



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Sulla Storia del Principio di Complementarità

Bohr e l’interpretazione della fisica quantistica

Relatore

Prof Giulio Peruzzi

Laureando

Vatri Michele

Anno Accademico 2017/2018

*Ai miei Genitori*

# Indice

Introduzione	4
1 Crisi della fisica classica	6
1.1 Meccanica ed elettromagnetismo classici	6
1.2 Il “quanto elementare d’azione” di Planck	7
1.3 La natura della luce	8
1.4 Struttura atomica	10
2 Niels Bohr	12
3 La fisica quantistica	17
3.1 Lo sviluppo della teoria dei quanti	17
3.2 Due visioni differenti	22
3.3 La discussione con Einstein	24
4 Il principio di complementarità	26
4.1 Cos’è la complementarità?	26
4.2 Altre riflessioni di Bohr	28
Conclusioni	31
Fonti bibliografiche	32

# Introduzione

*“La natura stessa della teoria quantistica ci obbliga a considerare aspetti duali,  
l’unione dei quali caratterizza le teorie classiche,  
come descrizioni complementari, ma mutuamente esclusive”*

È questo uno dei modi di enunciare il principio di complementarità introdotto da Niels Bohr per la prima volta nel settembre del 1927 in occasione del Congresso Internazionale dei Fisici tenutosi a Como. Organizzato per ricordare il centesimo anniversario della morte di Alessandro Volta, vi parteciparono i più grandi fisici italiani dell’epoca e anche tanti fisici stranieri, molti dei quali futuri premi Nobel. Nonostante i nomi illustri presenti, l’evento non sarebbe ricordato allo stesso modo se proprio l’ultimo giorno Bohr non fosse intervenuto cambiando per sempre il modo di intendere la fisica quantistica.

Il concetto di complementarità accompagna tutti i campi del sapere umano; basti pensare all’ambito psicologico dove si usano termini intrinsecamente complementari come “emozione” e “ragione”, oppure alla contrapposizione che si riscontra tra esseri viventi e oggetti inanimati. Per questo motivo il principio di complementarità trascende i confini della fisica e acquista ancora più importanza, importanza che però può essere compresa appieno solo ripercorrendo la storia che ha condotto Bohr ad enunciare questo principio. Nelle prossime pagine sarà proprio questo il nostro obiettivo.

Dedicheremo il primo capitolo ad una breve analisi dei risultati ottenuti dalla fisica classica e a come con l’avvento del XX secolo le sicurezze teoriche dei fisici iniziarono a vacillare di fronte a nuove scoperte e ad esperimenti allora inspiegabili. Grande importanza ebbero i risultati ottenuti da Max Planck sullo studio del corpo nero e la scoperta della costante  $h$ , che prenderà il suo nome, così come l’innovativo lavoro sostenuto da Ernest Rutherford riguardo la descrizione della struttura atomica attraverso il famoso esperimento sul calcolo della sezione d’urto. Questo excursus storico sui primi anni del Novecento ci aiuterà anche a capire meglio il periodo storico nel quale Bohr iniziò i suoi studi universitari, e quali difficoltà il fisico danese dovette affrontare, assieme a tutti i suoi colleghi, per superare i limiti conoscitivi dell’epoca.

Il secondo capitolo è dedicato alla biografia di Bohr. Mai come in questo caso sarebbe un errore limitarsi a parlare solo dei suoi contributi teorici alla fisica, che comunque sono molti sia nell’ambito atomico sia in quello nucleare, perché egli fu molto più di un semplice fisico, tanto da entrare di diritto come figura di spicco nella cultura danese. Tra le tante cose che gli si possono accreditare ci sono la costruzione dell’Istituto di Fisica Teorica di Copenaghen, a lui dedicato dopo la sua morte, e il merito di aver contribuito alla nascita della nuova figura di scienziato, al quale sono richieste anche abilità di coordinazione di gruppi di ricerca e di amministrazione per la raccolta di fondi. Il passare degli anni non gli impedì di essere un pioniere della Big Science, contribuendo alla nascita del CERN, e neppure, dal punto di vista politico, di schierarsi

apertamente contro la guerra e contro l'uso della fisica nella creazione di armi di distruzione di massa.

Nel terzo capitolo analizzeremo la nascita della vecchia teoria dei quanti, nella quale le idee della fisica classica avevano ancora un ruolo molto importante. Nel farlo vedremo più nei dettagli alcuni dei contributi che diede Bohr a questa nuova teoria, dal modello atomico, che propose nel 1913, al principio di corrispondenza su cui si basano gran parte dei suoi successi. Questo connubio tra teoria classica e nuove idee ispirate dalla quantizzazione scoperta da Planck, nonostante qualche successo, si rivelò insoddisfacente per la maggioranza dei fisici dell'epoca perché non possedeva l'eleganza e la compattezza delle teorie classiche precedenti. Nella nostra analisi proseguiamo quindi con lo studio del periodo chiamato da alcuni addirittura "l'età eroica della fisica quantistica", perché in un arco di tempo relativamente breve (indicativamente nel decennio degli anni venti) i fisici di tutto il mondo cooperarono assiduamente, in una maniera mai riscontrata prima, per la creazione della teoria quantistica vera e propria. Questo rapido processo vide come protagonisti principali Werner Karl Heisenberg e Ervin Schrödinger e le loro due visioni solo apparentemente discordanti del mondo fisico microscopico. È proprio nella comprensione del perché si fosse arrivati a due formulazioni diverse della meccanica quantistica che il principio di complementarità ha un ruolo fondamentale, non tanto a livello pratico-matematico quanto più a livello interpretativo. Infatti, mentre le potenzialità applicative della nuova teoria quantistica furono subito apprezzate, è solo grazie a Bohr e alla sua idea di applicare la complementarità che i fisici di tutto il mondo si resero conto della rivoluzione che stavano attuando. Solo con i due principi, quello di indeterminazione di Heisenberg e quello di complementarità, si riuscì finalmente a comprendere il vero significato della costante  $h$  di Planck e la limitazione che essa pone alla nostra conoscenza del mondo atomico.

Infine, il quarto capitolo parlerà di quali furono le conseguenze e le interpretazioni del principio di complementarità. Come ogni nuova scoperta o nuova teoria, anche la proposta di Bohr creò molto scalpore nel mondo della fisica e i dissensi tra chi sosteneva la visione complementare e tra chi, Albert Einstein su tutti, non era per nulla d'accordo sull'interpretazione data furono inevitabili. Proprio col fisico tedesco nacque una vera e propria sfida a chi sarebbe riuscito a persuadere la comunità scientifica della validità della propria visione: la complementarità di Bohr e della scuola di Copenaghen in generale contro la convinzione che la causalità debba essere conservata di Einstein. Ad uscirne vittoriosa sarà la prima visione non solo per il suo carattere rivoluzionario, ma anche per la generalità con cui il principio di complementarità si presta ad essere applicato.

# Capitolo 1

## Crisi della fisica classica

### 1.1 Meccanica ed elettromagnetismo classici

La rivoluzione scientifica iniziata con Galileo Galilei nel XVII secolo cambiò per sempre il modo di intendere la fisica, fino a quel momento relegata a essere un ramo della filosofia più che una vera e propria scienza. Il metodo sperimentale di Galileo diede nuova linfa a una disciplina che per troppo tempo era stata assoggettata alle istituzioni religiose, a credenze animistiche e a vecchi miti. L'idea davvero innovativa di Galileo fu quella di basare la descrizione dei fenomeni fisici della natura su grandezze misurabili in modo da poter ordinare tutto il campo delle esperienze fisiche. Un ulteriore vantaggio di questo *modus operandi* era che così facendo i fenomeni fisici potevano essere descritti sulla base del linguaggio comune attraverso la comunicazione dei dati raccolti e la ripetibilità degli esperimenti.

Un ulteriore apporto alla rivoluzione scientifica lo dobbiamo a Isaac Newton che diede una descrizione sistematica e generale di tutti i sistemi fisici basata sulle posizioni e sulle velocità istantanee di tutti i corpi materiali che ne fanno parte. Dalla conoscenza dello stato di un sistema in un dato istante e delle forze che su di esso agiscono è possibile risolvendo la nota equazione  $F=ma$ , e ricavare lo stato del sistema in qualsiasi altro momento. È a questo punto evidente che una simile rappresentazione dell'universo si basi su una forma ideale di connessione causale, sintetizzata dalla nozione di determinismo. L'incredibile precisione con cui il sistema solare venne descritto lo portò ad essere l'esempio perfetto del trionfo della meccanica classica e della sua visione spazio-temporale e causale.

Più tardi anche i fenomeni elettromagnetici all'apparenza meno intuitivi, seppur con più fatica da parte dei fisici, ricevettero una descrizione sempre basata sul concetto di determinismo. Fu sufficiente includere nella definizione dello stato, oltre che le posizioni e le velocità dei corpi carichi o magnetizzati, anche la direzione e l'intensità delle forze elettriche e magnetiche. I risultati dello studio dei fenomeni elettromagnetici furono elegantemente riassunti nel XIX secolo da James Clerk Maxwell tramite le sue famose equazioni.

Per molto tempo, quindi, si pensò che lo schema concettuale della fisica classica formato da meccanica ed elettromagnetismo fosse applicabile a qualsiasi sistema e che quindi fosse possibile la descrizione di ogni fenomeno fisico. Le sole limitazioni erano date dalla difficile reperibilità di strumenti di misura adeguati e tecnologie abbastanza avanzate e dalla complessità dei calcoli nel caso di sistemi non banali. Nonostante questo, l'uso di leggi statistiche permise di affrontare problemi come quelli dei corpi materiali, della teoria cinetica dei gas e dei fenomeni termici. Questa estensione dell'applicazione della teoria classica evidenziò, però, la necessità della concezione

atomica della materia così come anche l'impossibilità di studiare i singoli processi atomici.

L'edificio della fisica classica si completò grazie al contributo della relatività di Einstein nei primi anni del Novecento. Il fatto che la descrizione dei fenomeni fisici dipenda dal sistema di riferimento dell'osservatore permette di formulare leggi fisiche comuni a tutti gli osservatori, ma anche di collegare fenomeni che prima non si pensava avessero correlazione. L'introduzione di una velocità limite  $c$ , la non absolutezza del tempo e l'impiego di una formulazione matematica più avanzata e complessa, anziché invalidare le teorie classiche, rafforzarono la descrizione deterministica in quanto non implicavano il rovesciamento della sequenza causale.

## 1.2 Il “quanto elementare d'azione” di Planck

Il problema del corpo nero risale al 1859 anno in cui Gustav Kirchhoff studiò un sistema in equilibrio termico alla temperatura  $T$  con la radiazione che lo circonda. Il sistema inoltre doveva convertire tutta l'energia che assorbiva in energia termica. Egli definì il potere emissivo e il potere assorbente come la quantità di energia emessa o assorbita per unità di superficie e per unità di tempo in un certo intervallo infinitesimale di frequenze. Si aspettava che facendone il rapporto avrebbe trovato una funzione che, come è lecito aspettarsi, dipendesse anche da grandezze caratteristiche del corpo come la superficie, invece ottenne una funzione universale che dipendeva solo dalla frequenza e dalla temperatura. In seguito a questa scoperta, Kirchhoff introdusse la definizione di corpo nero ideale per indicare un corpo che assorbisse completamente la radiazione incidente; in questo modo un corpo nero ideale aveva potere emissivo pari alla funzione da lui congetturata in precedenza e il problema consisteva proprio nel determinare questa funzione.

Negli anni successivi molti fisici si cimentarono nella soluzione di questo quesito, ma senza successo. Ricordiamo che in quegli anni la teoria elettromagnetica non era ancora completa ed inoltre vi erano anche problemi nel realizzare apparati sperimentali che riproducessero l'idealità richiesta al corpo nero. Riprendendo la definizione data da Kirchhoff anni prima, nel 1884 si scoprì che se si praticava un foro su di una cavità con pareti a temperatura omogenea e che non permettessero il passaggio di radiazione, allora la radiazione emessa dal foro era una radiazione di corpo nero.

Nel 1900 Planck riuscì in questo arduo compito, continuando a lavorarci anche negli anni successivi. Basandosi sul lavoro di alcuni suoi predecessori come Wilhelm Wien e Ludwig Boltzmann, formulò una teoria in cui la radiazione è schematizzata come oscillatori armonici e l'energia, assorbita o emessa dagli ipotetici oscillatori materiali costituenti la parete, invece di essere infinitamente divisibile, può essere scomposta in un numero di elementi determinato dalla costante naturale  $h$ . Il lavoro di Planck non solo risolse il problema del corpo nero ma fu importante per tutta una serie di motivi: la costante da lui introdotta cambiò il modo di intendere lo spazio delle fasi, da una

descrizione puntuale si passò a uno spazio composto da celle di volume ben definito  $h$ . Tramite l'uso del quanto di energia formulò la prima discretizzazione di una quantità che fino ad allora era sempre stata considerata continua come l'energia. Si noti che la costante di Planck ha le dimensioni di un'azione, da qui il nome quanto elementare d'azione, e che questo è in accordo sia con il prodotto posizione per momento relativo allo spazio delle fasi sia con il prodotto energia per tempo usato nella definizione di quanto d'energia.

Ovviamente il significato e le conseguenze di questo evento non furono subito compresi da tutti. L'ipotesi dei quanti cominciò ad affermarsi solamente a partire dal 1905/1906 quando anche altri fisici iniziarono ad applicare le idee di Planck a settori e studi diversi da quelli del corpo nero. Iniziò così un processo di discretizzazione e quantizzazione della fisica del tutto rivoluzionario che portò alla nascita della vecchia teoria dei quanti prima e della meccanica quantistica poi.

Nonostante Planck, come abbiamo visto, diede inizio ad una nuova epoca della fisica e venga considerato uno dei padri fondatori della teoria quantistica, è solo grazie al lavoro di sperimentali e teorici successivi se si apprese il reale e profondo significato del quanto d'azione.

### 1.3 La natura della luce

La luce ha sempre ricoperto un ruolo fondamentale per l'uomo e per gli esseri viventi in generale. È perciò curioso che per molto tempo nulla si sapesse a proposito della sua natura. Newton per esempio credeva che la luce fosse costituita da minuscole particelle che si muovevano in linea retta in ogni direzione e che i loro moti fossero modulati dall'interazione con l'etere. Su questa idea e con l'uso dei metodi della meccanica arrivò a spiegare il fenomeno della riflessione, ma non quelli di diffrazione e interferenza. Inoltre, intuì che la luce era costituita da raggi colorati e che il bianco era la sovrapposizione di infiniti colori. Qualche anno dopo, l'olandese Christiaan Huygens fece una analogia con le onde acustiche e propose, al contrario di Newton, che la luce fosse un'onda che si propaga in un mezzo. Il problema per entrambi era la mancanza di una formulazione matematica per la trattazione dei fenomeni ondulatori. Fu infatti necessario attendere gli sviluppi della teoria elettromagnetica e della tecnologia per ottenere qualche risultato in questo senso. Nei primi anni dell'ottocento l'esperimento di Young dimostrò che i fenomeni di diffrazione e di interferenza erano riconducibili solo a una descrizione ondulatoria della luce. Questa teoria venne poi confermata da Maxwell che definì la luce visibile come una piccola parte dello spettro elettromagnetico. Nello stesso periodo fenomeni elettrici, magnetici e ottici erano largamente studiati da tutti i fisici dell'epoca e questo portò importanti sviluppi nella conoscenza dell'elettricità e della sua interazione con la materia. Ad esempio, si scoprì che alcuni metalli, se percorsi da corrente elettrica, si surriscaldavano ed emettevano luce, idea lapalissianamente alla base dell'invenzione della lampadina. Molto interesse



riscontrò inoltre lo studio degli spettri di emissione o di assorbimento di gas rarefatti riscaldati perché in essi si riscontrava una certa regolarità, all'epoca inspiegabile.

La domanda sulla natura della luce, che sembrava aver trovato risposta grazie a Maxwell, tornò a sconvolgere la comunità scientifica per via dei lavori di Einstein a inizio Novecento. Il 1905 è considerato il suo Annus Mirabilis perché nello stesso anno pubblicò quattro articoli destinati a rivoluzionare la fisica classica: due erano dedicati alla formulazione della relatività speciale, di cui abbiamo già brevemente parlato, uno trattava del moto browniano, di cui non ci occuperemo, e uno trattava di un approccio euristico ai problemi della luce, nel quale viene affrontato anche il fenomeno fotoelettrico. Il fisico tedesco non fu il primo a prendere in considerazione questo fenomeno; nel secolo precedente Heinrich Rudolf Hertz fu il primo a scoprire l'effetto fotoelettrico che prevede l'emissione di elettroni da parte di una superficie (di solito un metallo) se su questa veniva fatto incidere un'onda elettromagnetica di sufficiente frequenza; successivamente il suo allievo Philipp Lenard apprese che l'energia dell'elettrone emesso nel procedimento non dipendeva dall'intensità dell'onda, come ci si sarebbe aspettati classicamente, ma solo dalla frequenza. Come già accennato, Einstein riuscì a spiegare l'effetto fotoelettrico generalizzando l'idea di quantizzazione dell'energia al campo elettromagnetico e non solo alla radiazione emessa o assorbita dagli ipotetici oscillatori materiali delle pareti della cavità. Se l'energia in un fascio elettromagnetico non è più distribuita uniformemente, ma viene concentrata in piccole regioni di spazio, chiamate fotoni, con tutte la stessa energia data dal prodotto della frequenza per la costante  $h$ , allora il fenomeno può essere analizzato come un urto tra questi fotoni e gli elettroni della superficie. In questa maniera si spiega sia l'immediatezza con cui si manifesta l'effetto fotoelettrico, sia perché gli elettroni emessi in seguito all'urto abbiano energia proporzionale alla frequenza. Inoltre, il ricorso all'uso della costante di Planck per questa spiegazione ne avvalorò il carattere universale.

La proposta di Einstein secondo la quale la luce era composta da piccolissime particelle trovò nuove conferme grazie ad esperimenti successivi; tra questi il più importante è certamente quello sull'effetto Compton, il quale dimostrò che quello che avviene tra fotone ed elettrone era giustamente schematizzato come un urto in cui il fotone, seppur privo di massa, cede parte dell'energia cinetica che possiede all'elettrone deviando la sua traiettoria. Dopo l'urto, quindi, il fotone, essendo meno energetico, è descritto con una frequenza e una lunghezza d'onda diversa da quella iniziale.

L'inizio del XX secolo fu dunque caratterizzato dalla coesistenza di due teorie per quanta riguarda i fenomeni elettromagnetici: in certi casi era conveniente una descrizione ondulatoria mentre in altri una particellare. Questo fece sorgere dubbi sul fatto che anche il viceversa fosse possibile, cioè che anche la materia in particolari situazioni avesse un comportamento ondulatorio. Come vedremo meglio nel terzo capitolo, questa intuizione si dimostrò vera e portò all'ipotesi del dualismo onda-

particella, non solo per quanto riguarda la luce, ma come aspetto generale di cui tenere conto nella descrizione dei fenomeni microfisici.

## 1.4 Struttura atomica

L'idea di un costituente ultimo della materia risale all'antica Grecia e fu riassunta nella dottrina filosofica dell'atomismo. Seppur i vari filosofi che si occuparono della questione ne dessero una personale interpretazione, l'atomismo si basava sulla contrapposizione tra il vuoto e atomi indivisibili e piccoli. L'impossibilità di una loro osservazione diretta era da ricondurre alla grossolanità dei nostri organi di senso. Per questo motivo l'esistenza degli atomi rimase per millenni solo un'ipotesi.

Fu inizialmente grazie alla chimica che si fecero dei passi avanti in questo senso. La prima teoria atomica moderna può, infatti, essere ricondotta al chimico inglese John Dalton, che la formulò tra Settecento e Ottocento. Successivamente, anche la fisica, grazie allo studio dei fenomeni elettrici e magnetici iniziò a interessarsi alla struttura atomica. Dalla metà dell'Ottocento in poi, chimici e fisici lavorarono parallelamente alla ricerca di una spiegazione delle proprietà dei diversi elementi della tavola periodica e nacque così un processo di unificazione delle due discipline.

Fondamentale fu nel 1897 la scoperta dell'elettrone da parte del fisico inglese J. J. Thomson grazie allo studio dei raggi catodici, anche se già negli anni precedenti l'esistenza di esso era stata ipotizzata. Egli stimò il valore del rapporto tra la sua carica elettrica e la sua massa (fu solo nel 1909, grazie a Millikan, che venne trovato il valore della carica unitaria  $e$ ). Osservò che il rapporto tra queste due quantità rimaneva costante in tutta una serie di fenomeni elettromagnetici e col passare del tempo si accettò che fosse questa particella a portare la carica unitaria. La possibilità che gli elettroni fossero in realtà gli atomi che costituiscono la materia non fu però mai presa in considerazione perché gli atomi, nel loro stato naturale, sono elettricamente neutri e stabili. Perciò nel 1903 Thomson propose il suo modello atomico diventato famoso come "modello a panettone" perché consisteva in una sfera uniformemente piena di carica positiva con all'interno gli elettroni. In questo modello la carica positiva era considerata priva di massa e questo fece sorgere i primi dubbi sulla sua validità; significava che tutta la massa dell'atomo doveva essere portata dagli elettroni, che quindi dovevano essere a migliaia perché già all'epoca si sapeva che in media un atomo aveva una massa di almeno tre ordini di grandezza superiore a quella dell'elettrone. Nel 1906 lo stesso Thomson studiando la diffusione dei raggi X nei gas scoprì che il numero di elettroni negli atomi era dello stesso ordine di grandezza del peso atomico della sostanza considerata. Praticamente Thomson prima propose il modello e poi ne sottolineò le problematiche. Nonostante questo, il suo modello venne tenuto in considerazione negli anni successivi, perché non esistevano ipotesi migliori, nell'attesa di risolvere il problema della stabilità dell'atomo.

Contemporaneamente alla proposta di Thomson, nel 1903 il fisico giapponese Hantaro Nagaoka stava lavorando ad un modello in cui la carica positiva era concentrata in un nucleo attorno al quale ruotavano gli elettroni. Fu il primo esempio di modello atomico nucleato, ma non fu mai preso seriamente in considerazione perché instabile di fronte a piccole perturbazioni e perché non aveva un riscontro sperimentale.

A questo punto divenne fondamentale il contributo di Rutherford sulla questione della struttura atomica. Rutherford era già un affermato fisico e chimico, quando nel 1909 ideò un esperimento, assieme ai suoi assistenti Geiger e Marsden, destinato a cambiare per sempre la storia della fisica nucleare: lanciando un fascio di particelle  $\alpha$  contro una sottilissima lamina d'oro, i tre si accorsero, attraverso l'uso di un rivelatore, che queste venivano deflesse ad angoli di molto maggiori rispetto alle attese; alcune particelle addirittura erano respinte all'indietro. Se il modello di Thomson fosse corretto, le particelle  $\alpha$  avrebbero dovuto attraversare la lamina quasi indisturbate in virtù della loro massa di gran lunga superiore a quella degli elettroni che avrebbero incontrato. L'interpretazione che Rutherford diede a questo esperimento fu che il modello di Thomson era errato, definendo lui stesso un modello in cui l'atomo era costituito da un nucleo di carica positiva, dove vi era concentrata l'intera massa, e da un numero di elettroni adeguato a rendere il sistema neutro. Calcolando la sezione d'urto trovò che le dimensioni del nucleo erano di cinque ordini di grandezza inferiori a quelle dell'intero atomo; ciò significava che la maggior parte del volume di un atomo era vuota.

Allo stesso modo del precedente modello di Nagaoka, quello di Rutherford non era stabile perché elettroni accelerati in movimento classicamente emetterebbero radiazione con la conseguenza che essi spiraleggerebbero verso il nucleo, collassando in poco tempo. La differenza era che questa volta, almeno, vi era una prova sperimentale dell'esistenza del nucleo.

Dopo la scoperta di Rutherford, gran parte dei fisici di tutto il pianeta si interessarono a scoprire le conseguenze sia sperimentali che teoriche dell'esistenza di un nucleo atomico. Fra questi ci fu anche Bohr, che a distanza di pochi anni propose un modello in cui faceva ancora uso della fisica classica, ma dove era presente anche l'idea di quantizzazione già usata da Planck e da Einstein in altri campi. Tutto questo verrà trattato in maniera più approfondita nel capitolo dedicato alla fisica quantistica.

## Capitolo 2

### Niels Bohr

Niels Henrik David Bohr nacque il 7 ottobre 1885 a Copenaghen. La madre, Ellen Adler, era la figlia di un imprenditore di origini ebraiche che ottenne un grande successo in Danimarca sia in ambito finanziario che in ambito politico. Il padre, Christian Bohr, era invece figlio di un insegnante di latino, storia e geografia. Christian dedicò i suoi studi alla medicina ed in particolare alla fisiologia ottenendo enormi successi, tra cui due candidature al premio Nobel. Fu professore e poi rettore dal 1905 al 1906 dell'università di Copenaghen. Oltre ad essere un uomo di grande coltura, politicamente era un progressista e un gran sostenitore dei diritti delle donne. Oltre a Niels, i due coniugi ebbero altri due figli: un maschio, Harald, che diventerà un importante matematico e una femmina, Jenny.

Appartenendo ad una famiglia benestante Niels Bohr trascorse serenamente l'infanzia e l'adolescenza. In questo periodo a Niels e Harald era permesso, nonostante la loro giovane età, partecipare agli incontri che il padre teneva assieme ad alcuni amici. Nel gruppo c'erano anche due futuri insegnanti di Niels all'università, il fisico Christian Christiansen e il filosofo Harald Høffding, oltre che il filologo Vilhelm Thomsen. Tra i tanti temi di cui erano soliti parlare, uno in particolare, di carattere epistemologico, influenzò il modo di pensare di Niels: la controversia tra finalismo e meccanicismo. Il tema veniva affrontato dal padre a partire da problemi di fisiologia, più vicini a lui, e si incentrava sui limiti di una descrizione meccanica dei fenomeni biologici in contrapposizione ad una visione animistica o vitalistica tipica dei primi anni dell'Ottocento. La prova dell'importanza di questi incontri per la formazione del giovane Niels ci viene data dallo stesso, molti anni dopo, quando scriverà una serie di articoli come "La fisica e il problema della vita" del 1957 e "Rapporti tra le scienze fisiche e biologiche" del 1960 proprio in relazione a questi argomenti. È importante in questo caso sottolineare come fu proprio durante questi incontri che iniziò a fraternizzare col concetto di complementarità: cominciò in lui a farsi largo l'idea che, stabilendo con precisione il linguaggio usato nella descrizione dei fenomeni, si sarebbe potuto stemperare il conflitto tra meccanicismo e finalismo. Torneremo nel quarto capitolo su questo argomento, ma specifichiamo fin da subito che Niels non considerò possibile il coinvolgimento di entità non fisiche, come l'anima o dio, in nessuno dei suoi ragionamenti semplicemente perché non interessato a questioni teologiche e ontologiche; il suo reale interesse era investigare i limiti di una descrizione fisica e chimica degli esseri viventi.

Altri hobby che lo tennero occupato in questa fase della sua vita furono il calcio e la letteratura danese. Nello sport non ottenne mai gli stessi successi del fratello, che partecipò addirittura alle Olimpiadi di Londra del 1908; mentre la passione per la lettura era da attribuire alla madre che leggeva a lui e ai fratelli libri fin dalla tenera età.

Niels proseguì gli studi universitari iscrivendosi all'università di Copenaghen nel 1903. Scelse un corso interamente incentrato sulla fisica con qualche esame complementare di matematica, astronomia e chimica. All'università, come detto, incontrò gli amici del padre: Christiansen fu il suo professore di fisica sperimentale e teorica, mentre Høffding quello di un corso di introduzione alla filosofia, comune a tutti gli studenti. Il primo contributo che il giovane studente diede alla fisica fu un lavoro sulla tensione superficiale dei liquidi, lavoro che nel 1906 gli fece vincere una medaglia d'oro ad un prestigioso concorso annuale dell'università e che nel 1909 fu pubblicato sotto forma di articolo sulle "Philosophical Transactions of the Royal Society" con il titolo "Determination of the surface tension of water by the method of jet vibration". Le conoscenze apprese in questo periodo gli torneranno utili negli anni trenta, quando svilupperà un modello nucleare in analogia con una goccia di liquido.

Per quanto riguarda la tesi, Christiansen gli assegnò come argomento l'applicazione della teoria dell'elettrone alle proprietà fisiche dei metalli. Ricordiamo che l'elettrone all'epoca era stato scoperto solo da una decina di anni e rappresentava un tema molto di moda tra i fisici, anche perché una teoria atomica completa non era ancora stata sviluppata, come abbiamo menzionato nel capitolo precedente. Nella sua tesi dal titolo "Resoconto dell'applicazione della teoria dell'elettrone alle proprietà fisiche dei metalli" Bohr ripercorre tutti i principali risultati ottenuti dai vari Lorentz, Drude e Thomson. Al tempo i migliori risultati in questo ambito erano stati ottenuti usando un modello che descriveva gli elettroni in moto all'interno del metallo in maniera analoga al moto degli ioni in una soluzione molto diluita o a quello di atomi leggeri all'interno di un gas formato da atomi più pesanti. Nello scrivere la sua tesi Bohr capì quanto questo modello fosse limitato e quali fossero i punti in cui la teoria classica fallisce quando viene applicata a fenomeni microscopici.

Bohr si laureò verso la fine del 1909 e passò i successivi due anni a lavorare alla tesi di dottorato in cui approfondì la sua conoscenza della teoria elettronica. Il 13 maggio 1911 conseguì il dottorato. Durante questo biennio ci furono altri due eventi importanti per la sua vita: nell'estate del 1910 conobbe Margrethe Nørlung, sua futura moglie; a febbraio del 1911, invece, suo padre Christian morì.

Al termine degli studi Bohr ottenne una borsa di studio che gli permetteva di trascorrere un anno all'estero e decise di sfruttarla per andare a Cambridge, dove a capo del Cavendish Laboratory c'era Thomson. L'intenzione di Bohr, infatti, era quella di approfittare di quell'anno per continuare gli studi intrapresi nel suo lavoro di laurea e dottorato sotto la guida di Thomson, che dalla scoperta dell'elettrone in poi si era affermato come massima autorità nel campo della teoria elettronica.

Thomson, però, aveva abbandonato quel settore di ricerca e non dimostrò grande voglia nell'aiutare Bohr nella sua carriera; si limitò quindi a suggerirgli qualche ricerca sperimentale da compiere. Anche per questo motivo Bohr abbandonò l'interesse per gli elettroni e iniziò ad interessarsi alla struttura atomica. Nello stesso periodo in cui

egli si trovava a Cambridge, Rutherford, situato invece a Manchester, illustrava il suo modello di atomo visto nel primo capitolo. Nel marzo del 1912 Bohr decise quindi di trasferirsi a Manchester per approfondire le sue conoscenze sull'argomento.

Gli anni di Manchester e la sua relazione con Rutherford sono raccontati dallo stesso Bohr in un articolo dal titolo "La nascita e lo sviluppo della teoria del nucleo atomico" del 1961. In esso parla di quali furono i contributi di Rutherford nello sviluppo della fisica atomica e di come lui e Rutherford intrattennero una intensa relazione epistolare anche dopo il suo ritorno in Danimarca. Bohr sottolineò spesso come le parole di Rutherford furono di grande incoraggiamento per tutto il periodo in cui lavorò ad un nuovo modello atomico.

Nel luglio del 1912 ritornò a Copenaghen con in testa quasi tutte le conoscenze necessarie alla formulazione delle ipotesi sottostanti il suo modello di atomo. Prima però della pubblicazione del suo lavoro, ad agosto 1912 si sposò con Margrethe con un rito civile. I due coniugi intrapresero una luna di miele che li portò in Gran Bretagna dove in questo modo Bohr poté unire lo svago al suo continuo lavoro sulla ricerca di nuove evidenze a sostegno del suo modello. Solo nel 1913 l'atomo venne proposto al mondo attraverso la pubblicazione di tre articoli (chiamati "la grande trilogia") sul "Philosophical Magazine" con il titolo "Sulla costituzione degli atomi e delle molecole".

L'atomo di Bohr non verrà trattato in questo capitolo; ci limitiamo qua ad evidenziare il peculiare modo di procedere che lo portò a tali conclusioni. Come precedentemente accennato, Bohr, grazie alla molta esperienza acquisita in merito sia alla teoria elettronica sia alla struttura nucleare, era ben consapevole dei limiti della fisica classica. Ciononostante, questo non lo portò ad abbandonare la vecchia teoria, ma solo a introdurre nuove ipotesi, che nonostante fossero apparentemente in contraddizione con la teoria precedente, lo aiutarono nella formulazione di qualcosa di più ampio che fece da apripista alla nascita della teoria quantistica. Secondo Bohr, ci doveva essere un collegamento tra la teoria quantistica e quella classica; doveva, insomma, esserci un caso limite in cui la prima tendeva a restituire i risultati già consolidati della seconda: si riferì poi a questo ragionamento come principio di analogia o principio di corrispondenza. Questo modo di procedere, diverso da tutti gli altri e che a prima vista può sembrare ambiguo, caratterizzò tutti i contributi che Bohr diede come fisico, rendendolo però soggetto a critiche da parte di alcuni colleghi, in particolare da parte di Einstein.

Sempre nel 1913 Bohr ottiene una cattedra all'università di Copenaghen come docente di fisica presso la facoltà di medicina. Non soddisfatto dell'incarico, un anno più tardi accettò l'offerta di Rutherford di insegnare all'università di Manchester. Inizialmente si sarebbe dovuto fermare in Inghilterra solo un anno, nell'attesa che venisse istituita la cattedra di fisica teorica all'università di Copenaghen, ma la prima guerra mondiale ritardò il suo ritorno in patria fino al 1916. Molti fisici in periodo di guerra vennero

chiamati al fronte; alcuni, come Henry Moseley che fu importante per lo sviluppo della spettroscopia e la sua interpretazione, addirittura morirono; e anche quelli che rimanevano in patria venivano reclutati dallo stato per lavorare ad attività di ricerca legate alla guerra. Bohr, appartenendo ad uno stato neutro, si trovò nella particolare situazione di non poter partecipare a queste ricerche e quindi ebbe molto tempo da dedicare allo sviluppo della nuova teoria dei quanti. Nonostante la guerra, la ricerca scientifica progredì e molti passi avanti vennero fatti nello sviluppo di una struttura atomica più rigorosa, grazie soprattutto a Arnold Sommerfeld, e nella comprensione della tavola periodica degli elementi a cui lo stesso Bohr contribuì.

Nello stesso anno in cui ricevette la cattedra di fisica teorica a Copenaghen, nacque il suo primo figlio Christian Albert, al quale seguiranno Hans (1918), Erik (1920), Aage (nato nel 1922 e vincitore nel 1975 del premio Nobel per la fisica), Ernest (1924) e infine Harald (1927). Contemporaneamente conobbe Hans Kramers, giovane fisico che si rivolse a Bohr per conseguire il dottorato; i due collaborarono per quasi dieci anni.

Per la sua attività di ricerca e di formazione di nuovi fisici, Bohr necessitava di spazi e di laboratori all'avanguardia: nel 1917 chiese dunque la fondazione di un istituto di fisica teorica all'altezza di quelli già presenti altrove in Europa. La costruzione dell'edificio richiese quattro anni e venne inaugurato il 3 marzo 1921. Già in quell'anno però la scuola di Copenaghen si era affermata a livello mondiale con un ruolo chiave nello sviluppo della fisica quantistica; molti fisici promettenti chiedevano di passare del tempo in Danimarca per poter lavorare a stretto contatto con Bohr e grazie a questo l'università strinse forti legami con gli altri istituti di fisica sparsi per il mondo. In quegli anni il ruolo del fisico non era più quello di un uomo solitario, che attraverso una geniale intuizione arrivava ad una nuova scoperta, ma piuttosto quello di uno scienziato che faceva parte di una collaborazione a livello mondiale per lo sviluppo delle scienze. Non è dunque un caso che a partire dagli anni venti lo sviluppo della fisica quantistica accelerò notevolmente. Al centro di questo nuovo e repentino sviluppo troviamo sempre Bohr, che impegnato nella gestione dell'istituto e nella ricerca di fondi, trovava sempre il tempo per tenersi al passo con le ultime scoperte sperimentali e proposte teoriche, anche facilitato dal fatto che quasi tutti gli artefici della meccanica quantistica passarono del tempo a Copenaghen.

Nel 1925 Heisenberg, con l'aiuto di Max Born e Jordan Pascual, pubblicò la formulazione completa della meccanica delle matrici; mentre, seguendo una strada completamente diversa, Schrödinger nel 1926 enunciò la meccanica ondulatoria. Le due visioni si dimostrarono matematicamente equivalenti, ma fu solo il principio di complementarità a spiegare la presenza di due formulazioni così diverse, una di carattere corpuscolare e una di carattere ondulatorio. L'interpretazione che diede Bohr, come vedremo, si impose non senza creare dubbi e controversie nella comunità scientifica. Ancora una volta il più grande oppositore fu Einstein, ma con il passare degli anni fu proprio la visione sostenuta dalla scuola di Copenaghen a risultare la più

diffusa. Dal 1927 in poi Bohr continuò a dare contributi a livello fisico, in particolare nel campo della neonata fisica nucleare.

Con l'arrivo della guerra e la conseguente occupazione della Danimarca da parte dei nazisti, Bohr si rifiutò di collaborare a progetti bellici e fu costretto a rifugiarsi in Inghilterra. A dimostrazione della sua umanità e dell'impegno anche in ambito politico, cercò di salvare più ebrei danesi possibili dai rastrellamenti dei nazisti facendosi aiutare dal governo danese, e cercò di sensibilizzare le nazioni e in particolare i fisici di tutto il mondo sui rischi della creazione di armi nucleari. A guerra finita, le sue iniziative furono tutte dirette a favorire la collaborazione internazionale a livello scientifico e la diffusione dello spirito tipico del suo istituto a Copenaghen, definito stile "bohriano". Quest'ultimo consisteva in una quotidiana frequentazione tra tutti gli studiosi nella quale le questioni scientifiche attinenti al lavoro venivano intervallate da discussioni su argomenti filosofici e artistici; in questa maniera il luogo di lavoro divenne una sorta di circolo culturale, dove sussisteva un'atmosfera di scambi amichevoli e di reciproco rispetto atti a creare qualcosa di più che semplici relazioni meramente lavorative.

Niels Bohr morì nel 1962 a Copenaghen e viene ancora oggi riconosciuto come uno dei più grandi fisici del Novecento.



# Capitolo 3

## La fisica quantistica

Lo sviluppo della teoria quantistica richiese un processo assai complesso ed intricato, caratterizzato dall'insicurezza che contagiò i fisici nel periodo che va da inizio Novecento alla fine degli anni Venti. Contributi arrivarono da molti studiosi diversi, come un puzzle che piano piano prendeva forma.

Una narrazione completa di tutte le vicende richiederebbe troppo tempo e non rientra nell'obiettivo di questo scritto. Nelle prossime pagine, perciò, tratteremo solo gli avvenimenti fondamentali che portarono alla formulazione del principio di complementarità, partendo da una descrizione più dettagliata dell'atomo di Bohr lasciata in sospeso precedentemente.

### 3.1 Lo sviluppo della teoria dei quanti

L'esperimento del 1909 di Rutherford provò l'esistenza di un nucleo di carica positiva, aprendo di fatto la strada per successivi sviluppi inerenti la struttura atomica.

L'assenza di un modello valido, però, non impedì ai fisici di arrivare a importanti conclusioni: in primo luogo, quasi tutta la massa dell'atomo era concentrata nel nucleo, la cui dimensione si scoprì essere molto minore di quella delle orbite elettroniche; vi era, poi, una netta distinzione delle proprietà fisiche e chimiche della materia in base a quelle che dipendevano direttamente dal nucleo atomico e quelle che, invece, originavano principalmente dalla distribuzione degli elettroni attorno ad esso; le attività radioattive furono ricondotte alla particolare costituzione nucleare e vennero fatti notevoli passi avanti nello studio dei decadimenti  $\alpha$  e  $\beta$ ; infine, per quanto riguarda la chimica, si scoprì che la particolare disposizione degli elettroni dipendeva quasi esclusivamente dalla carica nucleare, cioè da un numero intero, in pieno accordo con l'organizzazione già attribuita alla tavola periodica degli elementi di Mendeleev. Inoltre, dalla fine dell'Ottocento in poi, la spettrografia aveva fatto enormi progressi; uno dei risultati più importanti fu la scoperta di formule numeriche che restituivano le righe spettrali degli atomi: in particolare Balmer definì le frequenze delle righe dell'idrogeno come la differenza tra l'inverso di due numeri interi moltiplicata per la costante di Rydberg.

Quello che invece rimaneva inspiegabile era come un sistema formato da un nucleo (ricordiamo che protone e neutrone vennero scoperti solo nel 1919 e 1932 rispettivamente) e un certo numero di elettroni potesse essere meccanicamente stabile. Consapevoli dell'impossibilità di arrivare ad una soluzione attraverso l'uso della fisica classica, molti studiosi iniziarono a ricorrere all'idea di quantizzazione di Planck. Tra questi troviamo Arthur Erich Haas, che per primo trovò una relazione tra la costante di Planck  $h$  e le grandezze dinamiche dell'atomo, e John William Nicholson, che ipotizzò la quantizzazione del momento angolare sempre attraverso l'uso del quanto d'azione.

Prendendo spunto da tutti i contributi precedenti, Bohr presentò il suo modello atomico. Le ipotesi su cui poggiava si possono riassumere così:

- l'atomo è costituito da una carica positiva, concentrata in un punto di dimensioni molto piccole (rispetto a quelle dell'atomo intero), circondata da un sistema di elettroni tale da pareggiarne la carica. Si assume anche che la massa è concentrata per la stragrande maggioranza nel nucleo;
- un elettrone può occupare solo orbite circolari definite dalla quantizzazione del momento angolare:

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad n \in \mathbb{N};$$

- un elettrone può “saltare” da un'orbita permessa  $n$  ad un'altra  $m$ , rispettivamente di energie  $E_n$  ed  $E_m$ , solo emettendo o assorbendo un'onda elettromagnetica di frequenza

$$\nu_{mn} = \frac{|E_m - E_n|}{h}.$$

La prima ipotesi si basava sulle osservazioni sperimentali di cui abbiamo già parlato; della seconda, invece, non venne data nessuna giustificazione meccanica, ma è in pieno accordo con la quantizzazione proposta da Planck anni prima; l'ultimo punto deriva dalla rielaborazione delle formule di spettroscopia, infatti ritroviamo una differenza tra quantità determinate da numeri interi come nella formula di Balmer.

Quando Bohr espose la sua teoria era ben conscio del fatto che fosse priva di una reale dimostrazione e proprio per questo lui stesso la definì “provvisoria”. Ma nonostante ciò, grazie a questa teoria in cui coesistevano fisica classica e quantizzazione, Bohr ottenne importanti risultati. I primi, in questo senso, derivarono direttamente dalla quantizzazione del momento angolare che con qualche rielaborazione, usando i concetti del moto circolare e dell'elettromagnetismo classico, restituirono delle formule per il calcolo del raggio delle orbite  $r_n$  e dell'energia  $E_n$ . Sostituendo quest'ultime nella formula per la frequenza, si ottiene una stima della costante di Rydberg in accordo con i risultati sperimentali. Un altro grande successo fu la possibilità di applicare il modello non solo all'atomo di idrogeno, ma anche ad atomi più pesanti, a patto che sia presente un solo elettrone (atomi idrogenoidi) e di sostituire  $e^2$  con  $Ze^2$  (tenere cioè conto della differente carica nucleare). Questo fatto portò Bohr a spiegare la serie di Pickering e a scoprire che apparteneva all'elio.

L'atomo di Bohr riuscì anche a fare luce su di un altro caso in cui la fisica classica e la realtà atomica non concordavano: classicamente è previsto che una carica elettrica oscillante emetta un'onda elettromagnetica della stessa frequenza di quella di oscillazione, ma la spettroscopia e il modello appena visto sostenevano che le due frequenze non fossero uguali. Queste due visioni però coincidevano nel caso di basse frequenze o, siccome nell'atomo di Bohr le frequenze sono proporzionali a  $\frac{1}{n^3}$ , nel caso di grandi numeri quantici. Con il tempo, questo singolare modo di ragionare, per il

quale si cercava un limite in cui il comportamento quantistico lasciava spazio a quello classico, venne chiamato principio di corrispondenza e si impose come una delle basi della vecchia teoria dei quanti. I maggiori successi della fisica atomica fino alla formulazione della meccanica quantistica si devono a questo principio.

Ulteriori conferme a sostegno del modello atomico di Bohr arrivarono dai lavori di Moseley sull'interpretazione della tavola periodica, che confermava previsioni fatte da Bohr nella sua trilogia di articoli, e dall'esperimento condotto da James Franck e Gustav Hertz; i due diedero la prima prova sperimentale diretta dei "salti quantici" previsti nell'atomo di Bohr. Ovviamente, nonostante i successi ottenuti, il modello aveva anche dei limiti; evidente era il fatto che la trattazione di atomi con più di un elettrone si complicava di molto e non restituiva informazioni precise su come gli elettroni fossero realmente disposti all'interno dell'atomo.

Parallelamente si ebbero progressi nello studio della spettroscopia e tramite strumentazioni più precise si notò che le righe osservate erano in realtà dei multipletti, cioè due o più righe vicinissime tra loro. La stessa cosa succedeva se gli atomi venivano sottoposti a campi elettrici (effetto Stark) o magnetici (effetto Zeeman). Venne scoperta quella che poi prenderà il nome di struttura fine. Ancora una volta l'attenzione si concentrò sull'atomo di idrogeno perché era l'unico su cui il modello di Bohr funzionava egregiamente; ne risultò che la formula di Balmer non era corretta e che le righe erano in realtà dei doppietti. Per risolvere l'enigma dei multipletti, si pensò, in analogia con quello che succede per il moto dei pianeti, che gli elettroni potessero percorrere anche orbite ellittiche; in questa maniera diventarono fondamentali gli effetti relativistici perché un elettrone ha velocità diversa a seconda se si trova all'afelio o al perielio e di conseguenza anche massa diversa nei due casi. I maggiori sviluppi in questo senso si devono a Sommerfeld, che cercò un approccio più matematico e rigoroso rispetto a Bohr nella descrizione dell'atomo.

La teoria di Sommerfeld parte, come al solito, dallo studio di atomi idrogenoidi e si basa su una più generale definizione delle regole di quantizzazione delle varie grandezze in gioco. Prendiamo un sistema fisico e le relative coordinate che sono funzioni periodiche del tempo, l'integrale di una di queste per la sua variabile coniugata, esteso ad un periodo, è quantizzato. Le variabili coniugate  $p_q$  e  $q$  sono legate dall'hamiltoniana  $H$  del sistema dalla relazione:

$$\dot{p}_q = -\frac{\partial H}{\partial q};$$

allora la regola di quantizzazione si possono riassumere in generale come:

$$\oint_{\text{periodo}} p_q dq = n_q h \quad n_q \in \mathbb{N}.$$

Utilizzando questa nuova formulazione si introdusse, oltre al numero quantico principale  $n$ , il numero quantico azimutale  $k$  (che ulteriori studi metteranno in relazione

con il momento angolare  $\ell$ ). Se un'orbita circolare è definita semplicemente dalla definizione del raggio, una ellittica ha bisogno di un'ulteriore parametro. I due numeri sono però collegati dalla relazione  $1 \leq k \leq n$ , in modo tale che le orbite siano ristrette dalla quantizzazione al solo sottoinsieme che rispetta questa condizione (se  $n=k$  allora siamo nel caso studiato da Bohr).

Nell'atomo di Bohr, l'energia dell'elettrone è stabilita dal valore di  $n$ ; nella teoria di Sommerfeld è lo stesso con la differenza che viene introdotta una degenerazione perché tutti gli stati stazionari con lo stesso  $n$ , ma diverso  $k$ , hanno la stessa energia. L'introduzione della meccanica relativistica fece sì che l'elettrone non avesse sempre la stessa velocità quando l'orbita è ellittica e questo si tradusse in una massa relativistica diversa a seconda della posizione che occupa e alla possibilità che il valore dell'energia sia diverso. Ecco che allora la struttura fine vista negli spettri trova spiegazione nel caso in cui l'energia non dipenda solo dal numero quantico principale, ma anche da quello azimutale. La rimozione della degenerazione è quindi la causa dei multipletti menzionati sopra.

Se poi si considera un ulteriore numero quantico, quello magnetico ed indicato con  $m$ , è possibile anche definire anche la quantizzazione della posizione dell'orbita rispetto ad una direzione privilegiata (si vedrà essere la proiezione del momento angolare  $\ell$ ). Siccome se  $n$  e  $k$  sono fissati, le orbite con i diversi valori di  $m$  sono degeneri, è possibile dare spiegazione anche dei multipletti nel caso di effetto Stark e Zeeman, in cui i campi determinano una direzione specifica nello spazio e rimuovono in parte la degenerazione.

Il modello atomico appena visto, che prenderà il nome di modello di Bohr-Sommerfeld, rappresentava sicuramente un passo avanti nell'interpretazione dei fenomeni atomici, ma allo stesso tempo alcune previsioni che ne derivarono non furono confermate. In molti casi, infatti, dove era previsto un multipletto formato da un certo numero di righe, ne vennero in realtà osservate un numero minore. Questo fatto suggerì come in natura ci dovessero essere delle regole che permettevano o meno il manifestarsi degli effetti ipotizzati da Sommerfeld (le regole vennero effettivamente trovate e confermate poi dalla meccanica quantistica). Ma era anche una prova di come in quel periodo i fisici procedessero per tentativi e fossero ancora molto lontani da una formulazione definitiva di una teoria dei quanti valida per ogni fenomeno atomico.

Grazie ancora alle intuizioni di Bohr, la struttura degli atomi a più elettroni diventò più chiara e influenzò non poco la chimica, che parallelamente faceva il suo corso nella speranza di una unificazione. I punti fondamentali di questa nuova teoria atomica furono i seguenti:

- gli elettroni si muovono attorno al nucleo sulla base delle orbite definite dal modello di Bohr-Sommerfeld. Ogni elettrone è indicato dai numeri quantici dell'orbita a cui appartiene. Prendendo spunto da una visione già di moda in

- chimica, le orbite sono viste come gusci sferici di dimensioni stabilite da  $n$  in cui gli elettroni sono in movimento;
- se un atomo ha  $Z$  elettroni allora questi sono disposti attorno al nucleo uno alla volta, con l'ipotesi che l'inserimento di un elettrone non modifichi i numeri quantici di quelli già presenti;
  - tanto più un elettrone si trova su orbite esterne, tanto minore è la forza di attrazione nucleare di cui risente;
  - la forma ellittica delle orbite permette ai vari elettroni di risentire di effetti di compenetrazione in cui l'elettrone attraversa vari gusci.

Il nuovo modello venne applicato con successo alla tavola periodica, dove si riuscì a spiegare la periodicità di alcune proprietà degli elementi. Vennero addirittura scoperti nuovi elementi che riempivano perfettamente i buchi presenti nella tavola. Questo modello, però, non riusciva ancora a spiegare alcune delle discrepanze presenti tra le righe degli spettri sperimentalmente osservate e quelle attese; in particolare lo spettro dell'elio e l'effetto Zeeman continuavano a lasciare perplessi i fisici.

Il problema venne risolto dall'intervento di Wolfgang Pauli: egli introdusse nel 1924 un nuovo numero quantico, e formulò nel 1925 il principio di esclusione. In realtà, l'idea di un nuovo numero quantico era già stata ipotizzata in precedenza, ma solo Pauli riuscì a dare una spiegazione soddisfacente. Per spiegare le righe che si osservavano nell'effetto Zeeman di certi atomi, era stato proposto che il nucleo ruotasse su sé stesso e che quindi gli fosse associato un momento angolare intrinseco; Pauli capì che questo momento angolare non era da attribuire al nucleo, ma all'elettrone. Il numero quantico di momento angolare intrinseco  $s$  (spin) fu poi effettivamente misurato nel 1925 da George Uhlenbeck e Goudsmit e poteva assumere solo i valori  $+\frac{1}{2}$  o  $-\frac{1}{2}$ . Secondo questa logica quindi, un elettrone era caratterizzato da quattro numeri quantici (i tre del modello di Bohr-Sommerfeld e lo spin appena scoperto). Inoltre, Pauli affermò che gli elettroni dovevano obbedire al principio di esclusione, secondo il quale in un atomo non ci possono essere elettroni con tutti e quattro i numeri quantici uguali. In questo modo era più facile definire i gusci sferici introdotti in precedenza: mentre prima gli stati possibili per ogni valore di  $n$  erano  $n^2$  (fissato  $n$ ,  $k$  varia tra 1 e  $n$  mentre  $m$  può assumere i valori tra  $-k$  e  $+k$ ), con l'introduzione dello spin gli stati diventano  $2n^2$ . Si ha, perciò, per  $n=1$  solo uno stato, per  $n=2$  otto stati, per  $n=3$  diventano 18 e così via. Se si fa attenzione, ci si accorge che questi sono i numeri che regolano i periodi della tavola periodica.

Il lavoro di Pauli completò un modello atomico molto potente che si dimostrò funzionare in diverse situazioni e che fu alla base della meccanica quantistica, la quale, di lì a qualche anno, avrebbe finalmente visto la luce.

## 3.2 Due visioni differenti

Se per quanto riguarda la definizione di una struttura atomica, i progressi potevano ritenersi soddisfacenti, in quanto, seppur con qualche difficoltà, la teoria dei quanti riusciva ad essere applicata senza contraddizioni, lo stesso non si poteva dire riguardo lo studio dell'interazione della radiazione con la materia. In questo campo la nuova teoria che stava nascendo doveva affrontare un ostacolo insormontabile rappresentato dall'esistenza di due aspetti, apparentemente contraddittori, dello stesso fenomeno. Come già anticipato nel primo capitolo dove parliamo della natura della luce, il fenomeno dell'interferenza presuppone una trattazione tipica delle onde, mentre lo scambio di energia e momento è possibile solo ammettendo l'esistenza dei fotoni. Questi due fatti sperimentali, insieme alla necessaria introduzione della probabilità, costituiscono la base per una spiegazione teorica.

Infatti, le strade che furono seguite, e che portarono alla meccanica quantistica, differiscono proprio per la diversa importanza data all'aspetto corpuscolare e a quello ondulatorio. Heisenberg fu molto critico rispetto ai tentativi precedenti di modellizzare l'atomo e sosteneva che ci si dovesse basare solo sulle quantità realmente misurabili e sui risultati evidenti della spettroscopia. Secondo lui, la determinazione di certe quantità attraverso espressioni che facevano uso di grandezze che non fossero realmente determinabili (per esempio, la posizione esatta di un elettrone all'interno di un atomo è impossibile da conoscere) non aveva senso fisico. Per questo motivo si impegnò nella creazione di una meccanica quantistica completamente nuova.

La meccanica matriciale di Heisenberg, come possiamo dedurre dal nome, considera le osservabili non più come funzioni, ma come operatori o matrici; l'algebra di queste osservabili poggia su di un corpo complesso e non reale. Un grande risultato del lavoro di Heisenberg fu la sua regola di commutazione:

$$[q_i, p_j] = i\hbar\delta_{ij}$$

dove  $q$  indica la posizione e  $p$  il momento.

Parteciparono alla formulazione di questa meccanica anche Born e Jordan e venne pubblicata per la prima volta nel 1925; soprattutto il primo ebbe un ruolo fondamentale nel riconoscere nell'algebra che stavano creando un'analogia con le matrici. Questa visione della fisica quantistica aveva il difetto di essere complessa dal punto di vista della struttura matematica e di non avere un aggancio intuitivo con i fenomeni fisici.

Nel 1926 vide la luce la teoria ondulatoria ad opera di Schrödinger; la fonte di ispirazione principale di questa fu il lavoro di Louis De Broglie, il quale associò alle particelle materiali un'onda di materia di lunghezza d'onda  $\lambda$  determinata dalla formula  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Non solo la radiazione, quindi, aveva un duplice aspetto, ma anche la materia.

Un altro spunto per la sua teoria venne dall'ottica: nello stesso modo in cui l'ottica geometrica fallisce nella descrizione di un raggio luminoso quando incontra un ostacolo delle dimensioni paragonabili alla sua lunghezza d'onda e cede il passo

all'ottica fisica, così succede anche per la meccanica classica quando ci troviamo in scale atomiche.

L'equazione fondamentale è l'equazione d'onda di Schrödinger che si può scrivere brevemente come

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

Dove  $\hat{H}$  è l'operatore corrispondente all'hamiltoniana,  $E$  rappresenta l'energia e  $\psi$  è detta funzione d'onda e dipende dal sistema che stiamo studiando. Grazie a Born, ora sappiamo che il modulo quadro della funzione d'onda rappresenta in realtà la probabilità di trovare il sistema in un certo stato. L'equazione ricorda un po' l'equazione agli autovalori e fa uso di operatori come nel caso della teoria di Heisenberg; altro punto di contatto delle due teorie è che la funzione d'onda è in generale complessa.

Nello stesso anno venne dimostrata dallo stesso Schrödinger l'equivalenza delle due formulazioni della meccanica quantistica e le prime applicazioni ne dimostrano la validità. Nonostante i buoni risultati, rimane aperta la questione su quale sia il significato dell'esistenza di due teorie, equivalenti dal punto di vista matematico, ma così diverse sul piano interpretativo dei fenomeni fisici.

Da questo punto di vista, diventano importanti due principi entrambi risalenti al 1927: il principio di indeterminazione di Heisenberg e il principio di complementarità di Bohr. Il primo è conseguenza del formalismo stesso della meccanica quantistica, che impone una limitazione alla precisione con cui posso misurare due variabili coniugate. Se, per esempio, prendo la posizione  $q$  e il momento  $p$ , allora le incertezze sui loro valori devono soddisfare la condizione di indeterminazione  $\Delta q \Delta p = \hbar$ . A differenza dell'ambito classico, dove in linea di principio le misure di  $p$  e  $q$  possono essere effettuate annullando l'incertezza, in ambito quantistico non ha più senso parlare di traiettorie delle particelle perché non potremo mai conoscere contemporaneamente i valori esatti di posizione e velocità. Se, per assurdo, riuscissimo a ridurre a zero l'incertezza su uno dei due valori, la condizione precedente impone che la precisione con cui conosco la variabile coniugata diventi incontrollabile e tenda all'infinito. Il significato che ne diede Heisenberg fu che il tentativo di misurare una caratteristica del comportamento corpuscolare faceva sì che si perdesse l'informazione su quello ondulatorio, lo stesso valeva per il contrario.

Il principio di complementarità si può interpretare come l'interpretazione filosofica delle relazioni di indeterminatezza. Bohr aveva già concepito l'idea di complementarità tre anni prima quando, assieme ai colleghi Kramers e Slater, aveva cercato di risolvere il problema della relazione tra radiazione e materia. In quella che poi sarebbe diventata nota come teoria BKS, i tre fisici cercarono di dare una spiegazione consistente della presenza di aspetti continui e discontinui e, seppur la teoria venga subito confutata, si può leggere tra le righe la presenza del concetto di complementarità, anche se solo a uno stadio embrionale.

A differenza di Heisenberg, Bohr non si concentrò sulle sole conseguenze matematiche, ma fece un'analisi più approfondita e generale della particolare situazione nella quale i fisici si erano imbattuti; arrivò alla conclusione che i due aspetti potevano convivere senza creare nessuna contraddizione teorica e che, anzi, l'aspetto corpuscolare e quello ondulatorio uniti rappresentavano la totalità delle possibili rappresentazioni dello stesso fenomeno fisico.

### 3.3 La discussione con Einstein

L'interpretazione data da Bohr alla meccanica quantistica, riassunta dal principio di complementarità, fu subito oggetto di profonde discussioni all'interno della comunità scientifica. La vedevano allo stesso modo tutti i fisici che in qualche maniera avevano lavorato con Bohr, magari passando del tempo nell'Istituto di Copenaghen, e i principali protagonisti della nascita della meccanica quantistica; ma c'era anche chi si opponeva a questa visione, principalmente perché troppo lontana dal concetto di analisi e descrizione della realtà fisica, che nei secoli precedenti si era imposto.

Tra questi ultimi troviamo Einstein: nonostante infatti egli conoscesse altrettanto bene i limiti della fisica classica a livello atomico, era convinto che la meccanica quantistica fosse solo una tappa intermedia di un percorso che avrebbe portato alla formulazione di una teoria generale, in cui i principi classici venivano rispettati. Ciò che sognava era una generalizzazione simile a quanto era avvenuto tra la meccanica classica e la relatività.

Bohr, invece, fin da quando aveva presentato il suo modello atomico, considerava possibile una violazione dei principi fondamentali classici (in particolare il principio di causalità) in favore della possibilità di descrivere i fenomeni atomici con il linguaggio proprio della fisica classica. In questo senso il principio di complementarità è anche conseguenza di tutto il lavoro svolto da Bohr negli anni precedenti: tutti i suoi più grandi risultati a livello fisico erano stati ottenuti facendo ricorso al principio di corrispondenza; una completa rinuncia alla fisica classica avrebbe significato la contemporanea rinuncia a tutti i risultati già ottenuti dalla vecchia teoria dei quanti.

A questo proposito, Bohr citò spesso nei suoi articoli lo sviluppo della relatività come termine di paragone. Mentre la teoria della relatività poggia su principi propri e trova nella meccanica classica una buona approssimazione nel caso di velocità molto più piccole di quelle della luce, questo non è del tutto vero per la teoria quantistica: essa ha sì la meccanica classica come approssimazione nel caso di valori in gioco molto superiori al quanto d'azione  $h$ , ma ne ha anche bisogno per l'interpretazione dei dati sperimentali. I principi fondamentali della meccanica quantistica hanno intrinsecamente bisogno della fisica classica per essere definiti.

Einstein e Bohr ebbero modo di incontrarsi molte volte sia prima che dopo il 1927 e le loro discussioni sono raccontate dallo stesso Bohr in un articolo del 1949 "Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics". Leggendo dei loro



incontri, diventa evidente che l'argomento principale non si limitava a quale fosse l'interpretazione corretta della fisica quantistica, ma assunse un carattere epistemologico più generale a proposito della descrizione fisica della natura. È altresì evidente come la visione di Bohr fosse stata influenzata dai continui stimoli a cui lo sottoponeva Einstein con le sue critiche e soprattutto con gli esperimenti mentali, che lo stesso Einstein formulava per provare la non validità dell'interpretazione di Bohr. Con il passare degli anni, il principio di complementarità prese sempre più piede tra i fisici e si affermò come principio fondamentale della meccanica quantistica. Nonostante questo Bohr e Einstein rimasero della loro idea: il primo considerava la meccanica quantistica e le sue singolarità in linea con il progresso scientifico; il secondo continuava a considerarla una teoria provvisoria.

## Capitolo 4

### Il principio di complementarità

#### 4.1 Cos'è la complementarità?

Bohr si riferì spesso al concetto di complementarità come ad un punto di vista generale con il quale si possono risolvere i paradossi della teoria dei quanti. Ma certo questa non è una definizione sufficiente. Il suo pensiero nacque dall'esigenza di trovare una descrizione scientifica della natura consistente, ma nel fare questo Bohr ottenne molto di più e dietro la parola "complementarità" si nasconde una vera e propria struttura concettuale e filosofica.

Per quanto riguarda l'origine della parola "complementarità", in un'intervista del 1957 Bohr affermò di aver scelto questa particolare parola semplicemente al fine di usare un singolo termine per riferirsi ad un argomento che avrebbe, altrimenti, richiesto troppo tempo per essere ripetuto ogni volta; inoltre, siccome il concetto che Bohr voleva riassumere fu completamente rivoluzionario, cercava una parola che non richiamasse nessun'altra idea nella mente di chi l'ascoltava.

Come già visto nel capitolo precedente, in cui abbiamo ripercorso brevemente la storia della meccanica quantistica, il punto di vista complementare è un risultato forzato dalla natura stessa e dalla scoperta del quanto di azione; è, perciò, strettamente necessario adottare questa visione non classica per sviluppare con successo una descrizione della natura valida a livello atomico. La parola "generale" usata all'inizio non deve quindi ingannare: la complementarità non è qualcosa di arbitrario, cioè che si può scegliere o non di seguire, ma qualcosa di cui non possiamo fare a meno. A questo proposito, anche se si è soliti riferirsi alla complementarità come ad un "principio" o ad una "teoria" (e nel proseguo continuerò a usare questi termini), mai nei suoi scritti Bohr utilizzò questi appellativi. Egli evitò di proposito tali termini, al fine di evitare incomprensioni sulla sua idea di complementarità; egli, infatti, la riteneva qualcosa al di sopra dei principi e delle teorie fisiche, intrisa di un valore assiomatico atto proprio ad interpretarli nella maniera corretta.

La più grande risorsa per la comprensione del principio di complementarità, a cui possiamo attingere, sono gli "scritti filosofici", che lo stesso Bohr scrisse e che vennero raccolti in quattro volumi risalenti al 1934, 1958, 1963 e 1998 (questi ultimi due pubblicati postumi). In essi troviamo tutte le riflessioni e gli interventi che, dal Congresso di Como in avanti, si incentrarono sul tema della complementarità e sulle sue conseguenze. Sin dalle prime pagine diviene chiaro come il principio di complementarità non è solo un utile strumento interpretativo della meccanica quantistica, ma un principio più generale della conoscenza umana perché applicabile non solo al campo della fisica atomica.

Per comprendere meglio il concetto, riallacciamoci a ciò che ha ispirato Bohr: l'interesse dello scienziato danese per le questioni filosofiche non nasce dai suoi studi

sulla fisica, bensì da considerazioni epistemologiche, in particolare sul linguaggio e sull'uso delle parole. Abbiamo già visto come Bohr diede molta importanza al linguaggio, come dimostra anche la scelta del termine “complementarità” e il rifiuto dell'uso di parole come “principio”. Ciò che lo aveva sempre incuriosito erano le parole che, a seconda del contesto, denotavano aspetti differenti della conoscenza umana. Un esempio è la parola “io” con la quale si può intendere sia la persona fisica, cioè il proprio corpo, sia la propria coscienza o il proprio pensiero. Argomenti di questo genere, oltre a questioni relative alla descrizione dei fenomeni, ai processi psicologici o al problema del libero arbitrio, furono tra i suoi interessi fin dalla giovane età. Nello stesso periodo gli studi universitari gli permisero di venire a conoscenza della teoria delle superfici di G. F. B. Riemann: una funzione complessa associa ad ogni punto del piano più valori, ma la stessa può essere ricondotta ad una funzione a un solo valore introducendo più piani complessi (fogli di Riemann). In questa maniera, bisogna non solo specificare il punto, ma anche un determinato piano. Facendo una analogia con questa operazione matematica, Bohr pensò che fosse possibile descrivere i vari significati che una parola può assumere in base ai contesti mutualmente esclusivi in cui si presenta. Per capire meglio l'idea di Bohr facciamo un esempio: se io affermo di vedere una mela rossa, l'oggetto della mia frase può essere il frutto in sé, oppure i raggi di luce rossa che arrivano ai miei occhi, o ancora la rappresentazione psicologica che si crea nella mia mente. In situazioni normali, il contesto ci aiuta a stabilire a quale piano interpretativo ci stiamo riferendo, ma se ci avventuriamo in aree della conoscenza non familiari questo passaggio potrebbe essere non scontato e creare ambiguità.

L'avvento della meccanica quantistica negli anni Venti del Novecento fornì a Bohr l'occasione di applicare la sua nascente idea di complementarità anche alla fisica. Come abbiamo visto nel terzo capitolo, egli risolse il paradosso del dualismo onda-particella affermando che i due aspetti erano complementari e mutuamente esclusivi e che insieme descrivevano completamente il fenomeno in esame. Quando, però, nei suoi scritti, Bohr parla del processo che lo ha portato a formulare il principio di complementarità, preferisce porre l'attenzione sul suo desiderio di accettare l'esistenza del quanto di azione e di conservare allo stesso tempo l'idea classica di causalità. La causalità fino a quel momento era ritenuta un fondamento indiscutibile di ogni descrizione dei fenomeni naturali, ma si dimostrò incapace di coinvolgere i processi atomici individuali e di spiegare la loro regolarità; infatti, l'esistenza del quanto elementare di azione, completamente estraneo alla fisica classica, comporta l'esistenza, per ogni misurazione, di una interazione fra lo strumento di misura e il sistema in esame e anche una indeterminazione nel calcolare l'interazione (in realtà le cose si complicano ulteriormente se si considera che anche le particelle con cui non interagisco direttamente con la mia misura sono soggette alle relazioni di indeterminazione come dimostra la soluzione del paradosso Einstein-Podolsky-Rosen). In altre parole, la

nostra osservazione di un sistema fisico interferisce con il suo sviluppo rendendo quindi impossibile una descrizione causale.

Il grande merito di Bohr fu di non considerare la rinuncia alla causalità come un fallimento, ma come una opportunità per il progresso della fisica e della conoscenza umana: egli capì che gli strumenti di misura che interagiscono con il sistema entrano in maniera intrinseca a far parte di un fenomeno che comprende sia il sistema iniziale sia l'apparato di misura e determina il risultato della misurazione.

In questo modo si spiegano le contraddizioni in cui ci si imbatte quando si cerca di descrivere in maniera coerente un sistema atomico utilizzando dispositivi sperimentali diversi. Inoltre, si possono definire come complementari i comportamenti del sistema atomico sotto diverse condizioni sperimentali. Anche se le informazioni ottenute con diverse strumentazioni non si possono combinare in un'unica descrizione del sistema grazie a concetti della fisica classica, essi rappresentano aspetti ugualmente essenziali della conoscenza di quel sistema.

Nel brano del 1937 "Biologia e fisica atomica" Bohr sottolinea come il punto di vista della complementarità non equivale a una rinuncia arbitraria all'analisi dei fenomeni atomici, ma è anzi l'espressione di una sintesi razionale delle esperienze che si estendono oltre i limiti entro cui l'applicazione del concetto di causalità è naturalmente confinato.

## 4.2 Altre riflessioni di Bohr

La rivoluzionaria visione della complementarità, che Bohr applicò così egregiamente alla nuova meccanica quantistica per la sua interpretazione, si presta ad una analisi molto più approfondita a livello filosofico ed epistemologico.

Per prima cosa ci soffermeremo ancora sull'attenzione per il linguaggio che Bohr esprime in molti dei suoi discorsi; secondo lui il linguaggio e la scelta delle parole acquistano maggiore importanza man mano che le situazioni che si cercano di descrivere si allontanano dall'esperienza quotidiana. Questo è il caso, ancora una volta, della meccanica quantistica e dall'ambigua parola, spesso utilizzata, "fenomeno". L'ambiguità nasce dal diverso significato attribuitogli in fisica classica e in fisica atomica; nel primo caso si considerava l'oggetto di un esperimento indipendentemente esistente, mentre nel secondo caso la nostra osservazione si limita all'interazione tra lo strumento di misura e il sistema fisico, e il fatto che questa interazione non sia trascurabile ci fa perdere l'informazione sul sistema fisico precedente alla nostra misura. Questa differenza ha portato i fisici dell'epoca, ma anche gli studiosi che oggi affrontano questo argomento, a interpretare male le parole di Bohr e a parlare di "disturbo del fenomeno" riferendosi all'effetto di una misurazione in meccanica quantistica.

Il fisico danese criticò aspramente l'uso di espressioni di questo tipo perché potevano creare confusione, per cui sostenne un limite nell'adoperare la parola fenomeno, la

quale doveva essere usata esclusivamente per osservazioni che comprendevano anche una dettagliata descrizione di tutto l'apparato sperimentale. Allo stesso modo ammonì gli altri fisici per l'uso di parole come "misura", "posizione", "particella" e "onda" che nell'ambito della meccanica quantistica non sono facili da definire operativamente, data l'impossibilità di visualizzare i sistemi atomici, e rischiano di perdere di significato.

Insomma, Bohr era convinto che la comunicazione di esperienze ed idee fossero alla base del progresso della conoscenza, e che per questo motivo le parole avessero una tale importanza.

Oltre al linguaggio, un altro tema ricorrente nelle discussioni di Bohr è quello del rapporto soggetto-oggetto; tema che già si è potuto intravedere quando abbiamo parlato dei fogli di Riemann e discusso le diverse interpretazioni di una stessa affermazione, ma anche quando abbiamo definito meglio il concetto di osservazione di un fenomeno nelle righe precedenti. Distaccandosi dall'ambito prettamente fisico, Bohr, a sostegno della complementarità come condizione logica necessaria alla descrizione e comprensione del mondo atomico, effettuò alcune analogie con la psicologia, l'antropologia e le scienze sociali.

Bohr stesso sottolineò quanto sia fondamentale l'argomento in un passaggio del brano "La teoria atomica e i principi fondamentali della descrizione della natura" del 1929 in cui afferma che il rapporto tra soggetto e oggetto è il nucleo centrale del problema della conoscenza. In realtà, a partire dagli anni Trenta, Bohr non fu il solo fisico a occuparsi di filosofia ed a cercare risposte a domande che fin dall'antichità hanno occupato le menti degli uomini; questo fatto va a favore dell'importanza che la comprensione e l'interpretazione della meccanica quantistica hanno avuto per lo sviluppo anche di altre discipline, come la vita, il libero arbitrio, il rapporto tra corpo e mente o tra anima e corpo, la differenza tra adattamento e naturale predisposizione, la relazione tra la singola persona e una comunità o società e, anche, tra culture diverse.

Il tema della vita, tra questi, è forse quello che impegnò maggiormente i pensieri di Bohr e più in generale il rapporto tra la fisica e la biologia. L'interesse per questo argomento nacque fin da giovane quando assisteva alle riunioni del padre, noto fisiologo, col suo gruppo di amici. Ciò che egli sosteneva è che ci fosse un confine ben determinato tra biologia e fisica, in quanto la determinazione esatta dello stato di un organismo vivente, sulla base dei suoi componenti fisici e della loro descrizione, ne richiede la sua morte. Infatti, i concetti che si utilizziamo per la descrizione della materia inanimata escludono la possibilità di considerare il fenomeno della vita. La meccanica quantistica, ma anche quella classica prima ancora, sono ottimizzate per lavorare con sistemi chiusi, mentre gli organismi viventi sono in continuo contatto con l'ambiente e questo complica la determinazione degli atomi che effettivamente fanno parte dell'organismo.

Nei brani “Luce e vita” del 1932, “Biologia e fisica atomica” del 1937, “Rapporti tra le scienze fisiche e biologiche” del 1960 e “Luce e vita rivisitate” di due anni più tardi affronta proprio questa tema e afferma che l’essenza di ogni interpretazione fisica si basa sulla scomposizione di fenomeni complessi in altri più semplici, ma questo è in netto contrasto con gli aspetti tipici della vita e la complessità inesauribile degli organismi. La conclusione a cui arrivò Bohr fu che l’esistenza stessa della vita andrebbe considerata in biologia un fatto elementare, allo stesso modo in cui in fisica atomica fu accettata l’esistenza del quanto d’azione. La descrizione della vita presenta dunque un carattere complementare a seconda che nella descrizione dell’essere vivente venga data maggiore importanza ai singoli processi chimico-fisici o alla totalità degli aspetti vitali.

Nonostante il suo grande interesse per lo studio e la comprensione della vita, Bohr prese sempre le distanze dalle visioni del vitalismo, credendo che debba essere la filosofia ad adattarsi alla scienza, e non viceversa.

## Conclusione

La maggior parte degli studenti di fisica conoscono Niels Bohr per la sua teoria provvisoria del modello atomico e per la proposta del modello a goccia nucleare, ma spesso ignorano tutti gli altri suoi contributi, più o meno grandi, nello sviluppo della meccanica quantistica. Questo fatto è anche dovuto alla maggiore importanza riservata dai corsi universitari e dai manuali di fisica all'idea e alla teoria finale, trascurando i vari passaggi che a esse hanno portato.

Niels Bohr è stato molto più di un geniale fisico, ma, come abbiamo visto, si può apprezzare il suo apporto alla cultura mondiale solo analizzando nel dettaglio la sua vita. In particolare, molti aspetti del mondo sono da ricondurre ai suoi contributi scientifici e umani.

La speranza, con l'aiuto di questo scritto, è di avere dimostrato il carattere fondamentale del principio di complementarità per l'interpretazione della meccanica quantistica e i suoi successivi sviluppi, e allo stesso tempo di aver fatto conoscere ai lettori il peculiare modo di ragionare di uno dei più grandi pensatori del Novecento.

## Fonti bibliografiche

- Folse H. J., *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementary*, North-Holland, Amsterdam, 1985.
- Gulmanelli P. (a cura), *Niels Bohr, I Quanti e la Vita*, Bollati Boringhieri editore (I Grandi Pensatori, 28), Torino, 2012.
- Murdoch D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- Peruzzi G., *Niels Bohr. Dall'alba della fisica atomica alla big science*, Le Scienze (I grandi della scienza, 23), Milano, 2001.
- Bohr N., *The Philosophical Writings*, Ox Bow Press, Woodbridge, Connecticut, voll. 1-3, 1987, vol. 4, 1998.