

LA MECCANICA QUANTISTICA E I SUOI PROTAGONISTI

Vincenzo Schettino

Il titolo di questa lezione è un po' presuntuoso perché non si può pretendere, nel tempo che abbiamo a disposizione fare la storia della meccanica quantistica, dei suoi principi e delle loro implicazioni nella scienza e nella cultura più in generale e dei protagonisti. Cercheremo quindi di fare una semplice panoramica organizzando il discorso nel seguente modo:

- Una introduzione in cui illustreremo come la meccanica quantistica, introducendo concetti contro-intuitivi abbia costituito una autentica rivoluzione non solo nella scienza ma nel nostro modo di pensare più in generale,
- Poi leggeremo una poesia, scritta da uno scienziato, e commentando la poesia richiameremo i concetti e i principi fondamentali della meccanica quantistica;
- In seguito, discuteremo come i fisici quantistici, quasi tutti personaggi singolari se non strani, sono arrivati alle loro scoperte e si posti davanti a esse;
- Infine, se il tempo ce lo permetterà, parleremo di Max Born, un fisico che ha dato molti contributi fondamentali alla meccanica quantistica, anche se non ha ricevuto tutti i riconoscimenti che meritava, ottenendo comunque e sia pure tardivamente il premio Nobel nel 1954.
-

INTRODUZIONE

La meccanica quantistica è stata una grande rivoluzione scientifica e culturale. Secondo un paradigma consolidato nell'immaginario popolare le grandi scoperte scientifiche sono associate a un personaggio e a un momento particolare in cui si verifica la scoperta, quasi come una rivelazione. Per l'archetipo di questo possiamo risalire all'eureka di Archimede che, eccitato dalla scoperta del principio che porta il suo nome, salta fuori nudo e trionfante dalla vasca.



Senza voler risalire così indietro nel tempo, possiamo riferirci a Isaac Newton, il fondatore con Galileo della scienza moderna. Nel 1665 scoppia la peste in Inghilterra



E, in conseguenza, l'Università di Cambridge chiude. Newton è costretto a ritirarsi nella sua casa natale a Woolsthorpe, la casa nel cui giardino c'era il famoso albero dal quale una mela sarebbe caduta sulla testa di Newton facendogli capire come funzionava la gravitazione universale, come cantato da vari poeti; questi a esempio sono i versi di un limerick di David Asher, un astronomo del Armagh Observatory in Irlanda del Nord:

***"Quando Newton guardò su all'albero
Pensando: "Terra e Luna – come può essere?"***

***E realizzò: "Naturalmente!
E' la forza di gravità
Con la sua magica costante G***

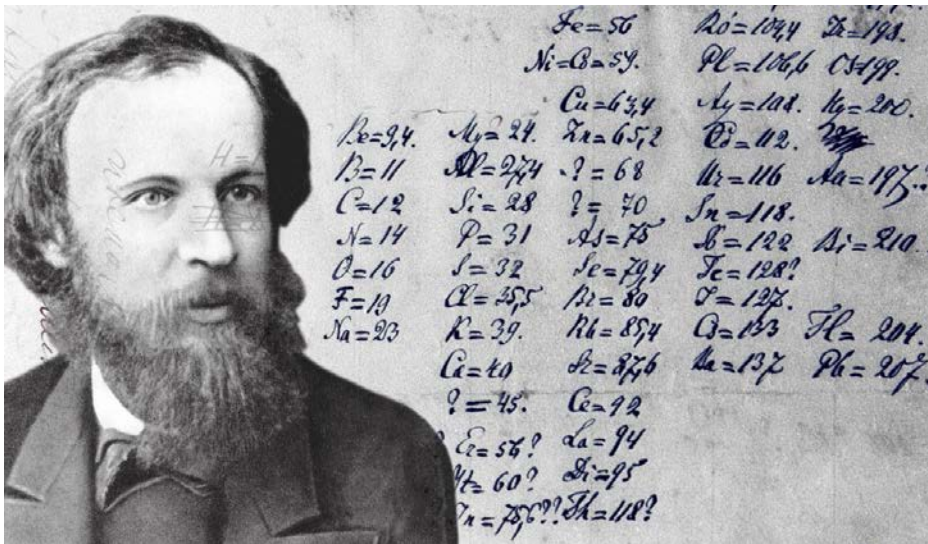
A parte la leggenda della mela, l'anno, o poco più che Newton trascorre a Woolsthorpe è l'**annus mirabilis** durante il quale Newton scopre tutto:

- Il calcolo differenziale o delle flussioni
- Le leggi della gravitazione
- Le leggi del moto
- Le leggi dell'ottica

anche se pubblicherà i **Principia** e **Optiks** molto tempo dopo perché l'assoluto rigore che caratterizzava il suo lavoro lo spingeva a voler essere assolutamente sicuro di quello che scriveva.

Questo stesso canovaccio riguarda non solo la fisica ma tutte le scienze e a esempio la Chimica. Quest'anno è stato dichiarato dall'Unesco Anno Internazionale del Sistema Periodico nella ricorrenza dei 150 anni della scoperta dei **Dmitrij Mendeleev**. Nelle sue memorie Mendeleev racconta di un sogno in cui improvvisamente i 63 elementi chimici che lui conosceva gli appaiono ordinati nella tavola periodica: svegliatosi improvvisamente si mette alla scrivania per trascrivere la tavola prima di dimenticarsi del sogno:

Ho visto in un sogno una tavola in cui tutti gli elementi erano al loro posto come richiesto. Appena mi sono svegliato, l'ho immediatamente trascritta su un pezzo di carta.



2019: ANNO INTERNAZIONALE DELLA TAVOLA PERIODICA

Lo stesso scienziato cerca di farci credere nella leggenda di una rivelazione improvvisa del sistema della tavola periodica.

Naturalmente, sappiamo che le cose non si svolgono esattamente così. Infatti, nello studio della storia della scienza un elemento costante e tradizionale di indagine è la ricerca di antecedenti e precursori delle grandi svolte nella dinamica del progresso scientifico. Complessivamente si può, parafrasando, applicare a queste dinamiche il famoso verso del poeta **John Donne**:

Nessuno è un'isola, chiuso in sé stesso

E del resto, Newton, parlando di sé stesso in una lettera a Robert Hooke, ha affermato:

***Se io ho visto più lontano degli altri,
ciò è stato perché stavo sulle spalle di giganti***

Nonostante questo, l'immagine della scoperta scientifica come una rivelazione improvvisa rimane come un riferimento comune, accomunando in qualche modo l'opera dello scienziato a quella del poeta che aspetta che la musa gli detti i suoi versi

La meccanica quantistica è stata una storia, o un'avventura, completamente diversa da questo stereotipo sotto almeno 3 punti di vista:

- 1. La durata**
- 2. Il numero di protagonisti che hanno contribuito**
- 3. L'atteggiamento dei protagonisti verso le loro stesse scoperte.**

!

1 -

La nascita della meccanica quantistica è stata un parto lunghissimo. Dopo la prima ipotesi di Planck del 1900 che, per spiegare l'andamento della emissione del corpo nero, soprattutto a bassa lunghezza d'onda, e risolvere il problema della catastrofe ultravioletta, introduce l'ipotesi quantistica assumendo che l'emissione degli oscillatori atomici avvenga non in maniera continua ma in maniera discreta, per quanti di energia E proporzionali alla frequenza ν attraverso una nuova costante, la costante di Planck h

$$E = h\nu$$

Da allora, ci sono voluti 30 anni per avere una teoria più o meno completa della meccanica quantistica. Ma la storia in realtà forse non è finita ancora.

Ad esempio, possiamo, pensare al laser, che si basa sulla teoria della emissione stimolata formulata da Einstein nel 1917 che descrive le condizioni per la moltiplicazione dei fotoni. Ebbene il primo laser fu realizzato solo nel 1950. e da allora, nel corso del tempo, ben 20 premi Nobel sono stati assegnati per la messa a punto di nuovi laser o per applicazioni del laser, fino al premio Nobel assegnato lo scorso anno. Ma di questo parleremo nell'ultima lezione di questo ciclo.

2 -

3 Il secondo aspetto caratteristico della meccanica quantistica è che non è stata opera di un singolo scienziato ma il risultato di una miriade quasi di ricercatori che lavorando spesso in maniera del tutto indipendente hanno messo insieme i pezzi di

un puzzle complicatissimo anche senza sapere l'uno quello che faceva l'altro e ritrovandosi solo a posteriori insieme per comporre un quadro complessivo.

Ma non sempre erano d'accordo. Stante le varie sfaccettature della teoria spesso non riconoscevano o aspramente criticavano quello che facevano gli altri, come vedremo in seguito. A parte questi dettagli, la nascita della meccanica quantistica è stata una grande impresa collettiva e la sua storia ha definitivamente obliterato l'icona dello scienziato solitario che nel suo laboratorio scopre i segreti della natura e possiamo interpretarla come una anticipazione del modo odierno di fare scienza in grandi strutture in cui ogni ricercatore porta un suo piccolo ma indispensabile contributo al risultato finale.



Planck	Einstein	Born	Dirac
Bohr	de Broglie	Pauli	Sommerfeld
Schrödinger	Feynman	Von Neumann	Heisenberg

Alcuni protagonisti della meccanica quantistica

3.

Possiamo poi identificare un ulteriore aspetto di unicità nel processo di nascita della meccanica quantistica. Alla fine del 800 la fisica sembrava navigare

nelle acque tranquille della meccanica di Newton e della teoria elettromagnetica di Maxwell, come è espresso da Lord Kelvin



Lord Kelvin

che scrive:

***Non c'è niente di nuovo da scoprire ora nella fisica.
Tutto quello che resta da fare è misure sempre più precise.***

In un'altra lezione su: ***Nuvole del 19.mo secolo sulla teoria dinamica del calore e della luce***, lo stesso Lord Kelvin diceva:

***La bellezza e la chiarezza della teoria dinamica
che asserisce che calore e luce sono modi di movimento
sono ora oscurate da due nuvole.***

Le nuvole a cui Lord Kelvin si riferiva erano il problema dell'etere e l'emissione del corpo nero. Ma la calma era solo apparente e le nuvole stavano per diventare molte più di due e molto più dense.

I PRINCIPI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Ricordiamo che in Italia la meccanica quantistica è stata portata da **Enrico Fermi** e dai ragazzi di via Panisperna. Enrico Fermi aveva trascorso un periodo di studio a Gottinga, in Germania, come assistente di Max Born e aveva portato in Italia le idee della nuova fisica maturate oltralpe.



Segré – Persico – Fermi
I ragazzi di Via Panisperna

Uno degli allievi di Fermi tra i **Ragazzi di Via Panisperna** era **Enrico Persico** (*Padre Enrico*) che poi era diventato professore di fisica a Torino (oltre l'Appennino) portando lì il nuovo Vangelo della meccanica quantistica predicato in Italia da Enrico Fermi. Padre Enrico ci ha lasciato una poesia in cui riepiloga i principi della nuova fede scientifica in cui credere, cioè della meccanica quantistica. Leggiamo questa poesia commentandola punto per punto:

$$\Psi = A e^{2\pi i \left(\frac{x}{\lambda} - \nu t \right)}$$

**Al di là dell'Appennino
Padre Enrico giunto è
Ed insegna altrui il cammino
Sulla strada della fè.
Incomincia la lezione
Col precetto elementare
Che è cattiva educazione
Carne umana divorare,
Narra poscia ch'oltre i monti
Vivon popoli fedel
Che del ver le sacre fonti
Ricevuto hanno dal ciel,
Essi han d'h il sacro culto**

Han nei quanti piena fè
E per loro è grave insulto
Dir che l'atomo non c'è.
Sono pur bestemmie orrende
Il negar che c'è la psi
Che valor non nullo prende
 $\Delta q x \Delta p$
Che dell'orbite ai momenti
S'addizionano gli spin
E elettroni equivalenti
Son dettati dal destin.
Credon poi con fè profonda
Cui s'inchina la ragion
Che la luce è corpo e onda
Onda e corpo è l'elettron.
Sono questi i dogmi santi
C'egli insegna agli infedel
Con esempi edificanti
Appoggiandosi al Vangel.

Il titolo, innanzi tutto, della poesia è l'espressione della funzione d'onda. Nello specifico si tratta della ψ per una particella libera (cioè che si muove nella direzione x sotto l'azione di un potenziale costante) e quindi un caso particolarmente semplice. La funzione d'onda si ottiene come soluzione della equazione di Schrödinger che nel caso monodimensionale e sotto l'azione di un potenziale $U(x)$ ha la forma

- Equazione di Schrödinger in una dimensione:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}$$

La funzione d'onda e l'equazione dipendono dalle coordinate e dal tempo e, in generale, possono essere separate in una parte temporale e in una parte

indipendente dal tempo. Nel caso di sopra, particolarmente semplice, la equazione di Schrödinger può essere risolta esattamente ma, nel caso più generale, le equazioni sono troppo complicate e dobbiamo procedere alla ricerca di soluzioni approssimate. Dopo che le leggi fondamentali della meccanica quantistica erano state formulate **Paul Dirac** affermò che:

le leggi fisiche sottostanti necessarie per la teoria matematica di gran parte della fisica e dell'intera chimica sono pertanto completamente conosciute e la difficoltà è che l'applicazione esatta di queste leggi porta a equazioni troppo complicate per essere risolte.

Una affermazione giusta ma forse troppo semplice.

La proprietà fondamentale della funzione d'onda, secondo l'interpretazione di Max Born, è che il modulo al quadrato della funzione d'onda in un elemento di volume dt

$$\Psi\Psi^*dt$$

Rappresenta la probabilità di trovare la particella in quell'elemento di volume. Descrivere un oggetto, ad esempio un elettrone, in questo modo costituiva un sovvertimento del modo di porsi davanti alla conoscenza del mondo fisico (microscopico): l'elettrone non è più visto come un oggetto macroscopico che caratterizziamo con una posizione e una velocità (momento) ma come qualcosa di cui possiamo avere una conoscenza solo probabilistica.

Ma procediamo per gradi leggendo la nostra poesia. L'incipit racconta di Persico (padre Enrico) che porta le nuove conoscenze della meccanica quantistica oltre l'Appennino come apprese e trasmesse da Fermi dai popoli del Nord:

**Al di là dell'Appennino
Padre Enrico giunto è
Ed insegna altrui il cammino
Sulla strada della fè.
Incomincia la lezione
Col precetto elementare
Che è cattiva educazione
Carne umana divorare,
Narra poscia ch'oltre i monti
Vivon popoli fedel
Che del ver le sacre fonti
Ricevuto hanno dal ciel,**

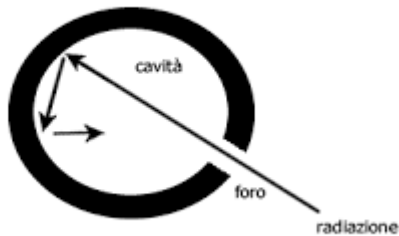
Il primo punto fondamentale della nuova teoria è l'ipotesi quantistica

**Essi han d'h il sacro culto
Han nei quanti piena fè**

L'ipotesi quantistica viene formulata in due momenti topici, nel 1900 da **Max Planck** per interpretare la emissione del corpo nero e nel 1905 da **Albert Einstein** nello studio dell'effetto fotoelettrico, cioè della emissione di elettroni da parte di un metallo illuminato da radiazione.

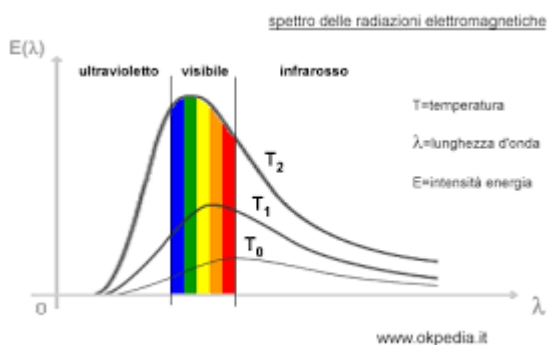
Idealmente il corpo nero è costituito da una cavità munita di un piccolo foro attraverso il quale può entrare o uscire la radiazione; caratteristica di un corpo nero è quella di assorbire e una volta riscaldato emettere radiazioni di tutte le frequenze

Esempio di corpo nero



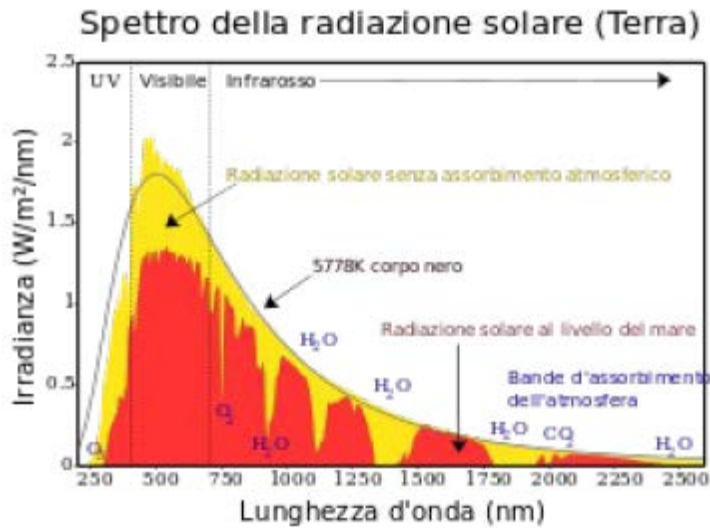
WWW.ANDREAMININI.COM

L'emissione di un corpo nero dipende dalla temperatura e, in funzione della frequenza, ha un andamento più o meno a campana con il massimo che si sposta verso le alte frequenze (cioè verso le lunghezze d'onda più basse) all'aumentare della temperatura. L'emissione di radiazione visibile è solo una parte della radiazione emessa.



Un corpo solido portato ad alta temperatura emette radiazione che solo parzialmente si avvicina all'andamento della emissione di un corpo nero. Come si vede dalla figura l'emissione di radiazione da parte del sole (con la sua temperatura di 5000 °C) si avvicina alla emissione di un corpo nero ideale, se teniamo conto che

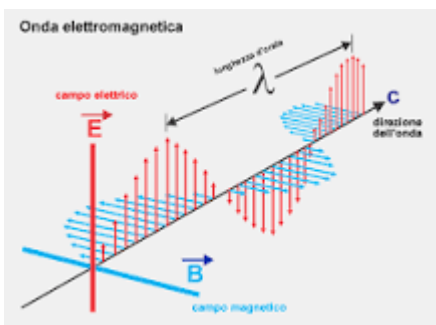
viaggiando verso la terra parte della radiazione emessa viene assorbita dai gas presenti nell'atmosfera (anidride carbonica, acqua, ozono, ossidi di azoto)



Secondo la teoria classica, dominante alla fine del 800, la radiazione, e tra queste la luce visibile in particolare, è costituita da onde elettromagnetiche che si propagano nel vuoto con la velocità della luce c e caratterizzate dalla lunghezza d'onda λ , la separazione tra i massimi del campo elettrico e del campo magnetico, o equivalentemente dalla frequenza ν

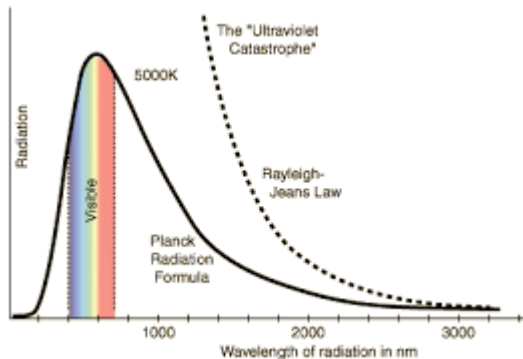
$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

e dall'altezza dei massimi il cui quadrato determina l'intensità e l'energia della radiazione. Quale era il problema con il corpo nero.



Applicando la teoria classica dell'elettromagnetismo l'andamento della emissione del corpo nero era riprodotto a lunghezze d'onda grandi, come si vede dalla figura, ma a lunghezze d'onda minori (cioè a frequenze alte) la curva teorica divergeva

dall'esperienza (legge di Rayleigh-Jeans) portando a una emissione infinita. Nel 1911 Paul Ehrenfest chiamerà questa anomalia della previsione teorica ***catastrofe ultravioletta***.

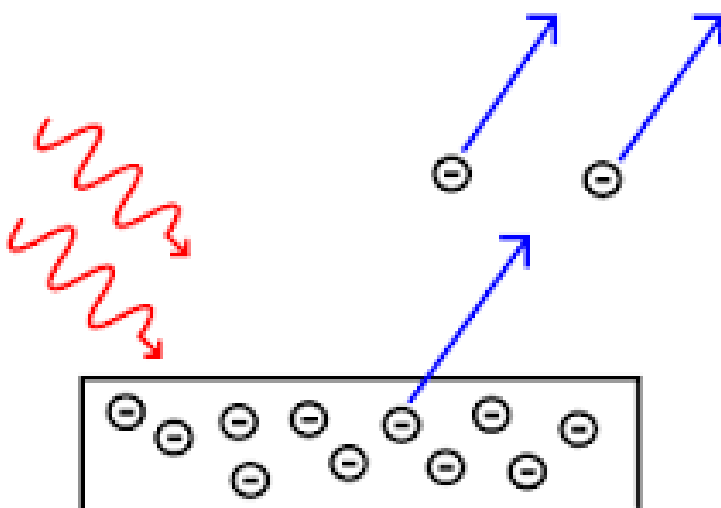


Affrontando il problema della emissione del corpo nero nel 1900 Max Planck ricorre a quello che lui stesso chiama un trucco, un ***artificio matematico***, assumendo che ad ogni frequenza gli oscillatori atomici ed elettronici emettano energia non in modo continuo ma in modo discontinuo per multipli di un ***quanto*** di energia proporzionale alla frequenza dell'oscillatore attraverso una costante ***h***, la costante di Planck menzionate nella poesia di Persico

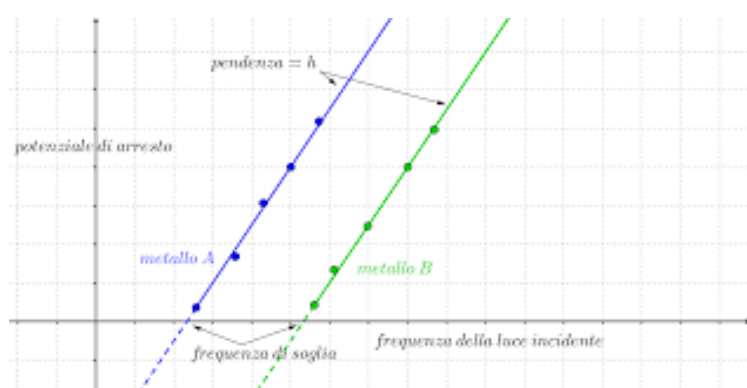
$$E = nh\nu$$

Certamente Planck non aveva una teoria in proposito ma il suo artificio introduce il concetto fondamentale che la luce, la radiazione, attraverso l'emissione di quanti, di quantità minime di energia sembra comportarsi come se avesse natura corpuscolare e non natura ondulatoria.

Il concetto di quantizzazione della energia si approfondisce nel 1905 nello studio di Einstein dell'effetto fotoelettrico. Come mostrato nella figura seguente



L'irraggiamento di un metallo produce, in certe condizioni, l'emissione di elettroni. Gli elettroni sono legati al metallo da una certa energia; la radiazione assorbita permette di strappare l'elettrone al metallo facendolo fuoriuscire con una certa velocità ed energia cinetica che corrisponde all'eccesso di energia della radiazione rispetto all'energia di legame dell'elettrone. Una caratteristica fondamentale dell'effetto fotoelettrico è che per una radiazione di frequenza al di sotto di un certo limite, la **soglia fotoelettrica**, qualunque sia l'intensità e l'energia, secondo l'interpretazione classica, della radiazione la emissione di elettroni non avviene. Si ha emissione fotoelettrica solo se la frequenza è superiore alla soglia fotoelettrica caratteristica di ogni metallo, come mostrato nella figura seguente



Einstein interpreta i dati sperimentali assunto che l'energia della radiazione sia proporzionale alla frequenza e non alla ampiezza dei campi elettrico e magnetico e quindi sia costituita da quanti di energia

$$E = h\nu$$

Solo nel 1926 questi quanti di energia verranno chiamati **fotoni** per la prima volta dal fisico ottico Frithiof Wolferse poi dal chimico Gilbert Newton Lewis e infine da tutti universalmente.

Le ipotesi di Planck e di Einstein introducono un concetto fondamentale nuovo nella fisica e cioè che la radiazione elettromagnetica ha una duplice natura di onda e di particella. L'aspetto rivoluzionario di questo sta nel fatto che questa duplice natura si manifesta alternativamente a seconda dell'esperimento che si esegue. Negli esperimenti di diffrazione e interferenza la radiazione si comporta come un'onda, o almeno questi esperimenti possono essere più semplicemente interpretati in termini di onde. Negli esperimenti del corpo nero e nell'effetto fotoelettrico invece l'interpretazione deve essere fatta in termini di una costituzione

corpuscolare. Questo fatto comporta una nuova profonda riflessione sulla natura stessa della nostra conoscenza del mondo che ci circonda. Dobbiamo, infatti, porci la domanda se il mondo materiale che noi studiamo ha una sua struttura ed evoluzione di cui lo scienziato è semplice osservatore ed interprete o se lo sperimentatore, decidendo l'esperimento da eseguire, costringe la natura a comportarsi in un modo o in un altro. Lo sperimentatore quindi non è un semplice osservatore ma un protagonista. Ma su questo ritorneremo in seguito.

Questo aspetto del dualismo onda-particella lo ritroviamo esplicitamente nella poesia di Persico in un più generale contesto se andiamo un po' avanti saltando per ora un pezzo quando dice che tra i dogmi del nuovo credo si sono:

Che la luce è corpo e onda
Onda e corpo è l'elettron.

Nel 1924 Louis de Broglie,



un giovane fisico francese, presenta la sua tesi di dottorato su *Recherches sur la théorie des quanta* (Ricerche sulla teoria dei quanti) in cui sostiene che l'elettrone,

tipicamente una particella, si comporta anche come un'onda con una lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

o più in generale

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

L'ipotesi di de Broglie è più generale nel senso che ogni particella o corpo in movimento ha una onda associata: è l'origine della cosiddetta **meccanica ondulatoria** e può essere sintetizzata nelle parole dello stesso de Broglie:

L'idea fondamentale della [mia tesi del 1924] era la seguente: Il fatto che, in seguito all'introduzione dei fotoni di Einstein nelle onde luminose, si sapesse che la luce contiene particelle che sono concentrazioni di energia incorporate nell'onda, suggerisce che tutte le particelle, come l'elettrone, deve essere trasportato da un'onda in cui è incorporato ... La mia idea essenziale era di estendere a tutte le particelle la coesistenza di onde e particelle scoperte da Einstein nel 1905 nel caso di luce e fotoni

L'aspetto ondulatorio della materia è stato formalizzato dalla funzione d'onda definita dall'equazione di Schrödinger, che abbiamo già vista e che è un'entità matematica pura con un'interpretazione probabilistica, senza il supporto di elementi fisici reali. Questa funzione d'onda dà un aspetto al comportamento delle onde della materia, senza far apparire vere onde fisiche.

Proseguendo nella lettura della poesia troviamo poi:

Sono pur bestemmie orrende
Il negar che c'è la psi
Che valor non nullo prende
 $\Delta q \times \Delta p$
Che dell'orbite ai momenti
S'addizionano gli spin

E elettroni equivalenti Son dettati dal destin.

la funzione d'onda, di cui abbiamo già parlato, e il principio di indeterminazione di Heisenberg che afferma che in una misura di posizione x e momento $p_x (=mv_x)$ di una particella in movimento il prodotto degli errori (delle incertezze) nella misura delle due grandezze non può mai essere inferiore a un limite definito in termini della costante di Planck:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Il principio di indeterminazione ha in realtà una portata più ampia nel senso che si riferisce in generale a due variabili coniugate; nella meccanica quantistica le grandezze fisiche sono associate a operatori. Gli operatori associati alle varie grandezze fisiche sono riportati nella tabella che segue

Postulato 4

Gli operatori sostituiscono le variabili dinamiche quali posizione, momento della quantità di moto p , energia totale del sistema, ecc..

Gli operatori agiscono sulla funzione $Y(x,t)$ trasformandola in un'altra funzione.

La meccanica quantistica impiega gli operatori piuttosto che le variabili dinamiche.

Variabile dinamica in meccanica classica	Operatore quantomeccanico
x	x
$f(x)$	$f(x)$
p	$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}$
$f(p)$	$f\left(\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}\right)$
E_{totale}	$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t}$
$E_{\text{potenziale}}$	$V(x)$
E_{cinetica}	$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$
E_{totale}	$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$
p^2	$-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}$

Due operatori si dicono coniugati e incompatibili se, come nel caso di posizione e momento non commutano:

$$xp_x - p_x x \neq 0$$

e

$$xp_x - p_x x \geq \hbar/2$$

e quindi si applica anche alle variabili coniugate Energia – Tempo.

Ritorniamo sul principio di indeterminazione e sulle sue implicazioni. In sostanza il principio afferma che è impossibile misurare con la precisione voluta due variabili coniugate in successione o simultaneamente perché il processo di misura stesso altera le condizioni del sistema e, quindi, quando misuriamo una variabile inevitabilmente alteriamo la variabile coniugata. Se così stanno le cose, è

concettualmente impossibile misurare tutte le proprietà di un sistema fisico ad un certo istante (condizioni iniziali) e se le condizioni iniziali non sono perfettamente note la evoluzione del sistema non può essere prevista se non in termini probabilistici. Viene quindi messo in discussione il determinismo e il principio di causalità nella evoluzione dei sistemi fisici. Su questo aspetto così si esprime Heisenberg:

Nell'ambito della realtà le cui condizioni sono formulate dalla teoria quantistica, le leggi naturali non conducono quindi a una completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo; l'accadere (all'interno delle frequenze determinate per mezzo delle connessioni) è piuttosto rimesso al gioco del caso (Heisenberg).

Questa è nella sostanza la cosiddetta ***interpretazione di Copenhagen*** della meccanica quantistica, generalmente attribuita a Bohr e Heisenberg. Ma non tutti erano d'accordo con questo punto di vista e tra questi soprattutto Einstein il quale riteneva che la meccanica quantistica in questa forma fosse una teoria incompleta e che ci fosse una teoria più completa, ancora non svelata, che avrebbe restituito alle particelle elementare una connotazione deterministica piuttosto che semplicemente probabilistica. Einstein espresse questa sua contrarietà a una visione puramente probabilistica con la famosa frase:

Dio non gioca coi dadi con l'universo

a cui Bohr avrebbe reagito con un ammonimento:

Smettila di dire a Dio quello che deve fare con i suoi dadi.

Sulla cosa è successivamente intervenuto nel 1996 [Stephen Hawking](#) dopo la scoperta delle conoscenze astrofisiche sulla struttura dell'universo e l'esistenza dei buchi neri che assorbirebbero e nasconderebbero tutto:

Einstein [...] sbagliò quando disse: «Dio non gioca a dadi». La considerazione dei [buchi neri](#) suggerisce infatti non solo che Dio gioca a dadi, ma che a volte ci confonda gettandoli dove non li si può vedere.

Le discussioni tra i fisici quantistici continueranno nel corso del tempo come vedremo.

I versi successivi della poesia di Persico

**Che dell'orbite ai momenti
S'addizionano gli spin**

pongono l'accento sullo spin, il quarto numero quantico nella descrizione della funzioni d'onda elettroniche e quindi nel **principio di esclusione** di Pauli che per particelle con spin semiintero (come gli elettroni) impone che una sola particella possa occupare un certo stato quantico. Il due versi successivi invece

**E elettroni equivalenti
Son dettati dal destin.**

accenna alla statistica di sistemi a molti elettroni.

I PROTAGONISTI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

I protagonisti della meccanica quantistica stavano per avventurarsi in una terra inesplorata nella quale non sapevano bene in che direzione stavano andando e non capivano bene quello che stavano facendo. Il punto di partenza era, come abbiamo già visto più sopra, la convinzione che la fisica del 1800 fosse ormai una scienza completamente definita dalle formulazioni della meccanica newtoniana e dell'elettromagnetismo di Maxwell.

Già l'iniziatore della storia della meccanica quantistica, Max Planck,

Max Planck

si trovò in questa situazione. Quando inizia i suoi studi di Fisica a Monaco nel 1874 e chiede consiglio al suo insegnante Philipp von Jolly questi lo scoraggia dipingendogli la fisica come:

una scienza altamente sviluppata, quasi completamente matura. . . Forse in un angolo o nell'altro ci potrà essere un granello di polvere o una piccola bolla da esaminare e classificare ma il sistema è nel complesso ben consolidato, e la fisica teorica è ormai vicina allo stesso grado di perfezione che la geometria ha già avuto da molti secoli.

Quindi, von Jolly lo sconsiglia di scegliere fisica perché

In questo campo quasi tutto è già stato scoperto e rimangono solo pochi buchi da riempire.

Ma Planck evidentemente, o fortunatamente, non gli dà ascolto. Planck si rende ben presto conto che le idee innovative possono avere vita dura e scrive che:

In quei giorni ero essenzialmente l'unico fisico teorico lì, per cui le cose non erano così facili per me, perché ho iniziato a menzionare l'entropia, ma non era abbastanza alla moda, dato che era considerata un fantasma matematico

E quando inizia la storia della teoria quantistica nello studio del corpo nero sembra prendere le misure dalla sua quantizzazione:

un'ipotesi puramente formale ... in realtà non ci avevo pensato molto

ma non gli manca il coraggio:

un atto di disperazione ... Ero pronto a sacrificare le mie precedenti convinzioni sulla fisica.

Successivamente, Planck cercò di capire il significato dei quanti di energia, ma non era facile:

I miei tentativi inopportuni di reintegrare in qualche modo il quanto di azione nella teoria classica si sono estesi per diversi anni e mi hanno causato molti problemi".

In seguito, altri fisici come Rayleigh, Jeans e Lorentz posero uguale a zero la costante di Planck per allinearsi con la fisica classica, ma Planck sapeva bene che questa costante aveva un preciso valore diverso da zero:

Non riesco a capire la testardaggine dei Jeans - è un esempio di un teorico che non dovrebbe mai esistere, lo stesso di Hegel per la filosofia, tanto peggio per i fatti se non si adattano"

In seguito, Max Born scrisse di Planck: "

Era, per sua natura, una mente conservatrice, non aveva nulla del rivoluzionario ed era completamente scettico riguardo alle speculazioni, ma la sua convinzione nella forza irresistibile della deduzione logica dai fatti era così forte che non sussultò dall'annunciare l'idea più rivoluzionaria che abbia mai scosso la fisica.

Si potrebbe pensare che questa situazione di dubbio o di incertezza in Planck riguardo all'ipotesi quantistica che lui stesso aveva formulato fosse dovuta al fatto che con lui il quanto di energia era stato formulato per la prima volta ed era una assoluta novità. Ma in realtà questa sensazione di incertezza continua in generale e molto tempo dopo. Questa sensazione di muoversi in un mondo sconosciuto la ritroviamo in Richard Feynmann, il padre della elettrodinamica quantistica,



Richard Feynmann

quando dice:

Penso di poter tranquillamente affermare che nessuno capisce la meccanica quantistica.

E lo stesso Feynmann, pensando di rivolgersi a degli studenti all'inizio di un corso sulla meccanica quantistica, ancora nel 1965 scrive:

Sarà difficile. Ma la difficoltà è davvero psicologica ed esiste nel tormento perpetuo che deriva dal vostro dire a voi stessi: "Ma come può essere così?" che è un riflesso del desiderio incontrollato ma assolutamente vano di vederlo in termini di qualcosa di familiare. Non lo descriverò in termini di analogia con qualcosa di familiare; Lo descriverò semplicemente. . . . D'altra parte, penso di poter affermare con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica. Quindi non prendete troppo sul serio la lezione, sentendo che dobbiate davvero capire in termini di qualche modello quello che sto per descrivere, ma rilassatevi e godetevela. Ho intenzione di dirvi come si comporta la natura. Se semplicemente ammetterete che forse si comporta in questo modo, la troverete una cosa deliziosa e affascinante. Non continuate a dire a voi stessi, se potete evitarlo, "Ma come può essere così?" perché verrete "scaricato" in un vicolo

cieco dal quale nessuno è ancora sfuggito. Nessuno sa come possa essere così.

Ma Feynmann non è il solo a pensarla così; anche Niels Bohr, uno dei principali fondatori della meccanica quantistica, nel 1952 scrive:

Quelli che non rimangono storditi quando per la prima volta hanno a che fare con la meccanica quantistica non possono sicuramente averla capita

Questa diffidenza o circospezione dei fisici quantistici riguardo alle equazioni e ai formalismi che loro stessi stavano mettendo o avevano messo a punto per calcolare le proprietà atomiche avevano una logica spiegazione. Questi nuovi formalismi si basavano su ipotesi sostanzialmente in disaccordo con i principi della meccanica classica newtoniana e dell'elettromagnetismo di Maxwell, principi sulla base dei quali era avvenuta la loro formazione scientifica e nei quali credevano ciecamente. Quello che appariva singolare era che le equazioni della meccanica quantistica, indipendentemente dal significato o dall'interpretazione che se ne poteva dare, davano ottimi risultati nel calcolo delle proprietà atomiche. Essi ci dicono esplicitamente che non riuscivano a rassegnarsi a fatti come quello che una particella materiale, come l'elettrone, si comportasse come un'onda e al fatto che la radiazione, un'onda secondo Maxwell, si comportasse come una particella, il fotone nell'effetto fotoelettrico, perché questo implicava andare oltre i canoni e il determinismo della fisica classica come, con la tradizionale lucidità, esprime Einstein negli anni 1950:

Ho pensato ai problemi quantistici cento volte di più che alla teoria della relatività generale. Prima dell'avvento della fisica quantistica, non c'era alcun dubbio in proposito: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella meccanica quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile. Alla domanda se una funzione ψ della teoria quantistica rappresenti una situazione reale effettiva, nel senso valido per un sistema di punti materiali o per un campo elettromagnetico, si esita a rispondere con un semplice «sì» o «no». Perché?

Tutti i fisici quantistici esprimono esplicitamente queste loro perplessità:

Non mi fu risparmiato lo shock che ogni fisico abituato al modo di pensare classico subiva quando sentiva parlare per la prima volta del postulato fondamentale della teoria quantistica di Bohr. (W. Pauli)

Se questi dannati salti quantici dovessero esistere, rimpiangerò di essermi occupato di meccanica quantistica! (E. Schrödinger)

Ricordo delle discussioni con Bohr che si prolungavano per molte ore fino a notte piena e che ci conducevano quasi ad uno stato di disperazione; e quando al termine della discussione me ne andavo solo a fare una passeggiata nel parco vicino continuavo sempre a ripropormi il problema: è possibile che la natura sia così assurda come ci appare in questi esperimenti atomici. (W. Heisenberg)

Questo clima allo stesso tempo di stupore, perplessità e impossibilità di inquadrare la meccanica quantistica negli schemi comuni lo ritroviamo nell'immaginario popolare. A esempio, nella serie televisiva [The Big Bang Theory](#), la storia di uno squinternato gruppo di giovani promettenti scienziati c'è la meraviglia per la meccanica quantistica:

***La fisica quantistica mi manda in estasi. [...]
È come guardare l'universo senza veli.***

Mentre nella serie televisiva [Joan of Arcadia](#) (nel titolo una parodia di Giovanna d'Arco) troviamo il seguente dialogo

***Luke: La teoria delle stringhe fornisce una descrizione unica
dell'universo. Insomma, è la pietra filosofale della fisica!***

Will: Certo, come lo sono le lasagne per la cucina italiana!

Luke: Non è un'analogia esatta...

Will: Beh, aspetta di assaggiare le lasagne!

Ritroviamo poi una battuta sulla meccanica quantistica da parte di Woody Allen, anche se fa un po' di confusione tra meccanica quantistica e teoria della relatività

Secondo te la fisica quantistica ha la risposta?

Scusa, ma a che cosa mi può servire che tempo e spazio siano esattamente la stessa cosa?

Cioè, chiedo a uno che ora è e lui mi risponde "6 Kilometri".

Ma che roba è?

Ma poi gli stessi fisici o chimici scherzano con i misteri della meccanica quantistica come ***Erich Huckel*** con questa poesiola su Schroedinger e sul significato della funzione d'onda ψ :

Erwin with his psi can do

Calculations quite a few.

But one thing has not been seen:

Just what does psi really mean?

Erwin con la sua psi può fare

Calcoli quanti ne vuole

Ma c'è una cosa che non si sa

Cosa questa psi veramente significhi

Lo stesso spirito a proposito del dualismo onda particella troviamo in ***William Henry Bragg***:

Dio fa andare gli elettromagneti con la teoria delle onde il lunedì, mercoledì, e venerdì, e il diavolo li fa andare con la teoria dei quanti il martedì, giovedì, e il sabato.

Mentre più drastico è ***David Hilbert***, che non lascia speranze ai fisici:

La fisica è decisamente troppo difficile per i fisici.

Se vogliamo arrivare alla fine di questa storia possiamo riferirci a quello che è stato scritto in un articolo del ***New York Times*** del 2005 in cui si riporta una discussione tra due personaggi, Ramsay e Legget, presumibilmente due fisici. Il secondo dice che bisognerebbe considerare con precisione meriti e difetti della meccanica quantistica e si chiede perché possiamo pensare che un elettrone possa essere in due stati contemporaneamente e non la stessa cosa per un gatto, dato che la teoria è la stessa. Il primo gli rimprovera di non avere capito bene il punto: non ha importanza come varia la funzione d'onda ma quello che è il risultato finale e che si può garantire dal calcolo che, se si tratta di un gatto, la previsione sarà che il gatto o è vivo o è morto. Viene poi riportato che ***David Gross***, premio Nobel per la fisica nel 2004, per la ***quantum ChromoDynamics***, ha affermato che 80 anni sono stati troppo pochi per radicare i nuovi concetti della meccanica quantistica nella testa degli

scienziati; siamo ancora troppo giovani per questo; dobbiamo aspettare fino al 2200 quando finalmente la meccanica quantistica sarà insegnata all'asilo.

Da questo breve racconto si vede che i protagonisti della meccanica quantistica vivevano e lavoravano in uno strano mondo. Scoprivano continuamente qualcosa di nuovo, anzi di rivoluzionario, nel comportamento degli atomi. Le cose, le loro formule, funzionavano, ma a loro stessi sembravano strane, quasi senza senso, perché erano controintuitive, cioè non si inquadravano né nel senso comune (e.g. il dualismo onda particella) né negli schemi consolidati della fisica classica in cui credevano ciecamente. Ma non solo ognuno aveva dubbi o perplessità su quello che lui stesso stavano facendo ma ancora di più si rifiutavano di credere o di considerare significativo quello che facevano gli altri. C'erano, è vero grandi amicizie e stima reciproca in molti casi, ma anche perplessità sulla ragionevolezza di quello che facevano gli altri, dal momento che c'erano punti di vista e formalismi diversi che, almeno inizialmente, sembravano inconciliabili. Come esempio di questo, possiamo leggere una opinione di Einstein che afferma che Planck, una delle figure nobili della meccanica quantistica, non capisce nulla di fisica:

Era una delle persone migliori che io abbia mai conosciuto ma non capiva proprio di fisica perché durante l'eclisse del 1919 è rimasto in piedi tutta la notte per vedere se sarebbe stata confermata la curvatura della luce dovuta al campo gravitazionale. Se avesse capito davvero [la teoria della gravità] avrebbe fatto come me e sarebbe andato a letto.

In questa situazione generale i protagonisti della meccanica quantistica ci sembrano un po' strani o almeno particolari. Io voglio raccontare ora qualcosa su Max Born che nella storia della meccanica quantistica è stato un padre nobile, un punto di riferimento e un rifugio per tutti, un poco come Niels Bohr, ma non ha avuto il riconoscimento completo e immediato dei suoi meriti e di questo suo ruolo. Per noi chimici e docenti di chimici Born è una figura molto importante che nel nostro insegnamento richiamiamo per:

- L'approssimazione di Born-Oppenheimer
- Il ciclo di Born-Haber
- La teoria dello stato solido (Born-von Karman)

Born nasce nel 1882. Il padre Gustav era professore di embriologia e anatomia nella Università di Breslau, la madre Gretchen Kauffmann veniva da una ricca famiglia di industriali dei tessuti. Entrambe le famiglie era di ascendenza giudaica cosa che avrà comunque un peso nella vita di Born. Fino alla prima guerra mondiale gli ebrei erano tollerati, se non proprio accettati, nella Germania, sia pure con alcuni importanti distinguo come vedremo. Born era un bambino fragile e di salute cagionevole e in tutta la vita soffersse di importanti attacchi di asma. Per questo motivo, fino alla iscrizione al Gymnasium di Breslau non fu mandato a scuola ma educato in casa dal padre; comunque ebbe una formazione di notevole livello perché il padre era una persona di grande cultura sia umanistica che scientifica. Questa circostanza e la perdita della madre all'età di quattro anni, che lo privò di un fondamentale punto di riferimento affettivo, possono aver determinato il carattere solitario di Born e le sue difficoltà di socializzazione. Non è che non si divertisse e facesse una vita brillante, ma questa era confinata nella splendida casa con parco dei nonni materni e con i numerosi cugini, ma al Gymnasium non era in grado di comunicare con i compagni, tanto meno con le ragazze. Born attribuiva questo suo carattere alla mancanza della madre: *Così una sorta di schermo si è sviluppato intorno a me e la natura non mi ha dato il dono di esprimere con parole le mie emozioni.* Il padre si risposa con Bertha Epstein che è molto affettuosa con Max ma la vera confidente e consigliera di Max è la zia materna Selma. La condizione affettiva di Born si aggrava, se possibile, con la morte del padre nel 1900. Nel seguito il Dr. Lachmann, un collega e amico del padre, diventerà il suo tutor e lo indirizzerà verso studi scientifici.

Al Gymnasium Born non era uno studente brillante e quando superò l'esame la madre Bertha si sentì sollevata e gli organizzò una grande festa. A questo punto, nel 1901 Born si iscrive all'Università di Breslau. Allora non c'era un curriculum obbligatorio e seguendo i consigli del padre esplora varie materie (filosofia, chimica, biologia, matematica, astronomia) ma come al ginnasio si annoia e non riesce ad appassionarsi soprattutto a materie che richiedono un certo grado di memorizzazione. Anche la matematica troppo astratta, senza applicazioni a problemi concreti, non gli piace. In questo periodo fa due stages a Heidelberg e a Zurigo, sempre alla ricerca della sua strada. Di ritorno a Breslau finalmente entra in un gruppo di matematici (studenti) con i quali si stabilisce un'amicizia che durerà tutta la vita; comincia insomma a socializzare anche la vita goliardica di Breslau, con lotte, duelli e cose del genere non erano fatte per lui.

Max Born ha scritto una autobiografia della sua vita personale e scientifica: era scritta per i figli e i nipoti ma il figlio la ha poi resa pubblica. Se uno legge questa biografia si rende conto che gli interessi principali di Born erano:

- La musica
- Lo sport (tennis, ciclismo, sci, cavalcare, nuoto, scalate in montagna ed altro)
- Un grande amore per la natura e specie per la montagna

Inoltre, si interessava della scienza. La sua grande storia scientifica inizia nel 1904, quando, su consiglio di Otto Toeplitz, si trasferisce all'Università di Gottingen. Lì c'era una grande tradizione scientifica che continuava con tre figure gigantesche, David Hilbert, Herman Minkowski e Felix Klein, con i quali entra subito in rapporto. Diventa lecturescribe e assistente di Hilbert. Ha una grande familiarità con Hilbert e Minkowski che frequenta correntemente anche fuori dell'Università. I rapporti con Klein sono più problematici: dopo aver frequentato un seminario di Klein sulla elasticità, Klein che ha una buona stima di Born gli propone una tesi con lui sulla elasticità. Born non interessato rifiuta suscitando l'ira di Klein che era personaggio molto potente e poteva condizionare la carriera di chi gli stava intorno. Comunque, sotto la guida di Carl Runge ottiene il PhD in matematica. Fa un tentativo di servizio militare, perché per un attacco di asma viene rimandato via. Poi nel 1907 fa un soggiorno in Inghilterra a Cambridge per lavorare nel Cavendish laboratory. Si vede come era un po' imbranato. Prima se ne sta un paio di settimane a Londra e dintorni, cosa che gli piace molto, e poi va a Cambridge. Ma ormai è tardi e forse anche per la sua scarsissima conoscenza dell'inglese non riesce ad iscriversi ai corsi. Non sa cosa fare e mentre pensa alla situazione vede un gruppo di giovani per strada che parla tedesco. Si fa aiutare e riesce infine a iscriversi ai corsi. Ma, non conoscendo l'inglese, non ci capisce molto. A un certo punto, lavora in laboratorio sotto la guida di George Searle con una studentessa molto bella e che gli piace molto. Ma la scarsa conoscenza dell'inglese gli gioca un brutto scherzo. Non sa che cosa fare con un angolo sul tavolo dell'esperimento; allora, sbagliando chiede a Searle: *Cosa faccio con questo angelo*, e Searle prontamente gli risponde: *Baciala!* Mettendolo completamente in crisi e facendolo cessare da ogni tentativo di approccio.

Ritornato in Germania, dopo un altro tentativo di servizio militare, ritorna a Breslau per studiare fisica, ma gli capita un'altra disgrazia. Mentre fa un esperimento si rompe un tubo e si allaga tutto il laboratorio durante tutta la notte. Quando la mattina il supervisore Otto Lummer vede il disastro non ha esitazioni a cacciarlo via dicendogli: *Non diventerai mai un fisico*. Mentre era in preda allo sconforto più totale trova che Minkowski stava studiando un articolo di un certo Einstein, che Minkowski aveva in precedenza definito un "cane pigro", sulla relatività che lui stesso stava studiando. Born si dedica a questo finché, anche per intercessione della madre, Minkowski gli propone di ritornare a Gottingen come suo assistente per una tesi sulla relatività.

Ma qui lo aspetta un altro disastro. Minkowski muore per un attacco di appendicite e Born si ritrova solo. Ma c'è di peggio. Deve fare una presentazione dei suoi risultati davanti a una commissione, di cui fa parte Klein, ma non riesce ad arrivare in fondo perché Klein lo interrompe continuamente con critiche ed osservazioni (del tipo ***Non capisci proprio di cosa stai parlando***) finché lo fa smettere definitivamente invitandolo a studiare la letteratura in matematica prima di presentarsi davanti alla commissione. Nel profondo dello sconforto pensa di ritornare a Breslau per laurearsi in Ingegneria. Lo salvano Runge e Hilbert che gli dicono di essere interessati al suo lavoro e che forse Klein non ha capito bene. Lo convincono a ripresentarsi davanti alla commissione; studia come un pazzo per alcune settimane e questa volta arriva in fondo senza che Klein faccia nessuna osservazione. Così infine riesce a presentare la sua tesi sul modello atomico di J.J. Thomson e a diventare (nel 1909) Privatdozent in fisica teorica a Gottingen. Ora il suo numero di amicizie aumenta e si consolida, mentre vive in una casa con altri ***El Bokarebo***. Per la prima volta viene invitato a un convegno internazionale, come lui Einstein; lui parla di Relatività, Einstein di altro (Luce e materia): *queste sciocchezze le ha lasciate a noi*.

[Partecipazione festival musicale wagneriano di Bayreuth, coi Nesser, grandi finanziatori del Festival. Moglie di Wagner, grande antisemita, non li invita].

Nel 1912 sposa Hedvig Ehrenberg (Hedi), conosciuta attraverso le cugine, da cui avrà tre figli (Grietli, Gustav e Irene). Anche Hedi aveva origini ebraiche ma era stata battezzata come luterana ed aveva cercato di convincere Max a battezzarsi, senza riuscirci. Born non era interessato alla religione: le professioni religiose e le chiese sono cose prive di importanza, e non era nemmeno minimamente interessato all'ebraismo. Tuttavia, nel 1914 si convinse a farsi battezzare, forse per far piacere alla moglie e forse per sentirsi ancor più radicato come tedesco, stante come abbiamo detto l'accettazione sub condizione degli ebrei in Germania.

Dopo un lungo soggiorno negli Stati Uniti, durante il quale fa sì un corso ma soprattutto gira tutti gli stati uniti, nel 1914 Planck lo chiama a Berlino come professore straordinario, un posto che non era stato accettato da von Laue.

Intanto scoppia la guerra e Born viene arruolato nella Army Signal Unit, una unità che si interessa di comunicazioni in cui svolge un ruolo molto importante. In questo periodo si cementa una grande amicizia con Einstein. Alla fine della guerra, cessato il servizio militare, fa un incontro casuale con Fritz Haber. Tra i due non c'era grande amicizia perché in precedenza Haber aveva cercato invano di coinvolgere Born nei suoi studi sulle armi chimiche. Da questo incontro venne fuori il famoso

ciclo di Born Haber per calcolare in modo indiretto le energie di una reazione chimica.

Dopo la guerra inizia il periodo d'oro della attività scientifica di Max Born. Nel 1919 fa uno scambio di cattedra con von Laue e diviene ordinario e direttore dell'Istituto di Fisica Teorica a Francoforte e nel 1921 viene chiamato a succedere a Debye come professore di Fisica teorica a Gottingen. (Si porta dietro il suo amico James Franck). Nel periodo 1921-1933 Gottingen diventa, sotto la guida di Born, il più importante centro di fisica teorica del mondo.

Il primo grande contributo scientifico alla fisica atomica di Born, in collaborazione con von Karman, ha riguardato la struttura cristallina dei solidi, le vibrazioni del reticolo e il calore specifico dei solidi. Nel 1912 (20 marzo) Born e von Karman avevano pubblicato un articolo su *Physikalische Zeitschrift* su questo. Sommerfeld lodò assolutamente i risultati e in particolare il modello del solido cristallino, ma poco dopo li informò che appena prima Debye aveva pubblicato un lavoro molto più semplificato, senza una struttura interna del solido, (definito una casa senza pareti da Born) sul calore specifico dei solidi e la sua variazione con la temperatura. Il merito è andato a Debye in sostanza perché il modello di Born era più completo e dettagliato, con troppa matematica, per quello che i fisici e chimici di allora potevano desiderare e digerire. Poco tempo dopo, un esperimento di Max Laue in Monaco, dimostrò sperimentalmente che la struttura del reticolo cristallino pensata da Born, come cosa che "non potrebbe essere altrimenti", era quella giusta. Il merito del tutto è andato a Debye e a Laue (premi Nobel 1938 e 1914 rispettivamente). In effetti, Born era stato proposto per il premio Nobel per i suoi lavori sui cristalli, ma senza successo. Diciamo in generale, come andiamo a vedere, che i riconoscimenti per Born sono stati più tardivi che per altri.

La stessa quasi coincidenza temporale che abbiamo visto per la formulazione della teoria dello stato solido si è verificata per la formulazione del formalismo della meccanica quantistica associato a Heisenberg o meccanica delle matrici e che ha visto Born come protagonista. Incidentalmente, possiamo ricordare che Born è stato il primo a usare la dizione "meccanica quantistica" in un suo articolo del 1924.

L'idea di partenza di Heisenberg è che anche ammettendo che l'elettrone si comporti come un'onda nello studio di quello che combina in un atomo o nelle varie interazioni dobbiamo usare solo quantità che possiamo misurare sperimentalmente. Ora un'onda elettronica non la possiamo certamente osservare fisicamente mentre possiamo osservare frequenze della luce che un atomo emette. associate alle transizioni tra vari stati energetici. Usando questo approccio Heisenberg elabora il

suo modello e scrive un articolo che dà a Born, di cui era assistente, perché lo revisioni e gli dica se è adatto per la pubblicazione, non sentendosi proprio del tutto sicuro di quello che aveva scritto. Born non riguarda subito l'articolo ma quando lo prende in mano osserva che Heisenberg ha usato strane regole di moltiplicazione per calcolare le probabilità di transizione tra i vari stati energetici dell'elettrone. Born all'inizio non capisce di cosa si tratta, ma poi si rende conto che Heisenberg, senza saper cosa fosse una matrice, aveva in pratica usato regole di moltiplicazioni di matrici, argomento che Born invece conosceva molto bene. Dopo aver licenziato il lavoro di Heisenberg per la pubblicazione, si mise alacremente al lavoro per capire e chiarire alcuni punti importanti con il suo collaboratore Jordan. Ad un congresso incontrò Wolfgang Pauli un grande fisico quantistico e suo assistente chiedendogli di collaborare al lavoro; Ma Pauli si rifiutò categoricamente dicendo con sarcasmo:

So che ti piacciono tanto i formalismi noiosi e complicati. Alla fine, riuscirai solo a impoverire le idee fisiche di Heisenberg con le tue futili matematiche.

Ma Born non si impressionò; tornato a Gottingen si rimise al lavoro con Jordan pubblicando un articolo in cui si giungeva alla famosa equazione della legge di commutazione della meccanica quantistica:

$$\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = \frac{h}{2\pi} \mathbf{I}$$

Cosa di cui era molto orgoglioso:

Sono stato la prima persona a scrivere una legge fisica in termini di simboli che non commutano.

Ma mancava ancora una cosa; c'era da dimostrare che i termini fuori della diagonale del prodotto non commutativo erano nulli. Quando il lavoro fu pubblicato e Heisenberg lo vide non poté fare a meno di dire

Ho un lavoro di Born che non riesco proprio a capire. E' pieno di matrici e non so quello che sono.

Ma si mise a studiare e ben presto pubblicarono un famoso lavoro a tre nomi (Born-Jordan- Heisenberg) che chiariva tutto del formalismo della meccanica delle matrici.

L'altra formulazione della meccanica quantistica parte dalla assunzione che l'elettrone si comporti come un'onda e scrive la equazione che descrive l'evoluzione di questa onda determinata dalla interazione tra le cariche degli elettroni e del nucleo. E' la formulazione di Schroedinger con la sua famosa equazione d'onda:

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \right] \Psi \quad \Psi \equiv \Psi(r,t)$$

In cui compare la funzione d'onda ψ . Prima che fosse pubblicato il lavoro di Schroedinger, Born aveva lavorato a qualcosa di simile insieme con Wiener, perché gli piaceva molto l'idea di De Broglie che l'elettrone si potesse comportare come un'onda. Naturalmente si trattava di capire cosa fosse o cosa rappresentasse la funzione d'onda ψ . Secondo Schrodinger ψ era una vera e propria distribuzione di carica, cioè rappresentava una nuvola di carica elettronica. Applicando l'equazione di Schroedinger allo scattering, cioè all'urto di un elettrone con un atomo giunse alla conclusione che la ψ era in realtà una distribuzione di probabilità nel senso che il quadrato $|\psi|^2$ dà in ogni punto la probabilità che l'elettrone sia in quel punto. Questa interpretazione costituiva il ritorno a una forma di determinismo: è vero che la particella, l'elettrone, si muove secondo una legge probabilistica ma la probabilità, a sua volta, si propaga secondo le leggi della causalità.

Naturalmente, le idee di Born, come abbiamo generalmente visto nello sviluppo della meccanica quantistica, suscitano brutte reazioni. Heisenberg lo accusò di essere un traditore della meccanica delle matrici, scagliandosi contro Born e Pauli:

Più penso all'aspetto fisico della teoria di Schroedinger, più disgusto io provo.

Ma a sua volta anche Schroedinger non ci andava di mano leggera:

Non c'è nessuna relazione genetica con Heisenberg che io conosca. Conosco naturalmente la sua teoria ma mi sento scoraggiato, per non dire ripugnato, di metodi dell'algebra trascendentale, che sono per me difficili.

Nel 1928 Einstein aveva proposto per il premio Nobel Heisenberg, Born e Jordan ma la cosa non era andata avanti. Successivamente per il 1932 era stata proposta la terna Schroedinger, Heisenberg e Born. Ma poi Born era stato cancellato e nel 1932 il premio era andato a Heisenberg mentre nel 1933 era stato assegnato a Schrodinger e a Dirac. Molti hanno pensato che sia stata una ingiustizia nei confronti di Born. In occasione del Nobel 1932, senza rancore, Born scrisse una lettera di congratulazioni a Heisenberg il quale ringraziò quasi scusandosi e riconoscendo il contributo di Born:

Se non ti ho ringraziato ancora per le tue congratulazioni è stato in parte per la mia cattiva coscienza verso di te. Il fatto che io abbia ricevuto il premio Nobel da solo per un lavoro in collaborazione, tu, Jordan e io, è un fatto che mi deprime e non so cosa scriverti. . . Credo che tutti i buoni fisici sappiamo quanto grande è stato il contributo tuo e di Jordan alla struttura della meccanica quantistica e questo non può essere cambiato da una errata decisione esterna. Comunque, non posso fare niente a parte ringraziarti ancora per la bellissima collaborazione e vergognarmi un po'.

Comunque, infine, nel 1954, all'età di 72 anni Born ricevette il Nobel in fisica per ***la fondamentale ricerca nella meccanica quantistica, in particolare nella interpretazione statistica della funzione d'onda.***

Certamente è impressionante, per valutare la grandezza scientifica di Max Born guardare semplicemente all'elenco di grandi scienziati, vari premiati con il premio Nobel che sono stati suoi studenti PhD o suoi assistenti:

Studenti PhD	Assistenti
Max Delbruck	Enrico Fermi
Siegfrid Flugge	Werner Heisenberg
Friedrich Hund	Gerhard Herzberg
Pascual Jordan	Friedrich Hund
Maria Goppert-Mayer	Pascual Jordan
Lothar Norheim	Wolfgang Pauli
Robert Oppenheimer	Leon Rosenfeld
Victor Weisskopf	Edward Teller
	Eugene Wigner
	Walter Heitler

Forse meglio di tutti ha espresso la grandezza di Born il suo grande amico ed estimatore Albert Einstein in una lettera in risposta alla richiesta di consiglio per la scelta dell'Università dove andare come professore:

Theoretical physics will flourish wherever you happen to be; there is no other Born to be found in Germany today.

REFERENZE

1. **S. Califano, V. Schettino**
La nascita della meccanica quantistica
FUP, Firenze 2017
2. **Abraham Pais**
Il danese tranquillo, Niels Bohr: un fisico e il suo tempo (1885-1962),
Bollati Boringhieri, Torino 1993
3. **Gabrielle Greison**
L'incredibile cena dei fisici quantistici,
Salani 2016
4. **Graham Carmelo,**
L'uomo più strano del mondo, Vita segreta di Paul Dirac, il genio dei
quanti,
Cortina 2013
5. **Michael Frayn,**
Copenhagen
Sironi 2003
6. **Giorgio Colangelo,**
La banda di via Panisperna,
Hoepli 2013
7. **George Gamow,**
Trent'anni che sconvolsero la fisica: La storia della teoria dei quanti,
Zanichelli 1955
8. **Gabriella Greison,**
Hotel Copenhagen,
Salani 2018
9. **Max Born,**
Autobiografia di un fisico,
Editori Riuniti 2015