

Max Planck e la fisica dei quanti

1. Una nuova era tecnologica

Sul finire dell'Ottocento, la scienza e la tecnologia erano trionfanti. L'Esposizione mondiale di Parigi del 1889, anno in cui cadeva il centenario della rivoluzione francese, fu una straordinaria mostra di nuove tecnologie. Tanto per fare l'esempio più celebre, fu inaugurata la torre Eiffel, all'epoca la struttura artificiale di gran lunga più alta del mondo; una fantastica novità, diversa da qualsiasi cosa l'uomo avesse mai costruito prima.

Per competere con Parigi, nel 1893, l'anno successivo al quattro centesimo anniversario della scoperta dell'America da parte di Colombo, gli americani organizzarono a Chicago la grande Esposizione mondiale colombiana, illuminando con la luce artificiale un'enorme area in cui il pubblico poteva ballare tutta la notte. In mostra c'erano molti altri congegni tecnologici, tra cui, credo, la versione primitiva del fonografo.

Negli stessi anni si iniziarono a produrre non solo ascensori e condizionatori, ma anche automobili. Era chiaro: la scienza aveva fatto un buon lavoro e molti pensavano che fosse alla fine, che avesse realizzato ogni suo possibile compito. I coloranti artificiali nella chimica e mille altre innovazioni tecnologiche, la teoria di Maxwell, la teoria di Newton: cos'altro restava da fare? Negli ultimi anni del secolo, però, furono fatte alcune scoperte sensazionali. Ne citerò soltanto tre, la prima delle quali fu quella, del tutto imprevista, dei raggi X: un nuovo metodo per individuare le ossa rotte, per trovare le carie dei denti e anche per scegliere le scarpe (un tempo, infatti, i raggi X si usavano addirittura nei negozi di scarpe, per controllare che queste calzassero bene). La seconda fu la scoperta della radioattività, una nuova fonte di energia apparentemente infinita, derivante da processi che nessuna legge fisica nota all'epoca poteva spiegare. Il culmine fu però la scoperta dell'elettrone, la prima particella elementare, alla base di tutti i fenomeni elettrici.

Stava per succedere qualcosa. All'alba del Novecento stavano per scoppiare due grandi rivoluzioni. La prima fu lo sviluppo della meccanica quantistica, derivante dalla comprensione dell'incapacità della meccanica di Newton di spiegare il comportamento di oggetti molto piccoli, come gli atomi. La seconda fu la teoria speciale della relatività di Einstein, che rivelò come la meccanica di Newton non fosse applicabile neanche agli oggetti molto veloci. Per gli oggetti molto piccoli, o molto veloci, occorre nuove teorie.

2. La radiazione termica

Uno dei problemi emersi nella seconda metà dell'Ottocento, e non ancora risolto, aveva a che fare con l'energia termica, a volte detta «*radiazione di corpo nero*»: la radiazione prodotta da un forno caldo, o dal riscaldamento di qualcosa nel fuoco.

Se prendo un comune ferro da stiro, la cui temperatura a caldo è sui 150 gradi centigradi, e lo avvicino al viso, posso sentire che emana calore: emana radiazione infrarossa. Se prendo un pezzo di ferro e lo riscaldo ancora di più, emetterà molto più calore e assumerà un colore rosso spento. Se continuo a scaldarlo, il pezzo di metallo cambia colore: prima arancio ne, poi giallo, poi bianco, e infine bianco-bluastrò, diventando sempre più brillante.

È questo il fenomeno della radiazione termica, che all'epoca gli scienziati non erano ancora in grado di comprendere. Erano note alcune leggi empiriche dettagliate, che descrivevano ciò che si osservava, ma non si era stati in grado di derivare una formula che spiegasse i cambiamenti di colore degli oggetti riscaldati, e l'aumento della quantità di energia emanata da un oggetto via via che diventa più caldo. La formula non arrivò fino al 1900, anno in cui fu elaborata da un fisico tedesco di nome Max Planck.

3. La costante di Planck

Planck fece molti tentativi, ma basandosi sulle teorie esistenti non riusciva ad arrivare a una formula. Per giungere a un risultato dovette ipotizzare che la radiazione elettromagnetica venisse emessa in pacchetti indivisibili, che chiamò «*quanti*». E questa l'origine dell'espressione «*meccanica quantistica*».

Possiamo fare un paragone con la spesa: non possiamo comprare 2,6 litri di latte, o 1,2 litri di latte: possiamo solo comprare mezzo litro, un litro, due litri ecc., ma sempre in quantità pari a un certo multiplo

di una quantità definita. Planck dovette fare una supposizione analoga, secondo la quale la luce è emessa in pacchetti, le cui dimensioni variano in ragione della frequenza della luce: quindi, un pacchetto di luce rossa trasporta meno energia di un pacchetto di luce violetta.

Questa ipotesi appariva completamente folle ai tempi, ma grazie a essa Planck elaborò una formula che funzionava alla perfezione, anche se era stato obbligato a uscire dal dominio della fisica classica e aveva dovuto introdurre una nuova costante fisica di cui nessuno aveva mai sentito parlare, in seguito chiamata «costante di Planck».

Il risultato raggiunto da Planck rimase ancora a lungo fonte di sconcerto per i fisici, e si iniziò a comprenderlo un po' meglio quando entrò in scena Einstein, nel 1905. Com'è noto, il 1905 fu un anno miracoloso per Einstein, che in quell'anno diede contributi di eccezionale importanza per la fisica, e uno di questi aveva a che fare proprio con il risultato di Planck.

4. La vera natura della luce

Einstein, affascinato dal lavoro di Planck, cercò di capirlo più nei dettagli. Scoprì innanzi tutto che la derivazione della formula operata da Planck era incompleta: mancava un passaggio, che richiedeva non solo che la luce fosse emessa e assorbita in pacchetti discreti, ma anche che viaggiasse in pacchetti. La luce consisterebbe quindi di pacchetti di energia, di corpuscoli.

Einstein aveva chiuso il cerchio. Newton sosteneva che la luce fosse fatta di particelle. Maxwell era convinto che fosse fatta di onde. E ora Einstein diceva: «*Be', non è così semplice. La luce si comporta a volte come un insieme di onde, e a volte come un insieme di particelle*». E anche questa è un' affermazione totalmente folle. È impossibile interpretarla nell'ambito del pensiero classico.

Anzi, è l'idea stessa di discutere se la luce sia fatta di particelle o di onde, che è priva di senso, perché «particella» e «onda» sono parole che abbiamo imparato come esseri umani che hanno esperienze umane, ma nel mondo dell'infinitamente piccolo le nostre parole comuni non hanno nessun senso. La luce, questa è la verità, non è una particella, e non è fatta di onde. La luce è luce: a volte si manifesta come un' onda, a volte come una particella. È come una divinità indiana, che si può incarnare in molti avatar diversi.

5. L'effetto foto elettrico

Einstein sosteneva che la luce si può comportare sia come una particella sia come un' onda, a seconda dei casi presi in considerazione. Il comportamento particellare della luce servì a Einstein per spiegare il cosiddetto «effetto fotoelettrico».

Era noto che la luce, in particolare la luce ultravioletta, quando colpisce un metallo ne fa scaturire degli elettroni, e Einstein pensò a come potesse avvenire questo fenomeno. Quando un quanto di luce, chiamato «fotone», penetra in un metallo, può cedere la sua energia a un elettrone, e quell' elettrone allora uscirà, portando con sé l'energia del fotone diminuita del costo di estrazione dell'elettrone dal metallo.

Einstein dedusse che, quando aumentiamo la frequenza della luce, l'energia dell'elettrone che esce dovrebbe aumentare in proporzione: se la frequenza fosse inferiore al costo di estrazione dell'elettrone, la luce non dovrebbe produrre elettroni. Infatti, la luce visibile che colpisce un pezzo di ferro o di stagno non produce elettroni. Invece la luce ultravioletta, che ha una frequenza più alta, genera elettroni.

La teoria ondulatoria della luce non riusciva a spiegare l'«effetto fotoelettrico» perché, secondo i suoi principi, la luce di qualsiasi frequenza dovrebbe produrre elettroni: anche la luce rossa, se fosse sufficientemente intensa. Invece questo non accadeva. Per produrre elettroni si doveva aumentare la frequenza, non l'intensità.

Nel 2009 un'applicazione pratica dell'effetto fotoelettrico ha fatto vincere il Nobel per la fisica ai due inventori del sensore che sta alla base anche delle macchine fotografiche digitali: la luce che colpisce questo sensore produce elettroni, che vengono usati per creare un'immagine digitale.

Nel 1905 nessuno credette a Einstein, ma di lì a poco fu chiaro che la luce si comporta come una particella in molte circostanze, non solo nell' effetto fotoelettrico. Un fisico americano, Arthur Compton, riuscì a osservare la diffusione della luce da parte degli elettroni, e vide che questo fenomeno si produceva in modo simile all'urto delle palle da biliardo: se si capisce che cosa succede quando una palla da biliardo ne colpisce un' altra, si capisce anche cosa succede quando un fotone colpisce un elettrone. E questo esperimento era perfettamente in accordo con la tesi di Einstein, che la luce in molte circostanze si comporta come se fosse costituita da particelle.

6. Il modello planetario dell'atomo

Ernest Rutherford fu uno dei più grandi fisici del Novecento. L'unico, che io ricordi, nato ed educato in Nuova Zelanda. Intorno al 1911 Rutherford lavorava in Inghilterra, e studiava le particelle alfa: particelle radioattive emesse dal polonio, un elemento scoperto qualche anno prima da Madame Curie. Il risultato più interessante raggiunto da Rutherford fu la scoperta del nucleo atomico.

Che cosa si sapeva dell'atomo ai tempi di Rutherford? Si sapeva che un atomo aveva certe dimensioni, all'incirca 10^{-10} metri, cioè un decimillesimo di milionesimo di metro, davvero minuscolo. E si supposeva che fosse una specie di goccia uniforme, con gli elettroni al suo interno, come le uvette in un dolce. Questo «*modello a panettone*» dell' atomo era stato proposto nel 1904 da Joseph Thomson, lo scopritore dell'elettrone.

Rutherford, invece, scoprì che un atomo è costituito per lo più da spazio vuoto, e la maggior parte della sua massa è contenuta in un minuscolo nucleo. Se immaginiamo che l'atomo sia grande come un campo da calcio, il nucleo, che contiene il 99,9% della massa, sarebbe grande come un' oliva: un' oliva in un campo da calcio. Il nucleo è piccolissimo, e la maggior parte della massa dell' atomo sta in questo minuscolo nucleo.

Questa nuova descrizione era rivoluzionaria. Il modello atomico di Rutherford è chiamato anche «*modello planetario*». Come il sistema solare ha il Sole al centro, e i pianeti gli ruotano intorno per effetto della forza gravitazionale, così un atomo consiste di un nucleo, con un numero di protoni che dipende dalla posizione dell'atomo nella tavola periodica, e gli elettroni gli ruotano attorno per effetto della forza elettrica (gli elettroni hanno carica negativa, e i protoni positiva).

Ma anche in questa spiegazione si celavano alcuni problemi. Consideriamo l'atomo più semplice, quello di idrogeno, che consiste di un nucleo molto semplice, composto da un'unica particella detta «*protone*», circondato da un solo elettrone. Il problema è questo: che cosa stabilisce quanto dovrebbe essere grande l'atomo?

Se proviamo a immaginare una stella con un pianeta, questo pianeta potrebbe avere un' orbita come quella di Mercurio, molto vicina al Sole, oppure potrebbe avere un'orbita come quella di Nettuno o di Urano, molto lontana dal Sole. Il dato empirico, però, mostrava che tutti gli atomi di idrogeno avevano le stesse dimensioni. Quale legge della fisica prescriveva che l'elettrone non potesse seguire un' orbita qualsiasi intorno al protone?

C'era, però, un problema ancora più grave. Stando a quanto stabilito da Maxwell, se una particella carica si muove di moto circolare, deve emettere luce. Quindi anche l'elettrone avrebbe dovuto emettere luce, perdendo così sempre più energia, fino a cadere nel nucleo, facendo collassare l'atomo in una frazione di secondo.

7. La teoria di Bohr

A questo punto entra in scena un giovane fisico danese, Niels Bohr, che si trovava in visita da Rutherford proprio quando questi fece la sua grande scoperta. Quando Bohr tornò in Danimarca, iniziò a elaborare le premesse della meccanica quantistica.

Il suo obiettivo era cercare di risolvere i due problemi di cui abbiamo parlato: perché tutti gli atomi di idrogeno hanno le stesse dimensioni? e perché un atomo di idrogeno è stabile? Bohr si rese conto che la fisica classica non poteva risolvere questi problemi, e fu quindi costretto a fare appello all'interpretazione particellare della luce di Einstein, e a elaborare alcune regole particolari per comprendere quali fossero le orbite degli elettroni.

L'ipotesi formulata da Bohr era che il momento angolare dell'elettrone (in altre parole, la misura di quanto sta girando intorno al protone) dovesse essere uguale a un multiplo intero della costante di Planck. Bohr riuscì così a spiegare perché tutti gli atomi di idrogeno hanno le stesse dimensioni. E anche perché l'atomo di idrogeno è stabile e l'elettrone non finisce per cadere sul protone.

Bohr spiegò inoltre lo spettro di emissione dell'atomo di idrogeno. Si sapeva da molti anni che ogni elemento chimico può vibrare in un certo numero discreto di oscillazioni, emettendo luce in alcune frequenze e non in altre. Se, per esempio, si butta un po' di sodio nel fuoco, come quando da una pentola trabocca l'acqua salata (il sale da cucina è cloruro di sodio), il sodio diventa giallo, perché alcune sue linee spettrali caratteristiche sono gialle.

Dell'idrogeno si sapeva che aveva cinque linee spettrali, ed esse soddisfacevano la formula derivata da Bohr: una formula piuttosto semplice, che però nessuno si sapeva spiegare. Bohr infatti era riuscito a dare conto di tutte le proprietà dell'idrogeno sulla base di alcune regole, la cui unica giustificazione era che funzionavano. Ci vollero altri tredici anni prima di arrivare a una loro comprensione.

Einstein era entusiasta di questa nuova teoria di Bohr, perché spiegava non solo lo spettro dell'atomo di idrogeno, ma anche di quello dell'elio ionizzato, che in una stella lontana produceva linee spettrali che prima nessuno era stato in grado di capire.

8. Le onde di de Broglie

Subito dopo l'epico lavoro di Bohr del 1913, anche un giovane francese si dedicò allo studio di questi problemi. Era un francese di sangue reale, il principe Louis de Broglie, che nella sua tesi propose una congettura affascinante. Disse che se Einstein aveva sostenuto e dimostrato al mondo che la luce si può comportare come un insieme di particelle, non doveva allora essere vero che anche le particelle, gli elettroni per esempio, a volte si dovessero comportare come onde?

Se questa idea fosse vera, ragionò de Broglie, dovrebbe essere possibile verificarla cercando figure di interferenza, simili a quelle prodotte dall'incontro di onde di luce o di acqua provenienti da direzioni diverse. Inviando un fascio di elettroni contro un cristallo, gli elettroni dovrebbero riflettersi, generando onde che in parte si esalterebbero a vicenda, e a volte si eliminerebbero, generando, appunto, una figura di interferenza.

Gli esperimenti confermarono la supposizione: queste onde, che furono chiamate «onde di de Broglie» o «onde materiali», effettivamente esistevano. Anche alla materia potevano dunque essere associate proprietà ondulatorie! Arriviamo così alla creazione della meccanica quantistica, che si realizzò in modo indipendente nella testa di due geni nell'anno 1926.

9. Heisenberg e la meccanica delle matrici

Le idee legate ai quanti erano rivoluzionarie. Dunque, attraevano gli scienziati più giovani e più ambiziosi, mentre quelli più avanti negli anni difficilmente accettavano ipotesi così innovative e stravaganti. Uno dei «giovani» della fisica era Werner Heisenberg. Riflettendo sulle idee di Bohr, Heisenberg capì che la strada era quella giusta, e cercò di elaborarne una solida base teorica.

Innanzitutto, si rese conto che una delle conseguenze dei lavori di Bohr e di de Broglie era il «principio di indeterminazione». Ossia, il fatto che un esperimento, per quanto preciso, non può misurare allo stesso tempo la posizione e la velocità (o meglio, la quantità di moto) di una particella.

Heisenberg ne offrì una spiegazione del tutto soddisfacente. Supponiamo di usare un microscopio per osservare la posizione di qualcosa di minuscolo. Il microscopio usa la luce visibile di una certa lunghezza d'onda, e perciò non possiamo localizzare nulla che sia più piccolo della lunghezza d'onda della luce. Non è un problema: basta usare la luce ultravioletta, che ha una lunghezza d'onda minore della luce visibile, e se non basta ancora possiamo usare i raggi X, che hanno una lunghezza d'onda ancora più piccola. Pertanto, usando onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda sempre minore, è possibile misurare la posizione di un oggetto con il grado di precisione desiderato.

E riguardo alla sua velocità? Dobbiamo ricordare che per ottenere informazioni sul minuscolo oggetto che stiamo osservando, occorre colpirlo con almeno una particella di luce, e se lo colpiamo con una particella di luce ne modifichiamo la velocità. Anche questo non è un problema: possiamo colpirlo in modo sempre più delicato, con una lunghezza d'onda maggiore.

Perciò, con lunghezze d'onda piccole possiamo misurare la velocità, e con lunghezze grandi possiamo misurare la posizione. Di conseguenza, maggiore è la precisione con cui misuriamo la posizione, minore è la precisione con cui possiamo misurare la velocità, e viceversa. Non possiamo misurare precisamente la posizione e la velocità allo stesso tempo.

Questo fatto cambia completamente le regole della fisica, perché secondo la meccanica newtoniana, se misuriamo la posizione e la velocità di qualcosa, sappiamo che cosa farà da quel momento in poi. Ora invece si scopriva che è impossibile misurare sia la posizione sia la velocità, e quindi è impossibile sapere che cosa farà l'oggetto da quel momento in poi.

Heisenberg, Bohr e Einstein ebbero molte discussioni per stabilire se ciò fosse realmente vero, se esistesse davvero un limite fondamentale alla possibile precisione delle misure.

Nel 1926 Heisenberg inventò uno schema nuovo, che chiamò «meccanica delle matrici», per dare un fondamento teorico alle regole di Bohr. La meccanica delle matrici era una formulazione della meccanica quantistica che comprendeva le regole arbitrarie di Bohr, ma era molto più precisa e specifica, oltre a essere matematicamente coerente. Era davvero una teoria, una teoria della meccanica quantistica.

10. I padri della meccanica quantistica

In realtà la meccanica quantistica ebbe due padri. Abbiamo parlato di uno di loro, Werner Heisenberg, che formulò la teoria della meccanica quantistica nella forma della meccanica delle matrici, e diventò un fisico molto stimato in Germania.

Nello stesso periodo Erwin Schrodinger, un fisico austriaco non più giovanissimo, mentre era in vacanza con un'amante in una stazione sciistica austriaca, creò la meccanica ondulatoria, un'altra forma di meccanica quantistica che incorporava tutte le regole di Niels Bohr.

Esistevano quindi due meccaniche quantistiche: la meccanica delle matrici di Heisenberg, che si basava su un certo tipo di manipolazioni algebriche, e la meccanica ondulatoria di Schrodinger, che si basava su un'equazione differenziale simile all'equazione che descrive il calore o i campi elettrici. Due tipi diversi, completamente diversi, di matematica.

L'«equazione di Schrodinger» descrive le onde materiali, le «onde di de Broglie», dell'elettrone in un atomo di idrogeno: è dunque un'equazione che descrive la funzione d'onda dell'elettrone. Nel lavoro di Heisenberg non c'era una funzione d'onda, c'erano invece le strutture algebriche che si chiamano «matrici». Si tratta quindi di due punti di vista molto diversi, ma l'uno e l'altro fornivano le stesse previsioni.

A questo punto, entra in scena un terzo padre, una specie di mediatore tra Schrodinger e Heisenberg. Era un ebreo tedesco, che durante la seconda guerra mondiale dovette abbandonare la Germania, di nome Max Born. Egli, analizzati i risultati ottenuti da Schrodinger e Heisenberg, li trovò perfettamente coerenti e validi, rendendosi conto che le due teorie erano equivalenti. Ciò che Schrodinger aveva elaborato con il linguaggio del calcolo differenziale, era esattamente equivalente a quanto fatto da Heisenberg in linguaggio algebrico: si trattava semplicemente di formulazioni matematiche diverse della medesima teoria.

Max Born capì inoltre cos' erano le onde materiali descritte da Schrodinger. In realtà non erano onde materiali, ma avevano a che fare con le probabilità: dove il valore della funzione d'onda è grande, è più probabile trovare la particella, e dove il valore è piccolo, è meno probabile. Questa è l'interpretazione probabilistica della meccanica quantistica, che oggi tutti crediamo corretta.

Tutti e tre i partecipanti a questa emozionante avventura ricevettero il premio Nobel per i loro contributi al sapere umano. Alla teoria, però, mancava ancora qualcosa.

11. Lo spin dell'elettrone

Una delle grandi sfide affrontate dalla meccanica quantistica fu cercare di spiegare il grande risultato ottenuto nell'Ottocento da Dmitrij Mendeleev: la tavola degli elementi, che ordinava i diversi elementi chimici secondo le rispettive proprietà periodiche.

La questione presentava una serie di difficoltà, e non era chiaro come si dovesse procedere. Mancava infatti il concetto di «spin elettronico», una proprietà molto strana ed essenzialmente quantistica posseduta, appunto, dall'elettrone. In poche parole, l'elettrone ruota su se stesso, in un certo verso o in quello opposto. Negli anni Venti due fisici olandesi, Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck, dimostrarono sperimentalmente l'esistenza dello spin facendo passare un fascio di elettroni attraverso un campo magnetico, e osservando che il fascio effettivamente si divideva in due parti, corrispondenti ai due stati di spin dell'elettrone.

Una volta svelato il concetto di spin, si riuscì a capire, come vedremo meglio fra poco, perché l'atomo di elio è stabile e non reagisce agli altri atomi combinandosi con essi. Si passò poi ad analizzare quantisticamente le proprietà chimiche di atomi sempre più grandi. Grazie alla scoperta dello spin dell'elettrone, i fisici si resero conto di essere ormai in grado di comprendere le regole fondamentali della chimica, le cui reazioni cessarono di essere misteriose: erano una conseguenza della meccanica quantistica.

Il comportamento dei diversi elementi chimici descritto nella tavola periodica poteva ora essere dedotto a priori, senza bisogno di ulteriori ipotesi o di altri esperimenti. Questo ovviamente non vuol dire che la chimica fosse diventata obsoleta: ai chimici restava e resta ancora molto da fare, e non basta conoscere le regole degli scacchi per essere un gran maestro.

12. L'equazione di Pauli

Un altro giovane scienziato ebbe un ruolo decisivo nella creazione della meccanica quantistica e nella spiegazione delle proprietà chimiche degli elementi. Il suo nome era Wolfgang Pauli.

Pauli introdusse un principio oggi noto con il suo nome. Nella forma originaria, il «principio di Pauli» affermava che non più di due elettroni possono fare la stessa cosa nello stesso momento. Era un principio a prima vista insensato, ma quando si scoprì che l'elettrone ha due stati di spin diversi, il principio di Pauli si semplificò un po' e diventò: «non più di un elettrone può fare la stessa cosa nello stesso tempo», perché se un elettrone gira in un verso l'altro gira nel verso opposto.

A quel punto, con il principio di Pauli e il concetto di spin, si riuscì a capire perché l'idrogeno è chimicamente molto attivo e l'elio no. L'idrogeno ha infatti un solo elettrone, con un certo spin, quindi per completare i suoi stati quanti ci gli manca un elettrone con spin opposto. L'elio invece ha due elettroni, è un elemento chimico molto «felice», per così dire, perché ha riempito i suoi stati quantici e non ha più nulla da fare: non può rubare un elettrone a nessuno, non può cedere un elettrone a nessuno. E felice in se stesso. E un gas inerte.

Il principio di Pauli spiegava quindi l'esistenza di questi strani elementi (l'elio, il neon, l'argon, lo xeno e il cripto) che non partecipavano alle reazioni chimiche. Sussisteva, però, ancora un piccolo problema. L'equazione di Schrodinger non comprende una descrizione dello spin, e non è coerente con la teoria della relatività di Einstein. Niente spin, niente relatività.

Heisenberg e Schrödinger sapevano entrambi che la teoria che stavano elaborando non era coerente con la teoria della relatività di Einstein, ma non riuscirono a fare di meglio. Pauli, cercando di migliorare la teoria di Schrodinger, concepì un'equazione, chiamata «equazione di Pauli», che comprendeva lo spin, ma la relatività rimase esclusa anche in questo caso.

Altri scienziati elaborarono un'equazione relativisticamente invariante, coerente con la teoria di Einstein, ma che non comprendeva lo spin.

13. Una nuova teoria unificatrice

Per descrivere l'elettrone è necessaria una teoria compatibile con la relatività e che comprenda lo spin. Una teoria di questo genere arrivò soltanto nel 1929. Arriviamo così a un altro giovane fisico, il più giovane di tutti: Paul Adriaan Maurice Dirac.

Dirac concepì un'equazione, detta appunto «equazione di Dirac», che pur essendo molto semplice, spiega davvero molto. Essendo un'equazione relativistica, coerente con la teoria di Einstein, e comprendendo lo spin, funziona: descrive per intero il comportamento di un elettrone in un campo elettromagnetico. Ma, come mi disse Dirac: «La mia equazione è più intelligente di me». Il punto è che questa equazione, che funzionava così bene, aveva due tipi di soluzioni: a energia positiva, che descriveva gli elettroni, ma anche a energia negativa, a cui non si sapeva dare un'interpretazione fisica.

Dirac pensò che la sua equazione potesse descrivere due tipi di particelle, ma i due tipi di particelle allora conosciuti (gli elettroni, con carica negativa, e i protoni, con carica positiva) non potevano soddisfare l'equazione. Alla fine Dirac capì che, oltre agli elettroni, dovevano esistere particelle con la stessa massa, ma con carica positiva.

Queste particelle furono chiamate «positroni», ma non ci fu nessuna prova della loro esistenza fino a quando un fisico americano, Carl Anderson, li scoprì per caso nei raggi cosmici, ignorando persino che Dirac ne avesse previsto l'esistenza. Oggi queste particelle sono piuttosto utili: il vostro medico potrebbe prescrivervi una PET, che è un sistema per analizzare l'interno del corpo umano basato proprio sui positroni, le prime particelle di antimateria che sono state scoperte.

Proprio come la teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell aveva spiegato il comportamento delle onde elettromagnetiche, così anche la teoria relativistica della meccanica quantistica spiegava qualcosa di completamente nuovo.

14. Creazione e distruzione delle particelle

Arriviamo così agli anni Trenta. I fisici stavano cercando di capire uno dei punti fondamentali del modello di Bohr: quello secondo cui se un atomo è in uno stato eccitato, decade in uno stato di energia inferiore ed emette un fotone. Le particelle si possono dunque produrre, e si possono distruggere: un fotone si può

trasformare in un elettrone e un positrone, un elettrone si può annichilire con un positrone producendo fotoni, i fotoni possono essere prodotti o assorbiti. Come avvengono questi processi? Qual è il meccanismo di creazione e di annichilazione delle particelle?

Prima del Novecento nessuno aveva mai sollevato la questione. I fisici osarono porsi questa domanda soltanto dopo lo sviluppo della meccanica quantistica relativistica, nota anche come «teoria quantistica dei campi», che è proprio una teoria della creazione e della distruzione delle particelle. Fu però necessario un bel po' di tempo per arrivare a una soluzione, poiché i tentativi di formulare una teoria coerente dell'interazione tra elettroni e fotoni incontrarono grossi problemi: i calcoli, infatti, producevano risultati assurdi: si calcolava qualcosa e si otteneva un valore infinito, che era del tutto privo di senso.

La situazione restò incomprensibile fino a quando tre fisici non vennero ispirati da una straordinaria scoperta sperimentale del 1948, e formularono la teoria dell'elettrodinamica quantistica, ossia la teoria quantistica dei campi che descrive gli elettroni, i positroni e i fotoni, vincendo in seguito il premio Nobel. La teoria fu elaborata da Julian Schwinger, che anni dopo fu il relatore della mia tesi a Harvard. Da Richard Feynman, che insegnava alla Cornell University quando io studiavo lì, ma poi si trasferì al California Institute of Technology. E, in maniera indipendente, anche Shin'ichirō Tomonaga, benché all'epoca i suoi studi avessero avuto poca risonanza.

Finalmente avevamo compreso la luce e gli elettroni, e tutti gli aspetti del comportamento degli atomi, compresa l'emissione di fotoni quando una particella passa da uno stato all'altro, di cui parlava Bohr. Era una teoria bellissima, un prototipo per le altre interazioni della fisica, e chiaramente era destinata a essere ancora più importante di quanto sembrasse a prima vista.

15. La teoria elettrodebole

Saltiamo ora al 1957, quando Schwinger non aveva ancora vinto il Nobel per il suo contributo allo sviluppo dell'elettrodinamica quantistica, e io ero un suo dottorando. Schwinger era convinto che fosse possibile estendere la teoria dell'elettrodinamica quantistica, in modo da spiegare anche la cosiddetta forza debole. «*Mettiti a scrivere una teoria*», mi disse, «*una teoria unificata delle interazioni deboli ed elettromagnetiche*».

Io ero solo un giovane dottorando, e non capii neanche di che cosa stesse parlando: feci mille tentativi, ma non approdai a nulla. Avendo comunque fatto un buon lavoro, ottenni il dottorato. Con il tempo, però, i miei amici e io abbiamo proprio creato una teoria come quella immaginata da Schwinger. Si tratta della «teoria elettrodebole», un'estensione dell'elettrodinamica quantistica, un'estensione della teoria di Maxwell dell'elettricità e del magnetismo, che però spiega anche la trasformazione dei protoni in neutroni e dei neutroni in protoni, il funzionamento delle armi nucleari e l'attività del Sole.

16. L'importanza dei quanti nella quotidianità

La meccanica quantistica, va riconosciuto, non è solo una disciplina astratta, una strana branca della matematica: ha anche applicazioni pratiche. Gli apparecchi che oggi tutti noi abbiamo in tasca sono veri e propri apparecchi quantistici. Il cellulare è uno di questi: usa i transistor, che sono di per sé dispositivi quantistici, e si serve del principio fotoelettrico per fotografare.

Quando ero un ragazzo, una radio era fatta di una dozzina di valvole, cioè di tubi a vuoto. Mi ricordo che, quando si rompeva, si mettevano tutte le valvole in un sacchetto di carta, si andava al negozio e si infilavano le valvole in un tester per scoprire quale fosse quella rotta, poi si comprava una valvola 6H6 e la radio era a posto. Quello era un apparecchio molto primitivo e poco quantistico: la valvola è infatti un dispositivo molto classico. I transistor, che furono inventati negli anni Cinquanta e rivoluzionarono le radio e tutta l'elettronica, sono invece essenzialmente dispositivi quantistici. Così come il laser, indispensabile per i lettori CD e DVD, e il computer.

Anche la relatività generale di Einstein, l'altro grande sistema teorico del Novecento, ha dato origine a importanti applicazioni pratiche: è alla base, per esempio, del funzionamento del GPS. Infatti, per individuare la posizione di un dispositivo sulla superficie terrestre, il GPS calcola la sua distanza da un certo numero di satelliti, misurando la differenza del tempo con cui le onde radio si muovono tra il dispositivo e i diversi satelliti.

Ovviamente, vista la velocità a cui si propagano le onde radio, la misura deve essere eccezionalmente precisa. Ma la teoria della relatività ci dice che il tempo non scorre con lo stesso ritmo per i satelliti e per ciò

che si trova sulla superficie terrestre (a causa della diversa velocità e della maggiore o minore distanza dal centro di gravità della Terra). Quindi, se non si fosse tenuto conto della teoria generale della relatività di Einstein, non avremmo potuto realizzare il Sistema di Posizionamento Globale, e in macchina non potremmo avere quelle piccole mappe che ci impediscono di perderci. E questo dimostra che la fisica, per quanto possa essere oscura e apparentemente irrilevante, prima o poi influenza la nostra vita o la vita dei nostri figli.

I padri della fisica dei quanti

MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK nacque a Kiel il 23 aprile 1858. Trasferitosi con la famiglia a Monaco di Baviera nel 1867, dove frequentò il liceo e l'università, proseguì gli studi a Berlino (1877-78) come allievo di Hermann von Helmholtz e di Gustav Kirchhoff, cui fu chiamato a succedere nel 1889 nella cattedra di fisica. Personaggio di vasta cultura, aperto oppositore del regime nazista e dell'antisemitismo, fu direttore (1930-35) del Kaiser Wilhelm Institut (nel 1948 Fondazione Max Planck per la ricerca scientifica). Dedicatosi alla termodinamica, sviluppò le idee di Rudolph Clausius, precisando il concetto di entropia e riformulando il secondo principio. Interessatosi al problema dell'irraggiamento del corpo nero da un punto di vista termodinamico, dopo aver tentato inutilmente di applicarvi la teoria elettromagnetica di James Clerk Maxwell, giunse a ipotizzare che l'energia venisse emessa in modo discontinuo, introducendo il concetto di «quanto» e quella costante universale, da lui chiamata «quanto elementare d'azione», oggi nota come costante di Planck. Tale relazione, presentata il 14 dicembre 1899 e che gli valse il premio Nobel nel 1918, segnò l'inizio della fisica moderna. Lo stesso Planck non valutò fino in fondo la portata delle sue teorie, considerandole come ipotesi di lavoro da conciliare con la meccanica classica e supponendo che la propagazione avvenisse ancora in modo continuo. Solo l'interpretazione di Albert Einstein dell'effetto fotoelettrico, l'introduzione del fotone e l'elaborazione della meccanica quantistica a opera di Niels Bohr, Max Born, Werner Heisenberg, Erwin Schrodinger e Paul Dirac hanno evidenziato la portata rivoluzionaria della sua formulazione. Da un punto di vista epistemologico, Planck rifiutò la visione probabilistica della fisica quantistica, sostenendo l'esistenza di una realtà fisica deterministica indipendente dall'osservatore, ma al contempo l'impossibilità di un'indagine totale di tale realtà. Planck fu attivo fino in tarda età, ma la sua vita fu funestata da gravi avvenimenti, soprattutto dalla morte del figlio Erwin fucilato dai nazisti per aver partecipato alla congiura contro Hitler nel luglio 1944. Morì a Gottinga il 4 ottobre 1947.

NIELS BOHR nacque a Copenaghen il 17 ottobre 1885; il padre Christian era professore alla facoltà di fisiologia dell'università di Copenaghen, la madre, Ellen Adler, proveniva da una ricca famiglia ebrea. Si laureò nel 1911, quindi si trasferì in Inghilterra, all'università di Manchester, dove fu allievo di Ernest Rutherford. Nel 1913 pubblicò la memoria La costituzione degli atomi e delle molecole nella quale formulò la prima teoria quantistica dell'atomo, che rivedeva quella precedente di Rutherford alla luce della teoria dei quanti. Nel 1916 ritornò in Danimarca come professore di fisica nell'università di Copenaghen, e nel 1921 fu nominato direttore dell'istituto di fisica teorica nella medesima università. Nel 1922 ricevette il premio Nobel per la fisica per le ricerche sulla struttura degli atomi e della radiazione emessa dagli stessi. Si occupò poi di fisica nucleare e nel 1943, in seguito all'occupazione nazista della Danimarca, si trasferì negli Stati Uniti dove partecipò alle ricerche per la costruzione della bomba atomica. Alla fine della guerra tornò in patria e sostenne l'uso pacifico dell'energia nucleare. Morì a Copenaghen il 18 novembre 1962.

LOUIS VICTOR DE BROGLIE nacque a Dieppe il 15 agosto 1892. Dopo gli studi di lettere conclusi con la laurea in storia nel 1910, sollecitato dal fratello maggiore Maurice, intraprese gli studi scientifici conducendo inizialmente esperimenti sugli spettri dei raggi X, poi si dedicò alla teoria dei quanti che fu oggetto della sua tesi di dottorato (Ricerche sulla teoria dei quanti) del 1924. Partendo dal modello di Niels Bohr, formulò la teoria che risolve il dualismo onda/corpuscolo (1923-24) e associa a ogni particella con quantità di moto p una lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ (h è la costante di Planck). Questa teoria, che venne confermata sperimentalmente da Clinton Davisson e Lester Germer nel 1927, segnò la nascita della meccanica ondulatoria e per essa de Broglie ottenne il premio Nobel per la fisica nel 1929. Nel 1932 gli venne affidata la cattedra di fisica teorica presso l'Istituto Henri Poincaré di Parigi e nel 1933 fu nominato membro dell'Accademia delle Scienze, di cui divenne segretario permanente nel 1942. Fu autore anche di opere di filosofia della scienza e di divulgazione scientifica tra cui *Materia e Luce* (1937), *Ottica ondulatoria e corpuscolare* (1950). Morì a Louveciennes il 19 marzo 1987.

WERNER KARL HEISENBERG nacque a Wuirzburg il 5 dicembre 1901. Allievo a Monaco di Arnold Sommerfeld e Wilhelm Wien, assistente dapprima di Max Born a Gottinga, poi di Niels Bohr a Copenaghen, quindi docente di fisica teorica a Lipsia (1927-41), fu insignito del premio Nobel per la fisica nel 1932. Direttore del Kaiser Wilhelm Institut di Berlino (1941-45), lavorò con Otto Hahn allo studio di un reattore nucleare. Ritornato a Gottinga come direttore del Max Planck Institut (1946-70), lavorò con Born e Pascual Jordan. Il ruolo svolto da Heisenberg nella fisica moderna è ben espresso dalla motivazione del Nobel: «[...] per la creazione della meccanica quantistica [...]». Il suo contributo principale, in seguito a una revisione e reinterpretazione dei concetti della meccanica classica alla luce delle nuove problematiche sorte con la scoperta del moto degli elettroni nell'atomo e dei livelli energetici degli stati stazionari dell'atomo, fu l'enunciato (1927) del principio di indeterminazione che porta il suo nome. Le conseguenze dei lavori di Heisenberg sono state notevoli in vari campi della fisica: in accordo con i risultati ottenuti da Louis Victor de Broglie in meccanica ondulatoria, le sue ricerche portarono alla formulazione dell'equazione fondamentale che rende possibile la valutazione probabilistica che una particella si trovi in una determinata posizione dello spazio. Alla luce della meccanica quantistica, Heisenberg descrisse il nucleo atomico come costituito di protoni e neutroni interagenti secondo forze di scambio, offrendo inoltre una congruente reinterpretazione dei fenomeni elettromagnetici e ferromagnetici. La meccanica delle matrici così creata ha portato un fondamentale contributo alla fisica delle particelle elementari, permettendo di prevedere il risultato delle interazioni tra particelle utilizzando solo i principi di conservazione. Negli ultimi anni tentò di formulare una teoria generale unitaria in grado di prevedere numero, caratteristiche e comportamenti delle particelle elementari. Morì a Monaco l'1 febbraio 1976.

MAX BORN nacque a Breslau l'11 dicembre 1882 in una famiglia di origini ebraiche. Dopo gli studi nella sua città natale e in diverse università europee, divenne professore di fisica teorica a Berlino (1915-19) e quindi a Francoforte (1919); direttore dell'istituto di fisica teorica a Gottinga dal 1921, dove ebbe tra i suoi allievi Enrico Fermi e Robert Oppenheimer, nel 1933 lasciò la Germania a causa delle leggi razziali e si trasferì nel Regno Unito dove prese la cittadinanza britannica. Insegnò a Cambridge e nel 1936 divenne professore di fisica teorica all'università di Edimburgo, dove rimase fino al 1953. Born rientrò in patria alla fine della seconda guerra mondiale. Nel 1954 venne insignito del premio Nobel per la fisica con Walter Bothe per le ricerche sulla meccanica quantistica, in particolare per l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda. Morì a Gottinga il 5 gennaio 1970.

WOLFGANG PAULI nacque a Vienna il 25 aprile 1900. Il padre, di origine ebraica, nel 1898 aveva cambiato il cognome da Pascheles in Pauli e si era convertito al cattolicesimo. Compì gli studi superiori presso il Döblinger Gymnasium di Vienna, quindi fu allievo di Arnold Sommerfeld all'università Ludwig-Maximilian di Monaco dove ottenne il dottorato in fisica nel 1921. Assistente di Max Born a Gottinga nel 1922, l'anno successivo fu invitato a Copenaghen da Niels Bohr, con il quale lavorò alla teoria dell'effetto Zeeman anomalo. Nel 1924 sostenne la necessità di introdurre, a integrazione del modello meccanicistico dell'atomo, una nuova grandezza caratterizzata da un quarto numero quantico, arrivando a enunciare il principio di esclusione. Nel 1927 identificò tale numero quantico con lo spin elettronico e, con Werner Heisenberg, descrisse l'interazione radiazione-materia cercando un'integrazione tra meccanica quantistica e teoria della relatività. Assistente di Emil Lenz ad Amburgo, nel 1928 ottenne la cattedra di fisica teorica all'Eidgenössische Technische Hochschule di Zurigo. Nel 1930 ipotizzò l'esistenza del neutrino, poi confermata da Enrico Fermi. Nel 1940, allo scoppio della seconda guerra mondiale, emigrò negli Stati Uniti dove divenne professore di fisica teorica a Princeton. Nel 1945 venne insignito del premio Nobel per la fisica per la scoperta del principio di esclusione. Tornato in Europa alla fine della guerra, morì a Zurigo il 15 dicembre 1958.

ERWIN SCHRÖDINGER nacque a Vienna il 12 agosto 1887. Dopo aver frequentato l'Akademisches Gymnasium di Vienna, si iscrisse all'università nel 1906, dove frequentò le lezioni di fisica teorica tenute da Friedrich Hasenohrl, e nel 1910 conseguì il dottorato. Docente al Politecnico di Zurigo dal 1921, formulò (1926) in base alle leggi della meccanica ondulatoria l'equazione non relativistica, che porta il suo nome, sulla propagazione delle onde elettromagnetiche. La sostanziale convergenza dei suoi risultati con quelli, contemporanei, di Werner Heisenberg, basati sulla meccanica delle matrici, lo portò a chiarire su basi matematiche le intuizioni di Louis de Broglie sul dualismo onda-corpuscolo, dimostrando l'equivalenza tra i due formalismi usati e ponendosi così tra i fondatori della meccanica quantistica (*Memorie di meccanica*

quantistica, 1927). Nel 1927 fu chiamato all'università di Berlino come successore di Max Planck alla cattedra di fisica teorica; nel 1933 conseguì con Paul Dirac, che estese in senso relativistico i suoi risultati, il premio Nobel per la fisica. Emigrato all'avvento del nazismo prima a Oxford e poi a Dublino, sviluppò il calcolo dei livelli energetici in termini spettrali, si occupò di termodinamica statistica ed estese alla biologia molecolare i metodi della fisica quantistica (*Che cos'è la vita?*, 1944). Negli ultimi anni si occupò di epistemologia e storia della scienza (*Scienza e Umanesimo*, 1951). Tornato a Vienna nel 1956, vi morì il 4 gennaio 1961.

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC nacque a Bristol l'8 agosto 1902. Mostrò fin dall'adolescenza una particolare predisposizione per la matematica e dopo gli studi superiori di indirizzo tecnico frequentò l'Engineering College di Bristol dove si laureò nel 1921. Contribuì in modo determinante alla formulazione matematica della meccanica quantistica (*Principi della meccanica quantistica*, 1931) per la quale fu insignito del premio Nobel per la fisica nel 1933 con Erwin Schrodinger. Professore di matematica a Cambridge dal 1932, lavorò con Enrico Fermi e, studiando la statistica delle particelle, confermò il principio di esclusione di Wolfgang Pauli e precorse la teoria quantistica della radiazione. Formulò un'equazione che prevedeva l'esistenza di uno stato energetico negativo dell'elettrone (1930), confermata poi dalla scoperta del positrone di Carl David Anderson del 1932. Morì a Tallahassee, in Florida, il 20 ottobre 1984.