

Alcuni aspetti della Fisica del Novecento

[Fonti: E. Segré, "Personaggi e scoperte della fisica contemporanea", Mondadori]

La Fisica intorno all'anno nel 1895

Situazione del mondo occidentale nel campo della scienza:

- Inghilterra, Germania, Francia potenze dominanti
- Russia, Stati Uniti, Italia, Svizzera, Paesi Scandinavi, ecc. a distanza
- il Giappone comincia ad uscire dal suo Medioevo e alcuni dei suoi giovani samurai vengono mandati a prendere contatto con il mondo occidentale.

Situazione politica e sociale:

- **Inghilterra** al colmo dello splendore sotto la regina Vittoria (1837-1901), imperatrice delle Indie (1876);



- **Francia** ancora sotto l'effetto dell'umiliante sconfitta dai Prussiani nella battaglia di Sedan (1870); il paese cerca il riscatto anche attraverso l'attività scientifica (v. Pasteur);

- **Germania** in ascesa: la sua potenza industriale stava superando quella dell'Inghilterra; lo scontro politico tra civili e militari si risolve a favore di questi ultimi: silurato il cancelliere Bismarck (1890), Guglielmo II guida l'avventura imperiale, con esiti che saranno poi disastrosi.

Nel 1895 non ci sono automobili, né aeroplani; i telefoni sono pochissimi; le comunicazioni avvengono per lettera; le città sono molto meno popolate di ora (Londra, circa 4.2 milioni; Parigi, circa 3 milioni; Berlino, circa 1.7 milioni; Roma, circa 300.000).

I laboratori di ricerca non hanno corrente elettrica, perché non esistono o quasi reti di distribuzione; un laboratorio è classificato a seconda delle batterie di pile di cui dispone.

Tra gli strumenti più importanti dell'epoca, il **rocchetto di Ruhmkorff**: trasformatore in cui la corrente del circuito primario viene bruscamente interrotta per generare elevate tensioni e quindi scariche, nel secondario.



Altra importante categoria di strumenti sono le **pompe pneumatiche**. Il vuoto raggiunto all'epoca (circa 1/1000 mm Hg o 1/10 Pa) richiedeva ore e ore di faticoso lavoro manuale (ora si raggiungono pressioni dell'ordine di 10^{-12} Pa).

I fisici intorno al 1895 pubblicavano su liquefazione dei gas, misure di calore specifico, onde elettromagnetiche e loro relazione con l'ottica, scariche nei gas in tubi a vuoto; la teoria cinetica era in pieno sviluppo, ma pochi ne erano i cultori (Gibbs, Boltzmann).

L'esistenza degli atomi era stata ipotizzata dai chimici sin dal 1804 (Dalton), ma non era universalmente accettata; le **leggi di Prout** delle proporzioni definite e multiple, la **legge di Avogadro**, le **leggi dell'elettrolisi di Faraday** non erano bastate a sgomberare il campo da scetticismi che dureranno fino al 1905.

Sebbene la legge di Avogadro fosse del 1811, nessuno ebbe idea dell'ordine di grandezza del numero di Avogadro fino al 1860 quando, grazie alla teoria cinetica e a misure di viscosità, **Loschmidt** riesce a stimare il cammino libero medio, il diametro, la massa delle molecole, ecc.

La **termodinamica** nel 1895 gode di ampio credito: non poggiando su ipotesi atomiche o statistiche, ma avendo basi assiomatiche, riscuote fiducia illimitata.

La generazioni dei fisici attivi intorno al 1895 include

- J.J. Thomson in Inghilterra
- L. Boltzmann, M. Planck, P. Lenard in Austria e Germania
- H. Poincaré in Francia
- H.A. Lorentz in Olanda

Il numero totale di fisici attivi intorno al 1895 era stimato intorno a 1000; erano ben pagati e occupavano un ruolo prestigioso nelle loro società. Napoleone III riceveva regolarmente gli scienziati più illustri per farsi spiegare le loro scoperte; lo stesso faceva Guglielmo II in Germania, dove Helmholtz era molto ascoltato; in Inghilterra Lord Kelvin o Lord Rayleigh potevano facilmente trovarsi insieme al primo ministro in una delle grandi case aristocratiche.

Gli studi sulla conducibilità nei gas rarefatti

1838: Faraday, studiando la scarica in gas rarefatti, aveva osservato effetti curiosi (striature, strati, spazi oscuri), ma i mezzi usati non gli avevano consentito di capire molto.

1858: **J. Plücker (1801-1868)** avvicina un magnete alla scarica per osservarne gli effetti; buona idea, ma scarsi i risultati, a causa del vuoto non sufficientemente spinto.



1869: **J.W. Hittorf (1824-1914)** realizza un vuoto migliore e comincia ad osservare quelli che oggi si chiamano **raggi catodici**.



Cosa erano i raggi catodici? Si sapeva che i raggi partivano dall'elettrodo negativo (catodo) e, urtando la parete opposta del tubo, la rendevano fluorescente.

Sembrava viaggiassero in linea retta: una croce metallica interposta proiettava la sua ombra sul fondo del tubo.

Forse erano deviati da un campo magnetico.

Forse erano corpuscoli proiettati dal catodo.



1883: H. Hertz sostiene che i raggi catodici non siano particelle, ma una radiazione di una qualche nuova specie; Wiedemann, Goldstein e tutti i tedeschi si accodano.



W. Crookes (1832-1919) in Inghilterra sosteneva che fossero particelle cariche e tutti gli inglesi (Lord Kelvin, J.J. Thomson e gli altri) si accodano.

Gli studi di Crookes sono realizzati con un vuoto che corrispondeva a una pressione di 40/1000 mm Hg (un pessimo vuoto per i nostri giorni).

J.J. Thomson e W. Crookes continuano ad investigare i raggi catodici.

1895: **J.B. Perrin (1870-1942)** compie il passo decisivo; grazie ad un vuoto adeguato, riesce a raccogliere i raggi in una gabbia di Faraday e dimostra che trasportano una carica e che possono essere deflessi da un campo magnetico.

[Nel 1905, dopo l'uscita dell'articolo di Einstein sul moto browniano, Perrin effettua l'esperimento per la verifica delle previsioni di Einstein, fugando gli ultimi residui dubbi sulla natura atomica della materia.



Premio Nobel nel 1926 per gli studi sulla struttura discontinua della materia.]

1894: G. Johnston Stoney conia il nome di **elettrone**.

Si afferma l'idea che negli atomi ci siano cariche elettriche che producono la luce con il moto.

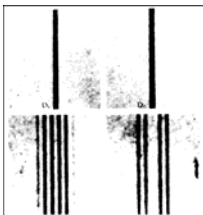
P. Zeeman (1865-1943)

Olandese, si interessa precocemente alla fisica (descrizione dell'aurora boreale del 1883, visibile in Olanda, pubblicata su Nature).

Studia con H. Kamerlingh Onnes e con H. Lorentz, a Leida.

Legge Faraday e si sofferma sulla ricerca delle relazioni tra le forze della natura e, in particolare, **sull'influenza del magnetismo sulla luce**.

Faraday nel 1862 aveva tentato invano di alterare la luce emessa dal vapore di sodio mediante un campo magnetico. Maxwell (1870) aveva negato la possibilità di questo fenomeno.



Zeeman dispone di apparecchiature per la spettroscopia superiori a quelle di Faraday: usa reticoli di diffrazione invece di spettroscopi a prismi di vetro.

Ritenta l'esperienza e vede la separazione delle righe spettrali (**effetto Zeeman**, premio Nobel 1902).

H. Lorentz: la luce è emessa per il moto degli elettroni; questo moto è influenzato dal campo magnetico, secondo l'elettricità classica.

Determinazione di e/m e del segno negativo della carica dell'elettrone; appariva chiaro che quel rapporto era migliaia di volte più grande che per m dell'ordine della massa atomica.

J.J. Thomson (1856-1940)

1897: svolge a Cambridge indipendentemente una classica serie di esperienze per misurare il rapporto e/m dell'**elettrone libero**.



1. Se campo elettrico E , magnetico B e velocità v sono perpendicolari l'uno all'altro e se $E/B=v/c$, la forza agente sulla particella è nulla ed essa si muove di moto rettilineo e uniforme; in un dispositivo di campi elettrici e magnetici perpendicolari tra di loro e ad un fascio di particelle, si possono selezionare quelle con una certa velocità.
2. Se questo fascio di particelle di velocità nota viene mandato in una regione con campo magnetico uniforme B perpendicolare alla velocità, il fascio viene deflesso e le particelle si muovono su un'orbita circolare di raggio r dato da

$$\frac{Bev}{c} = \frac{mv^2}{r}$$

da cui si può ricavare e/m .

3. Un altro metodo consiste nel misurare la carica trasportata da N corpuscoli, $Q = N e$, e allo stesso tempo, calorimetricamente, l'energia cinetica $W = N mv^2/2$; il rapporto $W/Q = mv / (2e)$ dà e/m , nota v .



Thomson trova $e/m = 6.6 \times 10^{17}$ ues/g, invece di 5.27×10^{17} ues/g.

Più tardi, insieme al suo ex allievo C.T.R. Wilson che aveva sviluppato la **camera a nebbia**, misura direttamente e , separatamente da m , trovando un valore di circa 3×10^{-10} ues.

Nel 1910, Millikan, negli Stati Uniti, trasformando il metodo delle gocce di Thomson e Wilson, ottiene il valore 4.78×10^{-10} ues, molto vicino a quello attualmente accettato.

Tutti gli esperimenti di J.J. Thomson erano stati condotti al Cavendish Laboratory, di cui era diventato professore, succedendo a Lord Rayleigh.

Riceve il premio Nobel nel 1906.

I numeri di Thomson erano poco precisi, ma gli ordini di grandezza erano giusti; inoltre gli **elettroni** di qualunque provenienza sembravano identici, quindi **erano un costituente universale della materia**.

Il rapporto e/m trovato da Thomson per l'elettrone libero era in accordo con il valore di Lorentz e Zeeman per l'elettrone atomico, a conferma del fatto che le cariche che con il loro moto producono la luce sono elettroni.



W. Rontgen (1845-1923)

Nasce in Renania, da padre tedesco e madre olandese; studia a Zurigo prima ingegneria e poi fisica, con Clausius.

Libera docenza nel 1874 e buona, ma non straordinaria, carriera accademica.

Cambia sede varie volte e nel 1888 finisce a Würzburg, università buona, ma non prestigiosa; a tutto il 1895 ha scritto 48 lavori.



Novembre 1895: ripete alcuni esperimenti sui raggi catodici e usa uno schermo fluorescente al platinocianuro di bario; nota che, **anche quando il tubo è avvolto con carta nera e lo schermo si trova ad una distanza da esso a cui i raggi non possono arrivare, si produce la fluorescenza.**



Vede casualmente l'ombra delle proprie ossa; non dice nulla e si chiude nel laboratorio a studiare il fenomeno. Ha scoperto i **raggi X**; dopo Natale 1895 fa una comunicazione all'accademia di medicina di Würzburg.

Crede si tratti di vibrazioni longitudinali dell'etere e cerca invano di vederne riflessione e rifrazione.

Diventa famoso e viene invitato a tenere conferenze, ma accetta di fare solo quella a Potsdam, al cospetto del Kaiser.

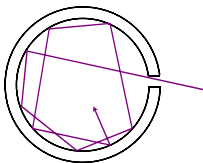
Scriva altri due lavori sui raggi X, poi torna ai vecchi argomenti, lasciando ad altri il nuovo campo. Premio Nobel nel 1901.

Immagine del 22 dicembre 1895

La nascita della meccanica quantistica

Alla fine del XIX secolo la fisica classica ha raggiunto una struttura mirabile:

- la meccanica di Newton è stata razionalizzata da Lagrange
- l'elettromagnetismo e l'ottica sono unificati nella teoria di Maxwell
- la termodinamica è il terzo pilastro della fisica, forse il più solido, essendo applicabile a qualunque sistema



Corpo nero: oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione incidente su di esso.

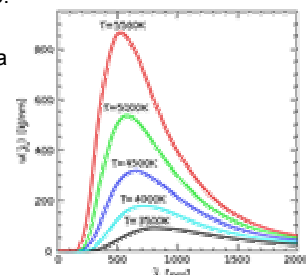
In pratica, un piccolo foro in una scatola con l'interno annerito, si avvicina molto al concetto di corpo nero: la radiazione che entra viene totalmente assorbita; quella che ne uscirà corrisponderà all'equilibrio di temperatura del corpo.

G.R. Kirchhoff (1859) dimostra termodinamicamente che la potenza emessa per unità di superficie di un corpo nero è data da

$$e = f(\nu, T)$$

mentre la densità di energia vale $u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} f(\nu, T)$

e la densità totale di energia $u(T) = \int_0^{\infty} u(\nu, T) d\nu$



Dall'elettrodinamica di Maxwell segue che la pressione all'interno della cavità nera è $p = \frac{u(T)}{3}$

Usando anche la termodinamica si arriva a $u(T) = aT^4$ - **legge di Stefan**

e alla **legge di Wien** $u(\nu, T) = \nu^3 F(\nu/T)$

Queste due leggi sono il massimo che si possa ottenere usando la termodinamica classica e l'elettromagnetismo; né la costante a della legge di Stefan, né la forma esplicita della funzione $F(\nu/T)$ sono determinate.

M. Planck (1858-1947)

Nasce a Kiel, in una famiglia di giuristi e pastori protestanti; il padre è professore di diritto. Aspetti del carattere: onestà e senso del dovere; svaghi: musica e alpinismo.

1867: trasferimento a Monaco di Baviera (prima dell'unificazione tedesca del 1871); ginnasio, poi università a Monaco e a Berlino; qui ha come professori Kirchhoff (lezioni perfette, ma noiose) e von Helmholtz (lezioni difficili e non ben organizzate).



Tesi sulla termodinamica e la reversibilità dei fenomeni, importante, ma che non riscuote attenzione. Le sue scoperte sugli equilibri termodinamici erano state precedute da Gibbs.



1885: posto di professore straordinario a Kiel

1889: muore Kirchhoff e la cattedra resasi libera a Berlino viene offerta a Boltzmann, che prima accetta, poi cambia idea, e quindi a Planck.

Planck ama affrontare i problemi fondamentali e generali, per questo si dedica naturalmente al problema del corpo nero. Comincia a studiare la funzione $u(\nu, T)$ nel 1897.

Risultato importante: **se in un corpo nero la radiazione non è influenzata dalla costituzione delle pareti, ma solo dalla loro temperatura, possiamo pensare che le pareti siano fatte di oscillatori hertziani**, e da questo discende che

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \bar{E}, \quad \bar{E} = kT$$

dove $\bar{E}$ è l'energia media dell'oscillatore nelle pareti (in nome "costante di Boltzmann" per k è introdotto da Planck).

Gli esperimenti mostrano però che la formula non è esatta; concettualmente, poi, c'è il problema della cosiddetta "catastrofe ultravioletta"; Planck trova che i dati sperimentali sono meglio riprodotti da una legge del tipo

$$u(\nu, T) = \frac{\alpha \nu^3}{e^{\beta \nu / T} - 1}$$

"Finché era solo una fortunata interpolazione, aveva un valore limitato. Pertanto, ..., mi dedicai al compito di dare alla formula una vera interpretazione fisica."

Per calcolare l'energia media di un oscillatore, Planck ipotizza che i possibili stati di energia siano multipli interi di un quanto piccolo, ma finito, ϵ .

Inoltre, per accordarsi alla legge di Wien, deve essere che $\epsilon=h\nu$, dove h è una nuova costante universale, detta giustamente **costante di Planck**. Questo consente di giungere (1900) a

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{h}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

In altre parole, **l'oscillatore non può avere una energia qualsiasi, ma solo valori discreti, dati da multipli interi di $h\nu$.**

Einstein: *"Era come se improvvisamente ci mancasse il terreno sotto i piedi senza vedere in nessun posto terreno solido su cui si potessero porre le fondamenta di una nuova costruzione."*

A partire dalla formula di Planck, si possono ottenere la costante di Stefan e i valori di h e di k ; Planck ottiene $h=6.55 \times 10^{-27}$ erg s (oggi $h=6.626 \times 10^{-27}$ erg s) e $k=1.346 \times 10^{-16}$ erg/K (oggi $k=1.380 \times 10^{-16}$ erg/K).

Il lavoro di Planck non è digerito facilmente dai fisici; egli stesso impiegherà molti anni di lavoro per cercare una spiegazione meno rivoluzionaria dei suoi risultati.

Planck diventa uno dei fisici tedeschi più autorevoli (segretario dell'Accademia delle Scienze di Berlino). Ha pochi studenti: non più di una dozzina di persone fa la tesi sotto la sua guida, ma tutti diventeranno fisici importanti.

1931: *"Avevo già lottato per sei anni con il problema del corpo nero. Sapevo che il problema era fondamentale e ne conoscevo la legge; una spiegazione teorica doveva trovarsi qualunque costo, salvo la inviolabilità delle due leggi della termodinamica."*

Verso la fine della sua vita: *"I miei vani tentativi di riconciliare in qualche modo il quanto elementare con la teoria classica continuarono per molti anni e mi costarono grandi sforzi. Molti dei miei colleghi videro in ciò quasi una tragedia, ma io la penso diversamente perché la profonda chiarificazione che ricevetti da questo lavoro fu di gran valore per me. Ora so che il quanto d'azione ha una parte assai più significativa di quel che sospettassi originariamente."*

Nel 1909 perde la prima moglie; poi, tre dei quattro figli muoiono durante la prima guerra mondiale (uno al fronte, due figlie di parto). Si risposa ed ha un altro figlio.

Premio Nobel nel 1918.

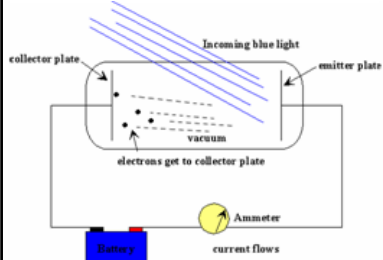
Assiste all'ascesa di Hitler, colpo durissimo per un patriota di vecchio stampo come lui; su richiesta dei colleghi, diventa presidente della Kaiser Wilhelm Gesellschaft. Va perfino a parlare con Hitler per indurlo a ragione su qualcuna delle sue aberrazioni, ma viene messo alla porta.

L'ultimo figlio del primo matrimonio è ucciso dai nazisti per aver congiurato contro Hitler (1944). Perde la casa in un bombardamento aereo; portato in salvo dagli alleati a Gottinga, vi muore nel 1947.

A. Einstein (1879-1955)

Lavorando sull'entropia della radiazione di corpo nero, giunge alla conclusione che la **radiazione di frequenza ν contiene corpuscoli ciascuno di energia $\epsilon=h\nu$** .

1905: "Se dunque per quel che riguarda la dipendenza dell'entropia dal volume la radiazione monocromatica di piccola densità si comporta come un mezzo discontinuo consistente di quanti di grandezza $h\nu$ è giusto domandarsi se le leggi di emissione e di trasformazione della luce corrispondono a quello che ci si aspetterebbe se la luce fosse composta degli stessi quanti."



Effetto fotoelettrico (H. Hertz (1887), Hallwachs (1888), Elster e Geitel (1889-92), Lenard (1899-1902))

Luce monocromatica (tipicamente UV) su placche di metalli alcalini; rilevazione della corrente tra catodo e anodo, in un tubo a vuoto.

1. esiste **frequenza di soglia**, al di sotto della quale non vengono emessi elettroni;
2. numero di elettroni emessi proporzionale alla intensità della radiazione incidente
3. velocità degli elettroni dipendente solo dalla frequenza della luce, secondo legge $\frac{1}{2}mv^2=h\nu-A$, con A costante caratteristica del metallo.



Fig.21 Albert Einstein (1879-1955). L'immagine ritrae all'epoca in cui il giovane Einstein lavorava come impiegato di seconda classe presso l'Ufficio federale dei brevetti di Berna e scriveva gli importanti lavori che comparvero nel 1905 negli 'Annalen der Physik'.

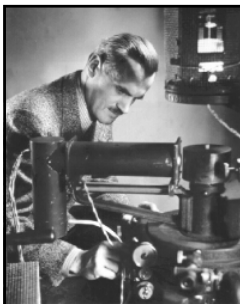
Ipotesi dei "quanti di luce" (1905):

- ogni quanto di luce colpisce un elettrone del metallo e gli cede la sua energia $h\nu$
- se questa energia è maggiore del lavoro di estrazione del metallo A , l'elettrone viene emesso
- l'avanzo di energia $h\nu-A$ di cui dispone l'elettrone costituisce l'energia cinetica con cui si muove dopo l'emissione

Il progresso su Planck è grandissimo:

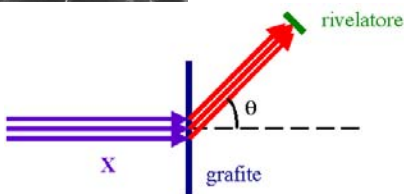
- per Planck è quantizzata solo l'energia degli oscillatori materiali delle pareti del corpo nero; il lavoro successivo di Planck lascia l'impressione che la quantizzazione sia un artificio di calcolo, piuttosto che un fatto reale;
- per Einstein si tratta di un fenomeno ondulatorio, in quanto è la luce stessa, ossia il campo elettromagnetico, ad essere quantizzato.

Einstein riceve il premio Nobel per la fisica nel 1921 "per i suoi contributi alla fisica teorica e specialmente per la sua scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico".



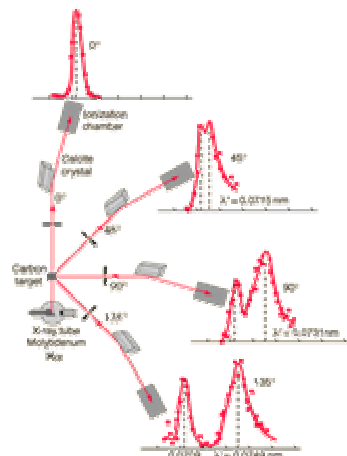
1922: conferma spettacolosa dell'ipotesi di Einstein dei quanti di luce grazie agli esperimenti dell'americano A.H. Compton (1892-1962) sulla diffusione di raggi X su grafite.

Secondo la teoria ondulatoria: gli elettroni del materiale vengono messi in oscillazione dalle onde elettromagnetiche incidenti e diventano essi stessi sorgente di radiazione elettromagnetica con la **stessa frequenza della radiazione incidente**.



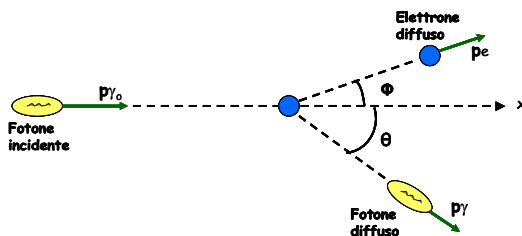
Compton osserva che

1. la radiazione diffusa ha una lunghezza d'onda λ' **diversa** da quella della radiazione incidente, λ
2. la differenza $\lambda' - \lambda$ **dipende dall'angolo di rilevazione**



Teoria corpuscolare della luce:
radiazione incidente costituita di **fotoni di energia $E=h\nu$ e quantità di moto**

$p = E/c = h\nu/c = h/\lambda$; ogni singolo fotone incide su un elettrone, trasferendogli parte della sua energia.



Conservazione dell'energia e della quantità di moto:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + p_e \cos \Phi$$

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - p_e \sin \Phi$$

$$mc^2 + h\nu = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4} + h\nu'$$



$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

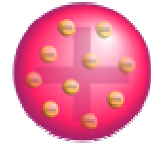
in accordo con l'esperimento

Compton riceve il premio Nobel per la fisica nel 1927 "per la scoperta dell'effetto che porta il suo nome".

Condivide il premio con C.T.R. Wilson "per il suo metodo di rendere visibili i cammini delle particelle elettricamente cariche mediante la condensazione del vapore".

I modelli atomici

- Elettone legato elasticamente (Lorentz per spiegare l'effetto Zeeman)
- Atomo di J.J. Thomson, elettroni immersi in carica positiva diffusa



Un atomo siffatto non può diffondere particelle α a grandi angoli, perché il campo elettrico medio all'interno dell'atomo è molto piccolo.



E. Rutherford (1871-1937) fornisce la base sperimentale per un modello atomico di tipo "planetario" (1911).

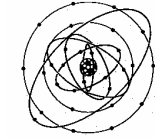
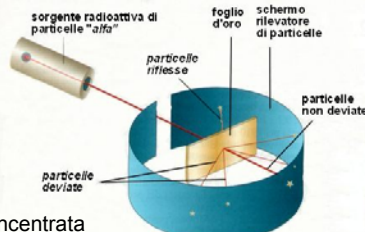
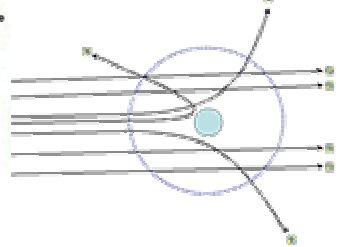


FIG. 5 - Schema del modello atomico di Rutherford.

La carica positiva è concentrata in un **nucleo** di dimensioni dell'ordine di 10^{-13} cm.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{2Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

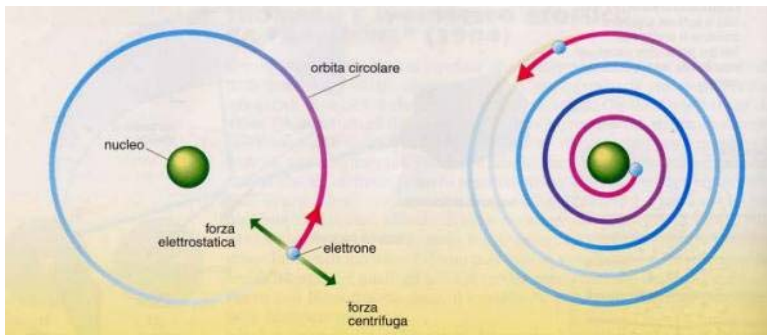


Formula verificata variando la sostanza bersaglio (quindi Z) e la velocità delle particelle proiettile; Z viene chiamato **numero atomico**.

Rutherford trascura esplicitamente i problemi di stabilità dell'atomo "planetario".

Secondo la teoria elettromagnetica una carica soggetta ad accelerazione emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica: gli elettroni dell'atomo di Rutherford dovrebbero emettere onde elettromagnetiche e, perdendo energia, spiralizzare fino a cadere sul nucleo ...

Nel caso dell'idrogeno, tutto ciò dovrebbe succedere in un tempo dell'ordine di 10^{-10} secondi!



Un siffatto scenario prevederebbe, tra l'altro, uno spettro di emissione continuo, in disaccordo con l'esperienza.

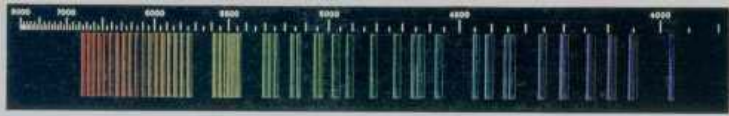
Digressione: Spettri di riga



Spettro solare
(continuo)



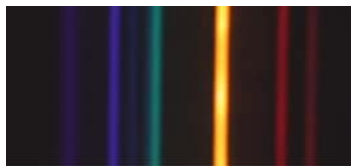
Spettro emissione
idrogeno atomico



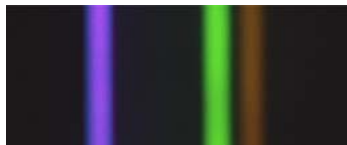
Spettro emissione
azoto molecolare



Spettro
assorbimento
del sole



Linee spettrali nel visibile dell'Elio



Linee spettrali nel visibile del mercurio
 $\lambda = 435.835 \text{ nm}$ (blu), 546.074 nm (verde), 576.959 nm e 579.065 nm (giallo-arancio).



Linee spettrali nel
visibile del Neon

N. Bohr (1885-1962)

Nasce a Copenaghen da un distinto fisiologo e dalla figlia di un ricco banchiere ebreo; suo fratello minore, Harald, diventerà un famoso matematico.

La famiglia gli garantisce un'educazione raffinata e frequenta i maggiori intellettuali della Danimarca, soprattutto filosofi e medici. Diventa ben presto un atleta (come il fratello, gioca a pallone in modo quasi professionale; scia fino a oltre 60 anni di età). Lui e il fratello spiccano negli studi scolastici.



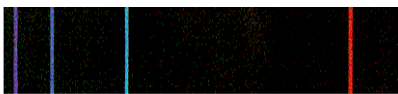
1903: comincia gli studi di fisica all'Università di Copenaghen, occupandosi di getti liquidi e tensioni superficiali; vince su questo tema un concorso dell'Accademia delle Scienze danese, con un lavoro teorico-sperimentale, facendo gli esperimenti nel laboratorio del padre. Poi, si dedica alla teoria, facendo il dottorato nella teoria dei metalli.

1911: si reca a Manchester per visitare Rutherford, che si stava occupando del passaggio di particelle α nella materia; decide allora di trasferirvisi e di occuparsi dello stesso problema.

1912: da una lettera al fratello emerge che ha ben presenti i problemi del modello atomico di Rutherford; oltre a quello della stabilità, c'è quello che tutti gli atomi hanno le stesse dimensioni e nel modello di Rutherford non c'è nulla che fornisca una scala di lunghezza; la chiave deve essere la costante di Planck.

Torna a Copenaghen per sposare Margrete Nørlund, degna compagna per bellezza e intelligenza.

1913: apprende, pare per la prima volta, che un professore svizzero di scuola secondaria, Balmer, aveva trovato nel 1885 una regolarità nello spettro dell'atomo di idrogeno



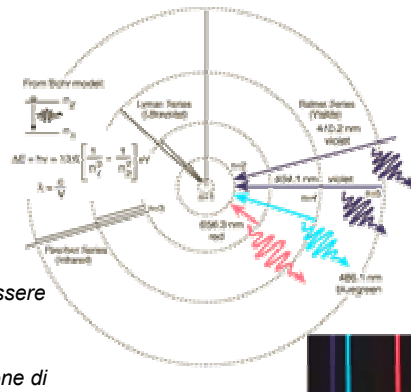
$$\nu = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots$$

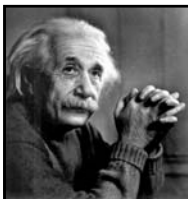
Ciò è della massima importanza, perché fornisce una pietra di paragone per qualunque teoria.

0. si assume l'esistenza di una serie di **stati stazionari**; mentre classicamente un atomo può avere orbite di qualunque raggio, pur di variare opportunamente la velocità di rivoluzione dell'elettrone, secondo Bohr solo alcune tra le orbite possibili sono permesse; queste orbite corrispondono agli stati stazionari;

1. "L'equilibrio dinamico dei sistemi in stati stazionari si può trattare con la meccanica ordinaria, mentre il passaggio da uno stato stazionario all'altro non può essere trattato su questa base."

2. "Quest'ultimo processo è accompagnato dalla emissione di una radiazione omogenea, per cui sussiste la relazione $W_2 - W_1 = h\nu$, dove W_2 e W_1 sono le due energie e ν è la frequenza della radiazione emessa."





Einstein (molti anni dopo): *"Che queste basi mal sicure e contraddittorie bastassero a un uomo con l'istinto e l'acutezza unici di Bohr a scoprire le leggi fondamentali delle righe spettrali, delle orbite elettroniche negli atomi e perfino la loro importanza per la chimica, mi sembrò allora un miracolo e tale mi sembra ancor oggi."*

Bohr: *"Assumeremo che le condizioni da usare per stabilire le energie medie negli stati stazionari siano tali che le frequenze ν , al limite quando il moto in stati stazionari successivi differisce molto poco, tenda a coincidere con le frequenze che sono da attendersi in base alla teoria classica ordinaria per il moto in queste orbite stazionarie."*



Principio di corrispondenza: per grandi orbite si deve passare con continuità dal caso classico a quello quantistico. Esempio: determinazione teorica della costante di Rydberg.

1913: Bohr scrive una formidabile trilogia di lavori: 1. costituzione generale degli atomi e delle molecole; 2. sistemi con un solo nucleo; 3. sistemi con più nuclei.

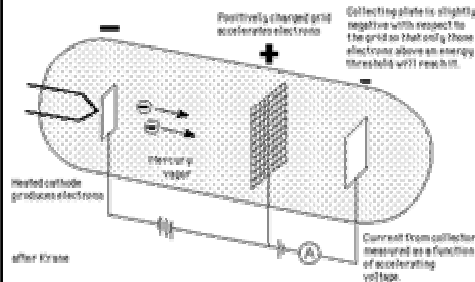
Alla fine del primo lavoro aggiunge un'osservazione importante: per le orbite stazionarie il momento angolare è $L = h / (2\pi)$ e questo può essere usato come criterio per scegliere gli stati stazionari.

Successo della teoria: altre serie spettrali dell'atomo di idrogeno, spettro dell'elio ionizzato, ecc.

Bohr ripete ad ogni occasione che la teoria è imperfetta e temporanea, ma le conferme sperimentali si accumulano.

L'esperimento di Franck-Hertz (1914)

In un tubo di vetro riempito di vapori di mercurio, gli elettroni emessi dal catodo vengono accelerati verso una griglia carica positivamente. Urtando contro gli atomi di mercurio, essi cedono parte della loro energia.



La corrente aumenta all'aumentare del potenziale della griglia; a 4.9 V, la corrente scende improvvisamente, segnalando una perdita brusca di energia da parte degli elettroni: gli elettroni cedono tutta la loro energia cinetica agli atomi di mercurio (che passano dallo stato fondamentale al primo stato eccitato) e non hanno più l'energia sufficiente a vincere il campo frenante tra griglia e anodo e a raggiungere quest'ultimo.

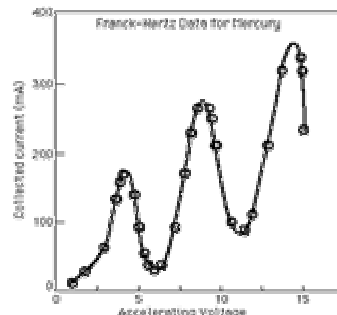


J. Franck (1889-1964)



G.L. Hertz (1887-1975)

Se gli atomi di mercurio possono trovarsi solo in stati stazionari quantizzati, le energie perse dagli elettroni nell'urto devono coincidere con le energie di eccitazione dell'atomo di mercurio.



Accoglienza dei lavori di Bohr:

- Rutherford comunica il lavoro al Philosophical Magazine, segno che ne ha una buona opinione, ma obietta *"Come fa un elettrone a sapere in quale orbita saltare?"*

Aneddoto: Rutherford trova il lavoro di Bohr un po' lungo e lo invita a scorciarlo; Bohr prende il piroscapo, va a Manchester e comincia a difendere rigo per rigo il lavoro, fino ad averla vinta.

- Birmingham, settembre 1913, riunione della British Association, dove, presenti Rutherford, Lorentz, Lord Rayleigh, i lavori di Bohr vengono discussi con attenzione; Lord Rayleigh mantiene fede all'impegno di non parlare dopo i 60 anni di età e non commenta nulla.

- A Gottinga, P. Debye e A. Sommerfeld sono entusiasti.

- A Zurigo, O. Stern e M. von Laue dicono che, se le conclusioni di Bohr sono corrette, lascerebbero la fisica.

- Sembra che Einstein sia stato subito entusiasta.

1915: scoppio della I guerra mondiale; Danimarca neutrale, Bohr simpatizza per gli alleati; incarico a Manchester.

1916: cattedra di fisica teorica a Copenaghen.

Bohr riesce ad avere dopo la guerra un istituto sperimentale annesso alla sua cattedra; nasce il Niels Bohr Institute (Blegdamsvej 15). In origine la sua casa è annessa ad esso.

La fama di Bohr cresce.

1920: viaggio in Germania e visita a Planck, Einstein ed altri

L'istituto di Copenaghen svolge una preziosa funzione di luogo di incontro internazionale, tanto più preziosa perché la fine della I guerra mondiale ha lasciato strascichi di odio e desideri di rivincita; nel mondo scientifico ufficiale ciò avveniva più tra le persone anziane e inattive, che tra i giovani.



Scanned at the American Institute of Physics

Il metodo di lavoro di Bohr spesso consisteva in lunghe discussioni con un interlocutore, durante le quali le idee prendevano forma; tra gli interlocutori di Bohr, molti giovani che poi diventeranno fisici famosi (Kramers, Dirac, Mott, Pauli, Heisenberg, Nishina, O. Klein, ecc.). Bohr pubblicava poco, ma serviva da perno di tutta l'attività.

Bohr viaggia parecchio e propaga le sue idee nei centri europei. Continua a sostenere la necessità di porre su basi solide la sua teoria, rimanendo molto più critico di molti cultori di essa, come Sommerfeld.

Egli organizza piccole conferenze private nel suo istituto (una trentina di fisici) invitando pochi fisici famosi e molti giovani, per farli conoscere e interagire tra di loro.





Conferenza di Copenaghen del 1937

Riceve il premio Nobel per la fisica (1922) "per i suoi servizi nell'indagine sulla struttura degli atomi e della radiazione che emana da loro".

La carriera di Bohr si estende anche dopo il superamento della sua "antica teoria dei quanti": forte influenza nello sviluppo della meccanica quantistica, non tanto per l'opera diretta, quanto per lo spirito di indagine coltivato nel suo istituto e per la raccolta che vi fece di giovani forze.

Viaggia molto, contribuendo a diffondere nel mondo le nuove idee (prima volta negli USA nel 1923).

Dopo l'avvento del nazismo le conferenze di Copenaghen diventano l'occasione per sistemare provvisoriamente gli scienziati profughi, in attesa di collocarli in una università, spesso con soddisfazione reciproca della vittima e della sede che accoglieva.

Bohr contribuisce con idee feconde alla teoria del nucleo, che hanno influenzato profondamente una intera generazione di fisici nucleari, incluso il figlio Aage (direttore del Niels Bohr fino al 1970).

Durante la II guerra mondiale sfugge all'arresto dai nazisti e rifugia in Svezia prima e in Inghilterra dopo; un giorno compare inatteso a Los Alamos, nel laboratorio dove si stava preparando la bomba atomica.

Trascorre la vecchiaia nel Palazzo Carlsberg a Copenaghen e per ospitalità, signorilità e tipo di frequentazioni, fa pensare ad un principe del Rinascimento.

Muore improvvisamente nel 1962.



La nascita della moderna teoria quantistica

Nasce nel giro di pochi anni, in tre formulazioni apparentemente diverse, ma che concordano nei risultati.

L'interpretazione dei risultati richiede una profonda revisione della concezione "classica" della realtà; si parla di "rivoluzione quantistica", dopo quella prodotta nel 1905 dalla relatività.

L. de Broglie (1892-1987)

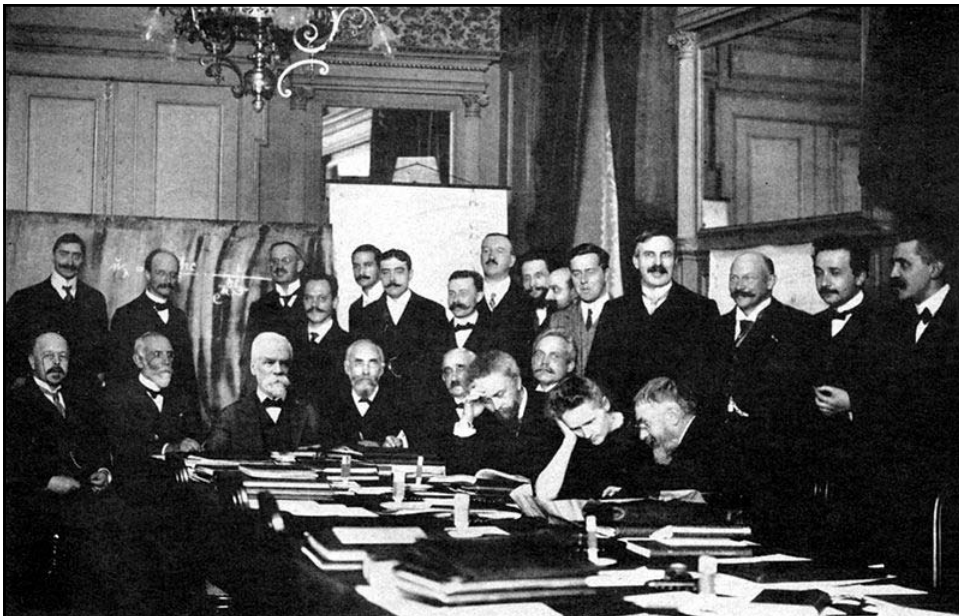
La famiglia de Broglie, originaria di Chieri in Piemonte, ha dato alla Francia sin dal XVII secolo vari marescialli, politici, diplomatici, tra i quali il fratello maggiore di Louis.

I genitori muoiono quando Louis è ancora giovane e di lui si occupa paternamente il fratello maggiore. Si orienta inizialmente verso gli studi di storia, poi, sente dal fratello i racconti dal Consiglio Solvay del 1911, cui questi aveva partecipato come segretario, e si accosta alla fisica.



Durante la I guerra mondiale si occupa di radiotelegrafia, dopo riprende gli studi di fisica, riflettendo sul dilemma della doppia natura ondulatoria/corpuscolare della luce.

Nel 1921 avrebbe desiderato assistere al terzo Consiglio Solvay, come membro esterno, ma non viene ammesso; giura di partecipare al successivo come membro invitato.



Prima Conferenza Solvay (1911)

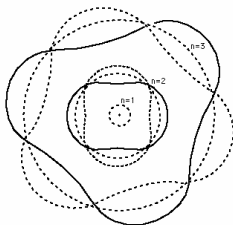


Quinta Conferenza Solvay (1927)

Ipotesi di de Broglie (1924): la stessa corrispondenza che esiste tra un'onda luminosa ed un quanto di luce deve esistere tra una particella ed una **onda di materia**.

Ad una particella che possiede quantità di moto pari a p viene associata un'onda piana di lunghezza d'onda pari a $\lambda = h / p$.

De Broglie giunge a questa conclusione da considerazioni relativistiche.



Per l'elettrone di un atomo di idrogeno la condizione di stazionarietà è data dalla condizione di non-autointerferenza:

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{p} \rightarrow mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

- quantizzazione del momento angolare (Bohr)

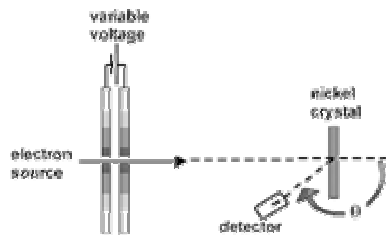
De Broglie espone le sue idee nei "Comptes rendus de l'Academie des Sciences" nel 1923-34; poi si prepara a metterle insieme nel lavoro di dottorato.

Imbarazzo della Sorbona per la mancanza di conferme sperimentali dirette: accettarlo o rigettarlo? Langevin, amico di M. Curie e di Einstein, manda a quest'ultimo copia dei lavori di de Broglie; ne riceve una risposta positiva, si trattava di cose importantissime.

Premio Nobel nel 1929 "per la scoperta della natura ondulatoria degli elettroni".

Esperimento di Davisson e Germer (1927)

Un fascio di elettroni era diretto verso un cristallo di nickel, che poteva essere ruotato per misurare la distribuzione angolare degli elettroni.

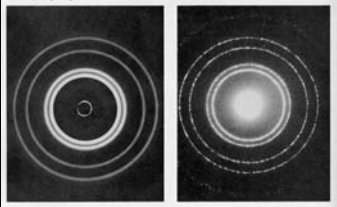


Variando il voltaggio, si può variare la velocità degli elettroni.

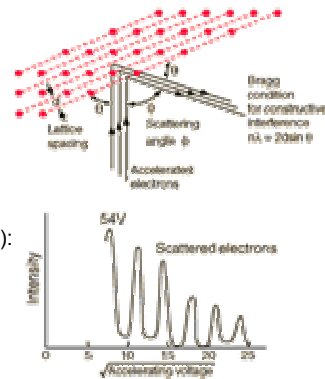


C. Davisson (1881-1958)
L. Germer (1896-1971)

A certi angoli si osserva un picco nell'intensità degli elettroni diffusi, in accordo con la condizione di interferenza costruttiva tra "onde elettroniche" riflesse da diversi piani reticolari, come accade con i raggi X.



Diffrazione da fenditura,
G.P. Thomson e Rupp (1927):
raggi X (sinistra), elettroni
(destra).



W. Heisenberg (1901-1976)

Nasce a Würzburg da un professore di greco dell'Università di Monaco, dove studia sotto la guida di Sommerfeld, facendo una tesi di idrodinamica.

A Monaco conduce una vita sportiva, ama le montagne, scia ed è un romantico patriota tedesco.

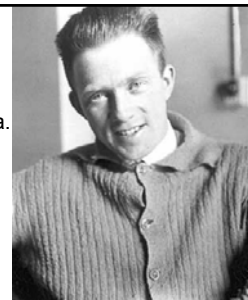
Non ancora trentenne fonda a Lipsia una scuola di fisica in cui si formano diversi teorici illustri, di poco più giovani di lui.

All'avvento del nazismo Heisenberg decide di restare in Germania con l'idea di salvare il salvabile, ma è troppo ottimista. Partecipa con scarso successo al progetto atomico tedesco.

Dopo la guerra fa il possibile per ricostruire la scienza in Germania. Si trasferisce a Monaco, dove dirige il Max Planck Institut.

Premio Nobel nel 1932 "per la creazione della meccanica quantistica, l'applicazione della quale ha, inter alia, condotto alla scoperta delle forme allotrope dell'idrogeno".

Muore nel 1976.



W. Pauli (1900-1958)

Coetaneo di Heisenberg, che incontra a Monaco quando questi lavorava sotto Sommerfeld.

Diventa celebre a 18 anni per aver scritto un libro di relatività che è ancora un classico.

Grasso e antisportivo sembra l'opposto di Heisenberg.
Terribile spirito critico e cultura formidabile. I colleghi si rivolgono a lui come ad un oracolo (non infallibile: vedi scoperta della spin).



Aneddoti: - nel 1932 i giovani fisici che lavorano da Bohr organizzano una parodia del Faust in cui Pauli è trasformato in Mefistofele, "*lo spirito che nega sempre tutto*";
- a chiunque propone una nuova idea risponde sempre "*Quatsch!*" (Sciocchezze), salvo poi essere di grande aiuto una vota convinto.

Dopo Gottinga e Copenaghen, nel 1923 va ad Amburgo da Stern, poi succede a Schrödinger a Zurigo (1928), salvo il periodo della II guerra mondiale, trascorso a Princeton. Muore a Zurigo.

Scoperte: **il principio di esclusione**, l'ipotesi del neutrino, la relazione tra spin e statistica ed altro. Notevole trattatista.

Premio Nobel per la fisica nel 1945 "per la scoperta del principio di esclusione, chiamato anche Il principio di Pauli".

Heisenberg entra in contatto con Bohr a Gottinga nel 1922, durante un seminario di quest'ultimo; dopo una discussione con lui, Bohr ne è impressionato e lo invita a Copenaghen.

Heisenberg va a Copenaghen nel 1924, dopo essersi laureato (1923) e dopo un breve soggiorno a Gottinga presso Born.

Nel 1924 Heisenberg comincia a formulare una teoria in cui entrassero non le orbite degli elettroni, che non sono osservabili, ma quantità direttamente osservabili, come le probabilità di transizione nei salti quantici; questa formulazione fa entrare in gioco grandezze a due indici, X_{nm} e dà luogo ad un'algebra non commutativa.

Dopo averne parlato con M. Born (1882-1970, premio Nobel nel 1954 "per la sua fondamentale ricerca in meccanica quantistica, specialmente per la sua interpretazione statistica della funzione d'onda"), quest'ultimo si accorge che si tratta di un'algebra di matrici.

Heisenberg, Born e Jordan sviluppano la **meccanica delle matrici** in cui la condizione fondamentale di quantizzazione prende la forma

$$p_{nr}q_{rm} - q_{nr}p_{rm} = \frac{h}{2\pi} \delta_{nm} \quad \text{oppure} \quad pq - qp = \frac{h}{2\pi}$$

Questa meccanica è tutt'altro che semplice; Heisenberg si era limitato ad applicarla a sistemi semplici come l'oscillatore armonico e anarmonico e a poco altro; Pauli con grande sforzo era riuscito ad applicarla all'atomo di idrogeno.

Nel 1927 Heisenberg formula il famoso **principio di indeterminazione**.



P.A.M. Dirac (1902-1984)

Di padre svizzero e madre inglese, studia ingegneria elettrotecnica a Bristol ma poi passa a matematica, prima a Bristol, poi al St. John's College di Cambridge con una borsa di studio.



Apprende a Cambridge la teoria di Bohr; dopo una visita di Heisenberg a Cambridge, riceve le bozze del suo lavoro sulla meccanica delle matrici e si sofferma sulla non commutabilità di p e q , osservando che aveva la stessa struttura delle matrici di Poisson della meccanica analitica. Ciò gli consente una nuova formulazione, diversa da quella di Heisenberg, ma equivalente ad essa.

Nel 1925 Dirac ottiene una formulazione completa della meccanica quantistica, fin dal principio in forma assiomatica.

Nel 1928 scrive l'equazione per l'elettrone relativistico, in cui lo spin dell'elettrone emerge con il corretto fattore giromagnetico e che prevede soluzioni ad energia negativa, interpretate come antiparticelle (positroni), osservate poi da Anderson nei raggi cosmici (1932).

Premio Nobel per la fisica nel 1933, insieme a Schrödinger per "la scoperta di nuove forme della teoria atomica".

1932: nomina a Lucasian Professor di matematica a Cambridge (stessa cattedra di Newton).

Di poche parole, esercita una grande influenza attraverso i suoi scritti, di stile stringato e profondo.



E. Schrödinger (1887-1961)

Nasce a Vienna, da padre coltissimo in molti campi e da madre inglese. Studia prima a Vienna, poi, dopo vari spostamenti, giunge a Zurigo per occupare la cattedra che era stata di Einstein, Debye, von Laue.

Colpito dai lavori di de Broglie e dai positivi commenti di Einstein, cerca di sviluppare una vera teoria ondulatoria, dapprima, senza successo, in modo relativistico.

Gennaio 1926: riprende il lavoro in approssimazione non relativistica e ricava la **famosa equazione**

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) + \frac{8\pi^2 m}{h^2} [E - U(x, y, z)] \psi(x, y, z) = 0$$

Da questa equazione, insieme alla condizione di normalizzazione della funzione d'onda ψ , la quantizzazione dei livelli atomici discende automaticamente.

I lavori di Schrödinger, scritti con chiarezza e facilità, riscuotono subito un grande interesse; egli viene invitato per un seminario a Berlino da Planck; anche Bohr lo invita a Copenaghen.

Nel 1933 succede a Planck a Berlino, poi, dopo l'avvento del nazismo, migra ad Oxford; nel 1936 torna imprudentemente a Graz (Austria), ma ne fugge via dopo l'annessione (1938). Cerca rifugio a Roma da Fermi che lo accompagna in Vaticano dove viene accolto. Si trasferisce a Dublino, all'Institute for Advanced Study fino al 1955, dove scrive "*Che cos'è la vita?*" (1944) poi torna a Vienna dove muore.

Cosa rappresentava la ψ ?

A Copenaghen la teoria è ammirata, ma la sua interpretazione non bene accetta. Bohr invita Schrödinger e lo subissa di domande e critiche fino a farlo esaurire.

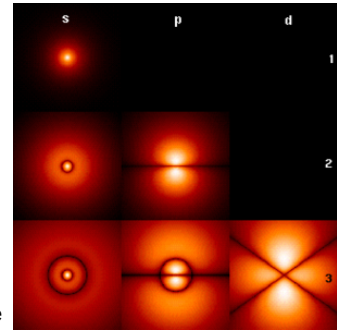
Nel 1926 M. Born interpreta correttamente la $|\psi|^2$ come densità di probabilità, invece che come densità di elettricità.

Ben presto lo stesso Schrödinger, C. Eckart in America ed altri si accorgono che la teoria di Schrödinger e quella di Heisenberg (quindi anche quella di Dirac) sono equivalenti.

Nel 1927 Heisenberg mostra che sia i concetti corpuscolari che quelli ondulatori oltre certi limiti sono fallaci e formula il suo famoso **principio di indeterminazione**: è impossibile determinare allo stesso momento con precisione illimitata la posizione e la velocità di un elettrone. Vale, invece, la restrizione data da

$$\Delta p \Delta q \geq \frac{h}{4\pi}$$

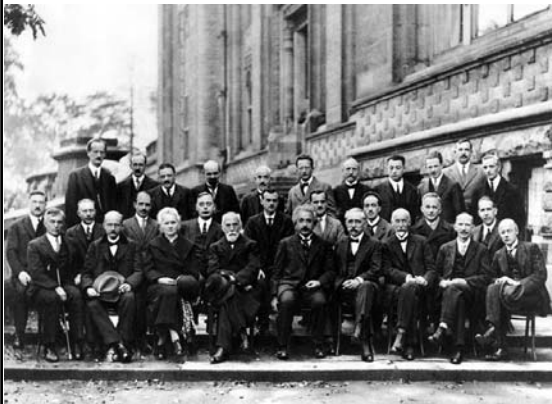
L'interpretazione probabilistica ha richiesto un cambiamento di paradigma radicale almeno quanto quello della relatività. Lo stesso Einstein non si è mai rassegnato ad una fisica probabilistica ("*Dio non gioca a dadi*"), pur riconoscendo la consistenza logica della teoria quantistica.



Orbitali atomo idrogeno

La meccanica quantistica ha la sua inaugurazione ufficiale al Congresso Internazionale di Fisica di Como (1927), per il centenario della morte di A. Volta. Bohr tiene un discorso sulla meccanica quantistica in cui tratta le questioni epistemologiche.

Eiinstein non partecipa, per non voler mettere piede nei domini di Mussolini; sarà presente, invece, alla V Conferenza Solvay (Bruxelles, 1927), in cui cerca in tutti i modi di trovare esempi contrari al principio di indeterminazione di Heisenberg, che Bohr, sistematicamente, smontava.



Fermi, Heisenberg, Pauli



Scanned at the American Institute of Physics

La meccanica quantistica prende forma e si consolida anche grazie alle prolungate discussioni tra Heisenberg, Pauli, Dirac e Bohr, durante i loro lunghi soggiorni a Copenaghen.

In quegli anni si è formata l'interpretazione "ortodossa" della meccanica quantistica, che oggi viene chiamata l'**interpretazione di Copenaghen**.

Da allora la nuova teoria ha mietuto successi dietro successi:

- estensione al caso relativistico (1928) e previsione del positrone
- teoria dell'atomo di elio (Heisenberg)
- teoria del legame chimico omopolare (Heitler, London)
- teoria dell'urto (Born)
- teoria del paramagnetismo (Pauli)
- teoria dei metalli (Bloch)
- teoria del ferromagnetismo (Heisenberg)
- teoria del decadimento radiattivo (Gamow e altri)
- ...

Per un breve periodo, bastava aver capito la meccanica quantistica per fare vere scoperte.

La meccanica quantistica non relativistica può essere considerata una disciplina chiusa; appare come una grandiosa generalizzazione della meccanica classica, su cui poggia.



Scanned at the American
Institute of Physics