetti ci rappresentiamo questa realtà». Dall'applicazione di questi criteri Einstein giungeva alla conclusione che la meccanica quantistica, pur essendo corretta non era completa. O, per lo meno, se si ipotizzava la sua completezza, nel senso prima detto, si perveniva a paradossi e anomalie insanabili.

Posta la questione in questi termini la risposta di Bohr non poteva discendere dai risultati di qualche esperimento di una qualche misura. La risposta, invece, dipendeva in larga misura dall'atteggiamento culturale e filosofico dei due scienziati verso la realtà fisica. Come ha recen-

temente affermato uno dei tre autori dell'articolo del '35, Rosen, in fin dei conti era «una questione su ciò in cui uno crede». Einstein credeva nell'esistenza di una realtà oggettiva, indipendente dall'osservatore, il quale, con l'aiuto di misure, poteva ottenere informazioni sulla realtà. Quest'ultima esisteva indipendentemente dalle misure e indipendentemente dal fatto che un essere umano l'osservasse.

Bohr, invece, sosteneva che gli elementi di realtà in un dato sistema sono determinati dagli apparati sperimentali che sono adoperati per analizzarlo. L'esistenza, all'interno della meccanica quantistica, di un principio di indeterminazione esclude, in linea di principio, la possibilità, per esempio, di misurare simultaneamente, con precisione infinita, la posizione e il momento di una particella. Ciò significa che se abbiamo un apparato sperimentale per misurare la posizione di una particella, questa posizione è un elemento di realtà, mentre non lo è il momento e viceversa. La risposta di Bohr, quindi, al quesito che Einstein e gli altri ponevano a titolo del loro articolo era altrettanto perentoria di quella dei suoi avversari: la meccanica quantistica è una teoria completa. L'argomentazione di Bohr metteva direttamente in discussione i presupposti filosofici sui quali erano basate le tesi dei suoi avversari sostenendo l'«inadeguatezza dell'ordinario punto di vista della filosofia naturale a dare una descrizione ra-

zionale dei fenomeni fisici del tipo di quelli presi in considerazione dalla meccanica quantistica». Bohr e Einstein guardavano alla teoria da punti di vista completamente opposti: per Einstein la teoria quantistica, nell'interpretazione di Born, come teoria statistica di un insieme di particelle, era soddisfacente, ma per essere completa necessitava della descrizione meccanica di ogni singola particella. L'uso della statistica derivava, secondo Einstein, in accordo alla concezione classica della probabilità, dalla incapacità della teoria di descrivere il comportamento di ogni singola particella.

Per Bohr, invece, la descrizione statistica si applicava al comportamento della singola particella. Ma questa caratteristica, lungi dall'essere il sintomo dell'incapacità della meccanica quantistica di descrivere in maniera esauriente il comportamento della singola particella, rappresentava, invece, il modo specifico di essere della particella in relazione agli apparati sperimentali. La presenza dell'apparato sperimentale, infatti, influenza le condizioni effettive che definiscono i possibili tipi di previsione sul futuro comportamento del sistema. Dal momento che queste condizioni costituiscono un elemento intrinseco alla descrizione di ogni fenomeno al quale può essere correttamente attribuito il nome di «realtà fisica», l'accusa di incompletezza, secondo Bohr, non è giu-

ustificata. La descrizione fornita dalla teoria, quindi, «può essere caratterizzata come una razionale utilizzazione di tutte le possibilità di interpretazione non ambigue di misure compatibili con l'interazione finita e incontrollabile tra gli oggetti e gli strumenti di misura nel campo di una teoria quantistica». Per Bohr, dunque, la descrizione quantistica è completa perché essa corrisponde esattamente a ciò che è possibile determinare in una data situazione, con uno specifico apparato di misura.

Per Einstein queste conclusioni erano inaccettabili: egli aveva in mente, come modello di teoria, una teoria di campo modellata secondo quella elettromagnetica di Maxwell o secondo quella relativistica nella quale esiste un campo classico nel quale le singole particelle con il loro comportamento quantistico sarebbero spiegate nei termini di singolarità del campo.

È stata più volte sottolineata, a proposito di questa controversia, l'influenza che su Einstein e Bohr ebbero rispettivamente la filosofia di Spinoza e di Höffding. È indubbio che la discussione, proprio perché incentrata su considerazioni metafisiche, faceva ampiamente riferimento al sistema di valori culturali e filosofici specifici di ciascuno scienziato. I «valori» e non i «fatti» che erano alla base della teoria furono oggetto di discussione. Ma non è il caso di sopravvalutare questi elementi. Quando Einstein e Bohr si cimentarono nella controversia le teorie alle

quali avevano dato il maggior contributo — rispettivamente la teoria della relatività e la meccanica quantistica — erano ormai giunte a un elevato grado di maturazione e di articolazione. Grandi, inoltre, erano stati i riconoscimenti che la comunità scientifica aveva tributato ai due fisici. Molte delle loro osservazioni intorno alle teorie scientifiche, quindi, nascevano da considerazioni sorte all'interno e a ridosso di teorie fortemente innovative nei rispettivi campi di indagine. Il dibattito, inoltre, fu fortemente alimentato dal clima di profondo interesse per i fondamenti della conoscenza scientifica che animò l'Europa negli anni 20 e 30 fino all'avvento del nazismo.

Il dibattito tra Bohr e Einstein è stato un modello di discussione accesa ma non velenosa tra uomini che, come è stato detto, cercavano la verità piuttosto che la celebrità. E fu un dibattito molto istruttivo condotto pubblicamente in sedi prestigiose e altamente qualificate dal punto di vista scientifico.

Perché, in fisica, non vi sono più dibattiti del genere? Qualcuno risponde che siamo in un'epoca di decadenza. Ma, a parte il fatto che si ha la sensazione di vivere in un'epoca di grande vivacità intellettuale, evidentemente si dilata il fatto che le condizioni che rendono possibili tali dibattiti si verificano molto raramente nella storia: è essenziale, infatti, che si sia in presenza di conoscenze fortemente innovative; come fu il caso della meccanica classica, della teoria dell'evoluzione, della relatività, della meccanica quantistica. È l'avvento di novità intellettuali, dunque, a stimolare il dibattito; non una generosa quanto generica tensione morale per la discussione sui fondamenti e sui fini della conoscenza scientifica.

Un'ultima considerazione. Bohr, evidentemente si dice aver vinto il duello con Einstein; ma mentre il fisico danese concordava con il suo avversario sul fatto che le teorie, per essere soddisfacenti, dovevano essere corrette e complete, altri fisici quantisti consideravano sufficiente la sola condizione della correttezza, cioè dell'adesione delle previsioni della teoria con l'esperienza umana, rompendo qualsiasi possibilità di dialogo con Einstein. Lo stesso Einstein, d'altro canto, accreditò l'immagine di scienziato geniale, ma emarginato e isolato, ossessivamente legato ad un programma di ricerca — quello della teoria di campo unificato — affascinante, ma sterile di risultati soddisfacenti.

Negli ultimi anni, però, la relatività generale ha iniziato a manifestare le sue feconde implicazioni anche in altri campi della fisica, ben al di là delle stesse previsioni einsteiniane ponendosi come modello di teoria. È ragionevole supporre, allora, come afferma Rosen, che la meccanica quantistica sarà un giorno sostituita da un'altra teoria. La quale comporterà cambiamenti rivoluzionari nei concetti e nei principi, tali che i quesiti sollevati nell'articolo del '35 perderanno di significato o subiranno una differente interpretazione.

Pasquale Tucci

## Ma il problema non è ancora risolto

Nella vastissima opera scientifica di Einstein si possono distinguere due atteggiamenti molto differenti. In alcuni lavori Einstein costruisce o elabora teorie fisiche che hanno alla base pochi, semplici e evidenti principi; in altre elabora teorie cosiddette fenomenologiche o provvisorie, basate su ipotesi poco fondate, mal sicure e spesso in contraddizione con qualche dato empirico. Al primo atteggiamento appartengono i lavori sulla relatività ristretta del 1905 e sulla relatività generale o teoria della gravitazione del 1916. Al secondo atteggiamento appartengono tutti i lavori sulla fisica quantistica, almeno fino al 1925. Esempio tipico è il lavoro del 1905 sull'effetto fotoelettrico che Einstein spiega con l'ipotesi che i fasci luminosi siano costituiti da tanti singoli corpuscoli chiamati successivamente fotoni. Questa ipotesi spiegava l'effetto, come disse Millikan dopo aver fatto esperimenti per dieci anni per cercare senza successo di contraddirla, era

«irragionevole perché sembrava violare tutto quello che noi conosciamo sulla interferenza della luce». Infatti, mentre nei fenomeni di interferenza la luce si presenta come un'onda, nell'effetto fotoelettrico si presenta come un fascio di particelle. La insoddisfazione per una chiara spiegazione teorica era del resto condivisa da Einstein: nel 1923 gli esperimenti di Compton e Debye confermarono l'esistenza reale dei fotoni mentre dimostrò che, come tutte le particelle, essi potevano subire urti singoli, ma Einstein scrive «vi sono ora due teorie della luce, entrambe indispensabili, e... senza alcuna logica connessione». «La radiazione si comporta come se fosse costituita da corpuscoli...».

Insomma in tutti questi anni Einstein è convinto della «esistenza reale» dei fotoni, ma anche al momento della conferma non è soddisfatto della comprensione teorica, e non lo sarà mai. Per il momento si accontenta di un «come se», non ritiene abbastanza approfondita la com-

preensione di questo campo della fisica da poter fare una sintesi teorica tra l'aspetto ondulatorio e quello corpuscolare. Per lui una teoria fisica deve avere una base semplice, evidente, intuitiva e forse istintiva, come è stato per la teoria della relatività e a suo avviso tale condizione non è ancora soddisfatta per la fisica quantistica. Ma questo giudizio non era condiviso da Bohr, Born, Heisenberg, e proprio nel 1925 comparvero i fondamentali lavori che segnarono la strada per la sintesi tra i due aspetti corpuscolari e ondulatori attraverso la formulazione della teoria della meccanica quantistica. In relazione al successivo dibattito con Einstein è utile ricordare che mentre la meccanica classica è la teoria che descrive correttamente il comportamento di un oggetto macroscopico (il moto di pianeti, il lancio di un sasso) in modo completamente prevedibile a priori, cioè deterministico, secondo la meccanica quantistica per un singolo atomo, molecola, il determinismo assoluto non vale: non è prevedibile il comportamento del singolo atomo o molecola, ma è prevedibile solo quanto avviene in media per un gran numero di atomi o molecole. Questo aspetto statistico della meccanica quantistica riconciliava in modo elegante l'aspetto ondulatorio e corpuscolare dei fenomeni atomici e era del resto consono alle ricerche e risultati ottenuti anche da Einstein in tutti quegli anni.

La reazione negativa di Einstein non si fece attendere. Nel 1926 scriveva a Born: «La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. E una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del gran Vecchio. In

ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi con il mondo». E questa stessa obiezione risuonerà per tutti gli anni successivi. Nel 1944 ancora a Born: «Tu ritieni che Dio giochi a dadi con il mondo; io credo invece che tutto obbedisca a una legge, in un mondo di realtà obiettive che cerco di cogliere per via feroce e speculativa... (non riesco) a convincermi che alla base di tutto vi sia la causalità...».

Born nel 1948 ricorda lo scontro sentito dai promotori della nuova teoria: «Egli ha visto più chiaramente di tutti i suoi predecessori il fondamento statistico delle leggi della fisica, e è stato un pioniere nella lotta per conquistare la terra vergine dai fenomeni quantistici. Eppure, in seguito, quando dal suo stesso lavoro emerse una sintesi dei principi statistici e quantistici che sembrò accettabile a quasi tutti i fisici, egli si ritrasse in disparte con il suo scetticismo. Molti di noi la considerano una tragedia — per lui, che cerca da solo la sua strada, e per noi, che non abbiamo più il nostro capo e portabandiera». In effetti questo scetticismo isterico da allora e per sempre l'attività di Einstein nel campo della fisica quantistica riducendola alla ricerca di paradossi che potessero dimostrare che la meccanica quantistica fosse una teoria intrinsecamente inconsistente o in ogni caso una descrizione non completa della natura. Già alla conferenza Solvay del 1927 Einstein presentò il primo paradosso e qui Bohr si assunse l'incarico di smontarlo. Così ebbe inizio il famoso dibattito Bohr-Einstein che si protrasse per il resto della loro vita. Il più importante di questi paradossi (apparenti o no) è stato formulato nel 1935 da Einstein in collaborazione con Podolski e Rosen. In esso si mostra che se-

condo le leggi della meccanica quantistica due particelle che si separano dopo avere interagito, anche a grande distanza potrebbero influenzarsi vicendevolmente; un risultato che molti considerano istintivamente non accettabile.

Anche se questo dibattito tra due fondatori della fisica moderna è ricco di importanti spunti filosofici, esso però non ha influenzato lo sviluppo successivo della ri-

cerca, che si continua a muovere entro lo schema della meccanica quantistica formulata nel 1925. È necessario però notare che questi sviluppi hanno scosso la fiducia che quella formulazione della meccanica quantistica debba considerarsi come definitiva. Infatti è dubbio che nella descrizione dei fenomeni quantistici si possa non tenere conto di effetti relativistici quali la esistenza di antimateria e la crea-

zione di materia dall'energia. Molti fisici perciò ritengono prioritaria la sintesi tra fisica quantistica e relativistica, iniziata con Dirac nel 1928, ma che non può dirsi ancora completamente compiuta. Alcuni ritengono che il dibattito Bohr-Einstein potrà essere più proficuamente ripreso solo dopo che questa sintesi sia completa.

Giuseppe Marchesini