
FISICA QUANTISTICA: I MODELLI ORIGINARI DELL'UNIVERSO

Fabio Marzocca

La scienza dell'Uomo è scienza di confine. [...] Per la prima volta nella nostra storia le scienze di punta trascinano le nostre epistemologie a revisioni spesso dilanianti e aprono la Scuola a orizzonti di altri umanesimi e ad altre saggezze che le nostre. Approfittiamone!¹

Introduzione

Il secolo scorso ha indubbiamente rappresentato per la ricerca scientifica un periodo di estremo interesse: sembrava fossero raggiunte e superate quelle che classicamente erano ritenute le frontiere della conoscenza. Gli scienziati hanno cominciato a volgere le loro ricerche verso il mondo microscopico, verso l'infinitamente piccolo, e contemporaneamente lanciavano lo sguardo in alto verso gli spazi infinitamente grandi del cosmo e dell'Universo. Questa apparente divergenza di interessi da parte dell'uomo aveva origine nella medesima esigenza di ampliare lo sguardo oltre le frontiere del visibile, oltre il naturale campo d'azione, verso una nuova esplorazione. Gli scienziati hanno sentito, pur con qualche timore, che era giunto il momento di potersi confrontare con aspetti fino allora insondabili del mondo, anche se la ricerca li avrebbe poi portati a risultati scientifici fondati su intangibili leggi di probabilità. Così, paradossalmente, la nuova «rivoluzione copernicana» prodotta dalla fisica quantistica metteva l'inconoscibile al centro di ogni speculazione.

L'aver intrapreso queste nuove e affascinanti strade della conoscenza ha innegabilmente rivestito un ruolo fondamentale nello sviluppo del pensiero umano dal secolo scorso a oggi, introducendo nuovi interrogativi che avrebbero portato a una nuova visione del mondo.

Contemporaneamente alle ricerche nelle profondità più remote della materia nascevano e si sviluppavano anche rivoluzionarie teorie che coinvolgevano ogni campo della scienza, della filosofia e dell'arte. In par-

¹ Gilbert Durand, dal discorso tenuto al Colloquio di Venezia «La scienza dell'uomo, scienza ai confini della conoscenza», organizzato dall'UNESCO in collaborazione con la fondazione Cini nel 1986.

ticolare la nascita e lo sviluppo della psicoanalisi dirigevano il loro interesse verso le profondità, anch'esse insondabili, dell'animo umano e i suoi studi si riverberavano su altre scienze «umane». Così proprio quelle ricerche nella fisica che avrebbero dovuto portare a spazzar via favole e miti, hanno portato a riscoprire l'*unus mundus* in cui ogni cosa è legata al Tutto e a valorizzare le capacità intuitive dell'uomo, la sua creatività e le sue straordinarie potenzialità, forse ancora inesplorate.

Trent'anni di rivoluzione nella fisica

È vero che la teoria dei quanti è soltanto un piccolo settore della fisica atomica e che la fisica atomica, a sua volta, è soltanto un piccolo settore della scienza moderna; tuttavia è nella teoria dei quanti che hanno avuto luogo i cambiamenti più radicali riguardo al concetto di realtà, ed è nella teoria dei quanti nella sua forma finale che si sono concentrate e cristallizzate le nuove idee della fisica atomica (Heisenberg, ed. it. 2008, p. 41).

La più grande crisi che la fisica avrebbe mai dovuto affrontare ebbe luogo nel tardo autunno del 1900 a casa di Max Planck, in Berlino. Figlio di un professore di giurisprudenza, da giovane studente Planck espresse l'interesse di intraprendere gli studi di fisica, nonostante il professor Phillip von Jolly dell'Università di Monaco gli avesse suggerito di desistere in quanto «in questo campo, quasi tutto è ormai stato scoperto e ciò che rimane è solo di riempire pochi buchi» (Lightman, Alan, 2005, p. 8). Questa visione scoraggiante, tuttavia ampiamente diffusa all'epoca, era alimentata dai continui trionfi della tecnologia e dall'apparente potere pervasivo delle leggi di Newton sulla meccanica e di quelle di Maxwell sull'elettromagnetismo. Più tardi Planck ricordò cosa gli fece comunque scegliere la carriera di fisico teorico: «Il mondo esterno è qualcosa di indipendente dall'uomo, qualcosa di assoluto e la ricerca delle leggi che si applicano a questo assoluto mi appariva come la più sublime ricerca scientifica nella vita» (Planck, 1949).

In quel pomeriggio d'autunno del 1900 alcuni colleghi si recarono a casa di Planck per comunicare al professore che gli esperimenti che il gruppo stava conducendo sulle radiazioni del *corpo nero*² non stavano

² In fisica un corpo nero è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla (ed è quindi detto *nero* secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi). Non riflettendo, il corpo nero assorbe dunque tutta l'energia incidente e, per la conservazione dell'energia, re-irradia tutta la quantità

portando ai risultati aspettati. Quando gli ospiti lasciarono la casa, Planck continuò a riflettere sul problema ed ebbe quella che lui stesso definì una «fortunata intuizione». Quella sera stessa aveva la formula nelle sue mani; ora si trattava di confermarne i risultati.

Questo tipico percorso metodologico è alla base delle maggiori scoperte scientifiche dell'ultimo secolo: intuizione, formulazione di una completa legge matematica, sperimentazione dei risultati. Una teoria matematica descrittiva del fenomeno (o del sistema) deve essere stabilita prima che ci si possa aspettare di raggiungere una comprensione più completa e profonda del fenomeno stesso. I numerosi tentativi di aggirare questo processo, cioè di tentare di capire le caratteristiche di un sistema sconosciuto senza averne prima realizzato una teoria descrittiva, si sono sempre dimostrati senza successo.

Eppure è significativo osservare come le più grandi e inaspettate scoperte scientifiche siano nate tutte da un'intuizione originante, da una scintilla che illumina il percorso verso il traguardo impostato. Molto spesso quest'intuizione rimane nel suo stato teorico per secoli, prima di essere opportunamente valorizzata, come per esempio gli atomi di Democrito che erano tutti della stessa sostanza, dotata della proprietà di essere, ma avevano grandezze e forme diverse. Fino alla fine del XIX secolo l'ipotesi atomica era ancora ritenuta, da diversi scienziati, una teoria accettata sebbene non ancora provata dall'esperienza. Come Einstein ha messo in rilievo, il fisico perviene alla sua teoria attraverso mezzi puramente speculativi. La deduzione, nel suo procedimento, non va dai fatti alle supposizioni teoriche, ma da queste ai fatti e ai dati sperimentali. Di conseguenza, le teorie devono essere proposte in linea speculativa e sviluppate deduttivamente rispetto alle loro molteplici conseguenze.

Il 14 dicembre 1900 è indicato come la data di nascita della fisica quantistica. In quel giorno, infatti, Max Planck presentava la sua relazione alla *Deutsche Physikalische Gesellschaft* [la Società Tedesca della Fisica] di Berlino, nella quale sosteneva che gli scambi di energia nei fenomeni di emissione e di assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche avvengono in forma discreta, non già in forma continua come sosteneva la teoria elettromagnetica classica. Il fisico tedesco introdusse una costante h , chiamata poi in suo onore *costante di Planck* anche detta *quanto d'azione*, determinando che le grandezze fisiche fondamentali non evolvessero in modo continuo, ma fossero quantizzate, cioè potevano assumere solo valori discreti multipli di tale costante.

di energia assorbita (coefficiente di emissione uguale a quello di assorbimento e pari a uno) e deve quindi il suo nome unicamente all'assenza di riflessione.

Il valore sperimentale del quanto d'azione è il seguente:

$$h = 4,135\ 667\ 516(91) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

La costante di Planck assumerà il ruolo di *costante universale della natura* (un'altra è rappresentata dalla velocità della luce, come stabilito dalla Teoria della Relatività). Le costanti universali determinano la scala della natura, le quantità caratteristiche che non possono essere ridotte ad altre quantità.

La teoria di Planck (premio Nobel per la Fisica nel 1918), successivamente rielaborata da Einstein nel 1905 e più tardi da Niels Bohr, ebbe l'effetto dell'innescare di una reazione di grande fermento scientifico in tutto il mondo della fisica. Fu come aprire una porta verso un nuovo Universo, quello delle particelle subatomiche. In poche decine di anni si apprese che alla base della solidità del mondo reale (persone, oggetti, piante, animali, ecc.) c'è un festoso brulicare di minuscole particelle circondate essenzialmente da spazio vuoto, la cui posizione è distribuita in nuvole di probabilità.

Pochi anni dopo, nel 1905, Albert Einstein riprese la teoria di Planck ed evidenziò la natura quantistica della luce, dimostrando come la radiazione elettromagnetica non fosse solo un'onda, ma un insieme di particelle discrete chiamati *fotoni*. Sebbene si possa pensare che Einstein abbia ricevuto il Nobel per le sue teorie sulle Relatività (Ristretta e Generale), fu proprio la scoperta di questo effetto fotoelettrico a portarlo all'aggiudicazione dell'ambito premio.

La reazione a catena scientifica, innescata dalla scoperta di Planck si era ormai avviata inarrestabilmente.

Il fisico francese (di origini piemontesi) Louis De Broglie fu il primo a cogliere le inaspettate conseguenze della scoperta di Einstein e nel 1924 postulò la dualità onda-particella della materia, che andrà a formare una parte centrale della teoria della meccanica quantistica. Le sue ricerche culminarono infatti nella nota «teoria di De Broglie»³, la quale postulava che *ogni particella in movimento era associata a un'onda*, cioè che il mo-

³. Secondo de Broglie anche la materia presentava il doppio aspetto ondulatorio-corpuscolare della radiazione elettromagnetica e di conseguenza, come a un'onda elettromagnetica di frequenza λ e di lunghezza d'onda $\lambda = c/v$ è associato un fotone (o quanto) di energia $E = h \cdot v$ e di quantità di moto $p = h \cdot v/c$, così a una particella di energia E e di quantità di moto $p = mv$ doveva essere associata un'onda di lunghezza d'onda $\lambda = c/v$. Mise così in relazione la massa m con l'impulso mv nell'equazione: $\lambda = h/mv$.

vimento di una particella materiale libera può venire opportunamente simulato mediante quello di un'onda o un gruppo di onde e che il legame tra le variabili d'onda e quelle di particella dipende dalla costante di Planck.

Vengono cioè a delinearsi quegli aspetti ondulatori della materia la cui conferma sperimentale arriverà nel 1927. Ogni particella è dotata quindi di doppia vita, quella energetica (rappresentazione ondulatoria) e quella materiale (rappresentazione particellare), che però non possono essere mai rivelate simultaneamente («principio di complementarità» di Niels Bohr, 1927).

L'impossibilità di una rivelazione simultanea di tutte le caratteristiche di una particella o di un sistema rappresenta la centralità degli studi svolti da un altro pioniere della fisica quantistica, anche lui Premio Nobel, il fisico tedesco Werner Heisenberg.

La sua nuova interpretazione intuitiva era basata sull'idea che in fisica atomica le incertezze nelle misure di posizione e quantità di moto non potessero essere ridotte contemporaneamente a zero a causa dell'inevitabile interazione tra l'oggetto da misurare e gli strumenti necessari a osservarlo. Quanto più è nota la posizione di una particella, tanto meno nota sarà la sua quantità di moto. D'altra parte, quanto più esattamente si misura la quantità di moto tanto più incerta è la conoscenza della posizione della particella in esame. La stessa relazione vale anche tra energia e tempo, consentendo così la creazione di «particelle virtuali» ad alta energia per brevissimi intervalli di tempo (vedi più avanti la *Teoria del Campo Quantistico*).

Si tratta del noto «principio di indeterminazione»⁴, che svolse una funzione fondamentale nell'interpretazione della realtà microscopica. E non stupirà notare che l'errore minimo di indeterminazione è proporzionale alla costante di Planck. Una delle conseguenze principali di questa scoperta è che non è possibile costringere una particella in una determinata posizione; più si tenta di confinarla in uno spazio ristretto, più il movimento della particella aumenta in una vibrazione vorticoso.

⁴. Nella sua formulazione più nota, viene espresso dalla relazione:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

in cui Δx è l'incertezza sulla posizione, Δp quella sulla quantità di moto, mentre \hbar è la costante di Planck ridotta.

La stessa relazione vale anche per l'energia:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Scrive Heisenberg:

Nell'ambito della realtà le cui connessioni sono formulate dalla teoria quantistica, le leggi naturali non conducono quindi a una completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo; l'accadere (all'interno delle frequenze determinate per mezzo delle connessioni) è piuttosto rimesso al gioco del caso (ed. it. 1991, p. 28).

Si apprendeva perciò che i vecchi concetti della fisica classica si adattavano alla natura solo *imprecisamente*.

A seguito dell'idea di De Broglie, il fisico austriaco Erwin Schrödinger (Premio Nobel per la fisica nel 1933) mise ordine alla teoria e ne tracciò definitivamente i contorni con la sua equazione, effettuando nel mondo atomico e subatomico un'operazione del tutto analoga a quella svolta nel mondo macroscopico dalle equazioni di Newton.

L'equazione di Schrödinger⁵ regola, in modo deterministico, l'evoluzione temporale di una grandezza, *la funzione d'onda*, la cui interpretazione è tutt'oggi argomento di animate discussioni nell'ambito della comunità dei fisici. A parere di Schrödinger tale funzione avrebbe rappresentato una sorta di diffusione dell'elettrone attorno al nucleo atomico. Non si tratta di un'onda che si propaga nello spazio tridimensionale delle osservazioni fisiche (come le onde elastiche o le onde radio), ma di un'onda in uno spazio a configurazione pluridimensionale denominato «delle configurazioni» e di cui possiamo dare solo una rappresentazione matematica. L'interpretazione più corretta del nuovo formalismo risultò essere quella secondo cui il valore che la funzione assume in un punto, è legato alla probabilità di trovare in quel punto la particella rappresentata dalla funzione d'onda. Il determinismo classico, che consentiva di descrivere il comportamento di ogni sistema individuale, si riduceva quindi al determinismo dell'evoluzione di una probabilità.

Il concetto di onda di probabilità era assolutamente nuovo nella fisi-

⁵ L'equazione di Schrödinger dipende dalle interazioni fra le varie componenti del sistema. Nel caso più generale l'equazione è scritta come:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r, t) = \mathcal{H} \Psi(r, t)$$

dove:

i è l'unità immaginaria;

$r = (x, y, z)$ è un punto nello spazio tridimensionale;

$\Psi(r, t)$ è la funzione d'onda, cioè l'ampiezza di probabilità per differenti configurazioni del sistema;

\hbar è la costante di Planck ridotta, cioè divisa per 2π ;

\mathcal{H} è l'operatore hamiltoniano.

ca teorica d'origine newtoniana. Probabilità in matematica significa un'affermazione sul nostro grado di conoscenza della situazione effettiva. Secondo Heisenberg, la probabilità è la misura del nostro non-sapere. L'equazione di Schrödinger regola perciò l'evoluzione temporale in termini di probabilità di una grandezza, la funzione d'onda.

La scienza non può descrivere la natura nella sua completezza, ma solo la nostra conoscenza di essa. Quindi l'unico tipo di domande cui siamo in grado di rispondere sono domande sui possibili risultati delle misurazioni. E questo è esattamente ciò che la funzione d'onda ci offre. Una realtà sconvolgente e apparentemente incomprensibile per l'uomo del Novecento: come poteva quel solido masso immobile contenere effettivamente miliardi di microscopici «oggetti» in movimento?

La funzione d'onda di Schrödinger è stata oggetto di numerosi dibattiti da parte dei maggiori filosofi della scienza del secolo scorso. Il suo valore è stato convenzionalmente indicato con la lettera greca Ψ la quale calcola la probabilità che una misurazione quantistica abbia un esito particolare. Prima della misura, lo stato del sistema si trova in una situazione di «sovrapposizione» di tutti gli stati possibili: è solo dopo aver eseguito la misurazione che il sistema «collassa» in uno stato determinato.

Ciò si presta a due diverse interpretazioni: ontologica ed epistemologica. Per l'approccio ontologico, Ψ rappresenta la realtà quale essa è, e il collasso della funzione d'onda altro non è che il naturale evolversi del sistema a seguito dell'interazione con l'ambiente circostante. Per contro, la visione epistemologica sostiene che Ψ rappresenta al massimo la nostra limitata conoscenza dello stato del sistema e il collasso della funzione d'onda non è un processo fisico vero e proprio, ma l'aggiornamento quasi istantaneo della nostra conoscenza sullo stato del sistema. È la nostra conoscenza, quindi, che sembra assumere modalità discontinue, non lo stato attuale del sistema quantistico.

Queste le conclusioni a cui giunsero i fisici intorno agli anni Trenta del secolo scorso: l'elettrone non è solo una particella – che possiamo visualizzare come una minuscola pallina di materia elettricamente carica –, ma è allo stesso tempo onda e particella. Non è «qui» o «là», come ci si può aspettare da un minuscolo pezzo di materia localizzata, ma è letteralmente «dappertutto» entro i confini di quell'ectoplasma delocalizzato che è la sua funzione d'onda. Gli elettroni non orbitano intorno al nucleo in senso letterale. Le loro funzioni d'onda formano caratteristiche strutture tridimensionali (che chiamiamo «orbitali») nello spazio circostante il nucleo. La formula matematica di un orbitale è legata alla probabilità di trovare il misterioso elettrone in un dato punto – «qui» o «là» –

all'interno dell'atomo. «La Natura ci permette di calcolare soltanto delle probabilità» (Feynman, ed. it. 1989, p.35).

In pochi anni (circa tre decenni) si era quindi passati dall'ipotesi di Democrito di un atomo indivisibile come un blocco da costruzione di sostanza primaria a un insieme di particelle sempre in moto dotate di una «doppia vita», che vibravano con incessante vitalità all'interno di nuvole e onde di probabilità e di indeterminazione.

Un vuoto strutturante

L'atomo è una struttura prevalentemente vuota. Non è semplice dare una definizione delle sue dimensioni o rapporti, ma possiamo considerare che il nucleo atomico (costituito da protoni e neutroni i quali, a loro volta, sono costituiti da quark tenuti assieme da gluoni) ha una dimensione media dell'ordine di 10^{-15} metri, mentre gli elettroni si muovono a una più probabile distanza di circa 10^{-11} metri da esso. In altri termini, il 99% dello spazio occupato da un atomo è vuoto. Se assumessimo il nucleo di un atomo medio pari alle dimensioni di una mela, il suo elettrone più vicino dotato di maggiore probabilità si troverebbe a una distanza non inferiore a un chilometro.

Sebbene gli atomi siano essenzialmente vuoti, la materia assume la sua caratteristica di solidità a causa delle forze elettromagnetiche che tengono assieme i suoi elementi fondamentali. Se l'elettrone fosse soggetto alle semplici leggi della fisica classica, dopo qualche tempo collasserebbe sul nucleo e tutta la materia si ridurrebbe in una piccola sfera super-densa. Fortunatamente, l'elettrone risponde alle leggi della fisica quantistica: in condizioni normali può occupare solo stati discreti di energia fino a un livello minimo chiamato *ground state*, al di là del quale non è consentita la sua presenza. Inoltre, valendo il principio di indeterminazione, avvicinare un elettrone al nucleo (e quindi cercare di conoscerne la posizione) aumenterebbe la sua velocità per mantenere costante il rapporto di proporzionalità del principio di Heisenberg e anche questo impedirebbe alla «nuvola» elettronica di cadere sul nucleo.

Quindi, tra il nucleo e gli elettroni c'è uno spazio vuoto che non può essere occupato che da forze. Eppure è questo vuoto che costituisce le forme ed è esso stesso a creare la sostanza, proprio la «forma e sostanza» tanto discussa dagli antichi filosofi greci.

Un vuoto «strutturante» sorregge l'Universo.

Ogni quark, ogni elettrone o altra particella sono uguali a se stesse, tuttavia mediante la loro composizione si realizzano tutte le forme pos-

sibili. Come «con le lettere dell'alfabeto si possono scrivere sia una tragedia che una commedia» (Aristotele, A9), così la moltitudine degli eventi in questo mondo può venir realizzata dalle stesse particelle attraverso diverse regole di ordinamento e movimento.

Consideriamo ora un semplice neutrone. Possiamo usare varie raffigurazioni e descriverlo una volta come particella, una volta come onda o come un complesso d'onde, ma sappiamo che nessuna di queste descrizioni è precisa. Se si vuole dare una descrizione «precisa» della particella elementare, l'unica cosa alla quale si può ricorrere è una funzione di probabilità.

Sappiamo che quasi tutte le particelle sono dotate di massa (tranne i fotoni e i gluoni) e poiché massa ed energia sono, secondo la teoria della relatività, concetti essenzialmente identici, possiamo dire che tutte le particelle elementari consistono di energia. Ciò potrebbe portare a considerare l'energia quale «sostanza» prima del mondo; essa, infatti, ha la proprietà essenziale implicita nel concetto di sostanza della filosofia greca: quella di conservarsi.

Facendo collidere ad alta velocità due particelle all'interno dei moderni acceleratori (il più potente è il *Large Hadron Collider* del CERN di Ginevra), molte nuove particelle possono prender vita dall'energia disponibile mentre le vecchie scompaiono in seguito all'urto. Questi esperimenti offrono la migliore riprova che tutte le particelle sono composte dalla stessa sostanza: l'energia.

La fisica moderna ha reinterpretato la materia come «forza» e il vuoto come un campo «potenzialmente attivo». Secondo la teoria dei campi quantistici (vedi più avanti), infatti, il vuoto fisico non significa assenza di essere; non è il non-essere parmenideo, ma è una realtà potenzialmente attiva: è un vuoto che vive e che s'inserisce nel processo continuo della creazione e distruzione della materia.

Un diverso linguaggio

Ciò che avviene nell'infinitamente piccolo (particelle subatomiche) lascia l'uomo senza fiato. Eppure la realtà intorno a noi sembra così diversa da quella descritta dalla fisica quantistica. Come nella fiaba di Lewis Carroll, *Alice nel Paese delle Meraviglie*, tutto sembra disobbedire alle leggi del mondo in cui viviamo e la realtà appare come ridisegnata dal Cappellaio Matto e dagli altri personaggi.

«Chi sei tu?» disse il Bruco. Alice replicò: «Io lo so a malapena giusto ora, ma è un attimo. So chi ero quando mi sono alzata questa mattina, ma penso di essere stata cambiata talmente tante volte da allora [...] sono dispiaciuta di non poter essere più chiara. Ma non so cosa mi stia accadendo, e cambiare molte taglie in un giorno confonde molto».

Oppure:

Alice: «Per quanto tempo è per sempre?».

Bianconiglio: «A volte, solo un secondo».

Le leggi fondamentali della fisica classica vengono sovvertite. Nel mondo macroscopico tutto sembra essere lineare (per andare da A a B percorriamo senza soluzione di continuità ciascun punto che li separa), causale (tra due fenomeni correlati c'è sempre un nesso di causa-effetto), locale (oggetti distanti non possono avere influenza istantanea l'uno sull'altro), deterministico (si può sempre conoscere contemporaneamente la posizione e la velocità di un oggetto) e così via. Sono leggi che hanno accompagnato l'uomo per millenni e che ne hanno conseguentemente determinato e influenzato il pensiero scientifico deduttivo.

Tuttavia, nella realtà quantistica tutto ciò viene contraddetto. Si riportano di seguito alcuni esempi relativi al diverso comportamento del mondo delle particelle con riferimento alle quattro principali proprietà caratteristiche:

- *non-linearità*: un elettrone che compie una transizione da un potenziale energetico a un altro, non percorre tutti i punti che li separano, ma esegue un «salto quantico» istantaneo tra i due livelli (assorbendo o cedendo un fotone di energia) senza assumere valori di energia intermedi;
- *non-causalità e indeterminazione*: il principio di Heisenberg introduce l'indeterminazione, mostrando come non sia possibile conoscere contemporaneamente la posizione e la velocità di una particella. Le condizioni di un sistema quantistico, successive a un'interferenza con un sistema di misura, non possono essere previste con precisione. I valori di una grandezza osservabile saranno ottenuti non deterministicamente secondo una distribuzione di probabilità che è individuata univocamente dallo stato del sistema;
- *non-località*: il fenomeno dell'*entanglement* quantistico (descritto più avanti) dimostra come due particelle *entangled* possano reagire istantaneamente anche se portate a grandi distanze fra loro.

In altri termini, le particelle elementari costituiscono il mondo reale sotto i nostri occhi eppure le leggi che ne governano l'esistenza appaiono

in grande contrasto con quelle dei corpi materiali da esse costituiti. L'uomo sembra dover rinunciare alla speranza di conoscenza certa del mondo basata sulle cosiddette scienze esatte. L'universo appare come un qualcosa del tutto indeterminato e indeterminabile, si da richiamare alla mente le espressioni con cui veniva nominato nelle religioni tradizionali.

Potrebbe trattarsi soltanto di un problema di natura epistemologica?

Il mondo subatomico si esprime evidentemente con un linguaggio completamente diverso da quello che siamo abituati a usare in ambito scientifico. Si è cercato di rappresentare i sorprendenti fenomeni della fisica quantistica mediante le regole matematiche e logiche usate da sempre. Ma, alla fine, formule e ipotesi speculative hanno portato solo a convenzioni, indeterminazione, probabilità.

Il grande fisico inglese Freeman Dyson, noto per il suo grande lavoro di sviluppo dell'elettrodinamica quantistica, racconta che i suoi studenti generalmente arrivano alla comprensione della meccanica quantistica dopo una prima fase di confusione e sconcerto. Poi «le difficoltà che sembravano così insormontabili, svaniscono misteriosamente. Ciò che accade è che [gli studenti] imparano a pensare direttamente e inconsciamente nel linguaggio della fisica quantistica. Hanno rinunciato a cercare di spiegare ogni cosa nei termini dei concetti classici» (Dyson, 1992, p.105).

In altre parole potremmo chiederci se non abbiamo forse usato un linguaggio improprio per descrivere una realtà che eccede le nostre attuali capacità di comprensione e di definizione. Sarà mai possibile giungere a una teoria unificatrice che descriva nella sua totalità il comportamento fisico del mondo subatomico, di quello macroscopico e di quello cosmologico?

Possiamo per il momento constatare che proprio la fisica quantistica ha aperto al mondo scientifico la questione dell'osservazione e del livello di realtà connesso con la stessa: ciò che spesso sembra impossibile e incongruente, è invece ammesso e non contraddittorio se osservato da una diversa prospettiva.

Un singolo livello di realtà può solo creare opposizioni antagoniste.

Un approccio transdisciplinare

La funzione d'onda è realtà oggettiva o soltanto conoscenza soggettiva? Su questo tema si sono dibattuti lungamente fisici, epistemologi e filosofi. Nel 1960, il fisico teorico Eugene Wigner ha proposto che la coscienza dell'osservatore sia la linea di demarcazione che innesca il col-

lasso della funzione d'onda (Wigner, Margenau, 1967) e questa teoria è stata poi ripresa e sviluppata nel corso degli ultimi anni.

Le leggi della meccanica quantistica sono corrette, tuttavia c'è solo un sistema che può essere trattato con tali leggi, cioè l'intero mondo materiale. Esistono "osservatori" esterni che non possono essere considerati all'interno della meccanica quantistica, vale a dire le menti umane, che svolgono misurazioni sul proprio cervello, causando il collasso della funzione d'onda (Schreiber, 1994).

Il fisico, matematico e filosofo della scienza inglese Roger Penrose ha sviluppato l'ipotesi denominata Orch-OR (*Orchestrated objective reduction*) secondo la quale la coscienza ha origine da processi all'interno dei neuroni, piuttosto che dalle connessioni tra i neuroni (la visione convenzionale). Il meccanismo è ritenuto essere un processo di fisica quantistica chiamato «riduzione oggettiva» che viene orchestrata dalle strutture molecolari dei microtubuli delle cellule cerebrali (costituenti il citoscheletro delle cellule stesse). Insieme al medico Stuart Hameroff, Penrose ha suggerito una relazione diretta tra le vibrazioni quantistiche dei microtubuli e la formazione della coscienza (Penrose, Hameroff, 2014). Scrive Penrose:

L'evoluzione della vita cosciente su questo pianeta è dovuta a successive mutazioni occorse nel tempo. Queste, presumibilmente, rappresentano eventi quantistici e quindi sarebbero esistite sotto forma di stati multipli sovrapposti fino a quando l'evoluzione ha portato a un essere cosciente, la cui vera esistenza dipende da tutte le corrette mutazioni che hanno realmente avuto luogo (1989, p. 295).

La fisica e la matematica ci hanno presentato sostanzialmente tre mondi distinti: quello microscopico delle particelle, quello visibile in cui viviamo su questa Terra e il mondo cosmologico delle grandi distanze intergalattiche. Per ciascuno di questi mondi gli scienziati hanno studiato ed elaborato formule che ne descrivono le leggi fondamentali. Eppure, nonostante gli sforzi, non è stata ancora trovata e sperimentata una legge unificatrice che esprima la sua validità dalla fisica quantistica alla cosmologia.

Si affaccia quindi all'orizzonte l'esigenza di allargare i confini oltre le limitazioni imposte dalle correnti modalità di ricerca scientifica, secondo un approccio che tenga conto anche di altre discipline umane che possano integrare – con intuizioni e conoscenze specifiche – i modelli presentati dalla fisica e giungere a prospettare diversi livelli di realtà. In al-

tri termini si è sentita l'esigenza di una ricerca transdisciplinare che sia in grado di integrare al suo interno il «ricercatore» (l'uomo), realizzando le necessarie connessioni.

Questo problema ha portato a riconoscere che esistono differenti vie della conoscenza, che le loro diverse modalità sono complementari e che esse afferiscono a diversi livelli di realtà. Il concetto di «livelli di realtà» è stato introdotto come primo assioma fondamentale della transdisciplinarietà dal fisico teorico Basarab Nicolescu, Presidente e fondatore del Centro Internazionale per gli Studi e le Ricerche Transdisciplinari (CI-RET). Scrive Nicolescu: «Esistono in natura – e nella nostra conoscenza della natura – diversi livelli di realtà e, di conseguenza, diversi livelli di percezione [...]. La struttura della totalità dei livelli di realtà o percezione è una struttura complessa: ogni livello è quello che è, perché esistono tutti i livelli contemporaneamente» (2006, pp. 142-166).

Nel caso in esame, possiamo rilevare con semplicità i tre livelli:

- il livello macrofisico;
- il livello microfisico;
- il livello cosmologico.

Secondo il comune approccio scientifico, le leggi fisiche che descrivono ogni livello valgono soltanto all'interno del livello stesso, e non negli altri. Eppure i tre livelli esistono simultaneamente e quelle che appaiono come contraddizioni in uno dei livelli non lo sono più negli altri due.

La complessità delle realtà non può essere descritta dal solo linguaggio matematico. Il linguaggio matematico si rivolge esclusivamente alla mente analitica, mentre il linguaggio simbolico si rivolge alla totalità dell'essere umano, con i suoi pensieri, i sentimenti e il corpo. In meccanica quantistica la particella è quello che è solo perché esistono tutte le altre particelle: la complessità è una caratteristica essenziale del mondo.

Il passaggio da un livello di realtà a un altro è assicurato dalla logica del «terzo incluso». Con questo termine il filosofo rumeno Stephane Lupasco (1951) indica come la logica aristotelica classica del *tertium non datur* sia criticamente da rivedere alla luce di uno sguardo transdisciplinare, soprattutto a seguito delle scoperte della fisica quantistica. Secondo Heisenberg:

Nella teoria dei quanti, questa legge del *tertium non datur* deve essere modificata. [...] Sarebbe contraddittorio descrivere nel linguaggio naturale uno schema logico che non si applica al linguaggio naturale stesso. [...] Noi dobbiamo ammettere che ci sono altre possibilità che sono stranamente mescolanze delle due prime possibilità (ed. it. 2008, pp. 212-213).

Werner Heisenberg fu il primo a vedere le conseguenze epistemologiche, ontologiche e metodologiche della fisica quantistica, evidenziando i due differenti aspetti della realtà che venivano delineati dai due concetti di «oggettivo» e «soggettivo». Heisenberg sosteneva che sarebbe stato però un grave errore dividere il mondo in una realtà soggettiva e una realtà oggettiva, in un mondo «reale» e un mondo «spirituale». La fisica quantistica ci ha dimostrato che abbiamo bisogno di ripensare le tesi della scienza classica, come la separazione totale tra il soggetto e l'oggetto, l'ipotesi che il mondo materiale è l'unico mondo «reale» e l'idea che la scienza può svilupparsi indipendentemente da altre fonti di conoscenza quali la teologia, la filosofia, le arti e la cultura.

La coesistenza del mondo quantistico e del mondo macrofisico ha portato allo sconvolgimento di ciò che in precedenza erano state considerate coppie di contraddizioni reciprocamente esclusive (A e non-A): onda e corpuscolo, continuità e discontinuità, separabilità e inseparabilità, causalità locale e causalità globale, simmetria e rottura di simmetria, reversibilità e irreversibilità del tempo ecc.

Lo «scandalo» intellettuale provocato dalla meccanica quantistica consiste nel fatto che le coppie di contraddittori generate sono in realtà antagoniste solo quando vengono analizzate attraverso il filtro interpretativo della logica classica.

Un esempio di quanto appena asserito è il fenomeno psicologico che C.G. Jung chiamò sincronicità: un legame tra due eventi che, pur se non connessi tra loro in maniera causale, avvengono contemporaneamente (Marzocca, 2011). Nonostante la fisica del tempo fosse fondata sul rigido assioma di causa-effetto, Jung e il fisico Wolfgang Pauli osservarono che qualunque presunzione di un nesso causale tra gli eventi sincronici era assurda o inconcepibile. La non-causalità, principio che sembra non aver ragione di esistere al nostro livello di macrocosmo, nella realtà quantistica è uno dei principi basilari dell'*entanglement*. C.G. Jung e W. Pauli non avrebbero mai potuto delineare e descrivere il fenomeno della sincronicità se ciascuno dei due non avesse osato trascendere i limiti delle proprie discipline, la fisica (Pauli) e la psicoanalisi (Jung).

La teoria del campo quantistico

Come si è visto, la meccanica quantistica è in grado di descrivere con elevati livelli di certezza il comportamento delle particelle e dei complessi sistemi subatomici, senza peraltro tener conto delle altrettanto valide conclusioni della Relatività Generale. Nel tentativo di unificare i due livelli di

realtà e di stabilire una teoria unificatrice, si è giunti alla definizione della «teoria del campo quantistico» (QFT: *Quantum Field Theory*). Tale teoria fu elaborata dalle considerazioni e dagli studi di Maurice Dirac intorno agli anni Venti del secolo scorso, ma solo dopo oltre 30 anni si giunse a un suo completo modello matematico, grazie ai lavori svolti da Richard Feynman e Freeman Dyson.

Le prime considerazioni sono nate dall'osservazione del processo di emissione e assorbimento dei fotoni da parte degli atomi. Esso non può essere ricompreso all'interno del consueto modello meccanico quantistico basato sulla meccanica delle particelle. Si consideri, infatti, l'emissione di un fotone da un elettrone atomico che perde energia. Lo stato iniziale del sistema ha un elettrone. Lo stato finale del sistema ha un elettrone e un fotone. Tuttavia, nel noto formalismo della meccanica quantistica il numero di particelle è sempre fisso e la funzione d'onda di Schrödinger stabilisce che comunque la particella è sempre da qualche parte. Evidentemente, quindi, un tale stato di cose non ci permette di trattare il fotone come una particella che può apparire e scomparire. Inoltre, è possibile avere transizioni atomiche in cui più fotoni possono essere emessi/assorbiti contemporaneamente. Chiaramente, i modelli meccanici quantistici sviluppati fino allora non erano più in grado di descrivere tali processi.

Sorprendentemente, si è verificato che è comunque possibile descrivere questi processi multi-particella utilizzando gli assiomi della teoria quantistica, purché tali assiomi vengano utilizzati in modo diverso. Questo nuovo e migliore utilizzo della meccanica quantistica è denominato «teoria quantistica dei campi», poiché può essere visto come un'applicazione degli assiomi fondamentali della fisica quantistica ai sistemi continui («teorie del campo»), piuttosto che ai sistemi meccanici.

Un *campo* in fisica è una sorta di tensione o stress che può esistere in uno spazio vuoto in assenza di materia. Si rivela producendo forze che agiscono su oggetti materiali cui accade di trovarsi nello spazio che il campo occupa. Gli esempi più classici di campi sono i campi elettrici e magnetici, i quali attraggono o respingono rispettivamente oggetti elettricamente carichi e oggetti magnetizzati.

La teoria del campo quantistico è una teoria descrittiva, non esplicativa. In altri termini, essa descrive come le particelle elementari si comportano, ma non tenta di spiegare il perché di tale comportamento.

Un campo quantistico è indubbiamente molto più difficile da visualizzare o sintetizzare che non un campo classico. Uno degli assiomi fondamentali della meccanica quantistica è il principio di indeterminazione: più cerchiamo di osservare da vicino e con precisione un oggetto (par-

ticella), più la nostra osservazione lo disturba e meno riusciamo a conoscere sul suo stato successivo. Un modo più semplice – ma meno preciso – per enunciare lo stesso principio è dire che gli oggetti di dimensioni atomiche fluttuano continuamente; non possono mantenere una posizione definita per una lunghezza finita di tempo.

Immaginate un liquido che scorre, il modello di un campo elettrico classico. Ma supponiamo che il flusso, invece di essere liscio e costante, sia turbolento, come la scia di un transatlantico. Sovrapposta al moto medio stabile, vi è una tremenda confusione di vortici di tutte le dimensioni che si sovrappongono e si mescolano tra loro. In ogni piccola regione del liquido la velocità continuamente oscilla, in modo più o meno casuale. Più è piccola la regione esaminata, più ampie e rapide saranno le fluttuazioni.

Questo modello non descrive correttamente le dettagliate proprietà del campo quantistico: nessun modello classico è in grado di farlo. Però rende chiaro il concetto che non ha senso parlare della velocità del liquido in qualunque punto. Le uniche quantità di cui si può parlare sono le medie delle velocità su regioni di spazio e in intervalli di tempo.

Non è possibile spiegare in linguaggio non tecnico come le particelle emergano matematicamente dalle fluttuazioni di un campo, eppure è ciò che realmente accade. L'immagine del mondo che è stata finalmente descritta dalla QFT è la seguente: esistono dieci o venti diversi campi quantistici, uno per ogni tipo di particella elementare. Ciascuno riempie tutto lo spazio e ha le sue particolari proprietà. Non c'è nient'altro, tranne questi campi; l'intero universo materiale è da loro costituito. Tra varie coppie di campi, esistono diversi tipi di interazione. Il numero di particelle di un dato tipo non è fisso, in quanto altre particelle vengono costantemente create o distrutte o trasformate in altre.

In tal senso, il campo elettromagnetico classico può essere perfettamente descritto dalla QFT, essendo i fotoni le sue particelle di riferimento. La particella elementare corrispondente invece al campo gravitazionale viene detta «gravitone», anche se la stessa non è ancora mai stata osservata. Data l'estrema debolezza dell'interazione gravitazionale, solo grandi masse possono produrre effetti gravitazionali osservabili. In questo caso, il numero di gravitoni coinvolti è enorme e il comportamento complessivo del campo coincide con quello di un campo classico. Di conseguenza, non è possibile osservare un singolo gravitone e la sua esistenza rimane ancora una delle più importanti domande aperte nella fisica.

Senza il sostegno della teoria matematica alle sue basi, tutto appare come un puro esercizio di immaginazione. Forse, in grande approssimazione, l'immagine più vicina a un campo quantistico è quello di un in-

finito tessuto, composto da minuscole molle vibranti intrecciate fra loro, che si estende per tutto lo spazio conosciuto. Il tessuto è costantemente increspato e queste increspature rappresentano ciò che chiamiamo particelle. Alcune pieghe sono tenute assieme, mentre altre si respingono e quando un gran numero di esse si unisce e si sposta congiuntamente lungo il tessuto, dà luogo a un oggetto macroscopico. Una singola particella è un'eccitazione solitaria, quantizzata del tessuto e quando il tessuto stesso è sottoposto a una forte scossa concentrata, queste minuscole particelle possono crearsi o terminare di esistere.

Nella QFT, le interazioni meccaniche quantistiche tra le particelle sono descritte come termini di interazione tra i corrispondenti campi quantistici sottostanti. Il quadro che ne emerge è che i «mattoni» della materia e le sue interazioni non sono né particelle né onde, ma un nuovo tipo di entità: un campo quantistico. Ogni tipo di particella elementare è descritto da un campo quantistico (anche se i raggruppamenti per tipologia dipendono dalla sofisticazione del modello). C'è un campo di elettroni-positroni, un campo di fotoni, un campo neutrino, e così via. In questo modo di vedere le cose, le particelle rappresentano eccitazioni elementari del campo quantistico, momentanee manifestazioni di intangibili campi interagenti. La materia si manifesta in risposta alle intrinseche interazioni di un campo.

La QFT ha portato oggi al raggiungimento di spettacolari successi nel descrivere il comportamento di una grande varietà di fenomeni atomici e subatomici. Tale successo non è stato solo qualitativo, ma anche sperimentale, soprattutto nel settore delle interazioni tra luce e materia.

«Il campo esiste sempre e dappertutto – scrive Fritjof Capra – non può mai essere eliminato. Esso è il veicolo di tutti i fenomeni materiali. È il vuoto dal quale il protone crea i mesoni pi-greco. L'esistere e il dissolversi delle particelle sono semplicemente forme di moto dei campi» (ed. it. 1982, p. 257).

La visione offerta dalla QFT, pertanto, richiede di abbandonare la distinzione tra particelle materiali e vuoto. Esse vanno considerate come condensazioni di un campo continuo che è presente in tutto lo spazio e non possono essere viste come entità isolate. Uno dei risultati più straordinari di questa teoria è l'aver scoperto che lo spazio vuoto non è affatto vuoto: appare tale solo perché la creazione e la distruzione incessante di particelle si verifica in esso su intervalli temporali brevissimi e tali comunque da non lasciare allo sperimentatore il tempo materiale per la loro rilevazione. Il piccolissimo grado d'indeterminazione esistente tra i vari livelli di energia e tempo, provoca (per intervalli brevissimi) fluttuazioni nell'energia del sistema. Per tempi che si aggirano intorno al mi-

liardesimo di trilionesimo di secondo un elettrone e il suo compagno di antimateria – il positrone – possono emergere improvvisamente dal nulla, congiungersi e quindi svanire. Questa è più di una semplice ipotesi; gli effetti di questi comportamenti spontanei di creazione e annullamento sono stati misurati in laboratorio in preciso accordo col Principio di Indeterminazione di Heisenberg. In questo senso, il vuoto contiene un numero illimitato di particelle che vengono generate e scompaiono in un processo senza fine. Anche in questa visione perciò, come già abbiamo notato in precedenza, il vuoto è la forma e la forma è il vuoto: un vuoto *strutturante*.

«La forma non è diversa dal vuoto, il vuoto non è diverso dalla forma, la forma è proprio tale vuoto, il vuoto è proprio tale forma»⁶.

È interessante osservare il collegamento intuitivo tra il campo quantistico (il «tessuto» di fondo universale) e la divinità creatrice Prajapati della cultura vedica: «Prajapati: il rumore di fondo dell'esistenza, il ronzio costante che precede ogni profilo sonoro, il silenzio dietro il quale si avverte l'operare di una mente che è la mente. È l'Es dell'accadere, quinta colonna che spia e sostiene ogni evento» (Calasso, 2010, p. 128).

Le frontiere dell'*entanglement*

Fra tutti i fenomeni venuti alla luce durante le approfondite ricerche della fisica sulle strutture microscopiche della materia, quello dell'*entanglement* rappresenta senza dubbio il momento di maggior stupore nell'ambito della stessa comunità scientifica, generando uno sconcertante enigma che si scontra non solo con la fisica classica, ma anche con quella relativistica.

Due particelle si dicono in uno stato di *entanglement* quando le proprietà di una di esse sono completamente correlate con le proprietà dell'altra (per esempio due elettroni sullo stesso livello energetico – pur avendo spin opposto – sono descritti da un'unica funzione d'onda). Due particelle *entangled* non rappresentano più due enti separati, ma un'unica manifestazione di una sola entità.

Se due particelle, che per qualche ragione hanno interagito tra loro almeno una volta, vengono separate anche a grandissima distanza, nel momento in cui si effettua una misura su una di esse viene determinato il collasso della funzione d'onda che ne descrive lo stato, rendendo ma-

⁶. Sutra del Cuore (*Prajñāpāramitā Hṛdaya*), I secolo d.C.

nifesta una delle sue proprietà (per esempio, lo spin). Tuttavia, nello stesso momento, l'operazione di misura sulla prima particella influenzerà istantaneamente l'altra particella a qualunque distanza essa si trovi dalla prima, la cui funzione d'onda collaserà ugualmente.

Sebbene intuito e descritto dalla teoria fin dai primi decenni del Novecento, il fenomeno dell'*entanglement* è stato sperimentato in laboratorio solo a partire dalla metà degli anni Sessanta del secolo scorso, per essere poi pienamente dimostrato nel 1982 dal fisico francese Alain Aspect. Eppure già nel 1935 Schrödinger – nel corso dei suoi studi – aveva intravisto il fantasma dell'*entanglement*, tanto da scrivere nelle sue conclusioni: «La migliore conoscenza possibile del tutto non include la migliore conoscenza possibile delle sue parti – e questo è ciò che continua a perseguitarci» (ed. it. p.167).

A una prima analisi può apparire che l'istantanea reazione che subisce la particella *entangled* a seguito di una sollecitazione sull'altra particella, possa violare la costante universale della velocità della luce. In verità, questa conclusione è errata: infatti, non esiste alcuna «propagazione di segnali» tra le due particelle in quanto non esiste un meccanismo di causa-effetto, non c'è nulla che fisicamente «viaggia» da una particella all'altra. Non si tratta di segnali, ma della struttura più intima dell'Universo, dove tutto esiste intimamente legato, al di là dello spazio e del tempo.

È ben noto come Carl Gustav Jung, insieme al fisico Wolfgang Pauli, associò l'*entanglement* al fenomeno psicologico della sincronicità. Nel *Diagramma ermeneutico di Jung-Pauli*, infatti, viene descritto come l'energia indistruttibile abbia una relazione di tipo duale con il *continuum* spazio-tempo: una connessione costante attraverso l'effetto (causalità) e una incostante attraverso la contingenza, il senso (sincronicità-*entanglement*) (Marzocca, 2011).

Per anni i fisici hanno ritenuto che il fenomeno dell'*entanglement* fosse confinato nella sfera delle basse temperature (vicino allo zero assoluto) e per brevissimi istanti in quanto solo in questi casi si riusciva a riprodurre il fenomeno in laboratorio. Tuttavia di recente sono venute alla luce sorprendenti scoperte che hanno disatteso anche questa aspettativa.

Già nel 2009, uno studio dell'Università di Irvine (California) (Ritz, 2009, pp. 3451–3457), aveva scoperto che la bussola magnetica biologica degli uccelli si basava su una proteina con una particolare sensibilità direzionale: il crittocromo, contenuto nella retina.

Tuttavia solo nel 2011 (Hore) l'Università di Oxford ha messo a punto uno studio dettagliato che ha rilevato fenomeni quantistici di *entanglement* nelle molecole ottiche del pettirosso europeo. Il crittocromo viene colpito da un fotone di luce, quindi gli elettroni della molecola si ec-

citano e vengono liberati, mantenendo uno stato di *entanglement*, per poi riunirsi in una nuova molecola che li accetta. Nel tragitto, gli spin degli elettroni sono influenzati dal magnetismo terrestre perciò quando si riaggregano alla molecola, trasportano con sé l'informazione del campo, restituendo il fotone che li aveva eccitati in precedenza e colpendo il nervo ottico. A questo punto il nervo ottico dispone di una sorta di «visione» del campo magnetico terrestre, necessario per la navigazione e l'orientamento.

Un altro esempio di *entanglement* «biologico» viene rilevato nel citato studio di Penrose e Hameroff relativo al comportamento quantistico della coscienza. I due scienziati hanno scoperto che i microtubuli presenti nel cervello (la principale componente del citoscheletro delle cellule e dei neuroni cerebrali) si trovano tra loro in perfetto stato di *entanglement*. Come concordano Penrose e Hameroff, il «momento conscio» corrisponde «al collasso della funzione d'onda che raccoglieva in sé, in un unico stato quantistico, il complesso *entanglement* globale che unisce i microtubuli del cervello» (Teodorani, 2007, p. 73). Questa fase viene denominata «riduzione obiettiva orchestrata» (*Orch-OR*).

Una recente pubblicazione (Penrose, Hameroff, 2014) del «*Physics of Life Reviews*» ha presentato la conferma sperimentale della presenza di vibrazioni quantistiche nei microtubuli dei neuroni cerebrali (pp. 39–78).

Aspetti metafisici della rivoluzione quantistica

Le conseguenze delle straordinarie scoperte legate alla struttura più intima della materia, però, non si limitarono a sconvolgere il mondo scientifico della fisica, ma introdussero quella che Heisenberg definì «una rivoluzione metafisica».

Ogni principio fondamentale della fisica, come abbiamo visto ad esempio per l'equazione di Schrödinger, presenta sempre un carattere filosofico. Esso può essere ontologico, cioè relativo all'oggetto della specifica conoscenza scientifica indipendentemente dai suoi rapporti con l'osservatore, o epistemologico, quando si riferisce alla relazione del ricercatore come sperimentatore con l'oggetto in esame. La fisica quantistica ha avuto un'importanza notevole per la modificazione apportata alla teoria epistemologica sulla relazione di esistenza fra soggetto e oggetto.

L'onda di probabilità, secondo Heisenberg, è una versione quantitativa dell'antico concetto di *potentia* nella filosofia aristotelica. Introduce qualcosa esattamente tra l'idea di un evento e l'evento stesso, una strana realtà fisica proprio nel mezzo tra «possibilità» e «realtà» e potrebbe es-

sere paragonata al concetto di energia che passa all'attualità per mezzo della forma quando viene creata la particella elementare.

Gli elettroni si mostrano solo quando interagiscono con qualcosa d'altro, si materializzano con una certa probabilità a seguito di un urto. I «salti quantici» fra due livelli sono solo un loro altro modo di essere. Quando è indisturbato, l'elettrone non è in un luogo preciso, non è in nessun luogo.

Questo nuovo e strano comportamento delle particelle, in forte contraddizione con i canoni della fisica classica, richiama alla mente l'analogia con un'antica cultura sapienziale: «Costui si muove, Costui non si muove; Costui è lontano, Costui è vicino; Costui è all'interno di questo Tutto, Costui è anche all'esterno di questo Tutto» (*īśā-Upaniṣad*, 5).

La nuova fisica sta gradualmente smussando gli spigoli del dibattito scienza-religione. Sempre più scienziati sensibili a questo tema, fra cui Freeman Dyson, intervengono direttamente in conferenze o lezioni pubbliche.

Scienza e religione sono due finestre attraverso cui possiamo gettare lo sguardo, cercando di capire il grande universo esterno, cercando di capire il motivo per cui siamo qui. Le due finestre offrono diversi punti di vista, eppure proiettano fuori allo stesso universo. Entrambe le viste sono unilaterali e incomplete. Entrambe tralasciano alcune caratteristiche essenziali del mondo reale. Tuttavia entrambe sono degne di rispetto. Il problema si pone quando sia la scienza o la religione sostengono di avere giurisdizione universale, quando il dogma religioso o scientifico si arroga il diritto di essere infallibile (Dyson, 2000).

Si è osservato in precedenza come il mondo delle particelle subatomiche appaia come una rete di relazioni tra le varie parti di un tutto unico. Lo stesso concetto di particella isolata è un'idealizzazione; essa può essere definita solo in rapporto alle sue connessioni con il tutto, e queste connessioni sono di natura statistica: probabilità invece di certezze. L'incertezza si affaccia e diventa determinante nel mondo della fisica, là dove sembrava tutto fosse regolato da leggi precise, univoche, inderogabili.

Quando interferiamo con un sistema per osservarlo, ne determiniamo lo stato facendo interagire un livello di realtà con un altro. Come si può risolvere il paradosso circolare implicito nel fatto che il mondo macroscopico determini la realtà microscopica dalla quale a sua volta è formato? Ci scontriamo con questo paradosso ogni volta che eseguiamo misure quantistiche.

Eppure senza la fisica quantistica non si sarebbe potuto inventare il

transistor e tutti i semiconduttori che usiamo oggi quotidianamente nella nostra vita. La chimica stessa, disciplina per secoli ben distinta dalla fisica, attraverso gli studi delle particelle subatomiche è pervenuta a una fusione completa con la fisica. Tuttavia, l'intero apparato della fisica quantistica non spiega il perché dell'agire dei sistemi, ma solo come essi interagiscono con gli altri. Ancor più, nelle frange più moderne in cui è sviluppata la moderna fisica (la Teoria dei Campi Quantistici e l'Elettrodinamica Quantistica) sembra che si debba accettare l'idea che la realtà sia solo un'interazione di energia in continuo movimento. Queste interazioni generano perciò un flusso incessante di scambio di particelle in un processo di creazione e distruzione senza fine, dando luogo alle strutture stabili del mondo materiale, le quali anch'esse oscillano in movimenti ritmici. L'intero universo è quindi impegnato in un movimento e un'attività senza fine, in quella che Fritjof Capra chiama «l'incessante danza cosmica di energia».

Anche nel quadro di una scienza «esatta», l'energia ha sempre una qualità trascendente. Non occorre essere poeti o mistici per scoprire che la definizione di energia offerta da William Blake è spesso più soddisfacente di quelle pubblicate sui libri di testo della fisica:

Nell'Uomo non c'è un Corpo distinto dall'Anima; il cosiddetto Corpo è una parte dell'Anima che i cinque Sensi, maggiori antenne dell'Anima in questo evo, discernono. Solo l'Energia è vita, e procede dal Corpo; la Ragione non è che il confine o il cerchio esterno dell'Energia. L'Energia è l'Eterno Piacere (Blake, ed. it. 2001).

Bibliografia

- ARISTOTELE, *Leucippo*, A 9.
BERNSTEIN J., *Salti quantici*, Milano, Adelphi, 2013.
BLAKE W. (1790), «Il matrimonio del cielo e dell'inferno», in *Visioni*, Milano, Mondadori, 2001.
BOHR N., *I quanti e la vita*, Torino, Bollati Boringhieri, 2007.
CALASSO R., *L'ardore*, Milano, Adelphi, 2010.
CAPRA, *Il Tao della Fisica*, Milano, Adelphi, 1982.
DYSON F., *From Eros to Gaia*, London, Penguin Books, 1992.
Progress in Religion, Templeton Prize Lecture. Edge.org, 2000.
FEYNMAN R.P., *Sei pezzi facili*, Milano, Adelphi, 2000.
QED, Milano, Adelphi, 1989.
HEISENBERG W., *Fisica e filosofia*, Milano, Il Saggiatore, 2008.
Indeterminazione e realtà, Napoli, Guida 1991.

- HORE P.J., *The Quantum Robin*, Department of Chemistry, University of Oxford, 2011.
- JAUCH J.M., *Sulla realtà dei quanti*, Milano, Adelphi, 2001.
- LIGHTMAN A.P., *The discoveries: great breakthroughs in twentieth-century science, including the original papers*, Toronto, Alfred A. Knopf, 2005.
- LUPASCO S., *The principle of antagonism and the logic of energy*, Hermann & co ed., 1951
- MALTESE P., SORRENTINO R., *Elementi di Meccanica Quantistica*, Roma, Ingegneria 2000, 1981.
- MARZOCCA F., *Incontro tra Jung e Pauli: l'esperienza psicologica della sincronicità verso l'entanglement quantistico*, Roma, Edizioni Mythos, 2011.
- NICOLESCU B., *Il manifesto della transdisciplinarietà*, Messina, Armando Siciliano, 2014.
- NICOLESCU B., «Transdisciplinarity, past, present and future», in *Moving World-views. Reshapingsciences, policies and practices for endogenous sustainable development*, Holland, COMPAS Editions, 2006.
- PENROSE R., *La strada che porta alla realtà*, Milano, Rizzoli, 2005.
- PENROSE R., HAMEROFF S., *Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory*, «Physics of Life Reviews», 11, 1, March 2014, pp. 39-78.
- The Emperor's New Mind*, New York, Penguin Books, 1989.
- PLANCK M., *Scientific Autobiography and Other Papers*, New York, Philosophical Library, 1949.
- RITZ T. et al., *Magnetic Compass of Birds Is Based on a Molecule with Optimal Directional Sensitivity*, «Biophysical Journal», 96, 8, 2009, pp. 3451-3457.
- SCHRÖDINGER E. (1935), *Naturwissenschaften* (ed. ingl. *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press, 1983).
- SCHREIBER Z., *The Nine Lives of Schrödinger's Cat*, London, Imperial College of Science, Department of Physics, 1994.
- TEODORANI M., *Entanglement*, Cesena, Macro, 2007.
- UPANISHAD (I mill. a.C.), a cura di C. Dalla Chiesa, Torino, Utet, 1976.
- WIGNER E., MARGENAU H., *Remarks on the Mind Body Question, in Symmetries and Reflections, Scientific Essays*, «American Journal of Physics», (1967-12).