Francesco Guerra
Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
Centro Fermi

Nadia Robotti
Dipartimento di Fisica, Università di Genova
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova
Centro Fermi

IL CONTRIBUTO DI BOHR ED HEISENBERG ALLA FISICA ATOMICA

Copenhagen: Fisica del Novecento in una società in guerra
Udine, 16 Ottobre 2017

Nella storia della Fisica, il Novecento è stato un periodo di grandissime scoperte, che hanno riguardato dall'infinitamente piccolo fino all'infinitamente grande, e che hanno cambiato il mondo, e anche il modo di concepirlo.

Due dei protagonisti più importanti furono **Niels Bohr** e **Werner Karl Heisenberg.**

In quanto segue cercheremo di ricostruire i loro contributi dati alla nascente Fisica Atomica, le loro storie e gli intrecci profondi tra le loro vite.

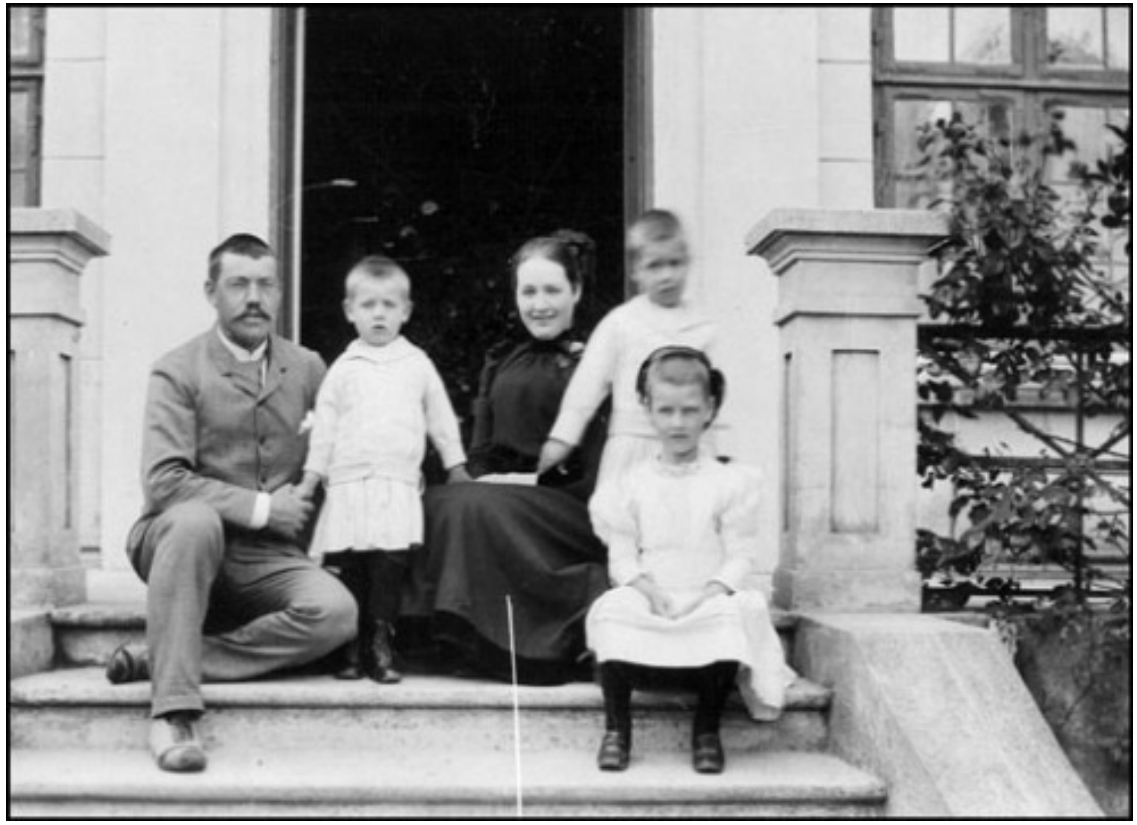
.

N. Bohr (1885-1962)

W. Heisenberg (1901-1976)

Niels Henrik David Bohr è nato il 7 ottobre 1885 a Copenhagen.
Suo padre, Christian Bohr, era professore di fisiologia all'Università di Copenhagen e sua madre, Ellen Adler Bohr, proveniva da una ricca famiglia danese di origine ebraica, assai importante nell'ambiente bancario e parlamentare.

Copenhagen fu sempre per Bohr la sede del suo lavoro e della sua casa, dove morì il 18 novembre del 1962



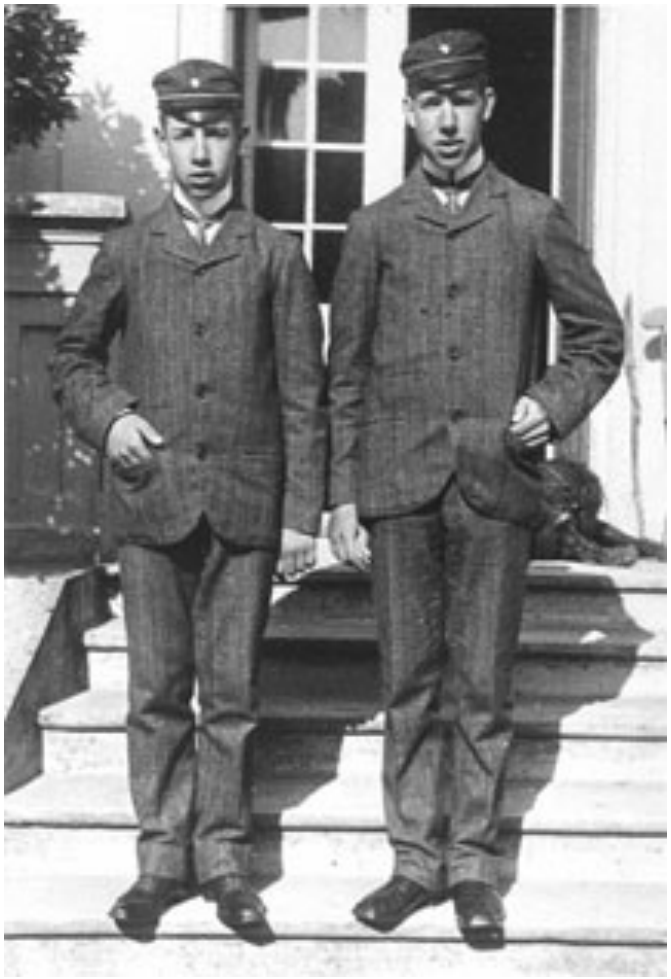
Niels Bohr con i genitori e con la sorella maggiore, Jenny Bohr, e il fratello minore, Harald Bohr.

A sette anni iniziò a frequentare la Gammelholm Latin- og Realskole, molto rigorosa e formale, dove le sue abilità straordinarie in matematica e fisica furono rapidamente notate.

Nel 1903, si iscrisse **all'Università di Copenhagen.** Il suo interesse principale fu la fisica, che studiò sotto la direzione di Christian Christiansen (1843-1917).

Nell'estate del 1909 Bohr conseguì la **laurea in Fisica** e subito dopo iniziò il **dottorato**, scegliendo come argomento di tesi “La teoria elettronica dei metalli”.

Questo lavoro fu **importantissimo**: già qui si rese conto dei limiti della fisica classica nel trattare le questioni atomiche



Niels e Harald Bohr nel 1904

Dopo aver conseguito nel 1911 il dottorato, Bohr vinse una **borsa di studio** della «Carlsberg Foundation» (birra danese!!) per studiare all'estero.

Visto l'argomento della sua tesi ("La teoria elettronica dei metalli") scelse di andare a **Cambridge,** per lavorare con J.J. Thomson, noto per aver scoperto nel 1897, l'elettrone, cioè un primo costituente dell'atomo di carica negativa e con una massa estremamente piccola (circa 1/1000 della massa dell'atomo di Idrogeno).

Thomson però non era più interessato a questi temi e così Bohr si trasferì **a Manchester**, invitato da Ernest Rutherford, per continuare lì i suoi studi.

Questa fu la sua **scelta vincente**.

Bohr a Cambridge, 1911

L’anno prima , Rutherford, per spiegare una serie di dati sperimentali, relativi alla diffusione delle particelle α, aveva introdotto il **modello atomico a nucleo centrale**, in cui la carica positiva era concentrata al centro dell’atomo, in un volume estremamente piccolo, e gli elettroni in moto su orbite concentriche intorno al nucleo.

Questo modello, dal punto di vista classico, era chiaramente un **modello instabile**. Gi elettroni, infatti, essendo accelerati, avrebbero perso rapidamente energia per irraggiamento e sarebbero collassati sul nucleo.

Bohr si impegnò immediatamente a cercare una **soluzione al problema della stabilità** del modello sulla base delle nascenti ipotesi quantistiche (Planck 1900) e nel giro di pochi mesi trovò una **soluzione radicale**: gli elettroni potevano stare solo su certe **orbite privilegiate**, su cui non irraggiavano e l**’irraggiamento** si aveva soltanto nel passaggio di un elettrone da un’orbita all’altra, secondo la legge di Planck, ovvero con l’emissione, o l’assorbimento di un «quanto di energia $h\nu$».

Queste idee trovarono la piena approvazione di Rutherford, che lo incoraggiò a proseguire su questa strada.

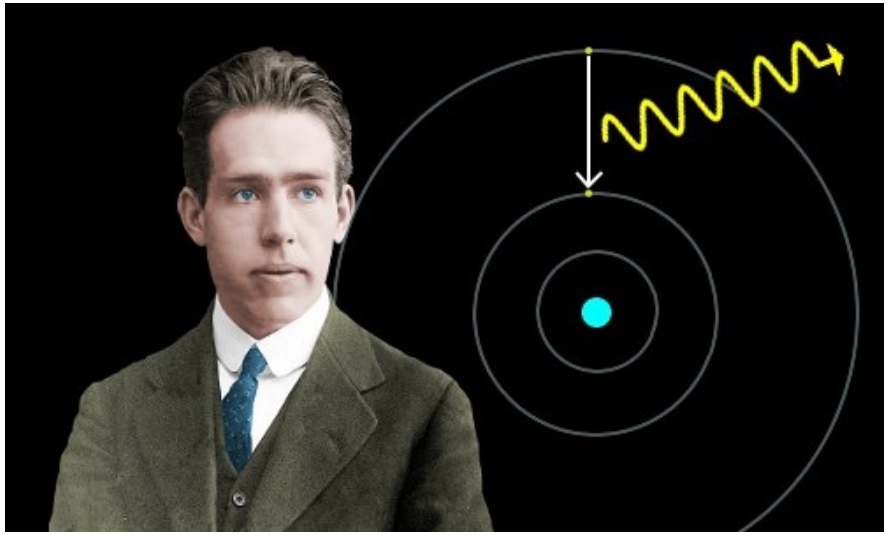
Niels Bohr tornò a Copenaghen alla fine di luglio 1912, e il primo **agosto sposò Margrethe Nørlund,** con la quale era fidanzato dal 1908 e con la quale passerà tutta la vita (sarà una dei tre protagonisti di «Copenhagen»)

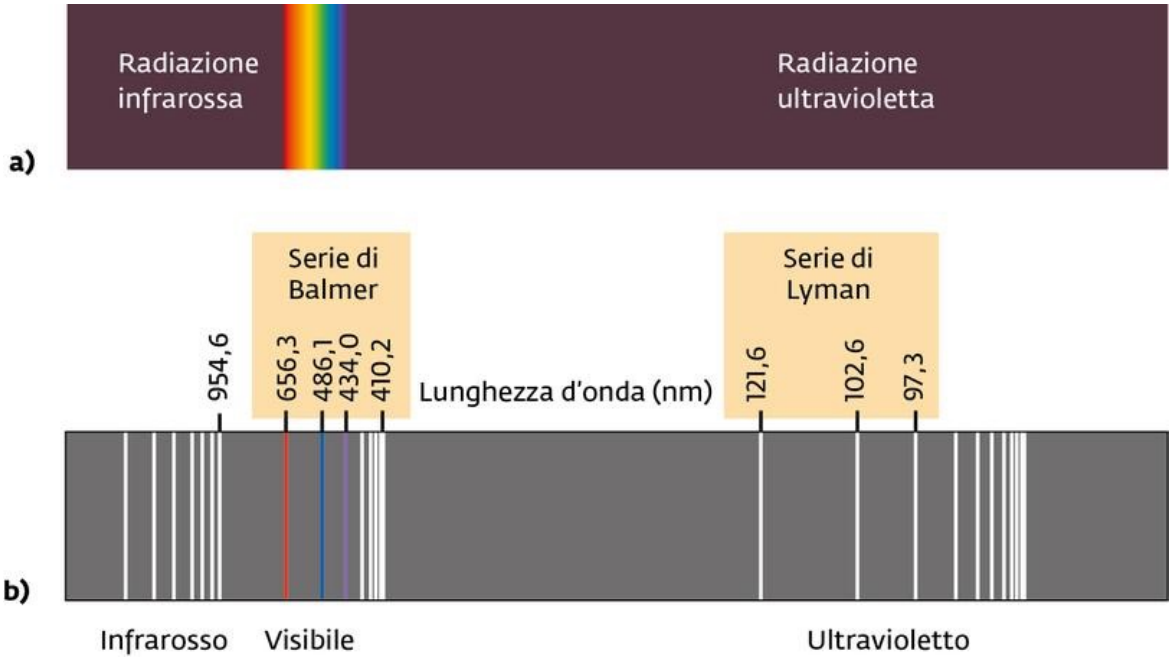
In ritorno da Manchester (1912)

Il giorno del matrimonio (1912)

Nei mesi successivi continuò a lavorare alla sua teoria atomica che pubblicherà poi nel 1913 in tre articoli successivi, ora ricordati come la «**Trilogia di Bohr».**
In essi venivano spiegati fenomeni fino a quel momento senza risposta, quali la stabilità dell'atomo d'idrogeno, le sue dimensioni e la struttura del suo spettro (rappresentato dalla formula generalizzata di Balmer-Rydberg).

Era stato a Manchester soltanto per quattro mesi. Tuttavia, in quel breve periodo aveva maturato idee che avrebbero portato a una rivoluzione nella fisica. Infatti da queste idee sarebbe nato a breve tutto un nuovo capitolo della fisica, che ora noi ricordiamo come la Old Quantum Theory.





Spettro dell'atomo di Idrogeno

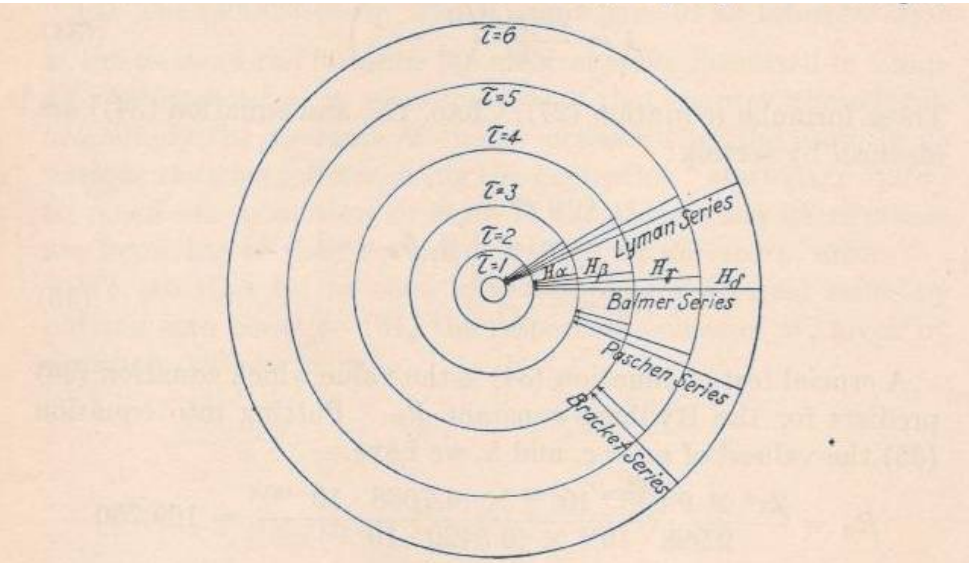


FIG. 98.—"Privileged" circular orbits surrounding the hydrogen nucleus, showing the interorbital transitions which give rise to the various lines in the hydrogen spectrum.

L'nterpretazione dello spettro dell'atomo

Nel 1916, Niels Bohr venne nominato **professore di fisica teorica** presso l'Università di **Copenhagen.**

Si impegnò subito nella realizzazione di un nuovo Istituto di Fisica all'avanguardia che fu poi inaugurato nel marzo 1921:
"L'Istituto Universitario di Fisica Teorica di Copenhagen» , o semplicemente, come venne poi chiamato **«l'Istituto Niels Bohr»**

Bohr aveva **sempre sognato la collaborazione internazionale della scienza**.
Con il nuovo Istituto, fu possibile realizzare questo sogno in Danimarca. Infatti molti ricercatori stranieri, sin dall'inizio, visitarono Copenhagen, dove scambiarono opinioni e idee tra loro e soprattutto con Bohr, avviando collaborazioni, anche durature, sulla teoria quantistica dell'atomo.

A quel tempo esistevano già altri due Istituti (centri di eccellenza per la Fisica atomica): l'Istituto di **Arnold Sommerfeld** a **Monaco** e quello di **Max Born**, a **Gottinga**, entrambi concentrati sulla teoria di Bohr**, che però non raggiunsero mai il prestigio dell'Istituto di Bohr**

Arnold Sommerfeld (1868-1951)

Max Born (1882-1870)

I **problemi** sollevati dalla teoria di Bohr e sui quali bisognava lavorare erano **molteplici**.

Tra questi vanno ricordati in particolare la ricerca di condizioni quantistiche generali per definire gli stati stazionari dei sistemi atomici, la costruzione di atomi via via più complessi, l'interpretazione delle periodicità della tavola periodica degli elementi, la spiegazione della struttura fine delle righe spettrali e del loro comportamento in presenza di campi magnetici (effetto Zeeman anomalo).

Su molti di questi temi un contributo fondamentale fu dato dallo stesso **Bohr**, con la formulazione del **"principio di corrispondenza",** come principio guida della teoria quantistica, ossia dell'idea di una generale "corrispondenza" tra la descrizione classica e quantistica dei fenomeni atomici, che si traduceva **nell'identità tra fenomeni classici e quantistici alle basse frequenze.**

Lavorando con questo principio, sfruttando al meglio i dati sperimentali, sia della Spettroscopia che della Chimica, usando concetti di simmetria, introducendo effetti di penetrazione tra le orbite, e basandosi anche su grandi intuizioni, tra il 1918 e il 1922 Bohr giungeva alla sua **seconda Teoria Atomica**, che oltre a spiegare le configurazioni dei vari elementi e le periodicità della tavola periodica, prevedeva alcuni elementi mancanti, tra cui quello con numero atomico **Z=72.**

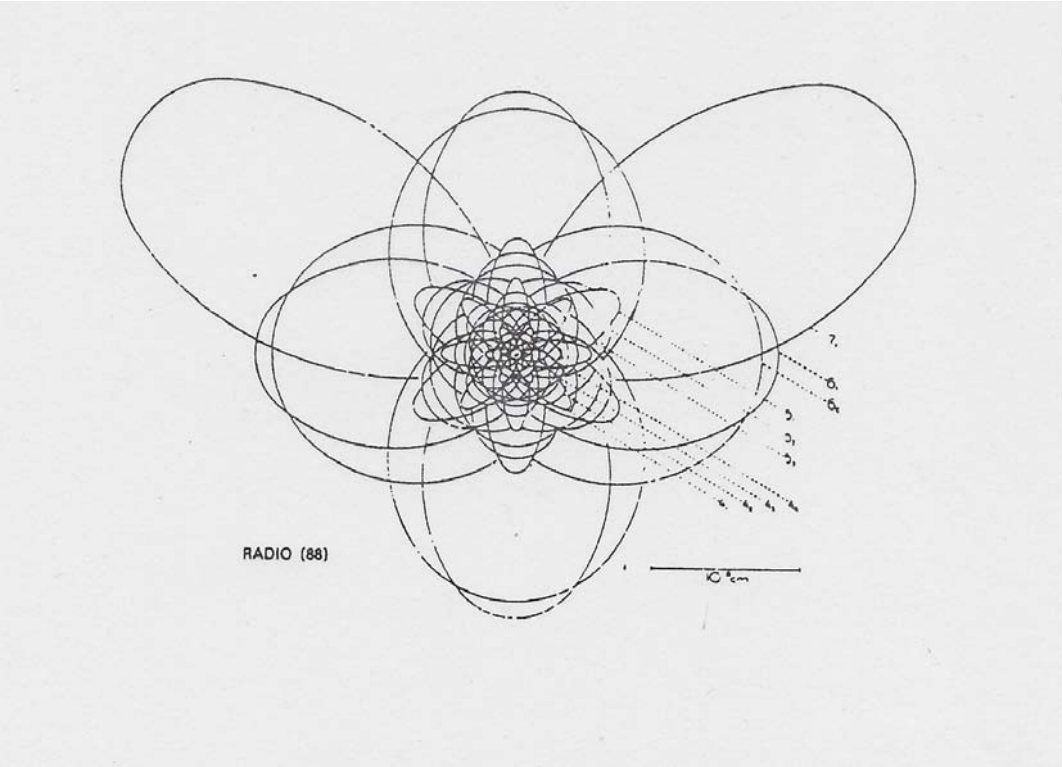
Questo elemento veniva **scoperto** da Coster e Hevesy, presso l'Istituto di Bohr, proprio **nel 1922**, giusto in tempo per essere citato da Bohr nella conclusione della sua Nobel Lecture, quando gli fu attribuito, nel 1922, **il premio Nobel per la Fisica** "per i suoi servizi nell'indagine sulla struttura degli atomi e della radiazione da essi emessa".

ATOMIC STRUCTURE

TABLE.

N \ n_k	1_1	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3	4_1	4_2	4_3	4_4	5_1	5_2	5_3	5_4	5_5	6_1	6_2	6_3	6_4	6_5	6_6	7_1	7_2
1 H	1																						
2 He	2																						
3 Li	2	1																					
4 Be	2	2																					
5 B	2	2	(1)																				
—	—	—	—																				
10 Ne	2	4	4																				
11 Na	2	4	4	1																			
12 Mg	2	4	4	2																			
13 Al	2	4	4	2	1																		
—	—	—	—	—	—																		
18 A	2	4	4	4	4																		
19 K	2	4	4	4	4		1																
20 Ca	2	4	4	4	4		2																
21 Sc	2	4	4	4	4	1	(2)																
22 Ti	2	4	4	4	4	2	(2)																
—	—	—	—	—	—	—	—																
29 Cu	2	4	4	6	6	6	1																
30 Zn	2	4	4	6	6	6	2																
31 Ga	2	4	4	6	6	6	2	1															
—	—	—	—	—	—	—	—	—															
36 Kr	2	4	4	6	6	6	4	4															
37 Rb	2	4	4	6	6	6	4	4			1												
38 Sr	2	4	4	6	6	6	4	4			2												
39 Y	2	4	4	6	6	6	4	4	1		(2)												
40 Zr	2	4	4	6	6	6	4	4	2		(2)												
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—												
47 Ag	2	4	4	6	6	6	6	6	6		1												
48 Cd	2	4	4	6	6	6	6	6	6		2												
49 In	2	4	4	6	6	6	6	6	6		2	1											
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—	—											
54 X	2	4	4	6	6	6	6	6	6		4	4											
55 Cs	2	4	4	6	6	6	6	6	6		4	4				1							
56 Ba	2	4	4	6	6	6	6	6	6		4	4				2							
57 La	2	4	4	6	6	6	6	6	6		4	4	1			(2)							
58 Ce	2	4	4	6	6	6	6	6	6	1	4	4	1			(2)							
59 Pr	2	4	4	6	6	6	6	6	6	2	4	4	1			(2)							
—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—			—							
71 Cp	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	4	4	1			(2)							
72 Hf	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	4	4	2			(2)							
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—							
79 Au	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			1							
80 Hg	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			2							
81 Tl	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			2	1						
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—	—						
86 Em	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			4	4						
87 —	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			4	4					1	
88 Ra	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			4	4					2	
89 Ac	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			4	4	1				(2)	
90 Th	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6			4	4	2				(2)	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—	—	—				—	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—				—	—
118 ?	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8		6	6	6				4	4

Tavola periodica secondo Bohr (1920)



Rappresentazione dell’atomo di Radio

Nonostante i molti successi raggiunti, **l'approccio di Bohr** di descrivere il moto degli elettroni come particelle puntiformi che si muovevano lungo orbite fissate, intorno agli anni '20, incominciò ad andare incontro a **serie difficoltà**.

In particolare questo modo di operare non sembrava in grado di spiegare non solo le proprietà di atomi e molecole complessi, il comportamento degli atomi nei cristalli, i legami chimici, la dispersione della luce, **ma anch**e alcuni problemi inerenti la spettroscopia (il "terreno forte" della teoria di Bohr) quali lo spettro dell'He, l'effetto Zeeman anomalo, l'effetto sugli spettri atomici di campi elettrici e magnetici incrociati.

Come vedremo, con queste difficoltà si scontrerà **Heisenberg,** risolvendole nel 1925 con l'abbandono dell'approccio di Bohr e con la creazione della vera Meccanica Quantistica.

Werner Karl Heisenberg nacque a Würzburg, in Baviera, il 5 Dicembre 1901. Suo padre era insegnante di filologia presso *Altes Gymnasium* in Würzburg e anche *Privatdozent* in filologia greca presso l'Università di Würzburg.

Il 18 September 1911 Werner si trasferì a Monaco per studiare presso il prestigioso *Maximilians-Gymnasium*, dove si mostrò subito **un allievo eccezionale, soprattutto nella matematica, ambizioso e sicuro di sè**. Studiò per conto suo il calcolo differenziale e integrale, le funzioni ellittiche e la teoria dei numeri astratti.

Dopo esser stato accettato come scholar della prestigiosa Maximilianeum Foundation, nell'a.a. 1920/1921si **iscrisse all'Università di Monaco**

Heisenberg con il padre e il fratello, più grande di un anno, Erwin

All’inizio intendeva studiare la matematica pura, ma in seguito decise di dedicarsi alla fisica teorica.
Sommerfeld, a Monaco**,** immediatamente riconobbe il suo talento e lo **ammise subito al suo «Seminario»,** di cui facevano parte studenti degli ultimi anni e ricercatori post-doc, tra cui **Wolfgang Pauli** (1900-1958).

Nel Seminario Heisenberg studiò la letteratura più recente sulla teoria atomica e discusse con Sommerfeld e con un gruppo di eccellenti colleghi, tra cui soprattutto Pauli, i problemi più scottanti che ne derivavano.

Già nel primo semestre Heisenberg cercò di sviluppare **un'analisi teorica dell'effetto Zeeman anomalo,** (questo tentativo, anche se mostrò grossissimi limiti, venne pubblicato come suo primo lavoro alla fine del 1921); successivamente si occupò di vari problemi di idrodinamica (tra cui i vortici di Kármán), su cui svolse poi anche la **tesi di dottorato** (discussa poi nell’estate del 1923).

Nel giugno 1922 Sommerfeld si fece accompagnare da Heisenberg a **Göttingen** dove Niels Bohr tenne una serie di conferenze sulla teoria quantistica e la struttura atomica, il **«Bohr Festival»**, in cui presentò la sua nuova teoria sulla tavola periodica.

Qui Heisenberg incontrò i principali rappresentanti della fisica atomica in Germania e in Europa, tra cui, oltre a Bohr, Max Born.

Bohr e Born notarono subito questo giovane fisico. Quando Sommerfeld si allontanò per motivi di studio da Monaco nell'inverno 1922/1923, **Born invitò Heisenberg a Göttingen come suo assistente personale (novembre 1922 - marzo 1923).**

A Göttingen Heisenberg apprese i rigorosi metodi matematici della scuola di Hilbert e lavorò con Born sul problema a molti corpi nella teoria atomica e anche sul calcolo degli stati energetici dell'atomo dell'elio, giungendo però a un **completo fallimento**.

Nell'ottobre 1923 Heisenberg divenne **assistente di Born all'Università di Göttingen**, e continuò a lavorare con Born su modelli atomici e molecolari.

Il 28 luglio 1924 ottenne l’abilitazione presso l'Università di Göttingen
A soli 22 anni, divenne così un Privatdozent e pienamente qualificato a essere docente universitario.

Nella primavera del 1924, Heisenberg fece **la sua prima visita all'istituto di Bohr a Copenaghen,** dove poi con una «borsa di studio Rockefeller» rimase per altri sette mesi.

All'Istituto di Bohr, Heisenberg lavorò intensamente con Bohr e con il suo collaboratore più stretto Kramers sui problemi più difficili della teoria atomica, quali la dispersione della luce e la struttura degli spettri complessi e dei loro effetti Zeeman, **senza però ottenere risultati soddisfacenti**.

Al suo ritorno a Göttingen, particolarmente colpito dalla teoria della dispersione recentemente pubblicata da Bohr, Kramers, Slater, in cui, pur di far tornare i conti, veniva addirittura proposta un'interpretazione statistica del principio di conservazione dell'energia, incominciò a maturare l'idea che i tentativi fino ad allora fatti di trattare l'atomo come un sistema dinamico di tipo classico dovevano essere abbandonati e che era **«necessaria una radicale rivoluzione nei concetti sui quali è stata finora basata la descrizione della Natura».**

Dopo un soggiorno **sull'isola di Helgoland,** diventata poi famosa, per curarsi da un violento attacco di febbre da fieno, al suo rientro a Gottinga, Heisenberg **creava la moderna meccanica quantistica**.

Infatti la motivazione per il Premio Nobel per la Fisica 1932 (annunziato nel 1933), a lui conferito, recita testualmente: "for **the creation** of quantum mechanics, the application of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen".

Heisenberg 1925

Questo è **l'articolo fondamentale** "Su una reinterpretazione teorica quantistica delle relazioni cinematiche e meccaniche«, completato da Heisenberg il 29 luglio 1925.

[Il 9 luglio 1925 aveva scritto a Pauli: «Sono realmente convinto che un'interpretazione della formula di Rydberg nel senso delle orbite circolari ed ellittiche della geometria classica non ha il minimo significato fisico e tutti i miei poveri sforzi son diretti ***a distruggere del tutto e a rimpiazzare appropriatamente il concetto delle orbite, che tanto non si possono osservare»****]*

Questo articolo rappresenta il punto di partenza per la nuova meccanica quantistica.

Qui Heisenberg annuncia come il principale principio filosofico della meccanica quantistica **che solo le quantità osservabili sono ammesse nella descrizione teorica degli atomi.**

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufszeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, wenn die genannten Regeln in sich konsequent und auf einen bestimmt umgrenzten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären. Die Erfahrung zeigt aber, daß sich nur das Wasserstoffatom und der Starkeffekt dieses Atoms jenen formalen Regeln der Quantentheorie fügen, daß aber schon beim Problem der „gekreuzten Felder" (Wasserstoffatom in elektrischem und magnetischem Feld verschiedener Richtung) fundamentale Schwierigkeiten auftreten, daß die Reaktion der Atome auf periodisch wechselnde Felder sicherlich nicht durch die genannten Regeln beschrieben werden kann, und daß schließlich eine Ausdehnung der Quantenregeln auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen sich als unmöglich erwiesen hat. Es ist üblich geworden, dieses Versagen der quantentheoretischen Regeln, die ja wesentlich durch die Anwendung der klassischen Mechanik charakterisiert waren, als Abweichung von der klassischen Mechanik zu bezeichnen. Diese Bezeichnung kann aber wohl kaum als sinngemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an

La **struttura** introdotta da Heisenberg è **estremamente semplice**, e motivata dall'esigenza di trattare solo grandezze osservabili, in contrasto con la Vecchia Meccanica Quantistica, che invece introduceva orbite quantizzate, intrinsecamente non osservabili.

La procedura è basata su una **geniale "Umdeutung" (reinterpretazione)** delle osservabili della meccanica classica, tipicamente posizioni e quantità di moto delle particelle.

Le osservabili della meccanica quantistica sono **le stesse** della meccanica classica e soddisfano le stesse equazioni del moto. Solo che vengono **reinterpretate in senso quantomeccanico.**

Mentre le osservabili classiche sono contraddistinte dai loro valori numerici che evolvono nel tempo, le osservabili quantistiche invece sono operatori, **con appropriate regole di commutazione**, che evolvono nel tempo seguendo le stesse equazioni classiche.
Come veniva scoperto da lì a poco da **Born e Jordan** le regole di composizione tra le osservabili di Heisenberg non erano altro che **moltiplicazioni tra matrici**.

Questo nuovo modo di procedere appariva molto promettente: come dimostrava subito Heisenberg, esso consentiva di calcolare gli **stati dell'oscillatore anarmonico e anche quelli del rotatore**

L'originaria teoria di Heisenberg (meccanica delle matrici) acquisì in pochi mesi **piena completezza fisica** con l'apporto di ulteriori importanti contributi da parte di **Born**, di **Pascual Jordan** (1902-1980) e dello stesso **Heisenberg**, culminati nel famoso **lavoro dei «Tre Uomini»** nel 1926 che rappresentava la formulazione rigorosa della Meccanica Quantistica moderna, secondo la Scuola di Göttingen (Heisenberg-Born-Jordan).
La caratteristica più importante della formulazione di Gottingen era di fare **uso soltanto di grandezze osservabili.** Non esiste il concetto di stato quantistico, che non è un osservabile.

W.Heisenberg

M.Born

P.Jordan

Subito dopo la pubblicazione da parte di Born, Heisenberg and Jordan dell'"articolo dei tre uomini", si ebbero rapidamente **ulteriori sviluppi e grandi successi,** che confermavano ulteriormente **la validità della Nuova Meccanica Quantistica**:

Pauli, nell'ottobre del 1925, calcolò gli stati stazionari dell'atomo di idrogeno; Cornelius Lanczos e, indipendentemente Born and Norbert Wiener estesero il metodo della meccanica degli operatori alla descrizione dei moti continui (Dicembre 1925); prima ancora, Paul Adrien Maurice Dirac, a Cambridge, nel novembre 1925, sviluppò, indipendentemente dalla scuola di Gottinga uno schema diverso, basato sempre sul lavoro di Heisenberg del luglio 1925 (il metodo dei numeri q), in cui gli atomi a molti elettroni e l'effetto Compton relativistico potevano essere trattati con grande successo (primavera 1926)
Inoltre Heisenberg e Jordan utilizzarono lo spin dell'elettrone e la Meccanica delle matrici per risolvere i vecchi problemi della struttura fine dell'idrogeno e dell'effetto Zeeman anomalo, e infine Heisenberg scoprì il fenomeno della risonanza quanto-meccanica (Giugno 1926) che giocò un ruolo decisivo nel suo successivo calcolo dello spettro dell'atomo di elio (luglio 1926).

Questi furono anni di grande fermento.

Quasi contemporaneamente giunse a maturazione, a partire dal 1926, e prevalentemente ad opera del fisico austriaco **Erwin Schrödinger** (1887-1961), un approccio alla meccanica quantistica completamente differente, rispetto alla teoria dei Tre Uomini.

Questo schema partiva dalle profonde intuizioni di Louis de Broglie (1892-1987), Premio Nobel 1929 "for his discovery of the wave nature of electrons", che aveva sviluppato le sue idee **sulla natura ondulatoria degli elettroni** con l'introduzione di una **"onda pilota" (intesa come un'onda fisica) che avrebbe guidato il comportamento dinamico dell'elettrone.**

Prendendo spunto da queste idee, e adottando **un'interpretazione ondulatoria del comportamento di una particella,** ossia assumendo che lo stato di un sistema fosse univocamente definito da una funzione d'onda Ψ, **Erwin Schrödinger**, in una serie di fondamentali lavori a partire dall'inizio del 1926, perveniva alla corretta formulazione dell'equazione d'onda quantistica che ora porta il suo nome e che descriveva l'evoluzione spazio-temporale di questa funzione Ψ.

Nella formulazione di De Broglie e Schrödinger è molto chiara l'idea che la funzione d'onda Ψ abbia una **esistenza fisica oggettiva nello spazio-tempo**.

In particolare, Schrödinger tentò disperatamente di limitarsi a considerare **funzioni d'onda reali**, e solo alla fine fu costretto ad arrendersi all'evidenza che la sua equazione richiede funzioni d'onda complesse nel caso generale.

Inoltre, fornisce l'interpretazione della funzione d'onda secondo cui **$|\psi|^2$ rappresenta la densità locale di carica dell'elettrone** e la difenderà a lungo.

.

Già nel Marzo del 1926 dimostrò **l'equivalenza matematica** tra la sua **Meccanica Ondulatoria e la Meccanica delle Matrici**, che verrà subito ripresa da Pauli (Aprile 1926) e provata in modo completo da Jordan e Dirac nel Dicembre 1926.

Nel Maggio del 1926 Niels Bohr offrì ad Heisenberg un posto di **Lettore** e successore del suo **assistente** Kramers, presso l'istituto di Copenhagen.

Qui Heisenberg discusse con Bohr i risultati della Nuova Meccanica Quantistica e anche i fondamenti della Meccanica Ondulatoria, da poco introdotta da Schrödinger (gennaio 1926).

Sia Bohr che Heisenberg, a Copenhaghen, **rifiutarono l'interpretazione di Schrödinger** del modulo quadro della funzione d'onda come densità locale di carica dell'elettrone in quanto faceva riferimento a grandezze non osservabili .

Essa fu anche rifiutata, per le stesse ragioni da Born a Göttingen che la sostituì con l'interpretazione secondo cui essa rappresentava **la densità di probabilità di trovare l'elettrone in una data posizione in un determinato istante** (Giugno 1926).

Durante profonde discussioni con Bohr, e in stretto contatto con Pauli, Heisenberg analizzò anche ciò che chiamava “il contenuto concettuale della cinematica e della meccanica quanto-teorica”.

Come risultato dell'analisi giunse, nel marzo 1927, al **«principio di indeterminazione»** che stabiliva che non è possibile misurare contemporaneamente e con precisione assoluta due variabili coniugate, quali la posizione e la velocità di una particella. Se ad esempio potessimo determinare con precisione assoluta la posizione, ci troveremmo ad avere la massima incertezza sulla sua velocità.

A questo principio verrà molto spesso fatto riferimento nell’opera teatrale «Copenhagen»

Bohr, dal canto suo, dopo aver riflettuto sull'uso simultaneo delle immagini fisiche di particelle e di onde, ossia sul fatto che Heisenberg descriveva le particelle come particelle, mentre la teoria di Schrödinger descriveva le particelle come onde, giungeva al suo **«principio generale di “complementarità"»,** annunciato nell'autunno del 1927.

Esso asseriva che un fenomeno fisico era **osservabile in due modi complementari diversi** che dipendevano dall’apparato sperimentale usato. Per esempio, la luce a volte si comportava come un’onda, a volte come una particella. Entrambe le rappresentazioni erano necessarie per ottenere una completa descrizione del fenomeno, anche se si escludevamo a vicenda.

Niels Bohr espose questo punto di vista radicale per la prima volta in una Conferenza a Como, dedicata al bicentenario della nascita di Alessandro Volta, (settembre1927) e, poche settimane dopo, al Congresso Solvay a Brussels (24-28 ottobre 1927).

Partecipanti al Congresso Solvay a Brussels (1927)

A partire dal 1927, **l'interpretazione statistica della funzione d'onda di Schrödinger data da Born, il principio di indeterminazione di Heisenberg e il principio di complementarità di Bohr** formarono la base **dell'interpretazione fisica della Nuova Meccanica Quantistica.**

L'interpretazione di Copenhagen della Meccanica Quantistica, così come più tardi fu chiamata, trovò consenso da parte della stragrande maggioranza dei fisici, ma non da tutti: ad esempio Albert Einstein fu uno dei massimi oppositori ("Dio non gioca a dadi" diceva) e ancora oggi è oggetto di studi.

Una volta dimostrata l’equivalenza tra la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria, poichè la funzione d’onda, è di più facile uso e di grande utilità in tutte le questioni di tipo applicativo rispetto all’algebra delle matrici, anche i sostenitori della scuola di Gottinga si convertirono al suo utilizzo (sebbene essa non fosse osservabile).

Per queste stesse ragioni l’insegnamento universitario della meccanica quantistica ha sempre privilegiato la linea di sviluppo Bohr - De Broglie - Schrödinger, rispetto all’impostazione di Gottingen, considerata (a ragione) più astratta e più difficile.

Dopo l’interpretazione di Copenaghen della Meccanica Quantistica, **le strade di Bohr e di Heisenberg si divisero.**

Nell’ottobre del 1927, **Heisenberg,** ormai riconosciuto il leader più rappresentativo della nuova teoria atomica, lasciò Copenhagen per andare a ricoprire a **Lipsia** la **cattedra di fisica teorica**, su cui era stato chiamato.

Aveva soli 25 anni!!

Heisenberg, assieme ad alcuni colleghi e allievi, creò a Lipsia un **nuovo centro di ricerca in fisica atomica,** che attrasse numerosi studenti di valore e che nel giro di pochi anni divenne il Centro più importante del settore.

Bohr, dal canto suo, continuò a restare a Copenhagen, dedicandosi sempre alla crescita del suo Istituto, così come aveva fatto sin dal 1921, accogliendo studenti da tutto il mondo, e rimanendo sempre **un punto di riferimento sicuro** per la fisica moderna.

Nel 1931, Niels Bohr e la sua famiglia andarono ad abitare nella **“Residenza Onoraria Carlsberg,”** a Valby, vicino a Copenhagen.

Questo ediificio fu fatto costruire nel 1883 dal fabbricante di birra Carl Jacobsen, per metterlo a disposizione dell'uomo o della donna che avessero dato il massimo onore alla nazione.

In questa residenza Bohr resterà per il resto della sua vita, tranne brevi periodi all’estero.

Qui, nel 1941, si svolgerà **il colloquio** tra Bohr, Heisenberg e sua moglie Margrethe, tema dell’opera teatrale “Copenhagen”.

“Residenza Onoraria Carlsberg”