

## NIELS BOHR (1885-1962), ONE OF THE ARCHITECTS OF MODERN PHYSICS

GIULIO PERUZZI

*Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova, Padova, Italia*

Niels Bohr died sixty years ago. He was one of the architects of modern physics and one of the leading figures of the reorganisation of research that led to the birth of the so-called Big Science. To commemorate him, we retrace his scientific and human biography. This offers many insights into the world we live in and into the role that science can play in promoting freedom and peace among people.

## NIELS BOHR (1885-1962), UNO DEGLI ARCHITETTI DELLA FISICA MODERNA

### 1 Introduzione

Sessant'anni fa, il 18 novembre del 1962, moriva Niels Bohr. Bohr (fig. 1) è ben noto come l'autore del primo modello quantistico di atomo, ma in realtà i suoi contributi scientifici vanno ben al di là di questo, e coinvolgono gli sviluppi della fisica atomica e delle interazioni tra fisica, chimica e biologia. D'altra parte Bohr si trova al centro di un vasto movimento di riorganizzazione della ricerca dal quale emerge tra gli anni 1930 e 1950 una nuova figura di scienziato che alle competenze del ricercatore deve unire quelle del coordinatore di gruppi di ricerca sempre più numerosi, e quelle dell'amministratore che deve reperire finanziamenti sempre più ingenti. Ebbene Bohr è stato uno dei primi a interpretare il nuovo ruolo del ricercatore, insieme scienziato, amministratore e politico, diventando uno dei protagonisti della nascita della cosiddetta Big Science.

Significativo a questo proposito è l'incipit del discorso pronunciato da Victor F. Weisskopf al CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), di cui era allora direttore generale, nel corso di una cerimonia svoltasi il 23 novembre 1962 in memoria di Bohr:

«Siamo qui riuniti per rendere omaggio a Niels Bohr. Niels Bohr è il simbolo, l'origine e il principale architetto del nostro lavoro. È stato tramite lui, per mezzo di lui e con lui che tutto ciò su cui il nostro lavoro e la nostra esistenza si basa è stato creato. Era un grande uomo. Ma che cosa è la grandezza?»



Fig. 1 Niels Bohr (circa 1920) (Nobel Foundation Archive).

Un grande uomo è uno che crea una nuova epoca, un nuovo modo di pensare, ed è certo che lui e la sua vita corrispondono a questa definizione. L'influsso di ciò che lui ha iniziato è visibile in ogni aspetto della nostra vita. La scienza moderna ha dato nuova forma al nostro mondo. Essa è diventata il fattore determinante del nostro pensiero, della nostra cultura, perfino della politica, e determina la direzione nella quale il genere umano si muoverà nei prossimi decenni»<sup>1</sup>.

Le parole di Weisskopf sono una chiara testimonianza del credito culturale e politico che Bohr si era guadagnato. Va tuttavia notato un fatto. L'opera di Bohr fu un importante punto di riferimento, sia per la sua generazione, sia per quella successiva, cioè per le due generazioni di fisici provenienti da diversi paesi che riuscirono a dare ordine a un nuovo vasto dominio di fenomeni, prima con la "vecchia teoria dei quanti" tra il 1900 e il 1925, e poi con la meccanica quantistica dopo il 1925. In seguito però la memoria della sua grande influenza sugli sviluppi della fisica del XX secolo si andò via via affievolendo. Un destino toccato a Bohr come a molti altri grandi scienziati del passato. Eppure, ripercorrendo la vita di questi personaggi, ci si accorge della ricchezza dei loro contributi e della lungimiranza delle loro riflessioni. Si scopre così che molte delle idee e delle teorie, che oggi vengono affermate senza ricordarne la provenienza, sono in realtà il frutto di un faticoso lavoro svolto in un determinato contesto da persone che si sono poste certe domande. È purtroppo diffusa la tendenza, consolidata dai manuali, a considerare rilevante la teoria finale e marginali i vari passaggi che a essa hanno portato. Al contrario, per afferrare davvero il significato e gli eventuali limiti di una nuova teoria è di fondamentale importanza ripercorrere il cammino di chi quella teoria ha proposto per la prima volta. Come vedremo, il caso di Bohr è in questo senso paradigmatico.

## 2 Formazione e primi contributi scientifici

Niels Henrik David, figlio di Ellen Adler e Christian Bohr, nasce il 7 ottobre del 1885 a Copenaghen. Sua madre proveniva da una facoltosa famiglia ebraica, mentre il padre era un importante fisiologo. I coniugi Adler-Bohr ebbero altri due figli, Jenny nel 1883, che si laureerà in storia e insegnerà nelle scuole danesi, e Harald nel 1887, destinato a diventare un importante matematico (fig. 2).

L'influsso del padre sulla formazione giovanile dei figli fu sicuramente importante. Christian, nel 1881 e nel 1883,

lavorò a Lipsia nel laboratorio del grande fisiologo tedesco Carl Ludwig. Ludwig, insieme a Hermann von Helmholtz, Emil Du Bois-Reymond e Ernst Wilhelm von Brücke, aveva costituito a Berlino, verso la fine degli anni 1840, una sorta di circolo "anti-vitalista". Proprio questo gruppo di Berlino fu tra gli ispiratori della reazione di una parte della comunità scientifica ai metodi e alle idee della *Naturphilosophie*, uno dei movimenti culturali legati al romanticismo e alla filosofia idealistica ampiamente diffuso in Germania nella prima metà dell'Ottocento.

La *Naturphilosophie* aveva rappresentato la ribellione contro l'ingenua interpretazione meccanicistica dei fenomeni organici complessi propria dei newtoniani dell'epoca: per i *Naturphilosophen* ridurre tutti i fenomeni e i processi del mondo organico a movimenti e forze era inaccettabile. Ma i progressi nel campo della fisica, della chimica e delle scienze biomediche avrebbero poi permesso, nel corso dell'Ottocento, di acquisire elementi tali da dare nuovo vigore alle posizioni di chi riteneva che le scienze della vita potessero problemi solo quantitativamente diversi da quelli delle scienze fisiche e chimiche. Proprio i componenti del gruppo di Berlino furono tra quelli che, in aperta polemica con i movimenti romantici, sostennero con maggiore autorevolezza che i fenomeni della vita potessero essere interpretati come manifestazioni di leggi fisiche e chimiche.

Christian Bohr assunse posizioni diverse da quelle strettamente riduzionistiche, ma il suo incontro con Ludwig fu rilevante nel formare la sua sensibilità per la controversia tra teorie vitalistiche (o finalistiche) e teorie meccanicistiche. Tali questioni erano state più volte discusse da Christian insieme a un gruppo di amici che si ritrovava regolarmente a casa ora dell'uno, ora dell'altro. Di questo gruppo, dai caratteri spiccatamente interdisciplinari, facevano parte il filosofo Harald Høffding, il fisico Christian Christiansen – entrambi futuri docenti di Niels all'Università – e il filologo Vilhelm Thomsen. Sia Niels sia Harald partecipavano a queste riunioni, e non v'è dubbio che l'approccio del padre a quei problemi influì sul modo in cui Niels avrebbe trattato, anni dopo, i rapporti tra la fisica e la biologia.

Quel che Niels Bohr ricava dall'insegnamento di Christian e dalle discussioni a cui assiste è che, se le nozioni utilizzate nella descrizione della natura sono definite in modo accorto, il conflitto tra meccanicismo e finalismo si stempera. Nella fase matura delle sue riflessioni, Niels arriverà a concludere, in linea con le posizioni espresse da Christian, che queste due forme di descrizione possono convivere completandosi a vicenda. Alcuni degli elementi di epistemologia della biologia ricorrenti nelle discussioni a casa dei Bohr possono sicuramente gettare luce su quel principio di complementarità che nel 1927 verrà introdotto da Niels in ambito fisico e che in seguito verrà da lui applicato anche ad altri settori della cultura.

<sup>1</sup> Cinque mesi dopo la morte di Niels Bohr la *American Physical Society* organizza un incontro commemorativo in suo onore. Gli interventi di J. Rud Nielsen, Felix Bloch, Aage Bohr, John Wheeler e Léon Rosenfeld, ai quali viene aggiunto quello di Victor Weisskopf tenuto al CERN qualche mese prima, vengono pubblicati su *Physics Today* [1].

I giovani danesi che volevano proseguire gli studi universitari potevano scegliere tra l'Università di Copenhagen e il Polytekniske Løeranstalt. Niels opta per l'Università dove entra nel 1903, scegliendo l'indirizzo di studi incentrato sulla fisica.

Punto di riferimento universitario di Niels è Christiansen, uno degli amici di suo padre, che lo avvierà allo studio della tensione superficiale dei liquidi, da un lato, e delle teorie dell'elettrone dall'altro. Proprio per i contributi nel primo campo Bohr vincerà, prima di laurearsi, un prestigioso riconoscimento danese nel 1907, mentre il secondo campo sarà oggetto dei suoi studi per la laurea e il dottorato. Sia la tesi di laurea del 1909 sia quella di dottorato del 1911 riguardano infatti gli *Studi sulla teoria elettronica dei metalli*: è qui che Bohr acquista la consapevolezza che per affrontare la descrizione di fenomeni fisici alla scala atomica è necessario introdurre delle modifiche all'elettromagnetismo classico alla luce della nuova ipotesi dei quanti.

### 3 L'atomo di Bohr

Terminati gli studi, Bohr ottiene dalla Fondazione Carlsberg una borsa postdottorato per trascorrere un anno all'estero. Decide quindi di recarsi nell'ottobre del 1911 a Cambridge con la speranza di proseguire le sue indagini sulla teoria dei metalli sotto la guida di J. J. Thomson, allora direttore del Cavendish Laboratory. Thomson è infatti una delle massime autorità nel campo: ha vinto il premio Nobel per la fisica nel 1906 come "riconoscimento dei grandi meriti delle sue ricerche teoriche e sperimentali sulla conduzione dell'elettricità da parte dei gas" e nella sua *Nobel lecture* ha parlato della sua scoperta di quello che oggi chiamiamo elettrone e che lui si ostina, per ragioni su cui non ci soffermiamo qui, a chiamare corpuscolo. L'interazione tra Bohr e Thomson non sarà però delle migliori e nel marzo del 1912 Bohr si sposta a Manchester dove inizia a lavorare con Ernest Rutherford (fig. 3).

Frutto delle ricerche condotte a Manchester e proseguite al suo ritorno in Danimarca nel luglio del 1912 è la proposta del primo modello quantistico di atomo. Il modello viene descritto nella prima parte di un articolo pubblicato nel 1913 in tre parti (la prima a luglio, la seconda a settembre e la terza a novembre) nel volume 26, sesta serie del *Philosophical Magazine* con



Fig. 2 Christian Bohr ed Ellen Adler con i tre figli: Niels è il bimbo in alto a destra. Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.



Fig. 3 Bohr e Rutherford a un picnic nei pressi di Cambridge. Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.

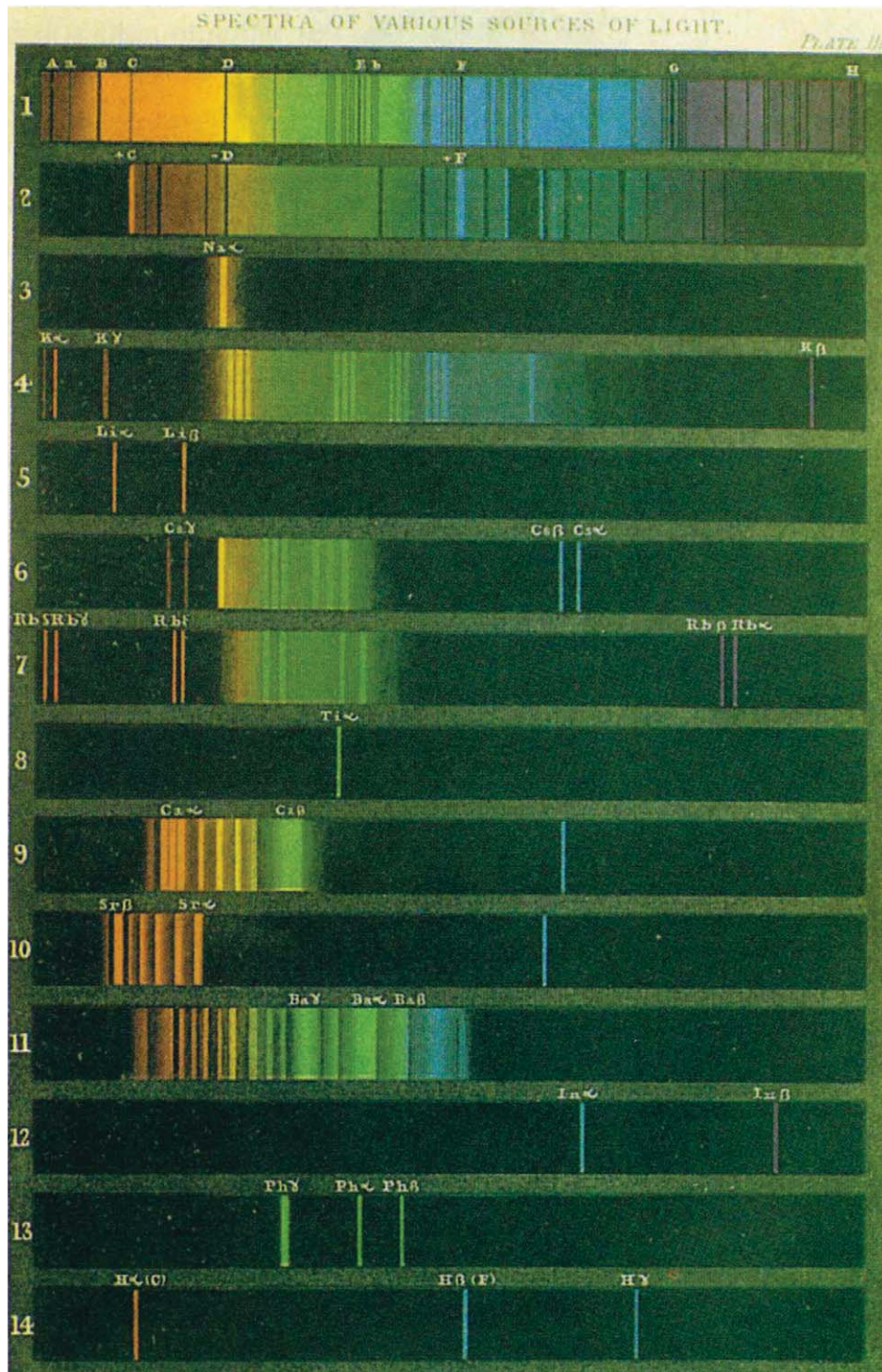


Fig. 4 Spettri di diverse sorgenti luminose (illustrazione tratta da un volume di fine Ottocento). Sono riportati, dall'alto in basso, gli spettri del Sole, della corona solare, del potassio, del litio, del cesio, del rubidio, del tallio, del calcio, dello stronzio, del bario, dell'indio, del fosforo e dell'idrogeno.

l'ambizioso titolo "Sulla costituzione di atomi e molecole": in realtà il modello si applica solo all'idrogeno (un solo elettrone intorno al nucleo) e agli atomi idrogenoidi (cioè gli atomi ionizzati, con un solo elettrone che orbita intorno al nucleo di carica positiva). Il lavoro di Bohr è legato a una serie di progressi sperimentali e teorici, fatti in particolare a partire dalla seconda metà dell'Ottocento, che sintetizziamo brevemente.

La rinascita dell'atomismo tra Settecento e Ottocento avviene inizialmente nell'ambito della neonata chimica moderna, ma che nel corso dell'Ottocento coinvolge un numero crescente di settori della fisica. Intorno al 1860, Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen fanno alcune scoperte che inaugurano la spettroscopia: le loro esperienze mettono definitivamente in evidenza che ogni elemento della tavola periodica emette e assorbe solo certi colori, cioè solo radiazione elettromagnetica di certe lunghezze d'onda o frequenze. Questi spettri di colori (fig. 4) diventano in qualche modo la carta di identità degli elementi chimici, un potente strumento di indagine per individuare la composizione chimica degli oggetti materiali sulla Terra, e per lo studio della composizione chimica di oggetti celesti, come le stelle. Ma perché l'emissione e l'assorbimento avvengono solo per particolari colori? Si comincia a pensare negli ultimi decenni dell'Ottocento che l'atomo, etimologicamente "indivisibile", sia in realtà costituito da cariche oscillanti che emettono e assorbono radiazione elettromagnetica. Non è però chiaro perché lo facciano solo per insiemi discreti di frequenze. Quando nel 1897 J. J. Thomson scopre l'elettrone, una particella elettricamente carica di massa almeno mille volte più piccola del più piccolo atomo della tavola periodica (l'idrogeno), l'idea che si fa strada è che siano proprio gli elettroni dentro l'atomo a muoversi in modo tale da giustificare le evidenze spettroscopiche. Non solo, negli stessi anni vengono scoperte nuove radiazioni, i raggi X (Wilhelm Roentgen, 1895) e la radioattività (Antoine Henri Becquerel, 1896), che probabilmente hanno qualcosa che fare con la costituzione atomica della materia.

Pochi anni dopo, nel 1900, Max Planck introduce nell'ambito delle sue ricerche sulla radiazione di corpo nero la prima teoria che afferma che gli scambi tra radiazione (considerata classicamente continua) e materia (composta da ipotetici oscillatori carichi elettricamente) avvengano per quanti discreti di energia, multipli del quanto elementare di energia  $E = h\nu$ . Saranno le ricerche successive, dovute in particolare ai contributi di Einstein tra il 1905 e il 1909, a dimostrare che i risultati ottenuti da Planck possono essere pienamente giustificati solo ammettendo che anche la radiazione elettromagnetica è costituita da quanti discreti, che dal 1926 saranno chiamati fotoni. La storia del fotone è affascinante ma esula da questa trattazione, basti qui osservare che la comunità scientifica ci metterà del tempo ad accettare la loro esistenza. Solo dopo la scoperta di Arthur H. Compton del 1922 dell'effetto che porta il suo nome, e dopo ulteriori verifiche sperimentali condotte in particolare nel 1925 da Walther Bothe e Hans W. Geiger e, indipendentemente, da Compton e Alfred W. Simon l'esistenza del fotone sarà definitivamente acquisita.

Nel frattempo, a partire in particolare dalla scoperta dell'elettrone, avevano preso le mosse le prime proposte di modelli atomici. È noto a tutti il cosiddetto "modello a panettone", di cui parla Kelvin nel 1902 e che viene sviluppato da J. J. Thomson tra il 1903 e il 1904: questo modello prevedeva una carica positiva diffusa dentro la quale erano collocati gli elettroni, in moto su orbite concentriche. Thomson era riuscito a dimostrare che il suo modello, pur basato sull'elettromagnetismo classico che prevede perdite di energia per cariche in moto accelerato, risultava stabile e permetteva una prima spiegazione della tavola periodica degli elementi. Rimaneva però il problema di giustificare le proprietà spettroscopiche. Era possibile unire l'idea di Planck di quanti discreti di energia con quelle del modello a panettone per ottenere una comprensione delle evidenze spettroscopiche e, più in generale, dei caratteri dell'interazione radiazione materia? Primi tentativi in questo senso furono fatti intorno al 1910 da Arthur Erich Haas. Tuttavia nel 1911 Ernst Rutherford, grazie ai risultati di esperimenti di collisione di particelle  $\alpha$  su sottili lamine d'oro condotti dai suoi collaboratori Hans Geiger e Ernest Marsden, arriva alla conclusione che il modello a panettone non è corretto: l'atomo è costituito da un nucleo di carica positiva di dimensioni piccole rispetto a quelle dell'atomo intorno al quale orbitano gli elettroni. Tuttavia, come osserva Bohr nell'introduzione alla sua trilogia, mentre il modello atomico di Thomson può essere dimostrato stabile nell'ambito dell'elettromagnetismo classico, ciò non avviene per quello di Rutherford. La sfida, a questo punto, è quella di costruire un modello atomico che cerchi di ricomporre in modo consistente i vari risultati sperimentali, e in particolare quelli relativi alle evidenze spettroscopiche.

Bohr a Manchester parte da qui. «Si pensava – ricorda Bohr in un'intervista del 1962 [2] – che [gli spettri] fossero meravigliosi, ma che non fosse possibile fare molti progressi in quel campo. Era come osservare l'ala di una farfalla, con la regolarità del disegno e i suoi bei colori: nessuno penserebbe di poter gettare le basi della biologia partendo dalla colorazione dell'ala di una farfalla». E invece proprio gli spettri degli elementi gli danno la chiave per aprire definitivamente la porta d'accesso ai segreti dell'atomo.

Il moto di un elettrone che ruota intorno al nucleo positivo è accelerato e quindi, secondo l'elettromagnetismo classico, dovrebbe perdere progressivamente energia irradiando, e cadere in un moto a spirale sul nucleo, in contrasto con quello che si osserva. D'altra parte Bohr è già convinto da tempo dei limiti di applicazione dell'elettromagnetismo classico su scala atomica. Nel primo articolo della trilogia osserva infatti che «esperimenti relativi a diversi fenomeni come i calori specifici, l'effetto fotoelettrico, i raggi X ecc.» sembrano tutti indicare la necessità di introdurre nelle leggi che descrivono i moti degli elettroni la costante  $h$  di Planck, una quantità estranea all'elettrodinamica classica. È tramite  $h$ , insieme alla massa  $m$  e la carica  $e$  dell'elettrone, che Bohr può fissare le grandezze che caratterizzano i moti degli elettroni sulle orbite nel modello atomico di Rutherford. Ipotizza infatti che gli elettroni si muovano su orbite ellittiche stazionarie con energia fissata. Queste costituiscono un insieme discreto di orbite stazionarie in ognuna delle quali l'energia è individuata da un numero quantico intero  $n$ :  $n=1$  individua lo "stato fondamentale", cioè quello più vicino al nucleo, mentre  $n=2, n=3, \dots$ , individuano stati di energia via via crescente, chiamati «stati eccitati». Il calcolo dei valori delle energie  $E_n$ , dei semiassi maggiori delle ellissi  $a_n$  e delle frequenze  $\nu_n$  delle orbite stazionarie viene fatto applicando «l'usuale meccanica» (essenzialmente l'equilibrio tra l'attrazione elettrostatica elettrone-nucleo e la forza centrifuga) e ipotizzando che  $E_n \propto nh\nu_n$ , in analogia con la proposta di Planck. Bohr arriva così a esprimere in particolare l'energia dei vari livelli nella forma  $E_n = (4\pi^2 me^4)/(2n^2 h^2)$ .

Alla fine del paragrafo, Bohr enuncia quali siano le principali assunzioni da lui utilizzate per arrivare alle formule di  $E_n$ ,  $\nu_n$  e  $a_n$ :

«(1) Che l'equilibrio dinamico dei sistemi negli stati stazionari può essere discusso con l'aiuto della usuale meccanica, mentre il passaggio dei sistemi tra due diversi stati stazionari non può essere trattato su questa base.

(2) Che quest'ultimo processo è seguito dall'emissione [o dall'assorbimento] di una radiazione *omogenea*, per la quale la relazione tra frequenza e quantità di energia emessa è quella data dalla teoria di Planck [ $E_n - E_p = h\nu_{np}$ ].»

Nell'elaborazione del modello gioca un ruolo essenziale la formula di Balmer generalizzata per le righe dello spettro dell'atomo di idrogeno. Modelli quantistici di atomo, per

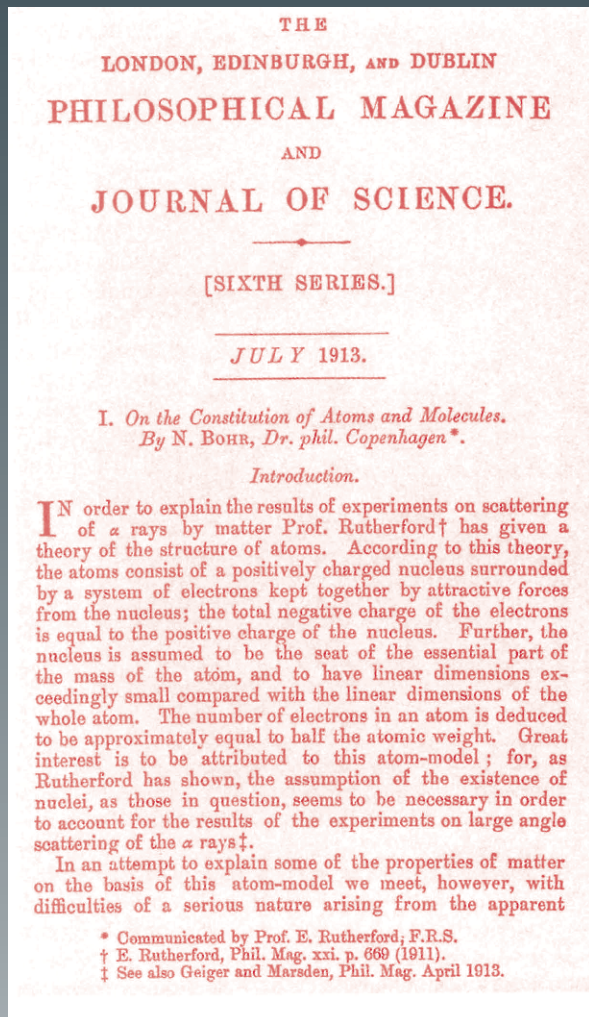


Fig. 5 Il frontespizio del primo articolo della trilogia di Bohr "On the Constitution of Atoms and Molecules" del luglio 1913.



Fig. 6 Henry Moseley nei primi mesi del 1913. I suoi lavori sono da Rutherford considerati di importanza paragonabile a quelli che hanno portato Mendeleev alla scoperta della tavola periodica.

il modello di Thomson e per quello di Rutherford, erano infatti già stati presentati tra il 1910 e il 1912: le frequenze di emissione erano state ricavate semplicemente calcolando in modo classico l'energia  $E$  di un elettrone orbitante in una sfera di carica positiva o intorno a un nucleo, e uguagliando  $E$  a multipli di  $h\nu$ . Tuttavia la serie di Balmer generalizzata prevede che le frequenze emesse o assorbite siano la differenza di due termini:

$$\nu_{np} = cR (1/n^2 - 1/p^2),$$

dove  $c$  è la velocità della luce,  $R$  è la costante di Rydberg, e  $n, p$  sono numeri interi con  $n$  sempre minore di  $p$  (cioè  $n = 1, 2, \dots$ , mentre  $p = 2, 3, \dots$ ), in particolare la serie di Balmer, come osserva Bohr, è quella ottenuta per  $n = 2$ . L'emissione o l'assorbimento non riguardano quindi l'energia dell'elettrone in una certa orbita ma il "salto" da un livello di energia a un altro. È l'uovo di Colombo per Bohr: avendo già a disposizione l'espressione per l'energia degli elettroni negli stati stazionari, Bohr può immediatamente ricavare la formula di Balmer generalizzata, nella quale la costante di Rydberg  $R$  per l'atomo di idrogeno è data da  $R = (2\pi^2 me^4)/(h^3 c)$  in funzione della velocità della luce  $c$ , della costante  $h$  di Planck e della massa  $m$  e della carica  $e$  dell'elettrone (per un elemento di numero atomico  $Z$ , basta sostituire  $e^4$  con  $Z^2 e^4$ ). Dando a  $c, m, e$  e  $h$  i valori sperimentali dell'epoca, Bohr ottiene  $cR = 3,1 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}$ , da confrontare con il valore  $3,29 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}$  ottenuto da misure spettroscopiche. Ne conclude che: «l'accordo tra il valore teorico e quello osservato è all'interno dell'incertezza dovuta agli errori di misura delle costanti che compaiono nell'espressione del valore teorico». È un passo importante per le future ricerche sperimentali e teoriche (fig. 5).

Il modello, per quanto semplice e frutto di ipotesi azzardate che mescolano fisica classica e quantistica, spiega in modo sorprendente lo spettro dell'atomo di idrogeno e degli atomi idrogenoidi. Inoltre, sempre nella trilogia del 1913, Bohr fornisce anche una prima spiegazione dei raggi X prodotti da elettroni orbitanti, e dei raggi  $\beta$  provenienti dal nucleo.

Due osservazioni possono chiarire quanto decisiva risultò all'epoca la proposta di Bohr [3, 4]. La prima riguarda il fatto che nell'atomo di Thomson la carica positiva, interpretata come una reazione dello spazio vuoto alla presenza degli elettroni, è priva di massa, per cui tutta la massa dell'atomo viene dalla massa degli elettroni. Un atomo di peso atomico  $A$  deve quindi contenere un numero di elettroni circa 2000 volte  $A$ : quindi l'idrogeno ( $A = 1$ ) avrebbe circa 2000 elettroni. Una simile conclusione si dimostra errata già nel 1906 sulla base di esperimenti condotti al Cavendish: il numero di elettroni contenuti in un atomo è dello stesso ordine del peso atomico dell'elemento e nel caso dell'idrogeno è

compreso tra 1 e 2. A partire dal 1911 si consolida l'idea che l'atomo di un generico elemento chimico sia costituito da un certo numero  $Z$  (numero atomico) di elettroni di carica  $-e$ , e da un piccolo corpo centrale di carica  $+Ze$ , nel quale è concentrata quasi tutta la massa atomica. L'affermazione che sia  $Z$  e non  $A$  a indicare la posizione dei diversi elementi nella tavola periodica è all'epoca ancora controversa: verrà proposta nel 1913 da Antonius Johannes van den Broek e definitivamente verificata sperimentalmente tra il 1913 e il 1914 da Henry Moseley (fig. 6), uno dei collaboratori di Rutherford a Manchester. L'atomo di Bohr costituisce il primo modello quantizzato che cerca di spiegare come le usuali caratteristiche chimiche e fisiche degli elementi emergano dalle proprietà del sistema di  $Z$  elettroni orbitanti intorno al nucleo.

La seconda osservazione concerne la composizione del nucleo atomico e la radioattività. All'epoca non si conoscono ancora né il protone (scoperto nel 1919), né il neutrone (scoperto nel 1932); non si esclude, anzi si ipotizza la presenza di elettroni nel nucleo (un'ipotesi abbandonata solo negli anni Trenta grazie alla teoria di Fermi del decadimento  $\beta$ ). Sull'origine nucleare dei raggi  $\alpha$ , almeno tra i fautori del modello atomico di Rutherford, c'era generale consenso: le cariche positive infatti si trovavano solo nel nucleo e quindi solo da lì potevano provenire. Per i raggi  $\beta$ , invece, la questione è controversa e, ancora nell'autunno del 1912, Rutherford ipotizza un legame tra raggi  $\beta$  ed espulsione di elettroni orbitanti intorno al nucleo. Bohr invece nella trilogia del 1913 conclude che il decadimento  $\beta$  derivi da elettroni emessi dal nucleo.

#### 4 Sviluppi successivi dell'atomo di Bohr e spiegazione della tavola periodica degli elementi

Nel luglio del 1913, Bohr ottiene dall'Università di Copenhagen la nomina a docente di fisica per gli studenti di medicina. L'incarico però gli lascia poco tempo per la ricerca e gli preclude la possibilità di formare studenti che possano lavorare con lui. Così nel marzo del 1914 chiede all'Università di istituire una cattedra di fisica teorica.

Nel maggio dello stesso anno, Rutherford offre a Bohr un posto di docente all'Università di Manchester. Bohr accetta immediatamente e, con qualche ritardo dovuto all'inizio della prima guerra mondiale, arriverà a Manchester insieme alla moglie nell'ottobre del 1914. L'idea è quella di rimanere a Manchester solo un anno, sperando che nel frattempo venga istituita la cattedra di fisica teorica a Copenhagen. Ma la guerra rallenta l'iter d'istituzione della cattedra, e i coniugi Bohr rimarranno a Manchester fino al luglio del 1916.

Come cittadino di uno stato neutrale, Bohr non può partecipare a nessuna delle attività di ricerca legate alla guerra svolte dal gruppo di Rutherford. Ha quindi

la possibilità di dedicarsi a tempo pieno ai suoi studi e all'insegnamento, anche se non può certo rimanere indifferente al nuovo clima creato dalla guerra. Questa esperienza susciterà in lui una serie di riflessioni più generali sui rapporti tra scienza e guerra, che lo prepareranno ad affrontare la ben diversa situazione nella quale si troverà nel corso del secondo conflitto mondiale.

Negli anni trascorsi a Manchester Bohr si impegna nel raffinamento del suo modello atomico facendo tesoro di una serie di nuovi risultati sperimentali, dei quali elenchiamo brevemente i principali. Dopo alcune osservazioni preliminari fatte a partire dal 1887, i progressi compiuti dall'indagine spettroscopica portano nel 1914 alla conclusione che la formula di Balmer non è esatta: le righe ordinarie dello spettro dell'atomo di idrogeno sono in realtà costituite da doppietti o multipletti di righe, manifestano cioè quella che verrà in seguito chiamata "struttura fine". Più o meno nello stesso torno di tempo, nel novembre del 1913, Stark annuncia una sua fondamentale scoperta: l'azione di un campo elettrostatico sull'atomo d'idrogeno determina uno sdoppiamento delle righe della serie di Balmer. Questo effetto, scoperto indipendentemente nello stesso anno anche da Antonino Lo Surdo, è da allora noto come effetto Stark. Un effetto simile era già stato osservato da Pieter Zeeman nel 1896 nel caso dell'applicazione di un campo magnetico esterno alle righe spettrali di un atomo di sodio (oggi noto come effetto Zeeman normale) e, per campi magnetici intensi, da Thomas Preston nel 1897 (oggi noto come effetto Zeeman anomalo). In altri termini in presenza di campi elettrici o magnetici le righe degli spettri atomici si dividono in due o più righe.

Bohr, sollecitato da questi risultati, avvia una serie di ricerche nelle quali comincia ad applicare al suo modello di atomo la relatività ristretta. In assenza però di una rigorosa formalizzazione della teoria, Bohr conduce i suoi calcoli mescolando le equazioni note della dinamica classica e relativistica con le ipotesi quantistiche, e utilizzando in modo accorto principi euristici più o meno fondati. Tra questi menzioniamo in particolare "il principio di analogia" o "principio di corrispondenza" secondo il quale, come già osservato da Einstein nel 1909 nelle sue ricerche sui rapporti tra quanti del campo elettromagnetico ed elettrodinamica classica [5], nel limite delle basse frequenze (cioè nel limite di  $n$  grandi) il comportamento quantistico lascia il posto a quello classico.

A partire dai contributi pionieristici di Bohr nel settore, molti altri ricercatori si cimentano con i problemi della spiegazione della struttura fine e degli effetti Stark e Zeeman. Tra questi ci limitiamo a citare solo alcuni nomi. Innanzi tutto quello di Arnold Sommerfeld (fig. 7) che nel 1916, partendo dai lavori di Bohr, ricava la corretta espressione della struttura fine delle righe dello spettro dell'atomo di idrogeno, introducendo

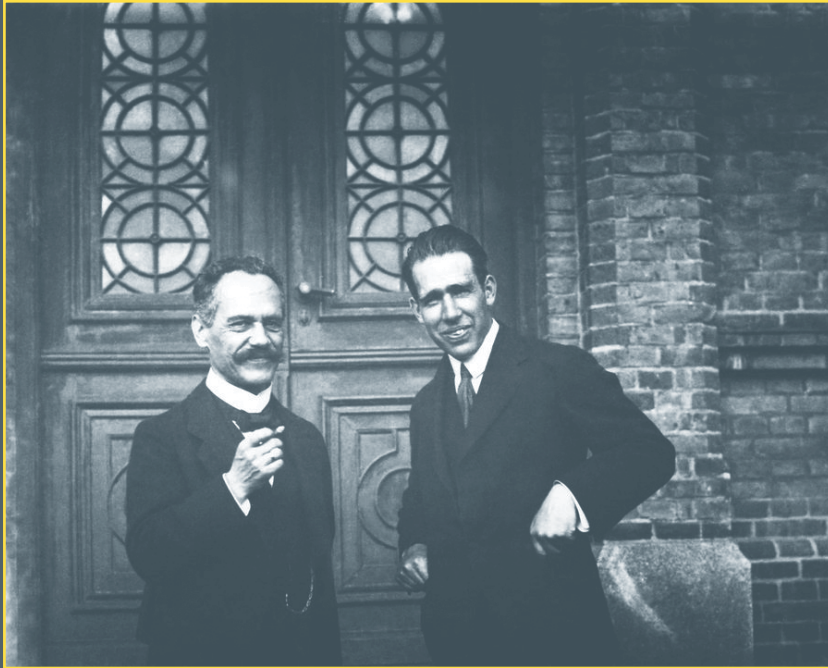


Fig. 7 Arnold Sommerfeld insieme a Bohr nel 1917.  
Crediti: Emilio Segrè Visual Archives.

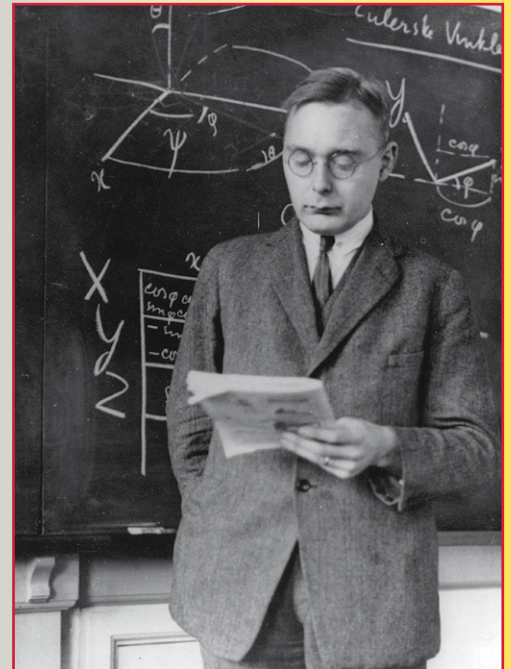


Fig. 8 Hendrik Anthony Kramers che dal 1916 al 1926 sarà il principale collaboratore di Bohr.

oltre al numero quantico principale  $n$  un nuovo numero quantico "azimutale"  $k$  (legato al momento angolare  $l$  dalla relazione  $k=l+1$ ) e un terzo numero quantico  $m$  (poi identificato con la proiezione del momento angolare  $l$  lungo una direzione fissata). L'approccio di Sommerfeld si basa sull'applicazione, nell'ambito della descrizione quantistica dell'atomo, di alcuni metodi matematici eleganti e generali (i cosiddetti "integrali di fase"), mutuati dalla trattazione della dinamica dei sistemi periodici nell'ambito della meccanica analitica classica. È così che Sommerfeld riesce a trattare le orbite ellittiche giustificando l'introduzione dei nuovi numeri quantici. Inoltre è il primo a esprimere compiutamente la correzione relativistica al moto dell'elettrone. È in questo lavoro di Sommerfeld che comparirà per la prima volta quella che oggi è nota come costante di struttura fine  $\alpha = (2\pi e^2)/(hc)$ , dove  $e$  è la carica dell'elettrone,  $h$  è la costante di Planck e  $c$  la velocità della luce.

Nello stesso anno, indipendentemente, Paul Sophus Epstein, collaboratore di Sommerfeld, e Karl Schwarzschild propongono

una spiegazione dell'effetto Stark. La formula ottenuta da Epstein e Schwarzschild, che esprime i valori dell'energia dei diversi livelli in funzione di  $n$ ,  $k$  e  $m$ , verrà ulteriormente estesa da Bohr e dal suo collaboratore Hendrik Anton Kramers negli anni 1918-1919, ricorrendo al principio di corrispondenza. Tutti questi successi, ancorché parziali, sono ottenuti nell'ambito della vecchia teoria dei quanti nella quale si parla ancora di orbite classiche degli elettroni, ancorché contrassegnate dai tre numeri quantici.

Nei due fecondi anni passati a Manchester, oltre agli articoli che daranno impulso ai lavori sulla struttura fine, sull'effetto Stark e sull'effetto Zeeman (normale e anomalo), Bohr comincia ad abbozzare il progetto che lo porterà nel 1922 alla spiegazione della tavola periodica, il punto di sintesi più alto della vecchia teoria dei quanti alla vigilia della meccanica quantistica.

Nel frattempo, nel maggio del 1916, viene ufficialmente istituita la cattedra di fisica teorica, e nel luglio dello stesso anno Bohr rientra in Danimarca insieme alla moglie come professore

di fisica teorica. Nell'autunno del 1916 si verificano due eventi importanti nella vita di Bohr: la nascita del primo figlio, Christian Albert, e l'incontro con Kramers (fig. 8). Christian Albert sarà il primo dei sei figli che i coniugi Bohr avranno tra il 1916 e il 1927: seguiranno Hans, Erik, Aage (premio Nobel per la fisica nel 1975), Ernest e Harald. Se la nascita del figlio segna l'inizio di una nuova stagione nella vita privata di Niels e Margrethe, l'incontro con Kramers è l'inizio di una nuova fase nella vita scientifica di Bohr. La collaborazione di Bohr con Kramers, infatti, si rivelerà negli anni successivi decisiva sia per gli sviluppi delle ricerche di Bohr sia per la scoperta della meccanica quantistica. Kramers, che si è appena laureato a Leida studiando con Lorentz e Ehrenfest, chiede di poter proseguire i suoi studi di dottorato sotto la supervisione di Bohr; alla fine lavoreranno insieme, più o meno ininterrottamente fino al 1926, quando Kramers tornerà in Olanda chiamato sulla cattedra di fisica dell'Università di Utrecht.

L'arrivo di Kramers e l'inizio dell'attività di insegnamento diretta alla



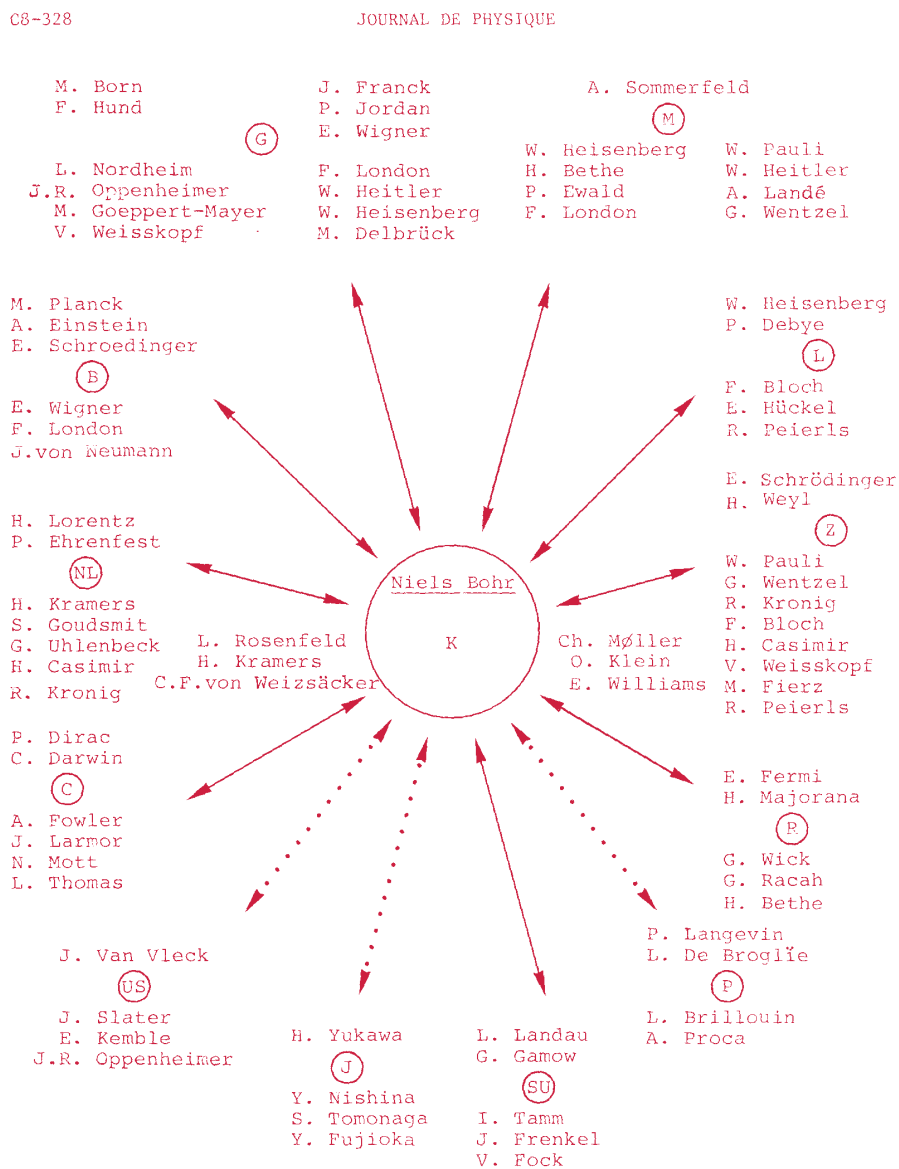
formazione di giovani fisici pongono a Bohr il problema di trovare spazi adeguati per la ricerca. Lo studio a sua disposizione al Løreanstalt si dimostra ben presto insufficiente, e l'assenza di un laboratorio attrezzato è in aperto contrasto col suo modo di concepire la ricerca nell'ambito della fisica atomica. Per queste ragioni, dall'aprile del 1917 Bohr si adopera per la fondazione di un Istituto di fisica teorica, in cui vengano create le condizioni per la crescita e lo sviluppo di questo campo in Danimarca. Fin dall'inizio Bohr concepisce l'Istituto come un centro di ricerca dove l'attività teorica deve svolgersi a stretto contatto con quella sperimentale.

Questa impostazione, ribadita da Bohr al momento dell'inaugurazione ufficiale dell'*Institut for Teoretisk Fysik*, il 3 marzo 1921, ispirerà non solo l'organizzazione dell'attività di ricerca dell'Istituto e dell'annesso laboratorio, ma più in generale anche tutte le azioni da lui condotte per istituire nuovi centri di ricerca, in Danimarca e in Europa, a partire dal secondo dopoguerra.

Nel giro di pochi anni l'Istituto di fisica teorica di Copenhagen (chiamato dal 1965 Istituto Niels Bohr) diventerà il principale punto di riferimento nel passaggio dalla vecchia teoria dei quanti alla meccanica quantistica. Come scrive Weisskopf, in un suo intervento al Congresso internazionale sulla storia della fisica delle particelle tenutosi a Parigi nel luglio del 1982: «La scoperta della meccanica quantistica fu il risultato degli sforzi di molti scienziati, al contrario della teoria della relatività. Ma ci fu un centro di questo sviluppo: *Copenhagen*, con Niels Bohr come figura guida. A Copenhagen, quasi ogni anno, si tenne una conferenza, e sempre a Copenhagen molti dei più attivi fisici teorici trascorsero periodi di tempo più o meno lunghi, presentando le loro idee in forma ancora incompleta a Niels Bohr e con lui discutendole. Molte delle idee fondamentali della meccanica quantistica sono state messe a fuoco proprio nel corso di quelle

discussioni con Bohr, molte più di quanto la letteratura sembri indicare: Bohr, infatti, solo raramente ha messo il suo nome sugli articoli. È questa la ragione per cui nella figura (fig. 9) le più

importanti scuole di fisica teorica che hanno contribuito alla teoria quantistica sono rappresentate in cerchio intorno a quella di Copenhagen» [6].



Schools of theoretical physics in the years of the foundation of QM

Abbreviations

G - Göttingen, M - Munich, L - Leipzig, Z - Zurich, R - Rome,  
P - Paris, SU - USSR, J - Japan, US - USA, C - Cambridge (UK)  
NL - Holland, B - Berlin, K - Copenhagen.

Fig. 9 Schema, presentato da Weisskopf in [6], dell'influenza esercitata da Bohr sulle scuole di fisica teorica che hanno contribuito alla nascita e ai primi sviluppi della teoria quantistica.

## 5 Dalla vecchia teoria dei quanti alla meccanica quantistica

Nonostante gli impegni di politica accademica, tra il 1917 e il 1918 Bohr farà notevoli progressi nella comprensione della struttura dell'atomo. Le sue ricerche prendono le mosse da un suo articolo di rassegna delle applicazioni della teoria dei quanti ai sistemi periodici, scritto a Manchester nell'aprile del 1916 ma non pubblicato. La revisione e l'ampliamento di questo articolo costituiscono l'argomento della memoria che Bohr pubblica in tre parti, le prime due nel 1918 e la terza nel 1922, dal titolo *Sulla teoria quantistica degli spettri di righe*. Bohr pone alla base della sua trattazione due principi: il principio di corrispondenza e il principio di costruzione [3, 4]. Il primo è ora applicato a elettroni che non si muovono più su orbite complanari, ma su orbite inclinate le une rispetto alle altre, a formare una sorta di nuvola o guscio sferico le cui dimensioni sono fissate da  $n$ . Il secondo principio consiste nella proposta di Bohr che la struttura di un atomo di numero atomico  $Z$  possa essere vista come il risultato della successiva aggiunta degli  $Z$  elettroni, uno alla volta, al nucleo inizialmente privo di elettroni orbitanti. Questo "principio di costruzione" si basa sull'ipotesi che i numeri quantici degli elettroni già presenti nell'atomo in formazione non vengano alterati dall'aggiunta di un nuovo elettrone (fig. 10).

Una volta completata la costruzione dell'atomo è necessario tenere conto del fatto che quando gli elettroni

più esterni si muovono su orbite ellittiche possono penetrare nel guscio sferico formato dalle orbite degli elettroni più interni. Tale "effetto di penetrazione delle orbite" nella zona centrale dell'atomo fa pensare, osserva Bohr, che l'elettrone, quando si trova all'interno del guscio sferico centrale si muova su un'orbita molto simile a quella esterna, ma con numero quantico principale diverso. L'idea delle orbite penetranti viene proposta da Bohr nel dicembre del 1920 e avanzata indipendentemente da Schrödinger in un articolo del gennaio del 1921. Tuttavia Bohr è il primo ad applicarla sistematicamente a tutti gli elementi della tavola periodica. Su queste basi Bohr è in grado di spiegare le deviazioni osservate nella successione degli elementi nella tavola periodica nel caso degli elementi di transizione: per ragioni di stabilità dell'atomo, prima si riempiono gli stati corrispondenti a orbite ellittiche con  $n$  maggiore e poi si riempiono gli stati dell'orbita circolare con  $n$  minore. La particolare somiglianza delle proprietà chimico fisiche dei lantanidi ( $Z$  superiori a 57), che insieme al lantanio, l'ittrio e lo scandio, costituiscono le "terre rare", è dovuta al fatto che tutti questi hanno tre elettroni di valenza, mentre i vari elettroni successivamente aggiunti vanno ad occupare le orbite rimaste vuote con  $n=4$ . Da qui Bohr conclude che i lantanidi dovrebbero essere 14 (all'epoca se ne conoscono solo 13, il promezio con  $Z=61$  sarà scoperto solo nel 1947), e che l'elemento sconosciuto con  $Z=72$  non dovrebbe essere una terra rara ma un elemento



Fig. 10 Una pagina degli appunti di Bohr risalente agli anni 1920-21 dove affronta il problema delle orbite degli elettroni per spiegare l'ordinamento degli elementi nella tavola periodica. Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.

affine allo zirconio ( $Z=40$ ). Bohr inoltre osserva che un'irregolarità analoga a quella dei lantanidi si riscontra subito dopo l'attinio ( $Z=89$ ), ed ipotizza quindi l'esistenza di un secondo gruppo di "terre rare", i cosiddetti attinidi, comprendente l'uranio e tutta una serie di elementi transuranici, all'epoca ancora sconosciuti (alcuni sarebbero stati scoperti a partire dagli anni 1940). Una prima clamorosa verifica dell'interpretazione di Bohr della tavola periodica arriva da George de Hevesy e Dirk Coster, entrambi in quegli anni a Copenhagen, che scoprono l'elemento 72 e la sua affinità con lo zirconio. Al nuovo elemento, la cui scoperta verrà comunicata a Bohr che si trova a Stoccolma per il conferimento del premio Nobel, verrà attribuito il nome di *afnium*, dal nome latino *Hafniae* di Copenhagen.

L'introduzione da parte di Pauli tra gennaio e febbraio del 1925 di un quarto numero quantico  $s$  dell'elettrone a due valori seminteri (quello che in seguito verrà chiamato spin dell'elettrone, scoperto nell'ottobre del 1925 da George E. Uhlenbeck e Samuel A. Goudsmit) e del principio di esclusione permettono di arrivare in maniera più diretta, e senza far ricorso al principio di corrispondenza, all'interpretazione della tavola periodica data da Bohr. Siamo ormai alle soglie della meccanica quantistica: nel luglio del 1925 infatti Heisenberg (fig. 11) introdurrà un primo abbozzo di quella che è oggi nota come meccanica delle matrici e nel gennaio del 1926 Schrödinger pubblica la prima delle quattro parti dell'articolo che inaugura la meccanica ondulatoria. L'equivalenza predittiva delle due teorie verrà dimostrata nel marzo del 1926 da Schrödinger.

Tra il 1926 e il 1927 molti degli artefici della meccanica quantistica passano qualche tempo all'Istituto di Copenhagen. Bohr ha così occasione di discutere, a più riprese, dei problemi dell'interpretazione della nuova teoria



Fig. 11 La famiglia Bohr insieme a Heisenberg durante il suo primo soggiorno a Copenhagen (circa 1924). Crediti: Niels Bohr Archive, Copenhagen.

con Dirac, Heisenberg, Schrödinger, Pauli e molti altri. Frutto di quelle discussioni saranno la scoperta delle *relazioni di indeterminazione* da parte di Heisenberg, pubblicate in un articolo nel marzo del 1927, e l'introduzione del *principio di complementarità*, proposto da Bohr per la prima volta nella sua relazione al Congresso per il centenario voltiano, svoltosi a Como nel settembre del 1927.

Bohr arriva alla formulazione del *principio di complementarità*, una sorta di fondamento "filosofico" delle relazioni di indeterminazione, riflettendo sul dualismo tra onda e corpuscolo alla ricerca di una risposta alla domanda: perché la nuova teoria è stata formulata in due modi matematicamente e concettualmente così diversi (la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria) eppure predittivamente equivalenti?

I tratti salienti del principio di complementarità possono essere desunti dal suo intervento al Congresso

di Como (vedi vol. 1 in [7]). «La nostra interpretazione dei dati sperimentali – scrive Bohr – si basa essenzialmente sui concetti classici», è per questo che ci poniamo il problema se un elettrone sia un'onda o un corpuscolo. Nel caso classico, però, la relazione tra oggetto osservato e strumento di misura può essere, almeno in linea di principio, controllata perfettamente, e quindi, se l'elettrone è un corpuscolo non è un'onda, o viceversa: in altre parole il fisico classico è in grado di dedurre dal risultato della misura che una delle due descrizioni è errata. Nel caso quantistico invece «una realtà indipendente nel senso fisico usuale [classico] del termine non può essere attribuita né al fenomeno né agli strumenti di misura», quindi il fisico quantistico ne deduce che l'elettrone è un'onda o un corpuscolo a seconda dello strumento di misura utilizzato. Per evitare i presunti paradossi legati al dualismo onda-corpuscolo bisogna tener presente il nuovo nesso che la teoria

quantistica introduce tra oggetto e strumento di misura. Questa situazione è chiamata da Bohr *complementarità* ed espressa nel seguente principio: «La natura stessa della teoria quantistica ci obbliga a considerare l'attribuzione di coordinate spazio-temporali [propria del comportamento corpuscolare] e l'enunciato di causalità [proprio del comportamento ondulatorio], l'unione dei quali caratterizza le teorie classiche, come aspetti complementari, ma mutuamente esclusivi della descrizione». Per ottenere «una generalizzazione naturale del modo classico di descrivere le cose», conclude Bohr, è necessario considerare l'insieme delle rappresentazioni mutuamente esclusive dei fenomeni.

Bohr spera di incontrare Einstein al Congresso di Como per discutere con lui la sua nuova interpretazione della meccanica quantistica. Einstein però non è presente a Como, ma i due hanno l'opportunità di incontrarsi un mese dopo, nell'ottobre del 1927, a Bruxelles al V Congresso Solvay (fig. 12).

Inizia in quell'occasione quello che è oggi conosciuto come "il dibattito Einstein-Bohr". In una prima fase, segnata dal V Congresso Solvay e dal successivo VI Congresso Solvay dell'ottobre del 1930, la discussione tra i due scienziati si incentra sull'analisi di esperimenti mentali che Einstein propone con l'intento di dimostrare l'inconsistenza della

meccanica quantistica. Nella fase successiva, Einstein sembra essersi convinto della consistenza della teoria e cerca di dimostrare che essa non fornisce una descrizione completa dei fenomeni fisici; questa fase culmina nella pubblicazione del 1935 sul *Physical Review* dell'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen dal titolo *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, al quale segue la replica di Bohr contenuta in un articolo con lo stesso titolo [8]. Questi due articoli del 1935 concludono il dibattito pubblico tra Einstein e Bohr. Ciò non toglie che, a più riprese, specie nei periodi di permanenza di Bohr all'*Institute for Advanced Studies* di Princeton (nel 1939, nel 1948 e nel 1954), i due abbiano ancora occasione di confrontarsi sui problemi interpretativi della meccanica quantistica.

Negli interventi di Einstein e Bohr, che si trovano nella raccolta curata da P. A. Schilpp nel 1949 [9], i due protagonisti ricostruiscono in prima persona le fasi salienti attraversate dal dibattito e le idee che lo hanno animato. Qui ci limitiamo soltanto ad alcune riflessioni generali. L'immagine più diffusa nella letteratura è quella che contrappone un Einstein arroccato su posizioni anacronistiche a un Bohr mentore della nuova fisica. Tuttavia una contrapposizione siffatta finisce per semplificare troppo i termini del dibattito.

Einstein non si oppone alla meccanica quantistica in



Fig. 12 V Congresso Solvay, 1927. In piedi: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, J. E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. Fowler, L. Brillouin. Seduti seconda fila: P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A. H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr. Seduti davanti: I. Langmuir, M. Planck, M. Skłodowska-Curie, H. A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch.-E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson.

quanto tale, ma piuttosto all'idea di considerarla l'ultima risposta nell'ambito dei fenomeni microfisici. Secondo Einstein deve esistere una teoria più generale della quale la meccanica quantistica è solo il livello fenomenologico, un po' come la termodinamica è il livello fenomenologico della meccanica statistica nell'ambito delle teorie classiche. In altri termini, come la meccanica statistica spiega le leggi della termodinamica riducendole a quelle causali della dinamica newtoniana di grandi numeri di particelle, così deve esistere una teoria che spieghi le leggi della meccanica quantistica. Nella teoria più generale il ruolo svolto dallo strumento di misura non deve essere più considerato inanalizzabile, come pretende Bohr, ma deve trovare una sua precisa descrizione matematica e fisica.

Un altro punto che differenzia la posizione di Einstein da quella di Bohr riguarda il progresso della conoscenza fisica. Per Einstein una teoria più generale deve poter essere formulata in modo logicamente chiuso, cioè indipendente da una teoria meno generale che ne costituisce un caso limite. Einstein ovviamente pensa alle teorie della relatività (ristretta e generale). Queste teorie, a suo avviso, rappresentano un passo avanti rispetto alla meccanica classica perché permettono di trattare un dominio di fenomeni più ampio sulla base di principi fondamentali loro propri. Per questo le equazioni che esprimono la relatività possono essere formulate senza riferimento a quelle della meccanica classica. La meccanica classica, tuttavia, può essere ricavata dalle teorie relativistiche come una descrizione approssimata dei fenomeni, un'approssimazione tanto migliore quanto più piccole sono le velocità in gioco rispetto alla velocità della luce, e quanto più deboli sono i campi gravitazionali.

A differenza di quanto avviene nelle teorie della relatività, la formulazione dei principi fondamentali della meccanica quantistica è, secondo Bohr, intrinsecamente impossibile senza ricorrere alla meccanica classica. La meccanica quantistica, infatti, pur contenendo la meccanica classica come buona approssimazione dei fenomeni quando le azioni in gioco sono molto più grandi del quanto d'azione  $h$ , ha bisogno della meccanica classica per la sua stessa fondazione, come dimostra la necessità di usare oggetti classici (gli strumenti di misura) per ottenere informazioni dal mondo microfisico. Per Einstein questa singolarità della meccanica quantistica è da considerarsi solo come un carattere provvisorio che dovrà essere superato con l'avvento di una nuova e più completa teoria, mentre per Bohr è perfettamente in linea con la sua concezione di progresso della conoscenza scientifica.

In questo senso, per Bohr il principio di complementarità non è solo la chiave interpretativa della meccanica quantistica, ma un principio generale della conoscenza umana [7], il punto di approdo di una serie di riflessioni da lui avviate fin dall'epoca in cui assisteva alle discussioni del

circolo di amici di suo padre. Un esempio significativo delle idee di Bohr si trova nel suo intervento dal titolo *Luce e vita*, tenuto nell'agosto del 1932 a Copenhagen al Congresso di elioterapia, dove applica la complementarità alla biologia (vedi vol. 2 in [7]). In esso Bohr sostiene l'esistenza di «una mutua esclusione tra aspetti tipici della vita come la conservazione o la generazione degli individui, da una parte, e la suddivisione necessaria ad ogni analisi fisica dall'altra. Proprio per questo essenziale carattere di complementarità, il concetto di fine, che è estraneo all'analisi meccanica, trova un certo campo di applicazione in biologia». Per inciso, è proprio l'interesse suscitato da questa relazione a determinare una delle prime "conversioni" di un fisico, Max Delbrück (fig. 13) premio Nobel per la medicina nel 1969, alle scienze biomediche.

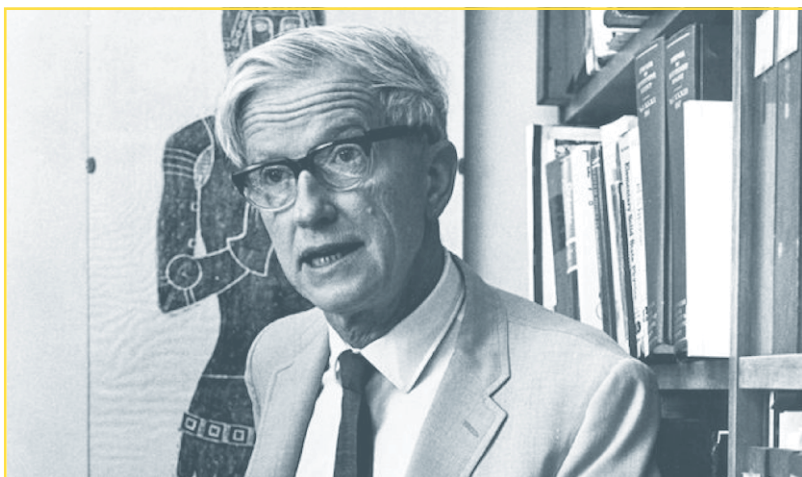


Fig. 13 Max Delbrück, premio Nobel per la medicina nel 1969, uno dei primi fisici a rivolgere i suoi interessi scientifici alle scienze della vita. Crediti: Caltech Archives.

## 6 Dalla fisica del nucleo all'impegno politico

Nell'estate del 1932 la famiglia Bohr si sposta a Carlsberg nell'Aeresbolig, la "Residenza onoraria delle birrerie Carlsberg" dove Niels abiterà per il resto dei suoi giorni.

Dalla metà degli anni Trenta a Copenhagen, come in molti altri centri di ricerca, l'indagine fisica viene indirizzata verso il nuovo settore della fisica nucleare. Anche in questo settore i contributi di Bohr e della sua scuola saranno rilevanti.

Uno dei problemi centrali dell'epoca riguarda le caratteristiche dell'assorbimento dei neutroni da parte del nucleo: come dar conto del fatto, sperimentalmente osservato, che il neutrone ha un'alta probabilità di essere "catturato" dal nucleo solo per particolari valori della sua energia che costituiscono una sequenza discreta di "energie risonanti"?

Tra il 1935 e il 1936 Bohr affronta questo problema proponendo un modello che visualizza il nucleo utilizzando un'analogia classica, ripresa dai suoi lavori giovanili sulla tensione superficiale dei liquidi. Il nucleo è concepito da Bohr come un insieme di neutroni e protoni tenuti insieme da forze a corta distanza, il cui comportamento è simile a quello delle molecole che formano una *goccia di liquido*. L'energia di un neutrone che urta il nucleo viene immediatamente distribuita all'intero sistema, con il risultato che nessuna particella avrà abbastanza energia per uscire dal nucleo. Il neutrone catturato forma con il nucleo originale un "nucleo composto" in uno stato di alta eccitazione. Lo stato eccitato del nucleo composto sarà soggetto a decadimento non appena una qualche fluttuazione casuale nella distribuzione di energia al suo interno concentrerà abbastanza energia su una o più particelle al suo interno causandone la fuoriuscita con un processo analogo all'evaporazione in una goccia di liquido surriscaldato. Ovviamente, la densità dei possibili stati del nucleo composto cresce col crescere dell'energia e questo spiega l'assenza di effetti di risonanza per neutroni veloci e la loro presenza nel caso di neutroni lenti.

Bohr pubblica le sue idee nel 1936 in un articolo su *Nature* dal titolo "Neutron Capture and Nuclear Constitution", essenzialmente qualitativo. Sulla linea del modello di Bohr, ma con un approccio completamente diverso e più generale, anche Gregory Breit e Eugene Wigner risolvono la questione pubblicando nello stesso anno sul *Physical Review* un articolo dal titolo "Capture of Slow Neutrons", dove arrivano all'espressione della sezione d'urto in vicinanza dell'energia di risonanza nelle reazioni nucleari. Il modello a goccia manterrà a lungo il suo potere euristico e sarà ulteriormente sviluppato da Bohr, tra il

1936 e il 1939, in collaborazione prima con Fritz Kalckar, poi con Rudolf Peierls e George Placzek, e infine con John Wheeler.

Queste ricerche di Bohr, in particolare quelle svolte con Wheeler nel 1939, hanno che fare con nuove evidenze sperimentali provenienti dalle indagini sulla produzione di radioisotopi artificiali e dalle loro applicazioni. Infatti, tra il 1934 e il 1939, a partire dalle esperienze condotte a Roma dal gruppo di Fermi (fig. 14), si diffonde l'utilizzo sistematico di fasci di neutroni

come strumento di sviluppo della fisica nucleare.

Si ottengono così importanti risultati in almeno tre settori di ricerca, nei quali l'Istituto di Copenhagen risulta all'avanguardia. Il primo è la definitiva conferma dell'esistenza di elementi transuranici, ipotizzati per la prima volta da Bohr. Il secondo settore riguarda lo sviluppo delle tecniche di tracciamento mediante isotopi radioattivi applicate in ambito biomedico, che in questa fase è merito quasi esclusivo del gruppo che a Copenhagen lavora



Fig. 14 I "ragazzi di via Panisperna": da sinistra, Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Enrico Fermi. Crediti: Emilio Segrè Visual Archives, Segrè Collection.

sotto la supervisione di de Hevesy. Il terzo settore è quello inaugurato dalla scoperta della fissione nucleare, su cui vale la pena soffermarsi. Fino al 1938 non si erano mai osservate nelle reazioni nucleari variazioni del numero atomico superiori a 2. Ma a dicembre del 1938 Otto Hahn e Fritz Strassman, proseguendo ricerche avviate con Lise Meitner, osservano che nel bombardamento dell'uranio ( $Z=92$ ) con neutroni si sono prodotti isotopi del bario ( $Z=56$ ). Essi comunicano subito i loro risultati alla Meitner, costretta a emigrare in Svezia a causa delle leggi naziste sulla razza.

Sulla base del modello a goccia di Bohr, la Meitner e Otto Frisch concludono, in un articolo pubblicato a febbraio su *Nature* [10], che il movimento collettivo delle particelle che costituiscono il nucleo possa essere perturbato così violentemente dall'aggiunta di energia, da determinare una divisione della goccia originaria in due gocce più piccole. In quei mesi Bohr si trova negli Stati Uniti e pubblica insieme a Wheeler un lavoro che costituisce la prima analisi teorica del meccanismo di fissione proposto da Frisch e Meitner.

Dagli Stati Uniti Bohr torna a Copenhagen pochi mesi prima dell'occupazione tedesca della Danimarca, che avverrà il 9 aprile del 1940. I rapporti internazionali che negli anni ha intrattenuto con scienziati provenienti da vari paesi, il grande prestigio di cui gode, l'indubbia competenza nell'ambito della fisica nucleare e le sue capacità organizzative fanno sì che da più parti gli giungano sollecitazioni a impegnarsi in progetti scientifici a scopo militare. Probabilmente il primo a tentare di coinvolgere Bohr in questo senso è Heisenberg, che va a trovarlo a Copenhagen nel settembre del 1941. Anche se il ruolo sostenuto da Heisenberg nel progetto di costruzione di armi nucleari da parte

tedesca continua a rimanere a tutt'oggi controverso, certo è, come scrive Pais, che «le relazioni tra Bohr e Heisenberg, dopo la guerra, non furono più così strette come ai vecchi tempi» [3]. Nei due anni successivi la situazione in Danimarca peggiora e il 29 settembre del 1943 Bohr lascia il suo paese e raggiunge l'Inghilterra.

Arrivato in Inghilterra, Bohr si rende conto che le ricerche miranti alla costruzione delle armi nucleari sono molto più avanzate di quanto avesse immaginato. Sebbene prenda parte, sia in Inghilterra sia negli Stati Uniti, alle discussioni sui problemi fisici legati allo sviluppo delle armi nucleari (trascorre tra l'altro alcuni periodi nel laboratorio segreto di Los Alamos), la sua principale preoccupazione in quel periodo è di sensibilizzare scienziati e uomini di governo riguardo alle implicazioni politiche e umane delle nuove armi. Ecco perché in quegli anni Bohr si prodiga per convincere Roosevelt e Churchill a stabilire subito contatti con l'Unione Sovietica per creare le premesse per una mutua cooperazione tra Ovest e Est necessaria a garantire la pace futura.

Le sue idee vengono apprezzate da molti scienziati, compreso Oppenheimer che all'epoca dirigeva il laboratorio di Los Alamos, ma i suoi sforzi per convincere i Capi di Stato si risolvono in un fallimento e i successivi sviluppi non fanno che confermare le sue più buie previsioni. Nonostante ciò, anche dopo il suo rientro in Danimarca il 25 agosto del 1945, Bohr continua a impegnarsi, sia nella politica sia nella scienza, nel tentativo di concretizzare il suo ideale di una cooperazione pacifica tra i popoli.

Sul piano politico il suo intervento più significativo è la *Lettera aperta alle Nazioni Unite* del 9 giugno 1950 [11]. In essa Bohr sostiene che le armi nucleari creano una situazione di pericolo mai incontrata prima dall'umanità. Ma proprio perché minacciano ugualmente

tutte le nazioni, esse offrono un'opportunità unica per raggiungere un universale accordo a non farne uso, da cui può scaturire un'era di pace duratura. «Qualunque garanzia – scrive Bohr – che il progresso delle scienze sia usato solo a beneficio del genere umano presuppone lo stesso tipo di atteggiamento di quello richiesto per realizzare la cooperazione tra le nazioni in tutti i settori della cultura. [...] Oggi infatti è più necessario che mai rendersi pienamente conto dei doveri e delle responsabilità che l'essere cittadini del mondo comporta. [...] Il fine da porre sopra ogni altro è quello di un mondo aperto, nel quale ciascuna nazione possa affermarsi solo nei limiti in cui sia in grado di contribuire alla cultura comune e di aiutare le altre grazie alla propria esperienza e alle proprie risorse», un mondo nel quale «sono rimossi gli ostacoli alla libera informazione reciproca e al libero scambio».

La lettera di Bohr, che suona oggi particolarmente attuale, non ha all'epoca particolari effetti. Diversa fortuna hanno invece le sue iniziative dirette a favorire la collaborazione internazionale in ambito scientifico. Coerentemente alle motivazioni che l'hanno spinto a fondare l'Istituto di Copenhagen, Bohr si impegna, dai primi anni Cinquanta in poi, nella realizzazione di centri internazionali di ricerca nei quali fisici teorici e sperimentali provenienti da diversi paesi abbiano occasione di lavorare insieme, assecondando almeno sul versante scientifico la sua utopia di un "mondo aperto". Non a caso Bohr promuove, insieme a Pierre Auger ed Edoardo Amaldi, l'accordo firmato il 15 febbraio del 1952 per la nascita del CERN a Ginevra, la cui divisione teorica viene provvisoriamente ospitata dall'Istituto di Copenhagen fino al 1957: è di fatto il primo atto concreto di una cooperazione europea tra nazioni che uscivano da due guerre

mondiali, con tragedie inenarrabili che le avevano viste schierate su fronti opposti. Bohr è anche uno dei promotori della costituzione nel settembre del 1957 del *Nordisk Institut for Theoretisk Atomfysik*, noto ancora oggi con l'acronimo *Nordita*, che riunisce Danimarca, Finlandia, Islanda, Norvegia e Svezia, con l'intento di formare giovani fisici teorici provenienti da vari paesi. Ed infine, l'ultima iniziativa di Bohr sarà la fondazione del Laboratorio Nazionale di Risø finalizzato originariamente a promuovere l'uso pacifico dell'energia atomica per il bene della comunità, e inaugurato il 6 giugno del 1958.

C'è un filo rosso che percorre tutta la vita di Bohr ed è la convinzione che la scienza, e in generale la cultura, siano gli strumenti essenziali per costruire ponti tra i popoli e le nazioni, per salvaguardare la loro feconda complementarità (fig. 15), per costruire una convivenza pacifica. Una convinzione che dovremmo oggi più che mai condividere con lui.



Fig. 15 Stemma di Bohr con il motto *contraria sunt complementa* e il simbolo dello Yin-Yang ripreso dalla cultura cinese. Dallo stemma conservato al Frederiksborg Castle, in Danimarca.

## Bibliografia

- [1] *Physics Today*, 16 (1963) 21.
- [2] T. S. Kuhn, J. L. Heilbron, Paul Forman, Lini Allen, "Sources for History of Quantum Physics. An Inventory and Report", *Memoirs of the vol. 68* (The American Philosophical Society, Philadelphia) 1967.
- [3] A. Pais, "Niels Bohr's Times, in physics, philosophy and polity" (Clarendon Press, Oxford) 1991 (tr. it. "Il danese tranquillo. Niels Bohr un fisico e il suo tempo 1885-1962" (Bollati Boringhieri, Torino) 1993).
- [4] G. Peruzzi, "Niels Bohr. Dall'alba della fisica atomica alla Big Science", "I grandi della scienza", *Le Scienze*, n. 23, 2001.
- [5] E. Bellone (a cura di), "Albert Einstein. Opere scelte" (Bollati Boringhieri, Torino) 1988.
- [6] V. F. Weisskopf, "The places where quantum mechanics was born", *J. Phys. Colloq.*, 43, N. C8 (Décembre 1982) 325.
- [7] *The Philosophical Writings of Niels Bohr* (Ox Bow Press, Woodbridge, Connecticut) voll. 1-3 (1987) vol. 4 (1998).
- [8] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Phys. Rev.*, 47 (1935) 777; N. Bohr, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Phys. Rev.*, 48 (1935) 696.
- [9] P. A. Schilpp (a cura di), "Albert Einstein: Philosopher-Scientist", *Library of Living Philosophers* (Evanston, Ill.) 1949 (tr. it. "Albert Einstein scienziato e filosofo" (Einaudi, Torino) 1958).
- [10] L. Meitner, O. R. Frisch, "Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction", *Nature*, 143 (1939) 239.
- [11] N. Bohr, "For an open world", *Bull. At. Sci.*, 6 (1950) 213.



### Giulio Peruzzi

Professore di storia della scienza e della tecnica al Dipartimento di fisica e astronomia (DFA) dell'Università di Padova, conduce dagli anni 1990 ricerche in storia della fisica, fondamenti della meccanica quantistica e filosofia della fisica. Svolge inoltre attività di divulgazione scientifica collaborando a riviste e trasmissioni radio e televisive, e come curatore di mostre e musei. Attualmente è vice-direttore del DFA e Direttore del master di comunicazione delle scienze. È socio corrispondente dell'Accademia Galileiana di Scienze Lettere ed Arti di Padova. Nel 2017 ha vinto il premio per la storia della fisica della Società Italiana di Fisica.