

LA RIVOLUZIONE MENTALE DELLA FISICA MODERNA

II.

LA FISICA QUANTISTICA

Continuo in questa seconda parte la libera « scorribanda » di descrizioni e riflessioni tra i nuovi concetti e scoperte della fisica moderna.

Come la Relatività, anche la fisica quantistica è cominciata all'inizio del secolo, provocata sempre dalla scoperta di fenomeni che non volevano stare nelle categorie della fisica classica e che, quindi, hanno costretto i fisici a cambiarle. Questa volta l'atto fondamentale è toccato, nel 1900, a Max Planck, giovane fisico berlinese, fortemente legato mentalmente alle categorie della fisica classica. Dedicatosi al problema dello spettro di emissione delle radiazioni da parte del noto « corpo nero » (cioè il corpo ideale che assorbe, secondo una successione continua tutte le radiazioni che emette, a una data temperatura) era arrivato alla disperante impossibilità di far combinare la teoria dell'emissione, allora ancora legata alle categorie classiche della fisica, con i fatti osservabili sperimentalmente. Secondo i fatti, ad una certa temperatura la curva dell'energia emessa alle varie frequenze irraggiate da un corpo, parte da un minimo, per certe frequenze basse, raggiunge un massimo, per certe frequenze medie, e poi gradualmente scende a zero per frequenze più alte. La teoria classica invece, conduceva all'assurdo risultato che la curva doveva salire sempre più fino all'infinito.

Nonostante fosse, come dicevo, di mentalità strettamente classica, Planck ebbe il genio e l'onestà di tentare un'ipotesi, per

allora, veramente pazzesca: l'energia elettromagnetica si comporta come se venisse emessa e assorbita in modo discontinuo, per *quanta* (plurale del latino « *quantum* »). Cioè, a ogni frequenza di radiazione (anche quella luminosa) sembra corrispondere un'emissione discontinua di quanti d'energia (piccolissima in valore assoluto), espressa dalla famosa formula: $E = 'h' f$ (famosa quanto quella di Einstein: $E = m 'c^2'$) dove E è l'energia del « quanto », f è la frequenza della radiazione e ' h ' è una costante di proporzionalità detta di Planck, chiamata pure « quanto d'azione »; quantità piccolissima: il numero che la indica è: $6,6 \cdot 10^{-27}$, cioè, 6,6 diviso per 1 seguito da 27 zeri. Essa esprime un misterioso legame tra energia e frequenza nella radiazione elettromagnetica.

Inconsapevolmente Planck era penetrato nel mondo « diverso » dell'infinitamente piccolo, scoprendo l'elemento-chiave di quel mondo: ' h ', che trascende ogni categoria classica (così come ' c ' fa, analogamente, nella Relatività). Planck non voleva credere alla realtà di ' h ' e, quindi, dei quanti. Per lui, le sue formule di calcolo erano semplicemente un artificio matematico provvisorio, per far corrispondere la teoria al comportamento reale dei corpi nell'irraggiare e assorbire l'energia elettromagnetica.

Ma sei anni dopo, Einstein stesso (aveva appena pubblicato la sua comunicazione sulla Relatività ristretta) ebbe occasione d'intervenire nel problema, così, quasi « en passant »; poiché la cosa non rientrava nei suoi interessi diretti. C'era un problema insolubile, quello di spiegare l'« effetto fotoelettrico » (quello che avviene nelle ormai comuni cellule fotoelettriche) da poco scoperto; cioè, certi corpi, colpiti dalla luce, emettono elettroni. Ma in modo strano (per allora): si poteva aumentare l'intensità luminosa finché si voleva, ma, se non si imbroccava una frequenza appropriatamente alta, neppure un elettrone saltava fuori. Mentre, anche con piccolissime intensità, ma con frequenza giusta, uscivano molti elettroni. Einstein capí subito la cosa: gli elettroni sono dei corpuscoli vincolati all'atomo con un certo legame energetico, e richiedono quindi una certa energia per essere « scalzati » dall'atomo stesso; ma devono essere colpiti da qualcosa di corpuscolare dotato di energia sufficiente. Ecco allora: i

« quanti » di Planck. La luce è costituita di quanti ben distinti l'uno dall'altro e ciascuno con energia proporzionale alla frequenza ($E = 'h' f$). Era evidente allora che, per quanti « quanti » si sparassero, l'elettrone, se non era colpito da un quanto di frequenza, e quindi di energia, sufficiente, non si muoveva. Sarebbe come sparare con una mitragliatrice contro delle grosse palle di acciaio poste in cima a un muro: si possono sparare milioni di proiettili senza smuovere nessuna palla, se i proiettili sono troppo piccoli; ma basta un colpo di mitragliera, dal proiettile abbastanza grosso, per ciascuna, per farle saltare.

Einstein capí che i quanti di Planck sono una realtà fisica vera e propria e non un artificio matematico. La luce è fatta di quanti, con energia ben precisa per ogni frequenza; l'effetto fotoelettrico ne è la dimostrazione concreta.

Einstein, poi, non si interessò più direttamente della ricerca, intento com'era a formulare la teoria generale della Relatività. Forse non si era reso conto della enorme rivoluzione che aveva scatenato nella fisica, dimostrando la *reale* connessione tra le formule di Planck e la realtà fisica dei quanti: la luce o, per meglio dire, la radiazione elettromagnetica in genere, proprio quella stessa che con la velocità 'c' fonda la Relatività, è fisicamente « anche » discontinua; è costituita da quanti più o meno grossi di energia a seconda della frequenza (Einstein li aveva chiamati « fotoni »): da quelli piccolissimi a frequenza bassissima delle onde radio, a quelli medi della luce visibile, a quelli grossissimi (relativamente!) di frequenza altissima dei raggi X e dei raggi gamma.

Quindi i quanti di luce, i fotoni, esistono realmente: in emissione emergono da un punto preciso di un atomo, e, in assorbimento, colpiscono un ben preciso elettrone atomico. E per la strada, nel percorso attraverso lo spazio, che cosa sono? Era ben noto che la luce è un'onda elettromagnetica; e di fatto, come ogni onda, produce fenomeni di interferenza, di diffrazione, ecc., fenomeni tipicamente ondulatori. Ma se è un'onda, essa si propaga su superfici sferiche in tutto lo spazio. Come può nascere come punto, diffondersi come onda, e riconcentrarsi come

punto quando viene assorbita? Qualcosa, almeno nel modello, non andava.

In un primo tempo, il problema « onda o corpuscolo » restò un po' in ombra, poiché in quel momento il grosso problema era quello di ideare un modello di atomo che rendesse conto logicamente della emissione e dell'assorbimento della radiazione per quanti, cioè per quantità « discrete », discontinue, legate all'energia e alla frequenza dalla costante fondamentale ' \hbar '. Negli anni '10 e all'inizio dei '20, Rutherford, prima, poi Bohr e altri della sua famosa scuola di Copenaghen, costruirono un modello atomico che funzionava... e funziona tuttora. È il famoso modello cosiddetto planetario dell'atomo: un nucleo centrale fatto di protoni positivi e neutroni, in cui è concentrata quasi tutta la massa, e un sistema di elettroni negativi, tanti quanti i protoni, distribuiti su varie orbite o « livelli energetici ». Lo scatto di un elettrone da un livello superiore a uno inferiore provoca l'emissione di un quanto energetico. Fu teorizzato tutto un meccanismo per questa attività dell'atomo, ma non entro nei dettagli. Dirò solo che il modello è... solo un modello; le leggi che regolano il movimento elettronico sono di natura del tutto diversa da quelle, per esempio, dei pianeti attorno al Sole. Gli elettroni sono più immaginabili come nuvola « di presenza »; sono da considerare in nessun punto dell'orbita e, nello stesso tempo, su tutta l'orbita. L'orbita non è un'orbita, ma una zona di « probabilità » di presenza elettronica, probabilità distribuita secondo leggi ben determinate.

La struttura logica della teoria dell'emissione e assorbimento dei quanti rompe del tutto con le categorie della meccanica classica. Ne emergono proprietà, costanti parametriche, ecc., totalmente nuove; e, soprattutto, la concezione di una essenziale discontinuità, non solo dei corpuscoli di materia, ma anche dei fenomeni risultanti dai loro rapporti.

Come ho accennato prima, è la nuova nozione di probabilità che invade le concezioni della fisica quantistica (vedremo in seguito la « radice » fisica di questa probabilità). Furono gli anni '20 i più fertili per la fisica nuova. Fisici giovanissimi, come Born, Schrödinger, Heisenberg, Jordan, Pauli, Fermi, Dirac...

per nominarne solo alcuni, aggredirono i vecchi schemi con la risolutezza di rompere ogni compromesso, per risolvere in modo più profondo i problemi e le « false » contraddizioni che le vecchie categorie creavano nell'analisi del mondo dei quanti e delle particelle. Furono così forgiate nuove teorie i cui sistemi logici erano basati su nuove concezioni e leggi delle strutture e, soprattutto, su un nuovo modo di concepire l'« esistenza ». Gran parte delle leggi della fisica classica, valide macroscopicamente, perdono senso nel mondo delle particelle e dei quanti. Fu una rivoluzione profonda che oggi, dopo cinquant'anni, è ancora del tutto valida.

Come dicevo, la categoria più radicale che ne è venuta fuori è *che l'esistenza, a livello elementare, è esprimibile quasi solo in termini di probabilità*. Nacquero così i vari tipi di statistiche adatte per i vari tipi e proprietà di particelle. Ho già pure accennato all'esistenza « probabile » degli elettroni attorno ai nuclei atomici e al problema onda-corpuscolo. Quest'ultimo problema lo si affronta se si rinuncia alla categoria di onda e di corpuscolo e se si costruisce una espressione matematica di *onde di probabilità*, in una situazione di natura assolutamente diversa da quella per noi immaginabile, per descrivere esattamente e prevedere quello che succede ai quanti nelle relazioni tra loro e cogli atomi. « Onda di probabilità » in sostanza significa che, in ogni punto dello spazio in cui si propagano i quanti di energia, ciò che oscilla nel tempo, è il valore della probabilità che ha un quanto di esistere in quel punto, espressa matematicamente.

Sembra un mondo fittizio, simbolico, ma che corrisponde a fatti reali manovrabili solo attraverso quegli schemi. Un esempio di che cosa sia la « probabilità d'esistenza » di una particella o di un evento, in fisica quantistica, può essere questo, semplicissimo: prendiamo una piastrina opaca in cui facciamo due forellini molto vicini. Se inviamo un sottile cono di luce che investa ambedue i forellini, dall'altra parte, su uno schermo, o meglio, su una lastra fotografica, posta a conveniente distanza, avremo le ben note frange di interferenza dovute alla natura ondulatoria della luce; avremo cioè una fitta serie di frange chiare e oscure,

piú intense quelle al centro e piú sfumate quelle dalle parti; infatti, se chiudo un foro, le frange spariscono e ottengo una macchia di cerchietti corrispondente al foro restante. Viste così le cose, la luce appare proprio un fenomeno che si propaga per « onde » nello spazio.

Però, se dietro ai fori, al posto della lastra, pongo una piccola cellula fotoelettrica (che « sente » la luce solo come fotoni), questa mi rivela l'arrivo di fasci di singoli fotoni, piú numerosi nelle frange chiare e piú radi o nulli in quelle scure. Allora appare chiaro che la luce si presenta come un fascio di fotoni che si propagano secondo « onde di probabilità »; cioè, la probabilità di cogliere un fotone in un certo punto è proporzionale all'intensità della luce in quel punto. Come facciano fasci di fotoni, propagarsi a onde di probabilità, a interferire... è inconcepibile per le nostre categorie: in realtà sarebbero le « onde di probabilità » a interferire! Esse sono *astratte e reali* nello stesso tempo. Ma il fatto paradossale è questo: ogni fotone interferisce anche con se stesso poiché è la sua onda di probabilità a interferire! Le parole non sono adatte per esprimere questa cosa.

Infatti, rifacciamo l'esperienza di prima; ora però usiamo una luce cosí debole da essere sicuri che i fotoni siano cosí distanziati tra loro da passare uno per volta dai fori. Se faccio una lunga posa fotografica ottengo le stesse frange di interferenza come se si fosse trattato di luce, « ondulatoria » continua. Ma... come ha fatto un fotone passato prima da un foro a interferire con uno passato dall'altro foro « dopo » che esso era già sulla lastra? Solo il concetto di onda di probabilità spiega bene, matematicamente, la cosa; ma essa non corrisponde assolutamente a nessuna immagine che possiamo farci del fenomeno. Sarebbe come se ogni singolo fotone passasse per ambedue i fori per interferire con se stesso! È certo che, parlando cosí, stiamo applicando categorie sbagliate alla realtà che stiamo trattando.

Ma il paradosso ancor piú grande è questo: se metto subito dietro ai fori (una per ciascun foro) due piccolissime cellule fotoelettriche collegate con un amplificatore, ciascuna segnala, con un colpo d'altoparlante, l'arrivo di ogni singolo fotone. Se sposto ogni cellula davanti a ogni foro in modo da cogliere tutte

le direzioni con cui i singoli fotoni possono uscire dal foro, e faccio migliaia di conteggi uniti anche a misure di direzione, e poi ricostruisco un grafico mettendo insieme le misure fatte davanti a un foro con quelle fatte davanti all'altro, non ottengo più un grafico di interferenza, a frange intervallate come quando il fotone va liberamente dritto sulla lastra, ottengo un grafico come se ogni fotone fosse una pallina indipendente; cioè un grafico di distribuzione a curva continua. Eppure, ciascuno l'ho colto « dopo » che era già passato dal foro! Come si spiega? Se i fotoni, dopo il passaggio dei fori *non li osservo*, le loro onde di probabilità interferiscono; se *li osservo* non si rivelano in atteggiamento di interferenza. Sarebbe come dire: se li osservo, ciascuno di essi passa o da un foro o dall'altro; se *non li osservo*, ciascuno passa da ambedue i fori! Molto più esattamente dovrei dire: se *non li osservo* conservano la loro natura probabilistica; se *li osservo*, identificandoli nel tempo e nello spazio, li determino e distruggo... la loro « probabilità ». Con altro tipo di esperienza, ma analoga a questa, potrei ottenere gli stessi risultati usando elettroni (cioè particelle con massa) invece che quanti di pura energia. Questo perché in fisica quantistica, detta pure meccanica ondulatoria, ad ogni particella sub-atomica, è associata sempre un'« onda » di probabilità. È stata un'idea, pienamente confermata, di De Broglie, nel 1924. Ma non insisto su questo.

È evidente che lì, a quel livello di esistenza, le cose sono percepibili con categorie relazionali tanto diverse da quelle del mondo al nostro livello: il fatto dell'*osservazione* sembra cambiare la natura del fenomeno. E *non tanto perché lo disturba*, ma perché precisa alcuni dati al posto di altri, come vedremo. È proprio per arrivare a questa conclusione che ho insistito su questa particolare esperienza veramente sconcertante, ma anche rivelante. È da esperienze come questa, ripetentisi a milioni nel mondo atomico, che si è stati costretti a creare una fisica basata su categorie di probabilità applicate a situazioni reali.

Altro esempio è l'« effetto tunnel ». Si sa che se riempio una buca con pallini da fucile, posso aspettare miliardi di anni, ma nessun pallino si metterà in testa di disobbedire al « potenziale » di gravità e di saltar fuori dalla buca o di passare attra-

verso i bordi. La buca in questo caso si chiama buca di « potenziale di gravità ». Supponiamo invece di fare un « buca elettrica » — cioè una zona di spazio a potenziale elettrico basso limitata da un contorno a potenziale più alto — e di confinarvi degli elettroni. Essi, essendo a potenziale minore, non dovrebbero assolutamente poter superare la barriera a potenziale maggiore che impedisce loro di evadere. Ma non è così: a questo livello non ci sono certezze, ma solo probabilità; ogni elettrone, benché a potenziale più basso, è definito solo da una certa probabilità di esistere *dentro* la buca; esso ha pure una certa probabilità di esistere *fuori*. E questo, di fatto, avviene: molti elettroni sembrano evadere dalla buca solo per quel grado di probabilità che ognuno ha di essere... fuori. È come se si aprissero un « tunnel » nella barriera di potenziale e scappassero: da ciò il nome dell'effetto. Numerosi fenomeni avvengono nel mondo nucleare per effetto tunnel, perfettamente prevedibili e calcolabili in modo da doverne tener conto; per esempio, per spiegare l'emissione di particelle « alfa » (nuclei-ionizzati di elio) da certi nuclei di corpi radioattivi.

Ho anticipato tutte queste considerazioni per condurre il lettore a meglio rendersi conto della « scoperta logica » fondamentale della fisica quantistica, quella su cui si basa la maggior parte delle situazioni nel mondo dell'infinitamente piccolo. Si tratta delle famose « relazioni di incertezza », dette anche « principio di indeterminazione » di Heisenberg. Heisenberg, scomparso qualche anno fa, è stato, come ho accennato, tra i principali « ideatori » della fisica quantistica. In lui, nei contatti con Bohr (il « modellatore » dell'atomo) e con tutta la generazione già accennata dei fisici nuovi, era maturata l'esigenza di un cambio totale di categorie e concetti fisici per poter capire il mondo alle infime dimensioni della materia. Era ormai chiaro che in quel mondo gli enti e i fatti non possono essere distinti e conosciuti, così come nel mondo ordinario. Lo stesso concetto di osservabilità, fondamentale in fisica, doveva anch'esso essere definito in un altro modo.

Heisenberg nel 1926 (aveva appena 25 anni) trovò il modo

logico per esprimere questo ed enunciò la sua cosiddetta « meccanica quantistica », nella quale aveva fatto scomparire ogni categoria legata a immagini o concezioni del senso comune, anche di quello fisicamente più affinato. Costruì così un nuovo sistema logico-matematico, nel quale ogni simbolo e relazione corrispondeva a enti e rapporti cui fosse applicabile il concetto di operabilità secondo determinati canoni, stabiliti da un modo più proprio di considerare i fatti di quel mondo.

Contemporaneamente a lui, un altro grande giovane fisico, Schrödinger, aveva affrontato la stessa situazione di quel mondo con un sistema logico-matematico che partiva da premesse assai diverse (basato sul concetto delle onde di probabilità e per questo chiamato « meccanica ondulatoria »), che poi si rivelò, nei riguardi della realtà descritta, assolutamente equivalente a quello di Heisenberg. Questa combinazione (l'unica, forse, di tale portata in tutta la storia della fisica teorica) fu una delle più belle ed « eleganti » conferme (i fisici danno tanto valore *probante* all'armonia e all'eleganza delle strutture logiche), che il mondo, alle minime dimensioni, è un'« altra cosa », e che la mente deve affrontarlo con metodi di approccio conoscitivo del tutto « altri » da quelli del mondo della nostra esperienza normale.

Ritornando ad Heisenberg, dirò solo qualcosa nei riguardi del principio di indeterminazione. Lo derivò come naturale conseguenza della meccanica quantistica nel 1927. Sostanzialmente si può dire questo: per conoscere lo stato di un ente fisico, occorre conoscere i vari parametri che lo definiscono, come la velocità, l'energia, la posizione, la carica elettrica, la massa, e altri. Nella fisica ordinaria, anche relativistica alle grandi dimensioni, ciò è cosa comune; e, quasi sempre, una volta conosciuti questi parametri a un dato istante e in un certo punto, si può prevedere quale sarà lo stato dell'ente fisico in un istante e in un punto successivo. Nella fisica quantistica non è così: non è possibile conoscere contemporaneamente tutti i parametri che definiscono lo stato di una particella elementare o di qualche ente di quel mondo. Se, per esempio, conosco la velocità di una particella, mi resta indeterminata la sua posizione; se definisco, per esempio, la durata di un tempuscolo abbastanza piccolo, rimane

indeterminata l'energia che riguarda la particella durante quel tempuscolo; e così via.

L'elemento che rappresenta questo rapporto di indeterminazione tra questi parametri non osservabili contemporaneamente, è sempre il quanto ' h ' d'azione di Planck. La già vista piccolezza di ' h ' dice subito a che livello di grandezza si trova il campo di conoscenze della fisica quantistica.

Questo è, grosso modo, il contenuto del principio di indeterminazione. In altre parole: tanto più precisamente mi appare un aspetto di una cosa tanto meno precisamente mi sono definibili altri aspetti. Per es., ritornando al fatto succitato dei due fori (ovviamente non è qui luogo di riportare definizioni di parametri ed espressioni matematiche), si può dire che: se localizzo (con la cellula fotoelettrica) con precisione il fotone dopo un foro, distruggo l'onda di probabilità (cioè la natura ondulatoria della luce) e quindi, come abbiamo visto, non ottengo più un diagramma di interferenza. Il dilemma onda-corpuscolo non è risolvibile: o osservo l'onda o il corpuscolo; *mai assieme*. Se osservo un aspetto, sparisce l'altro.

Con la scoperta del principio di indeterminazione finalmente si capí il significato fisico della costante ' h '. Dal punto di vista fisico, essa è l'atto più piccolo che il reale può esprimere. Dal punto di vista conoscitivo, essa stabilisce il limite invalicabile di osservabilità; o, meglio, il limite invalicabile per poter porre una corrispondenza definita tra le strutture logiche che rappresentano i fatti e i fatti stessi. Nessun fatto, nessuna azione, nessuna relazione tra esseri fisici può essere espressa, almeno per quanto si sa oggi, in termini inferiori a ' h '. Se vogliamo fare un'analogia, come nessun essere fisico (anche nel microcosmo) può esprimere il proprio dinamismo con un rapporto spazio-temporale superiore a ' c ' (velocità della luce), così nessun essere fisico può esprimere il proprio stato d'esistenza con parametri inferiori a ' h '. La costante di Planck, in parole povere, è la *cosa più piccola* pensabile. E man mano che i rapporti, i dinamismi e le situazioni si abbassano verso le dimensioni di ' h ' tanto più per esse vale il principio di indeterminazione.

Si è cercato di fare filosofia su questo fatto. A me sembra

che '*b*' apra realmente una possibilità nuova di rapporto tra fisica e filosofia, non solo per l'aspetto epistemologico, ma anche perché ci presenta aspetti del reale sconosciuti in passato. Sembra proprio che esso descriva una caratteristica della natura. Quindi è legittimo, penso, per la filosofia tener conto del cambio di categorie che la fisica quantistica (come del resto anche la Relatività) ha operato nei sistemi di conoscenza umana a causa delle nuove situazioni reali che il «reale» fisico ci ha manifestato. Ma, a volte, si è voluto andare troppo in là come vedremo.

Quel che è certo è che '*b*' è un'entità fisica che definisce la natura dei microfenomeni fisici, anche se ne limita grandemente il rapporto di osservabilità. Comunque bisogna insistere sul fatto che sono reali situazioni fisiche quelle a cui essa si riferisce, pienamente formulabili con lo strumento logico della fisica: la matematica. Essa, è vero, rivela al fisico una soglia di innaccessibilità a un mondo che, fisicamente, è per sé stesso indeterminato; ma non nega che esista questo mondo indeterminato *in quanto tale* e non nega a questo stesso mondo ogni via di passaggio alla determinazione; né nega al fisico ogni «trucco», per far emergere qualcosa da quel mondo. Nei dintorni di '*b*' e quindi nel mondo delle particelle e dei quanti d'energia (parlo di dintorni nel senso di dimensioni) le leggi fisiche sono impregnate di «probabilità». È logico: è '*b*' che, pur piccola, ha dimensioni paragonabili agli eventi di cui si tratta; quindi ogni confronto con essa, ogni formula che la contenga ha, per natura di cose, un grado più o meno grande di indeterminazione.

Perciò quando dico che, se preciso un parametro ne lascio indeterminato un altro, dico una cosa vera in sé, non per un difetto tecnico nelle mie capacità di misura; quindi è un fatto insuperabile anche idealmente, anche usando mezzi solamente logici. Questa realtà della indeterminazione ha delle importantissime applicazioni nel mondo sub-atomico: rivela tutto un mondo che è stato chiamato il mondo della *virtualità*, inteso in senso strettamente fisico e non filosofico.

LA VIRTUALITÀ

Prendiamo uno degli esempi che ho portato nel descrivere il principio di indeterminazione; quello in cui, se preciso oltre un certo grado il tempuscolo di durata di un fenomeno, ne rimane completamente indeterminata l'energia che dovrebbe esservi coinvolta. È inimmaginabile l'importanza di questo fatto. Per primo ne fece l'applicazione Yukawa, fisico della generazione di Heisenberg, all'inizio degli anni '30, quando si era posto il problema del perché il nucleo atomico composto di protoni (e neutroni), e quindi tutto positivo, non si sfasciasse istantaneamente per la tremenda repulsione tra le cariche elettriche dello stesso segno così ravvicinate. Non mi dilungo sul processo con cui arrivò alla sua idea, ma dirò solo che risolse il problema applicando il principio di indeterminazione sotto l'aspetto tempo-energia accennato più sopra.

Egli immaginò che la carica positiva del protone fosse dovuta alla presenza in esso di una particella che chiamò « mesone » (poi isolato e misurato; è quello citato nella Relatività). Questo mesone, dato l'equilibrio interno del protone, non può uscirne perché ciò richiederebbe, a calcoli fatti, un grande apporto d'energia. È per questa ragione che il protone, se non è colpito dall'esterno (come avviene, a energie enormi, ai protoni cosmici che urtano gli atomi dell'altra atmosfera, liberando i mesoni cui ho accennato in Relatività), è per sé stabile per l'eternità; ma la tendenza intrinseca sua, come quella di ogni altra particella composita, sarebbe quella di disintegrarsi (per interazione « debole », si dice). Allora cosa succede? Parlando con linguaggio figurato, quasi da favola, questo mesone tenta in infiniti modi di uscire dal sistema « protone », ma non può per la ragione detta prima. Tuttavia, se si considera un tempuscolo sufficientemente piccolo, inferiore per esempio a 10^{-23} secondi (cioè 1 diviso per 1 seguito da 23 zeri), l'energia interna del protone, sempre durante quel tempuscolo, è *realmente* indeterminata; quindi il mesone potrebbe approfittarne per uscire; ma data la estrema brevità del tempuscolo, esso fa appena in tempo ad affacciarsi (parlo sempre con linguaggio da favola) che deve

già tornare indietro poiché gli è proibito dalla mancanza di energia. In tal modo è possibile considerare la superficie del protone come un infinito pullulare di tentativi di evadere del mesone, il quale così fa la figura di essere... « moltissimi ».

Ma se per caso succede che un altro protone (spinto dall'esterno con forza sufficiente per vincere la repulsione elettrica, come avviene nei processi di « fusione » dell'idrogeno), o meglio un neutrone (che non sente niente), va a *toccare* il protone, il mesone *fa in tempo* a entrare nel secondo protone (o nel neutrone) e un mesone del secondo a entrare nel primo avanti che scada il tempuscolo in cui c'è piena « anarchia » energetica. Succede allora un infinitamente veloce e continuo passaggio di mesoni dall'uno all'altro, durante gli infiniti tempuscoli succitati. Questo passaggio, o scambio, determina il « collaggio » dei protoni e dei neutroni tra loro. È la cosiddetta interazione di scambio, più comunemente detta interazione « forte », che tiene incollati tra loro i protoni e i neutroni dei nuclei atomici. Il mesone è la « colla » che impedisce la separazione, perché... non c'è tempo di separarsi; a meno che, un urto fortissimo non operi la separazione in un tempo ancora più piccolo (come avviene nelle reazioni nucleari di fissione).

È una favola strana... ma vera. È un fatto vero permesso, anzi *obbligato*, dalla indeterminatezza dell'energia durante tempuscoli sufficientemente brevi. Tutti i fenomeni che avvengono durante quelle infime dimensioni temporali si chiamano *virtuali*. Durante tempuscoli così brevi è permesso tutto ciò che si riferisce all'energia; tutto può avvenire senza energia, o meglio, con qualunque energia. Anche se consideriamo lo spazio-tempo « vuoto » in esso si possono formare delle particelle e dei quanti di qualunque natura, di qualunque massa, di qualunque energia, purché... spariscano prima che scada il tempuscolo, non avendo così rapporto con nessuna cosa. La loro effimera esistenza di fantasmi è permessa « virtualmente » dal principio di indeterminazione di Heisenberg riferito al rapporto energia-tempo.

Questi enti non si manifesteranno mai nel reale fisico salvo che, come nel caso dell'urto tra protoni o neutroni, non avvenga un fenomeno (il contatto) che richieda meno tempo di quello

loro permesso per manifestarsi. Se si potesse trovare il modo di intervenire con altri atti ultra-rapidi, si sarebbe in grado di ricavare dal... « vuoto » (cioè dal virtuale fisico) ogni tipo di particella e di quanti d'energia. È il sogno di certi tecnologi, molto futuristici, che intravvedono la possibilità di sfruttare la cosiddetta « energia virtuale dello spazio » come sorgente inesauribile. (C'è al riguardo una teoria, abbastanza logica, riguardante i cosiddetti « mini-buchi neri »). Siamo quasi in piena fantascienza; ma per la natura è un fatto realizzato, e ogni istante su di esso è basata la coesione del mondo.

Per quale atto o fatto primordiale, poi, la *realtà* delle particelle reali (protoni, neutroni, ecc.) sia emersa stabilmente dal mondo della virtualità superando '*b*', è un mistero che gruppi di scienziati stanno febbrilmente cercando di sondare nell'intima struttura di quelle particelle, sia teoricamente, sia sperimentalmente con sincrotoni sempre più giganteschi (l'ultimo ha 7 Km. di circonferenza) e sempre più energetici. Alludo alla teoria dei « quarks » su cui non mi soffermo.

Non posso però non accennare brevissimamente, e quasi fuori contesto, alla scoperta più strana e sconcertante operata dalla fisica quantistica per pura via logica: l'antimateria. L'ha « vista » Dirac nel '29, dentro... un'equazione. Nessuno voleva crederci. Egli insistette affinché la ricercassero anche nella realtà. E fu scoperta. L'antielettrone, per primo, e poi l'antiprotone, l'antineutrone e via via l'« anti » di ogni particella, man mano che veniva scoperta. Si tratta di particelle allo specchio: un'immagine *reale* identica, ma inversa di ogni particella. Anche questo è uno dei tanti esempi di passaggio obbligatorio dal logico al reale.

Qui non c'è spazio per farlo, ma sarebbe interessante soffermarsi sulla visione *inversa* del tempo (le particelle risultano assolutamente simmetriche rispetto all'andamento del tempo), l'« antitempo » cui conduce la teoria dell'antimateria portata alle sue ultime conseguenze logiche. Il tempo inverso è ormai di uso comune nella raffigurazione logico-matematica dell'interazione delle particelle tra loro e coi quanti d'energia. Sarebbe un muoversi in direzione inversa, ma non sullo stesso percorso, nel « crontopo ».

Ritornando al mondo della virtualità devo aggiungere che, oltre a quelle accennate, altre virtualità si prospettano riguardo ad altri parametri coinvolti nel principio di indeterminazione (richiamo appena l'effetto di Lamb, per il quale gli elettroni atomici, nei loro scatti rapidissimi, risentono debolmente della presenza, nel vuoto, delle entità virtuali, sopraccennate). Col concetto di virtualità (che, come abbiamo visto, non è solo un concetto...) evidentemente ogni nostra categoria classica sul mondo fisico salta. Le categorie classiche possono, in parte, resistere finché vengono applicate (come buone approssimazioni) ai fenomeni situati al nostro livello d'esperienza macroscopica e di bassa energia. Con la fisica quantistica siamo penetrati in un mondo (che è costitutivo poi del nostro mondo) dove, man mano che si scende, ciò che esiste è, in un certo senso, sempre « meno esistente ». Giunti poi allo spazio-tempo « vuoto », sembra di poter dedurre che esso è, in realtà, un « pieno » di cose che non hanno... tempo di emergere all'esistenza, e al quale diamo il nome di virtuale, perché di fatto esiste qualche atto che lo può manifestare esistente. È una specie di mondo in tensione verso l'esistenza, situato nel più profondo della primordialità; tensione bloccata, a livello iniziale, dalla misteriosa presenza di '*b*', vero e proprio limite di esistenza fisica. Così, sempre più si manifesta la natura fondamentale di questa « quantità fisica » posta all'inizio della realtà.

Poco al di sopra di '*b*' come ho già accennato, ogni realtà fisica risulta in parte determinata e in parte indeterminata, con aspetti che si « indeterminano » a vicenda, quasi in una primordiale lotta per apparire all'esistenza e, di conseguenza, alla conoscibilità. Si potrebbe pensare che, a quel livello, l'esistenza non si percepisce mai completa, perché... *non è mai* completa mentre si percepisce. Man mano che si cresce nelle dimensioni spazio-temporali e si considerano forme più organizzate, in cui i rapporti tra gli « enti elementari » si complementano, l'essere delle cose risultanti sembra definirsi sempre di più e il condizionamento posto da '*b*' va sfumando rapidamente. Già a livello di atomo, preso nel suo complesso, '*b*' è quasi trascurabile; lo è pra-

ticamente del tutto nelle grosse molecole, nelle grosse masse, nelle grandi organizzazioni.

E qui, appena usciti dal « primordiale » della fisica quantistica, la strada sembra biforcarsi: un ramo va verso le grandi masse « brute » (per cosí dire), i grandi campi di forza, le grandi energie e velocità, dove, nelle condizioni estreme, appaiono i limiti posti dalla Relatività. L'altro ramo va verso le grandi organizzazioni molecolari, verso la *grande complessità* basata sui significati crescenti delle organizzazioni: verso gli organismi; cioè verso un *altro modo* di esistenza: il modo definito dalla cibernetica.

Sembra che questa seconda via sia quella (come abbiamo visto nei primi tre articoli che ho pubblicato su questa rivista) che, da un lato (agli inizi) conduce all'esistenza del reale al di qua della barriera '*b*'; e dall'altro, conduce il reale oltre ogni barriera spazio-temporale, in una serie senza limite di « trascendenze ». Vorrei dire che la cibernetica indica la via verso l'esistenza totale, trascendente i limiti della visione « fisica » delle cose.

Un'ultima osservazione. Sul principio di indeterminazione sono state fatte molte considerazioni di carattere filosofico, a volte pertinenti e a volte no. Qualche volta esso è stato prospettato come « radice » del libero arbitrio, o meglio, della spontaneità degli esseri pensanti. A me sembra che questa deduzione, oltre ad essere arbitraria, sia profondamente errata. Le particelle sono indeterminate, non perché sono « libere », ma perché « scaraggiano » di esistenza. Al contrario, a mio parere, la spontaneità e, a livelli piú alti, la libertà, si può trovare sempre piú accentuata man mano che ci si eleva nella gerarchia cibernetica, cioè man mano che ci si avvicina alla pienezza d'essere.

Piero Pasolini