

aggressivo – che ha concimato il terreno per far nascere la fisica quantistica.

Gli appassionati, leggendo il romanzo, riconosceranno molte frasi attribuibili ad Einstein, a Niels Bohr, a Schrödinger, a Heisenberg, a Marie Curie. Senza contare quelle che ripeto anche nella mia vita reale, fingendo ormai che siano mie. Sarà che ho un cognome quantistico, e in libreria mi mettono tra Gribbin e Heisenberg, sarà per questo che credo di avere tutti i tic che ho attribuito ai fisici presenti al tavolo quella sera (e che ho distribuito equamente, con la fantasia, per non far torto a nessuno). La passione per i treni è soprattutto mia, ma anche loro hanno ammesso di averla avuta. La passione per gli scacchi, pure. Infine, i titoli dei vari capitoli sono una rivisitazione di titoli di famosi teoremi di fisica che non riesco a togliermi dalla mente, a distanza di così tanti anni dalla mia laurea.

Alla fine dell'Ottocento si pensava di aver compreso i principi fondamentali della natura. Gli atomi erano i mattoncini con cui era costruito il mondo, le leggi di gravitazione universale di Newton spiegavano il moto dei pianeti e di tutti gli altri corpi, l'universo intero sembrava funzionare come un gigantesco orologio. Ma, nei primi decenni del Novecento, uno studio più approfondito dell'atomo e dei suoi componenti ha dato origine alla teoria dei quanti che, facendo perdere gran parte delle certezze su cui si basava la fisica classica, ha gradualmente fatto comprendere che la conoscenza della realtà era ben lontana dall'essere completa.

La fisica quantistica è la teoria fisica che descrive il comportamento della materia, della radiazione e di tutte le loro interazioni viste sia come fenomeni ondulatori sia come fe-

nomeni particellari (dualismo onda-particella), a differenza della fisica classica o newtoniana, basata sulle teorie di Isaac Newton, che vede per esempio la luce solo come onda e l'elettrone solo come particella.

La fisica quantistica si occupa di unità discrete indivisibili (discrete in senso matematico) di energia chiamati quanti, come descritto dalla teoria quantistica.

Un quanto (quantum) è la quantità minima di una grandezza fisica che può esistere in modo indipendente, in particolare una quantità discreta di radiazione elettromagnetica.

In questo contesto «discreto» è il participio passato di discernere, che significa separare, cioè separato, quindi non può essere ulteriormente separato. È stato tradotto dall'inglese *discrete* che significa separato, diviso, distinto.

La teoria dei quanti si basa su alcune idee fondamentali:

- 1) L'energia non è continua, ma viene in piccole unità discrete.
- 2) Le particelle elementari si comportano sia come particelle sia come onde. Il movimento di queste particelle è intrinsecamente casuale. È fisicamente impossibile conoscere sia la posizione sia la quantità di moto di una particella contemporaneamente. Più precisamente una è nota, meno precisa è la misurazione dell'altra.
- 3) Il mondo atomico non è come il mondo in cui viviamo.

La teoria dei quanti contiene molti indizi, come la natura fondamentale dell'universo, ed è più importante anche della relatività nel grande schema delle cose (sempre che, a quel livello, si possa dire che una cosa è più importante di qualsiasi altra). Inoltre, descrive la natura dell'universo come molto diversa dal mondo che vediamo.

Cos'è la dualità particella/onda? È il modo più semplice

per familiarizzare con la teoria quantistica, perché mostra come il mondo atomico sia differente da quello visibile. Per la scienza classica un elettrone è una particella, per la fisica quantistica può essere una particella o un'onda a seconda dei casi. La cosa divertente è che diversi esperimenti hanno dimostrato che un elettrone è una particella finché la guardi, e diventa un'onda quando non la guardi.

I principi basilari su cui si basa la fisica quantistica sono:

- 1) Sia la luce sia le particelle che costituiscono gli atomi, e cioè gli elementi fondamentali che compongono la materia (quindi noi stessi e la realtà a noi manifesta) sono costituiti da minuscoli concentrati di energia detti quanti, che hanno una duplice natura: ondulatoria e corpuscolare. Precisamente a livello subatomico la materia presenta le caratteristiche tipiche delle onde e solo all'atto dell'osservazione assume un comportamento corpuscolare. Il primo a intuire la duplice natura della materia fu il matematico e fisico Louis de Broglie.
- 2) Le proprietà delle vibrazioni dell'onda quantistica furono descritte matematicamente dall'equazione d'onda di Schrödinger.
- 3) Non è possibile conoscere simultaneamente la velocità e la posizione di una particella quantistica, poiché quanto maggiore è l'accuratezza nel determinarne la posizione tanto minore è la precisione con la quale si può accertarne la velocità e viceversa. La suddetta proprietà è conosciuta come principio d'indeterminazione di Heisenberg. L'indeterminazione non dipende dai limiti dei nostri strumenti, che comportano necessariamente un'interazione più o meno grande con l'oggetto da sottoporre a misurazione, bensì rappresenta una caratteristica intrinseca della materia.

- 4) Se si fanno interagire due particelle per un certo periodo e successivamente vengono separate, quando si sollecita una delle due in modo da modificarne lo stato, istantaneamente si manifesta sulla seconda un'analogia sollecitazione a qualunque distanza si trovi rispetto alla prima. Si tratta del cosiddetto fenomeno dell'*entanglement*.

I due esperimenti fondamentali per la fisica quantistica sono:

- 1) L'effetto fotoelettrico. In certe situazioni, come messo in evidenza nel 1905 da Einstein con l'ipotesi del fotone nell'effetto fotoelettrico, la luce si comportava decisamente come composta da particelle. L'effetto fotoelettrico è il fenomeno che si manifesta con l'emissione di particelle elettricamente cariche da parte di un corpo esposto a onde luminose o a radiazioni elettromagnetiche di varia frequenza: gli elettroni vengono emessi dalla superficie di un conduttore metallico (o da un gas) in seguito all'assorbimento dell'energia trasportata dalla luce incidente sulla superficie stessa. Come diceva Planck, la radiazione luminosa di frequenza ν è composta da particelle corpuscolari (fotoni) di energia $E = h\nu$ (h è la costante di Planck). Per riuscire a strappare un elettrone a una superficie metallica, l'energia del fotone deve essere più grande dell'energia di legame dell'elettrone nel metallo (W). Inserendo un amperometro fra anodo e catodo si misura così un passaggio di corrente. Se invece l'energia del fotone è inferiore a W non si ha effetto fotoelettrico, e l'amperometro non registra passaggio di corrente. La teoria ondulatoria classica prevedeva che, all'aumentare dell'intensità della luce incidente, aumentasse l'energia degli elettroni emessi. Nel 1902 il fisico

tedesco Philip Lenard mostrò invece che l'energia dei fotoelettroni non dipendeva dall'intensità di illuminazione, ma dalla frequenza (o dalla lunghezza d'onda) della radiazione incidente. L'intensità della radiazione determinava invece l'intensità della corrente, cioè il numero di elettroni strappati alla superficie metallica. Il risultato sperimentale era inspiegabile presupponendo che la natura della luce fosse solo ondulatoria. Nel 1905 Albert Einstein spiegò l'effetto fotoelettrico con l'ipotesi secondo cui i raggi luminosi trasporterebbero particelle, chiamate fotoni, la cui energia è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda corrispondente: incidendo sulla superficie di un corpo metallico, i fotoni cedono parte della loro energia agli elettroni liberi del conduttore, provocandone l'emissione. Allora l'energia dell'elettrone liberato dipende solo dall'energia del fotone, mentre l'intensità della radiazione è direttamente correlata al numero di fotoni trasportati dall'onda, e dunque può influire sul numero di elettroni estratti dal metallo, ma non sulla loro energia. Era difficile credere che la luce presentasse tale dualismo, apparendo come onda o come particella a seconda degli esperimenti. De Broglie nel 1924 ipotizzò che tutta la materia manifestasse lo stesso dualismo.

2) Nel 1927 Davisson e Germer ottennero la prova sperimentale di tale comportamento tramite l'esperimento della doppia fenditura: osservarono figure di diffrazione facendo attraversare un cristallo di nichel da un fascio di elettroni (la diffrazione è un fenomeno associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino). Nasceva da qui la possibilità di utilizzare fasci di particelle per eseguire esperimenti di interferenza con

due fenditure (proprio come Young aveva fatto con la luce). L'esperimento delle due fenditure permette di dimostrare la dualità onda-particella della materia. Richard Feynman ripeteva che questo esperimento era la chiave per comprendere la fisica quantistica. Questa volta vennero usate lastre rilevatrici moderne e una sorgente estremamente debole di luce o elettroni. Aprendo soltanto una fenditura (ad esempio, quella di sinistra), sulla lastra fotografica si ottiene la proiezione della fenditura. Aprendo solo la fessura destra si forma una figura speculare a quella precedente. La luce risponde quindi perfettamente alla teoria corpuscolare di Newton. Ora, provando a prevedere che figura risulterebbe dall'apertura contemporanea di entrambe le fenditure, secondo la teoria corpuscolare si verificherebbe la semplice sovrapposizione delle due figure precedenti. In realtà, quella che si genera è una figura d'interferenza, ovvero in questo caso la luce si comporta come un'onda meccanica: sulla lastra fotografica avremmo in alcuni punti sovrapposizioni di picchi o ventri, in altri cancellazioni. Ciò dimostra inequivocabilmente l'esistenza del dualismo onda-corpuscolo, sia della materia che della radiazione elettromagnetica. Niels Bohr introdusse anche il principio di complementarità, secondo il quale i due aspetti, corpuscolare e ondulatorio, non possono essere osservati contemporaneamente perché si escludono a vicenda, ovvero il tipo di esperimento determina il comportamento successivo delle particelle coinvolte. Ma com'è possibile che un singolo elettrone si comporti come un'onda e faccia interferenza con se stesso? Fino a quando l'elettrone non viene rivelato sul bersaglio, non si trova mai in un punto preciso dello spazio, ma esiste in uno stato potenziale astratto descritto da una funzio-

ne di probabilità, che si propaga come un'onda e non secondo una traiettoria definita. De Broglie e Schrödinger tentarono di descrivere tutto il mondo quantistico in termini di onde, abolendo il concetto di particella. Ma per cogliere l'elettrone sul fatto, dobbiamo rivelarlo. La meccanica quantistica non ci permette di avere contemporaneamente la figura di interferenza e la conoscenza del singolo foro da cui l'elettrone è passato. O l'uno o l'altro: o l'elettrone viene rivelato come particella oggettiva, e quindi non produce interferenza, o è un'onda estesa, e in tal caso non passa da un solo foro, bensì da tutte e due: è come se fosse passato da tutte e due.

Questo è un po' come il notissimo paradosso del gatto di Schrödinger: gatto vivo o gatto morto; non si sa finché non si vede il gatto aprendo la scatola, altrimenti si considera vivo e morto contemporaneamente.

Il fenomeno dell'*entanglement* viola il «principio di località» per il quale ciò che accade in un luogo non può influire immediatamente su ciò che accade in un altro. Ecco un esempio: due particelle vengono lanciate in direzioni opposte. Se la particella A durante il suo tragitto incontra una carica magnetica che ne devia la direzione verso l'alto, la particella B, anziché continuare la sua traiettoria in linea retta, devia contemporaneamente la direzione assumendo un moto contrario alla sua gemella. Questo esperimento dimostra che le particelle sono in grado di comunicare tra loro trasmettendo ed elaborando informazioni, e dimostra anche che la comunicazione è istantanea. Nell'ottobre del 1998 il fenomeno dell'*entanglement* è stato definitivamente confermato da un esperimento effettuato presso l'Institute of Technology (Caltech) di Pasadena, in California. In conclusione, la meccanica quantistica nel microscopico ci ha

condotto ad abbandonare la descrizione della fisica classica deterministica, per arrivare a una descrizione probabilistica in cui gli stati e le proprietà del mondo microscopico non sono determinati a priori e intrinsecamente, ma acquisiscono realtà solo se vengono misurati o se entrano in contatto con altri oggetti. Questo stravolge la descrizione di un mondo che fino al secolo scorso sembrava sensato e ragionevole.

Per ulteriori approfondimenti su argomenti più tecnici, ho elencato alla fine l'intera bibliografia di cui mi sono servita. Quella sì che rappresenta un riferimento solido, irrinunciabile per parlare di fisica quantistica.

Ma in quale momento della storia della fisica si inserisce questo romanzo? Nel 1927, in Belgio, si svolge il quinto congresso dei fisici di fama mondiale. Il primo ritrovo ufficiale è datato 1911, ed è sempre Bruxelles a ospitarlo. In quei tempi, i fisici non trovavano un terreno comune per descrivere la natura più piccola della materia: atomi indivisibili o continuum infinitamente indivisibile? Non legavano neanche le equazioni di Newton con quelle di Maxwell, e quindi fisica classica con elettromagnetismo. Poi fu il momento di due grandi intuizioni, due esperimenti decisivi: la radiazione del corpo nero e l'effetto fotoelettrico, uno dovuto a Planck e l'altro a Einstein. In fisica, un corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla. Per il teorema della conservazione dell'energia (niente si crea o si distrugge, ma tutto si trasforma), deve quindi re-irradiarla. È detto 'nero' secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi; il sole con buona approssimazione può essere considerato un corpo nero. Secondo Planck, il corpo nero emette