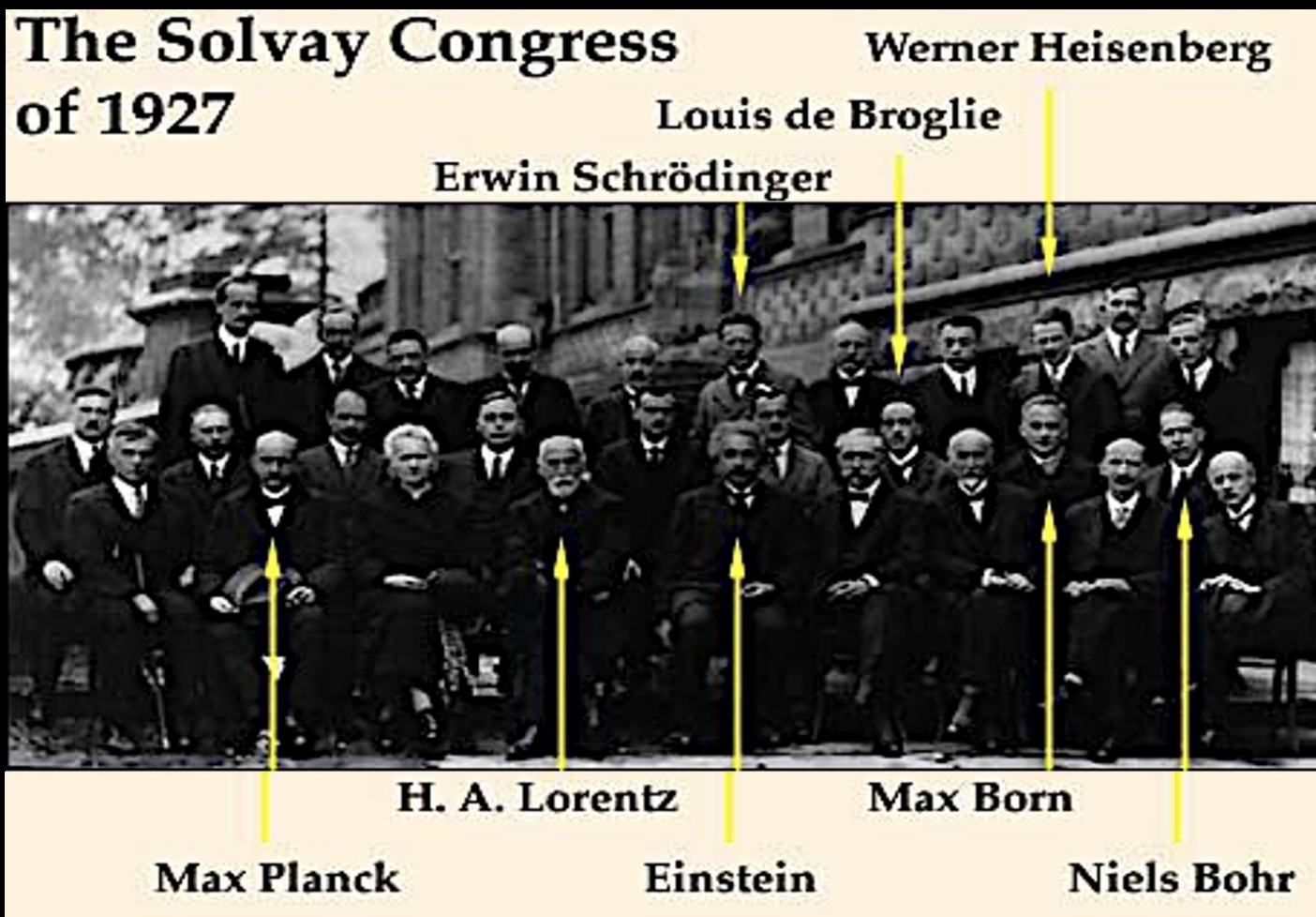


PLANCK, BOHR, HEISENBERG

Nascita e Sviluppi della Meccanica Quantistica

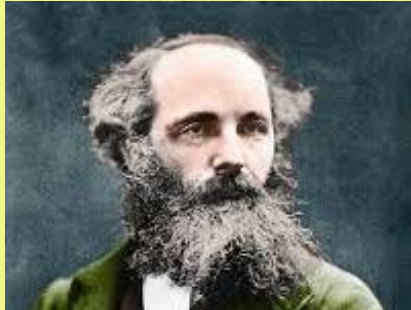


La Fisica Classica e i suoi limiti

Alla fine del **XIX secolo**, la fisica sembrava una disciplina quasi "completa". Grazie ai successi di Newton, Maxwell, e altri, i fenomeni del mondo macroscopico erano spiegati in modo accurato attraverso **due pilastri fondamentali**:



- **Meccanica classica** (Newton): descrive il moto degli oggetti, dalla caduta dei corpi alle orbite planetarie.



- **Elettromagnetismo** (Maxwell): descrive i fenomeni elettrici, magnetici e ottici.

Molti scienziati credevano che la fisica avesse raggiunto il suo **apice**, con solo pochi "**dettagli**" da risolvere. Tuttavia, proprio quei dettagli portarono alla **crisi** e alla nascita di una nuova fisica...

La Fisica Classica e i suoi limiti



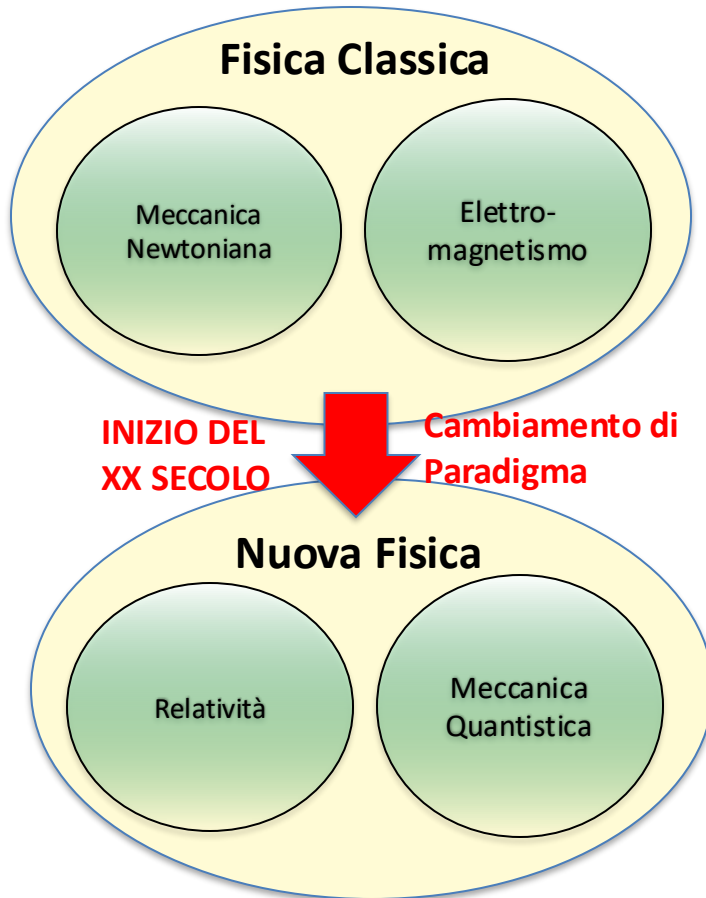
(1922-1996)

Thomas Kuhn (Paradigmi e Rivoluzioni Scientifiche)

- La scienza progredisce attraverso **paradigmi**, insiemi di teorie e metodi condivisi da una comunità scientifica.
- Il progresso scientifico non è lineare, ma alterna periodi di **scienza normale** (lavoro entro un paradigma) e **rivoluzioni scientifiche**, che avvengono quando un paradigma viene sostituito da un altro.
- Le rivoluzioni scientifiche sono in parte soggettive e influenzate da fattori sociali e culturali.

Esempi di **cambiamenti di paradigma** nelle scienze fisiche:

- Dalla cosmologia geocentrica a quella eliocentrica
- Dalla fisica aristotelica alla meccanica newtoniana
- Dalla termodinamica classica alla meccanica statistica
- Dal determinismo classico al caos deterministico
- Dalla meccanica newtoniana alla meccanica relativistica
- Dalla meccanica classica alla meccanica quantistica



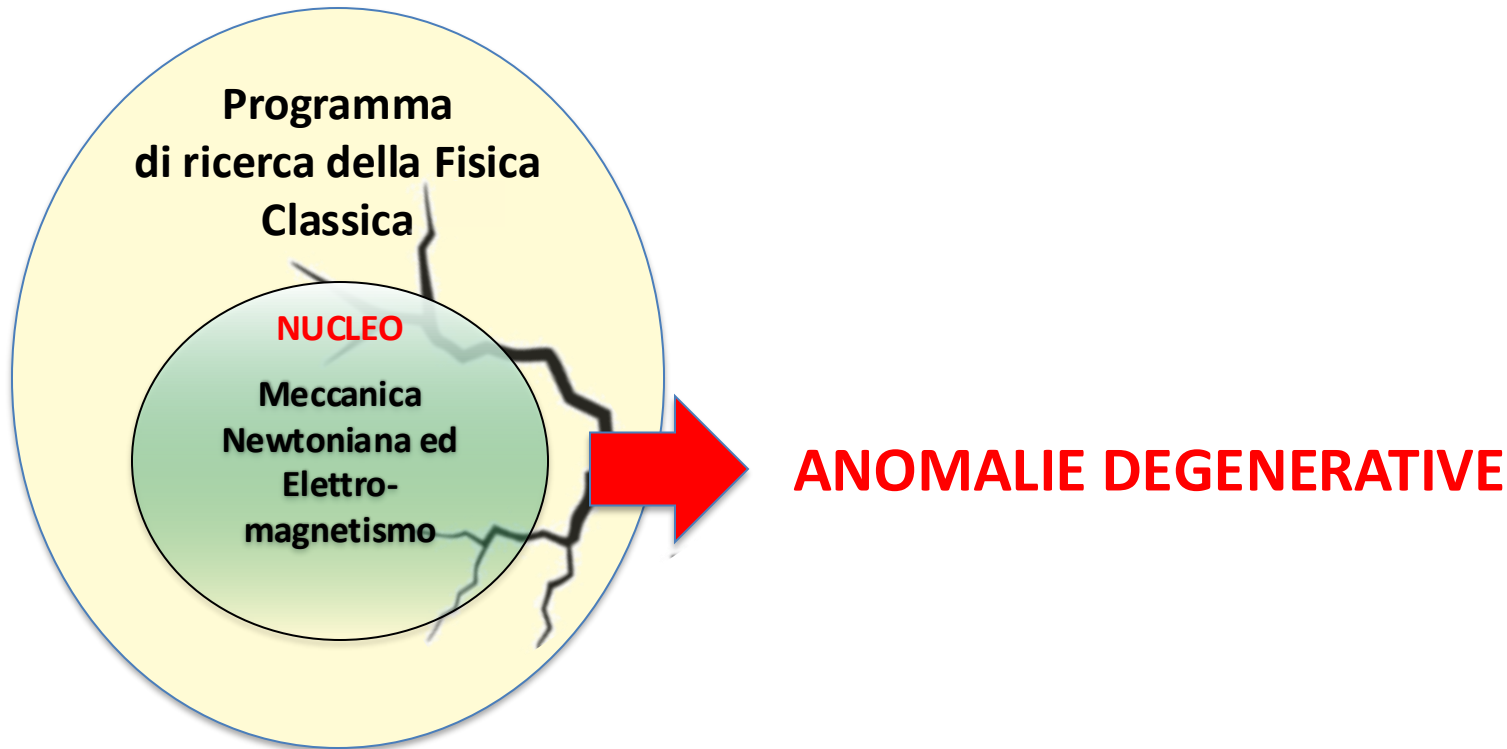
La Fisica Classica e i suoi limiti



(1922-1974)

Imre Lakatos (Programmi di Ricerca Scientifici)

- Combina aspetti di Popper e Kuhn: la scienza avanza attraverso **programmi di ricerca** caratterizzati da un **nucleo centrale** protetto da ipotesi ausiliarie.
- Un programma è progressivo se genera nuove previsioni verificabili; è degenerativo se non produce nuova conoscenza empirica.
- Rifiuta sia il falsificazionismo puro di Popper sia il relativismo di Kuhn.



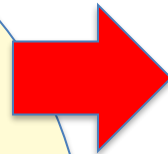
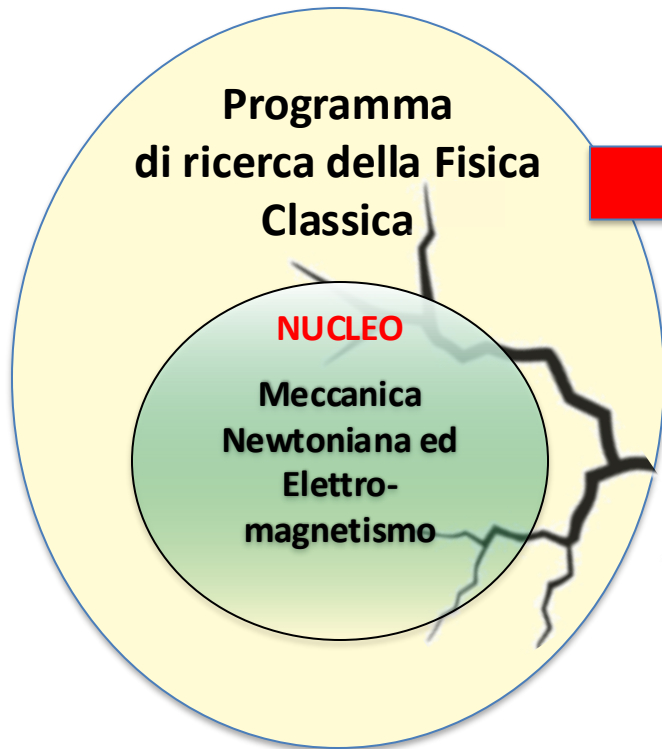
La Fisica Classica e i suoi limiti



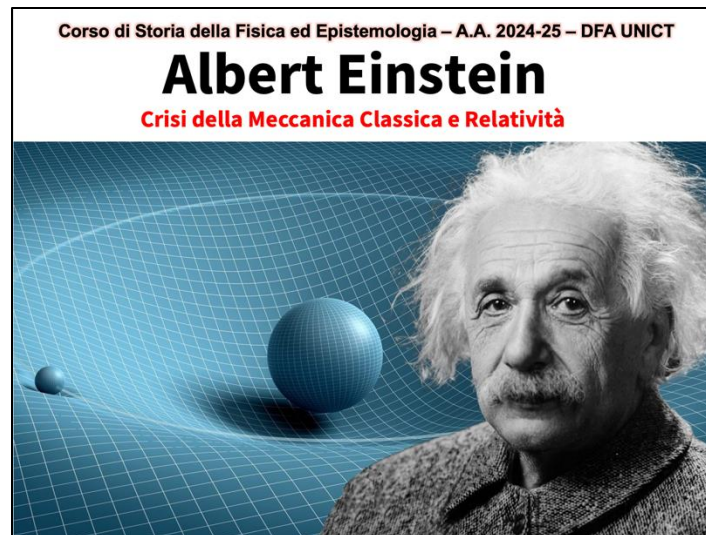
(1922-1974)

Imre Lakatos (Programmi di Ricerca Scientifici)

- Combina aspetti di Popper e Kuhn: la scienza avanza attraverso **programmi di ricerca** caratterizzati da un **nucleo centrale** protetto da ipotesi ausiliarie.
- Un programma è progressivo se genera nuove previsioni verificabili; è degenerativo se non produce nuova conoscenza empirica.
- Rifiuta sia il falsificazionismo puro di Popper sia il relativismo di Kuhn.



ANOMALIE DEGENERATIVE



Nella lezione scorsa abbiamo già visto le **anomalie** che hanno portato alla teoria della **Relatività**. Vediamo adesso quelle che condussero alla **Meccanica Quantistica**...

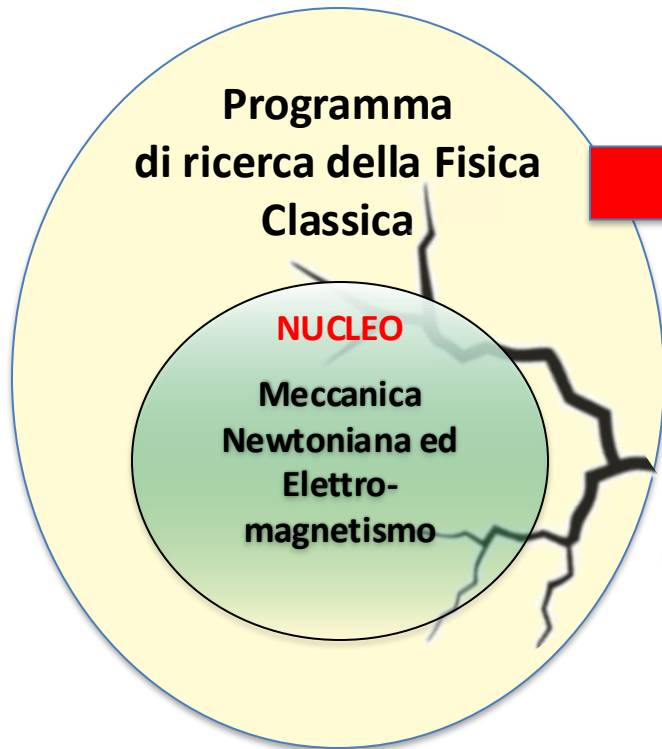
La Fisica Classica e i suoi limiti



(1922-1974)

Imre Lakatos (Programmi di Ricerca Scientifici)

- Combina aspetti di Popper e Kuhn: la scienza avanza attraverso **programmi di ricerca** caratterizzati da un **nucleo centrale** protetto da ipotesi ausiliarie.
- Un programma è progressivo se genera nuove previsioni verificabili; è degenerativo se non produce nuova conoscenza empirica.
- Rifiuta sia il falsificazionismo puro di Popper sia il relativismo di Kuhn.



ANOMALIE DEGENERATIVE

1. La radiazione del corpo nero

- **Cos'è il corpo nero?** Un corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente e ne emette in funzione solo della sua temperatura.
- **Problema:** La fisica classica, tramite le leggi di Rayleigh-Jeans, prevedeva che l'intensità della radiazione emessa crescesse all'infinito per frequenze elevate. Questo portava alla cosiddetta *catastrofe ultravioletta*: risultati sperimentali e teorici erano in totale disaccordo.

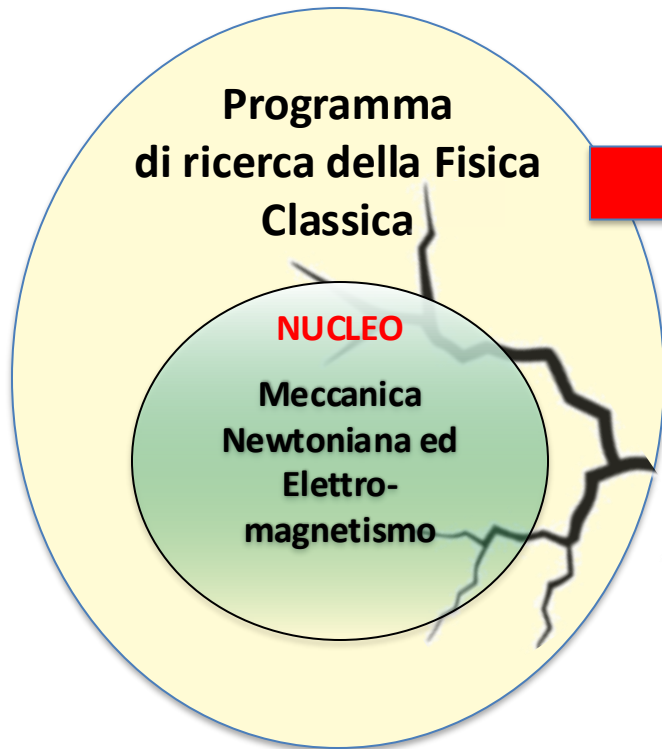
La Fisica Classica e i suoi limiti



(1922-1974)

Imre Lakatos (Programmi di Ricerca Scientifici)

- Combina aspetti di Popper e Kuhn: la scienza avanza attraverso **programmi di ricerca** caratterizzati da un **nucleo centrale** protetto da ipotesi ausiliarie.
- Un programma è progressivo se genera nuove previsioni verificabili; è degenerativo se non produce nuova conoscenza empirica.
- Rifiuta sia il falsificazionismo puro di Popper sia il relativismo di Kuhn.



ANOMALIE DEGENERATIVE

2. L'effetto fotoelettrico

- **Fenomeno:** Quando la luce colpisce una superficie metallica, può causare l'emissione di elettroni. Tuttavia, secondo la teoria ondulatoria della luce classica, l'energia degli elettroni emessi dovrebbe dipendere solo dall'intensità della luce, non dalla sua frequenza.
- **Problema:** Gli esperimenti mostrano che solo la luce con una frequenza superiore a una certa soglia può liberare elettroni, indipendentemente dall'intensità.

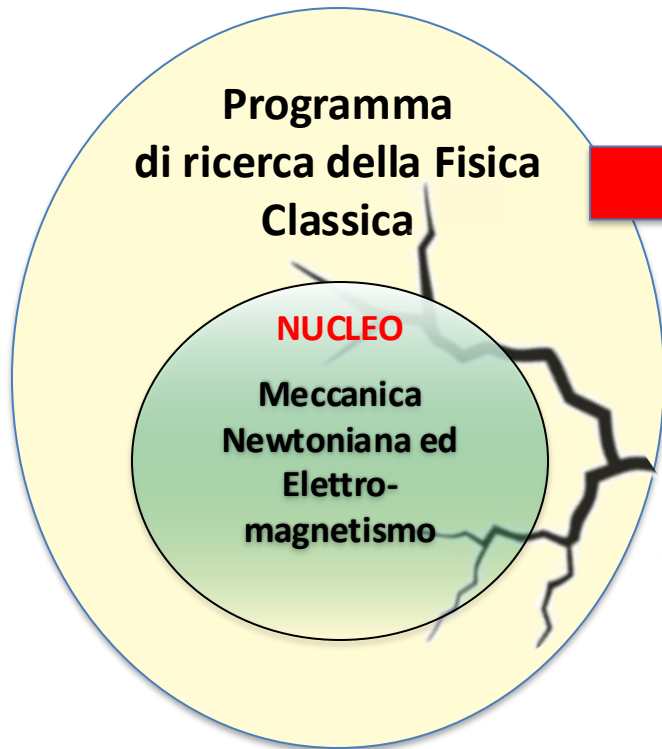
La Fisica Classica e i suoi limiti



(1922-1974)

Imre Lakatos (Programmi di Ricerca Scientifici)

- Combina aspetti di Popper e Kuhn: la scienza avanza attraverso **programmi di ricerca** caratterizzati da un **nucleo centrale** protetto da ipotesi ausiliarie.
- Un programma è progressivo se genera nuove previsioni verificabili; è degenerativo se non produce nuova conoscenza empirica.
- Rifiuta sia il falsificazionismo puro di Popper sia il relativismo di Kuhn.



ANOMALIE DEGENERATIVE

3. L'effetto Compton

- **Fenomeno:** Quando un fotone (tipicamente un raggio X) interagisce con un elettrone libero, trasferisce parte della sua energia, facendo aumentare la lunghezza d'onda del fotone diffuso.
- **Problema:** La fisica classica prevedeva che la lunghezza d'onda della radiazione diffusa rimanesse invariata, mentre gli esperimenti mostrarono che essa dipendeva dall'angolo di diffusione, dimostrando la natura corpuscolare della luce.

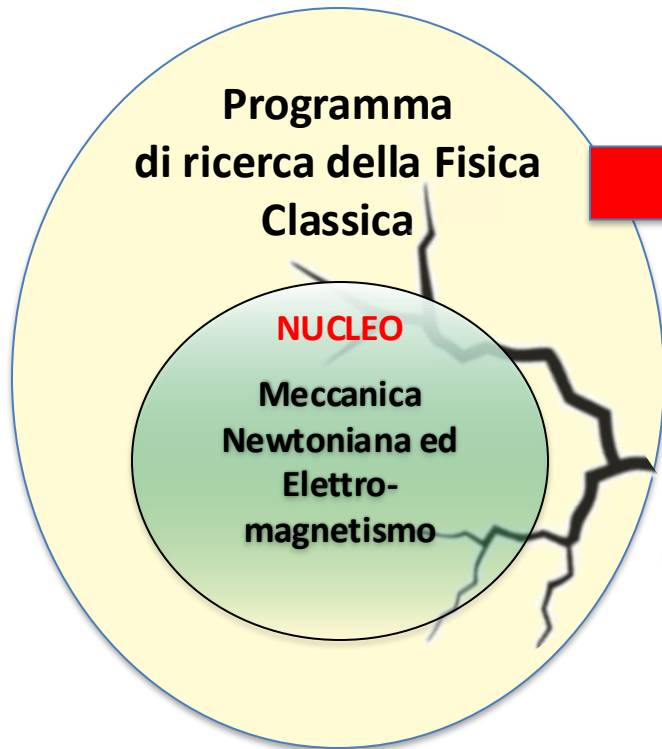
La Fisica Classica e i suoi limiti



(1922-1974)

Imre Lakatos (Programmi di Ricerca Scientifici)

- Combina aspetti di Popper e Kuhn: la scienza avanza attraverso **programmi di ricerca** caratterizzati da un **nucleo centrale** protetto da ipotesi ausiliarie.
- Un programma è progressivo se genera nuove previsioni verificabili; è degenerativo se non produce nuova conoscenza empirica.
- Rifiuta sia il falsificazionismo puro di Popper sia il relativismo di Kuhn.



ANOMALIE DEGENERATIVE

4. La stabilità dell'atomo

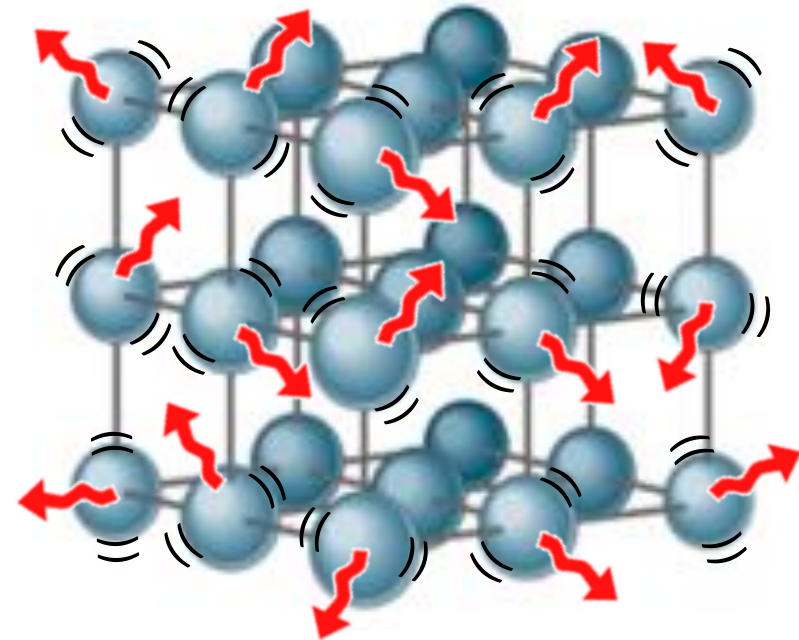
- **Problema:** Secondo l'elettromagnetismo classico, un elettrone in orbita attorno al nucleo dovrebbe emettere continuamente radiazione, perdendo energia e spiraleggiando verso il nucleo. Tuttavia, gli atomi sono stabili.

5. Lo spettro atomico

- **Problema:** Gli esperimenti mostrano che gli atomi emettono luce a specifiche lunghezze d'onda, formando uno spettro discreto. La fisica classica non riusciva a spiegare perché l'emissione non fosse continua.

Il problema della Radiazione Nera

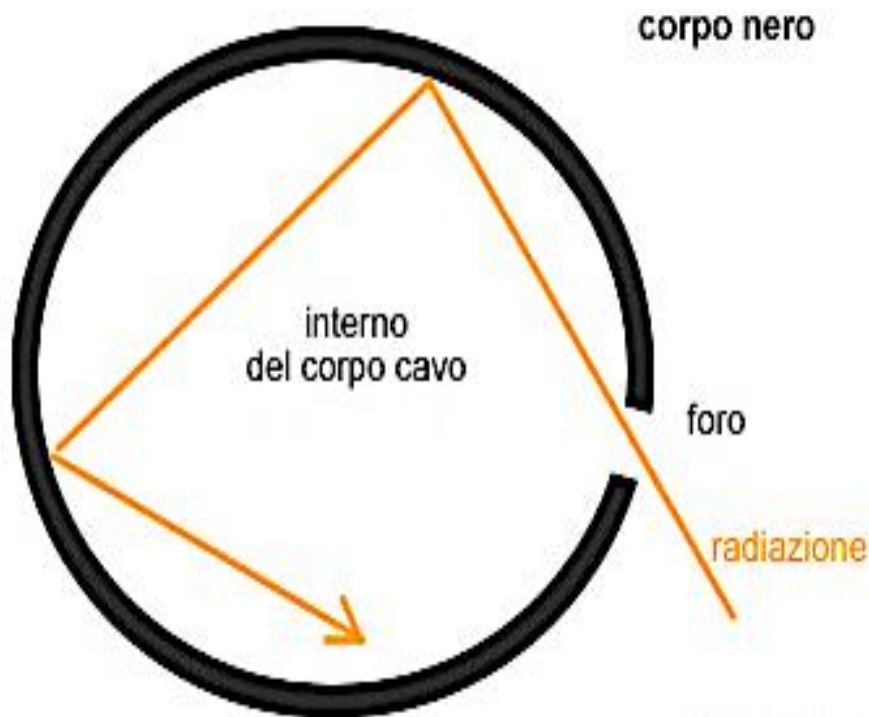
Alla fine del XIX secolo l'**elettromagnetismo classico di Faraday-Maxwell** era stato sviluppato da A.H. **Lorentz** in modo da rendere conto della natura granulare dell'elettricità. Infatti nel 1897 J.J. **Thomson** aveva scoperto l'elettrone, misurandone il rapporto carica/massa e dimostrando che i raggi catodici altro non erano che flussi di elettroni. Ben presto apparve chiaro che l'elettrone è il portatore della carica elementare. Ogni quantità di carica è un multiplo intero della carica dell'elettrone, che sarà poi misurata direttamente da R.A. **Millikan** nel 1910 e fornirà il valore oggi noto di $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.



Si poneva adesso il problema di studiare le relazioni tra materia e radiazione sotto i diversi profili della meccanica, dell'elettrodinamica e della termodinamica. La materia poteva venire descritta come un insieme discreto di oscillatori elettromagnetici. La radiazione era trattata secondo la teoria del campo continuo di **Maxwell**. La prima questione che mise in luce le insufficienze profonde della fisica classica fu lo studio della radiazione emessa da un corpo in equilibrio termico, in assenza di scambi energetici con l'ambiente.

La Catastrofe Ultravioletta

Già G.R. **Kirchhoff** nel 1859 aveva dimostrato per via termodinamica che in questo tipo di studio era conveniente usare un **corpo nero ideale**, che assorbe tutta la radiazione incidente su di esso. Un foro in una cavità con le pareti interne nere, o meglio a specchio, costituisce una buona approssimazione sperimentale di un corpo nero. In questo caso il **potere emissivo** di un corpo, che indicheremo con « e », è una funzione della frequenza (o del suo inverso, la lunghezza d'onda: $\lambda = c/\nu$) della radiazione e della temperatura del corpo. In più, è indipendente dalla natura o forma del corpo. La dipendenza di e soltanto da T semplifica molto la trattazione teorica.



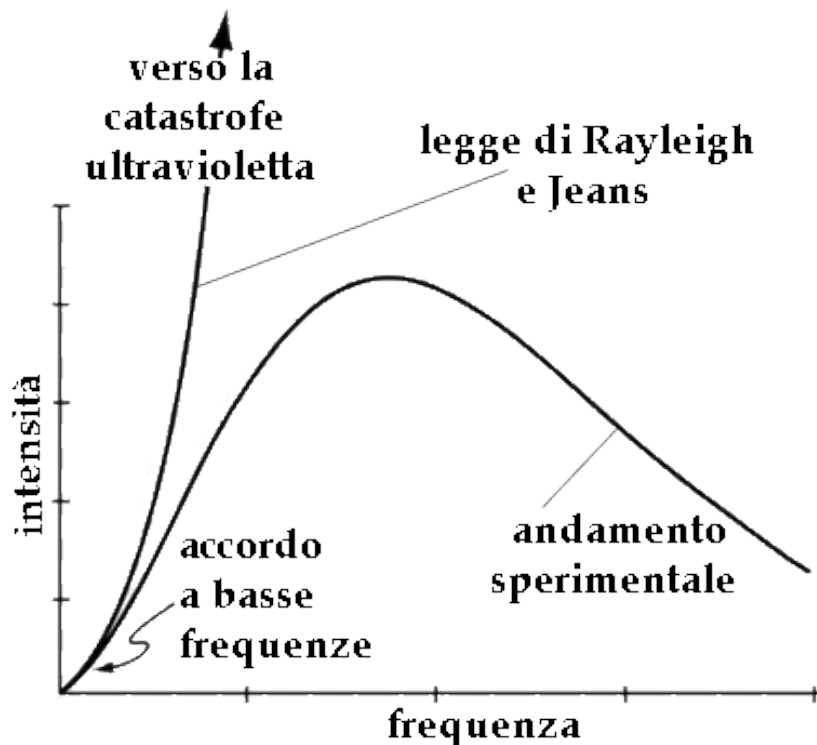
Il punto di vista della fisica classica sul problema della radiazione nera era espresso dalla semplice **legge di Rayleigh-Jeans**:

$$e = k \cdot \frac{T}{\lambda^2} \quad (1)$$

dove T è temperatura assoluta del corpo, k è una costante. Come si vede, a una fissata temperatura, **per lunghezze d'onda sempre più piccole (cioè per frequenze crescenti), corrispondono valori di e sempre più grandi, tendenti all'infinito (→catastrofe ultravioletta)**. Questo è manifestamente in contrasto con l'esperienza: secondo la (1) anche un cubetto di ghiaccio dovrebbe emettere radiazioni di elevatissima frequenza, come raggi X o gamma!

La Catastrofe Ultravioletta

Già G.R. **Kirchhoff** nel 1859 aveva dimostrato per via termodinamica che in questo tipo di studio era conveniente usare un **corpo nero ideale**, che assorbe tutta la radiazione incidente su di esso. Un foro in una cavità con le pareti interne nere, o meglio a specchio, costituisce una buona approssimazione sperimentale di un corpo nero. In questo caso il **potere emissivo** di un corpo, che indicheremo con « e », è una funzione della frequenza (o del suo inverso, la lunghezza d'onda: $\lambda = c/\nu$) della radiazione e della temperatura del corpo. In più, è indipendente dalla natura o forma del corpo. La dipendenza di e soltanto da T semplifica molto la trattazione teorica.



Il punto di vista della fisica classica sul problema della radiazione nera era espresso dalla semplice **legge di Rayleigh-Jeans**:

$$e = k \cdot \frac{T}{\lambda^2} \quad (1)$$

dove T è temperatura assoluta del corpo, k è una costante. Come si vede, a una fissata temperatura, **per lunghezze d'onda sempre più piccole (cioè per frequenze crescenti), corrispondono valori di e sempre più grandi, tendenti all'infinito (→catastrofe ultravioletta)**. Questo è manifestamente in contrasto con l'esperienza: secondo la (1) anche un cubetto di ghiaccio dovrebbe emettere radiazioni di elevatissima frequenza, come raggi X o gamma!

Equipartizione dell'Energia

La legge (1) era il risultato di una lunga **sintesi di elettromagnetismo e termodinamica**; per condurre a un risultato così chiaramente assurdo l'errore doveva essere celato davvero in profondità. In effetti, più che l'insuccesso di una particolare legge su una ben definita questione, la **catastrofe ultravioletta** doveva condurre i fisici a prender atto dei limiti di applicabilità di un concetto tra i più radicati della fisica classica: il **principio di equipartizione dell'energia** (alla base della teoria cinetica di Maxwell e Boltzmann).

IL PRINCIPIO DI EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA
attribuisce ad ogni grado di libertà un contributo all'energia totale della molecola pari a $1/2 kT$ (dove k è la costante di Boltzmann e T è la temperatura assoluta).



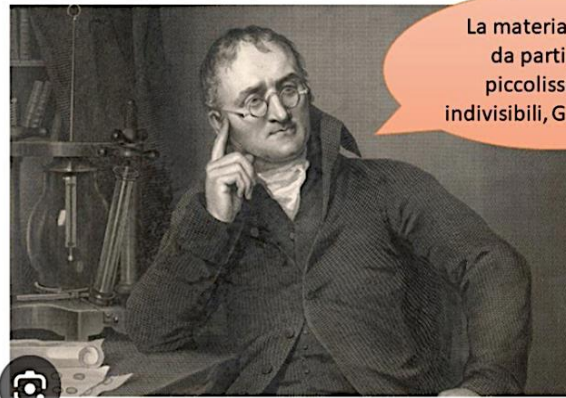
Equipartizione dell'Energia

La legge (1) era il risultato di una lunga **sintesi di elettromagnetismo e termodinamica**; per condurre a un risultato così chiaramente assurdo l'errore doveva essere celato davvero in profondità. In effetti, più che l'insuccesso di una particolare legge su una ben definita questione, la **catastrofe ultravioletta** doveva condurre i fisici a prender atto dei limiti di applicabilità di un concetto tra i più radicati della fisica classica: il **principio di equipartizione dell'energia** (alla base della teoria cinetica di Maxwell-Boltzmann).

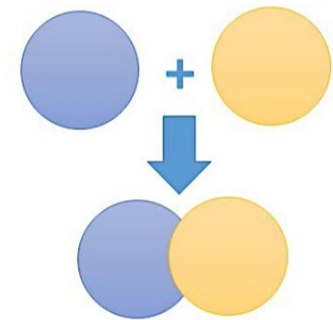
Sin dalla prima metà dell'Ottocento, con l'**ipotesi atomica di Dalton** enunciata per rendere conto della legge delle proporzioni multiple in chimica, gli scienziati erano abituati all'idea di una fondamentale discontinuità della materia, più volte espressa nella storia del pensiero fin dagli **atomisti greci**. La scoperta dell'elettrone, come abbiamo visto, aveva esteso quest'idea anche all'elettricità. Ma **non esisteva nessuna concezione discontinua di questo tipo per l'energia**.

IL MODELLO ATOMICO DI DALTON

Nel 1808 il chimico inglese Jhon Dalton osservò che le sostanze elementari non si possono scomporre in sostanze semplici. La materia che ci circonda infatti può essere suddivisa in porzioni sempre più piccole fino a quando le sue proprietà chimico-fisiche rimangono inalterate. **POI NON SI PUO' PIU'.**



La materia è fatta da particelle piccolissime e indivisibili, GLI ATOMI.



In una reazione chimica le particelle scompaiono per formare una nuova sostanza. IL NUMERO DI PARTICELLE TOTALI TRA REAGENTI E PRODOTTI NON VARIA MAI. NULLA SI CREA NULLA SI DISTRUGGE

L'Ipotesi di Planck: i quanti di luce

Nello studio degli urti tra corpi o tra molecole, nella meccanica e nella teoria cinetica dei gas, **l'energia veniva quindi considerata una grandezza continua**. Così era anche nella teoria di Maxwell, per quel che riguardava l'energia associata a un campo elettromagnetico. Si ammetteva che l'energia potesse essere scambiata in quantità piccole a piacere. In ciò consiste il principio di equipartizione dell'energia. Non a caso abbiamo utilizzato l'espressione piccola a piacere, tipica delle definizioni dell'analisi matematica, basata sulla nozione di continuo, dove si trattano le quantità infinitesime e i processi al limite. In effetti l'analisi è la forma matematica di tutta la fisica classica. **Se una grandezza è continua possiamo considerarne senza contraddizioni parti infinitesimali arbitrarie**. La legge di Rayleigh-Jeans è ottenuta con il formalismo classico, che implica la concezione continua dell'energia ed è dunque inefficace a un livello fondamentale.

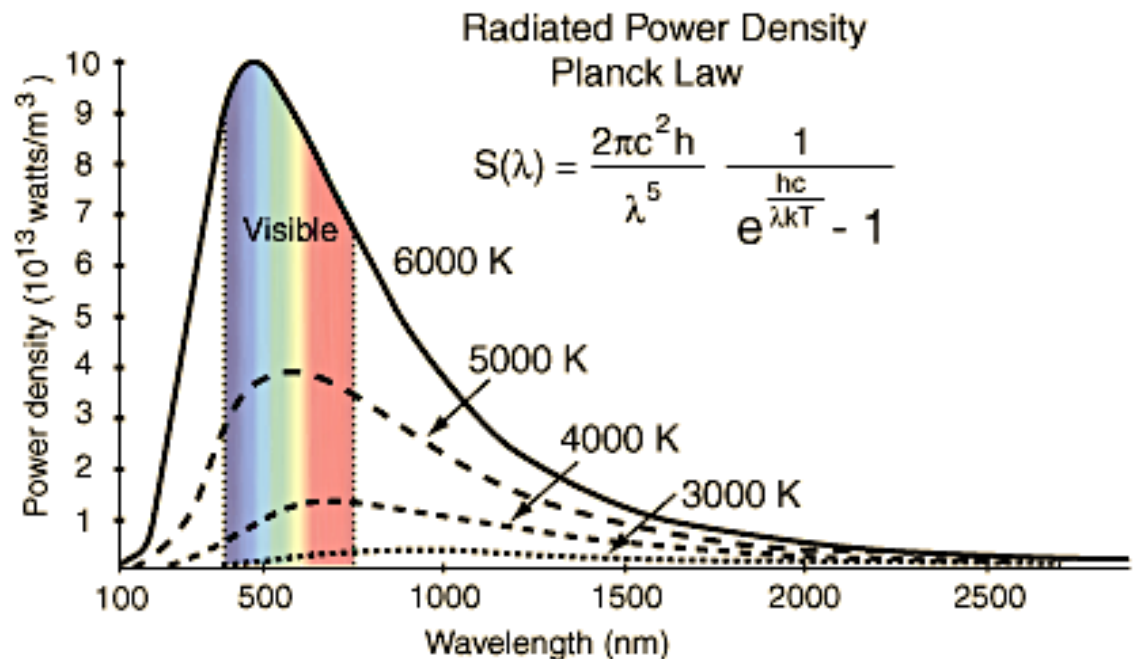


Max Planck (1858-1947; Nobel 1918), dopo un lungo travaglio, trovò nel 1900 il modo di modificare la (1) per ottenere una piena corrispondenza con i dati sperimentali. La nuova formula richiedeva un'ipotesi assolutamente nuova: **l'interazione tra materia e radiazione avviene tramite lo scambio di quantità finite discrete d'energia**, pacchetti indivisibili a cui Planck diede il nome di **quanti**, la cui energia dipende dalla frequenza della radiazione.

L'Ipotesi di Planck: i quanti di luce

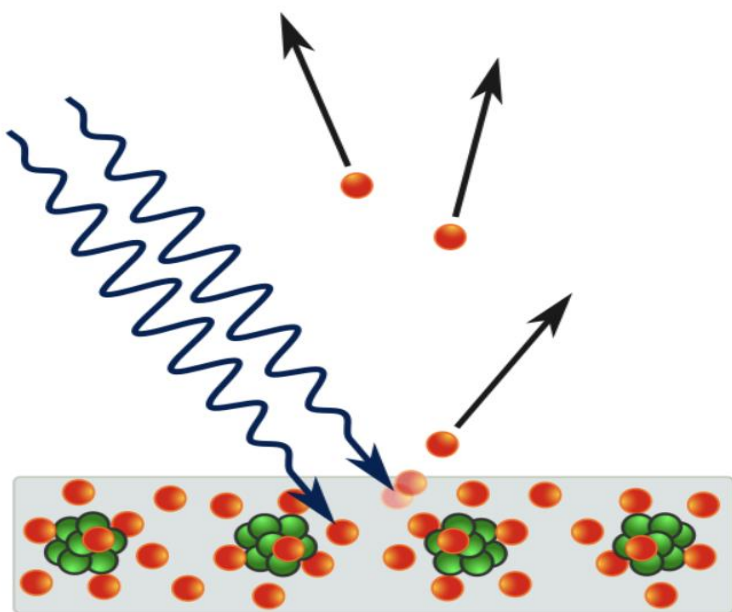
Secondo Planck, la **nuova relazione tra energia e frequenza** per un singolo quanto di radiazione è data dalla formula: **$E = h\nu$** (2) dove ν è la frequenza della radiazione e h è la **costante di Planck**, il cui valore è $6,626 \cdot 10^{-34}$ Joule per secondo. È importante rendersi conto dell'**estrema piccolezza** di questo numero che caratterizza gli scambi materia-radiazione. E' il suo valore che spiega perché l'approccio continuo era stato sempre ritenuto soddisfacente: si consideri infatti che una sorgente di luce della frequenza di $6 \cdot 10^{14}$ Hertz produce in un secondo $2,75 \cdot 10^{19}$ quanti (a tutti gli effetti un continuum!).

La soluzione del problema della radiazione nera tramite la (2) segnò **l'atto di nascita della fisica quantistica** e indicò ai fisici l'esistenza di una vera e propria porta d'ingresso che permetteva il **passaggio dalla macrofisica alla microfisica**. Quando le grandezze in gioco sono dell'ordine della costante di Planck allora la fisica classica mostra dei ben precisi **limiti di applicabilità**.



L'Effetto Fotoelettrico

Come abbiamo visto in una lezione precedente, nel **1905** – anno magico nella produzione di **Albert Einstein** – appare sulla rivista *Annalen der Physik* il suo articolo “*Emissione e trasformazione della luce da un punto di vista euristico*”. Einstein si occupava della teoria dell'**effetto fotoelettrico**, ben noto dai lavori sperimentali di A. Stoletov e H. Hertz. Si tratta dell'espulsione di elettroni dalla superficie di un metallo colpito da un fascio di luce. I dati sperimentali mostrano l'esistenza di una **frequenza caratteristica** per un dato metallo, al di sotto della quale il fenomeno non avviene, qualunque sia l'intensità della luce incidente. Al di sopra di questa soglia comincia l'emissione di elettroni, tanto più veloci quanto maggiore è la frequenza, tanto più numerosi quanto più grande è l'intensità.

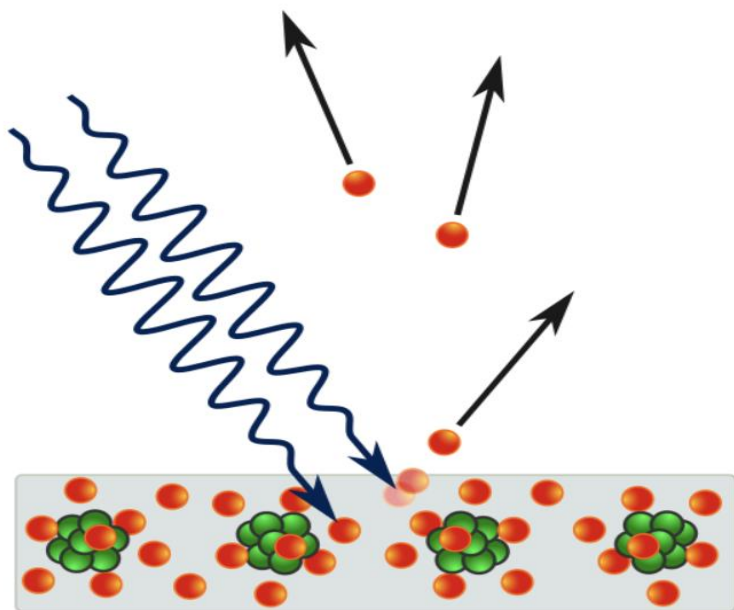


Questa semplice situazione era **fuori dalla portata esplicativa dell'elettromagnetismo classico**, secondo il quale ci si aspettava un flusso di elettroni proporzionale all'intensità della luce, in accordo con l'idea di una trasmissione continua dell'energia. **L'esistenza di una frequenza critica non era spiegabile**, come non lo era la manifestazione quasi istantanea della corrente di elettroni, anche per basse intensità, qualora la frequenza fosse quella di soglia.

L'Effetto Fotoelettrico

Utilizzando le idee di Planck, Einstein riuscì a dare un **semplice modello esplicativo** per il fenomeno. Bisogna qui ricordare che nei metalli gli elettroni superficiali sono legati con una certa energia caratteristica del particolare metallo considerato, detta lavoro di estrazione. Nell'**interpretazione quantistica del fenomeno** i quanti di luce urtano gli elettroni. Se l'energia è al di sotto della frequenza necessaria per la fotoemissione, secondo la formula di Planck (2), la luce incidente non può fare lavoro di estrazione. Ma se i quanti di radiazione hanno un'energia superiore alla **frequenza di soglia** allora il fenomeno dell'emissione si verificherà istantaneamente e i fotoelettroni avranno un'energia cinetica pari all'energia dei quanti incidenti meno l'energia da questi spesa per il lavoro di estrazione, secondo la relazione:

$$E = h\nu - L \quad (3)$$

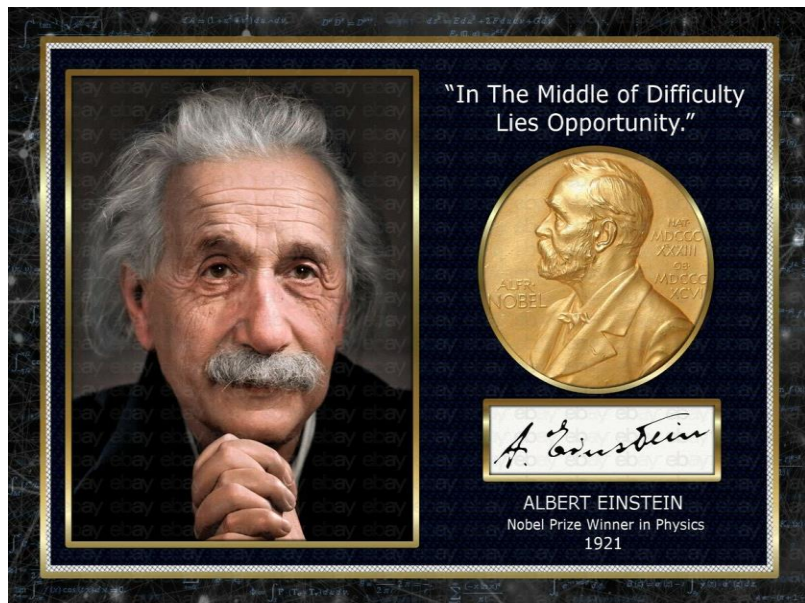


con L lavoro di estrazione. Soltanto sopra la frequenza di soglia il numero degli elettroni emessi è proporzionale all'intensità della luce, ossia al numero dei quanti incidenti con l'energia giusta. **Con questo successo l'ipotesi dei quanti di Planck si consolidò all'attenzione dei fisici** e diede l'avvio al processo che poi, nel 1926, avrebbe condotto il chimico Gilbert N. Lewis a coniare il termine «**fotone**» (dal greco *phos-photos*, che significa «luce»).

L'Effetto Fotoelettrico

Utilizzando le idee di Planck, Einstein riuscì a dare un **semplice modello esplicativo** per il fenomeno. Bisogna qui ricordare che nei metalli gli elettroni superficiali sono legati con una certa energia caratteristica del particolare metallo considerato, detta lavoro di estrazione. Nell'**interpretazione quantistica del fenomeno** i quanti di luce urtano gli elettroni. Se l'energia è al di sotto della frequenza necessaria per la fotoemissione, secondo la formula di Planck (2), la luce incidente non può fare lavoro di estrazione. Ma se i quanti di radiazione hanno un'energia superiore alla **frequenza di soglia** allora il fenomeno dell'emissione si verificherà istantaneamente e i fotoelettroni avranno un'energia cinetica pari all'energia dei quanti incidenti meno l'energia da questi spesa per il lavoro di estrazione, secondo la relazione:

$$E = h\nu - L \quad (3)$$



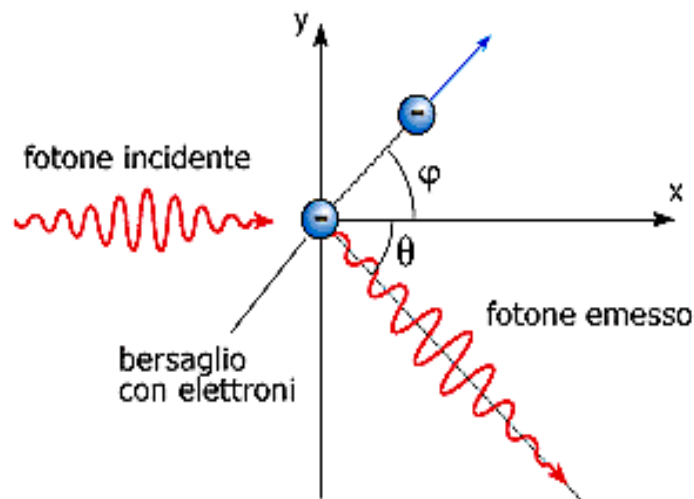
con L lavoro di estrazione. Soltanto sopra la frequenza di soglia il numero degli elettroni emessi è proporzionale all'intensità della luce, ossia al numero dei quanti incidenti con l'energia giusta. **Con questo successo l'ipotesi dei quanti di Planck si consolidò all'attenzione dei fisici** e diede l'avvio al processo che poi, nel 1926, avrebbe condotto il chimico Gilbert N. Lewis a coniare il termine «**fotone**» (dal greco *phos-photos*, che significa «luce»).

L'Effetto Compton

La considerazione della radiazione elettromagnetica in termini classici, ondulatoria e continua, prevede che quando **un'onda incide su un sistema di cariche libere** essa venga diffusa in tutte le direzioni, conservando la stessa frequenza iniziale. Nel 1922 **Arthur H. Compton** (1892-1962) dimostrò che, contrariamente alle previsioni classiche, l'ipotesi dei fotoni implicava che la luce diffusa doveva avere una frequenza inferiore a quella incidente.



In pratica Compton considerò lo **scattering tra un fotone e la particella carica libera** al pari di un urto perfettamente elastico tra due palle da biliardo e, attraverso semplici calcoli che tengono conto della **conservazione dell'energia e della quantità di moto**, trovò la relazione cercata tra lo shift in lunghezza d'onda e l'angolo di diffusione:



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

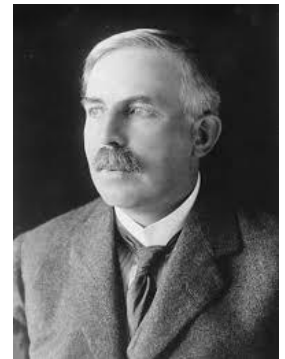
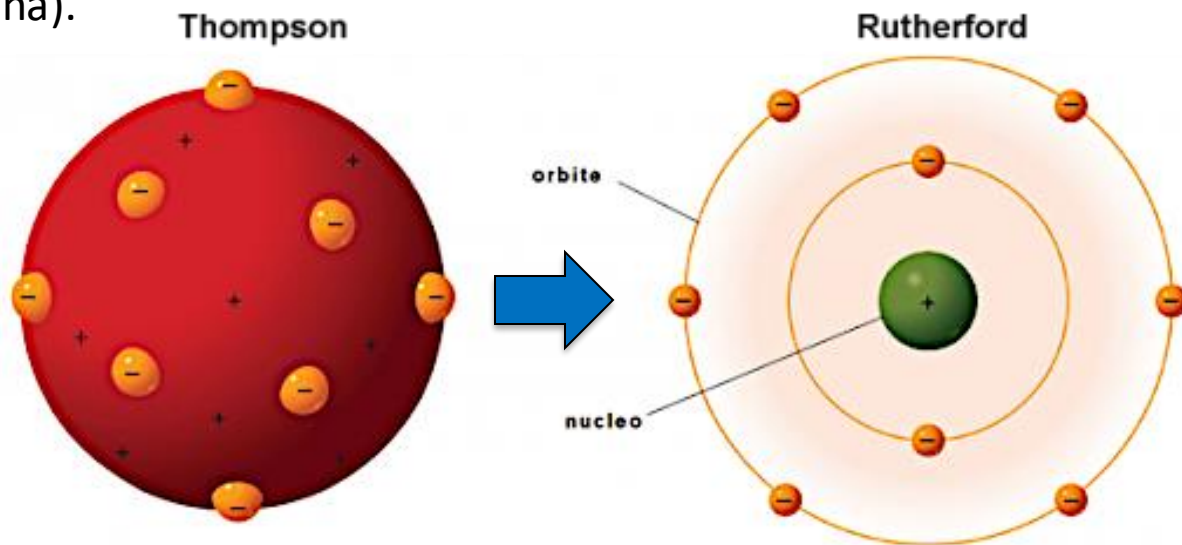
Compton verificò poi **sperimentalmente** la sua analisi teorica facendo incidere raggi X su cristalli di grafite. Per questo gli fu assegnato il **premio Nobel per la fisica nel 1927**.

Primi modelli atomici

La concezione moderna dell'atomo comincia dopo la (già anticipata) scoperta dell'**elettrone** da parte di Thomson (1897). Lo stesso **Thomson**, nel 1904, propose un primo **modello atomico «a panettone»**, costituito da una distribuzione di carica positiva diffusa, all'interno della quale erano inseriti – a caso, come l'uvetta nel panettone – gli elettroni carichi negativamente (nel complesso l'atomo doveva essere elettricamente neutro). Nel 1911 il fisico neozelandese **Ernest Rutherford** (1871-1937, Nobel 1908), studiando la deflessione di particelle alfa positive (che oggi sappiamo essere nuclei di elio) da parte di sottili lamine d'oro, ipotizzò per la prima volta un nucleo pesante positivo intorno al quale orbitavano gli elettroni (**modello planetario**). Si noti che in questo modello il nucleo era generico, in quanto i protoni e i neutroni sarebbero stati scoperti solo successivamente (i **protoni** nel 1919 dallo stesso Rutherford e i **neutroni** nel 1932 dal fisico britannico James Chadwick – anche se ipotizzati in precedenza dal nostro Ettore Majorana).



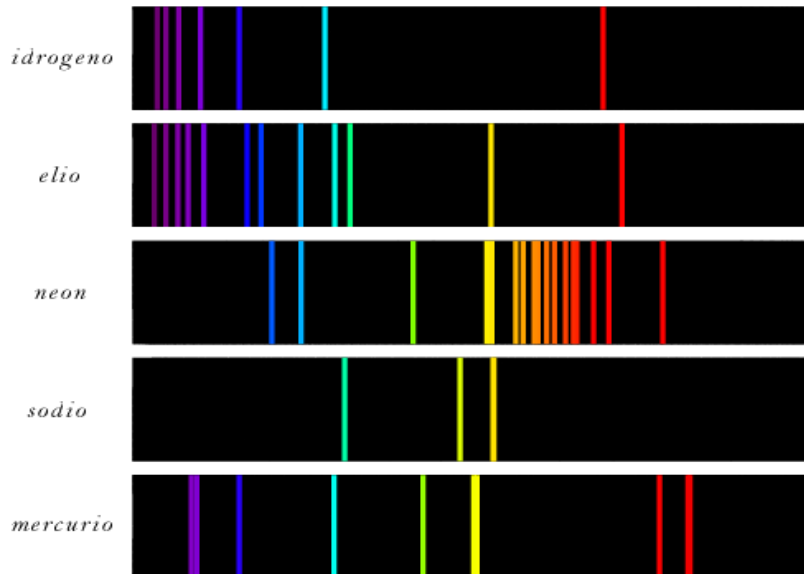
J.J.Thomson
(1856-1940)



E.Rutherford
(1871-1937)

Primi modelli atomici

Il modello planetario di Rutherford aveva però un **problema serio**: secondo la fisica classica, infatti, gli elettroni orbitando dovevano emettere radiazioni elettromagnetiche, perdere così energia e precipitare sul nucleo. Cosa che ovviamente non avviene, anzi, l'atomo è una struttura dotata di enorme stabilità, come mostra la stabilità stessa della materia ordinaria. Nel 1913 il fisico danese **Niels Bohr** (1885-1962; Nobel 1922) trovò nella formula di Planck il modo di risolvere il **problema del collasso** dell'atomo planetario. L'indizio chiave gli fu offerto dai **dati spettroscopici** raccolti sistematicamente sin dal 1859 da G.R. **Kirchhoff** e R.W. **Bunsen**. I gas monoatomici eccitati dal calore o attraverso una scarica elettrica emettono uno spettro discreto di radiazioni monocromatiche, diversamente dai solidi che emettono uno spettro continuo.



A ogni colore corrisponde una ben definita frequenza. Nel 1882 **J.Balmer** aveva trovato una semplice formula per individuare le frequenze delle righe spettrali dell'idrogeno nella regione del visibile. Fu facile poi, per **J.Rydberg**, estenderla alle regioni infrarosse e ultraviolette:

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

con R costante di Rydberg, ed m, n interi con $n > m$.

L'Atomo di Bohr

Il significato della relazione (4) apparve a Bohr subito chiaro, essendo già convinto che in qualche modo la **soluzione del problema della stabilità dell'atomo** di Rutherford fosse connessa alla **costante di Planck**. Infatti, combinata opportunamente con la massa e la carica dell'elettrone, h forniva una lunghezza definita, interpretabile come raggio atomico (ad es. distanza dell'elettrone orbitale dell'atomo di Idrogeno dal nucleo). Appena conosciuta la formula di Balmer, Bohr trovò il modo di modificare il modello atomico di Rutherford in una direzione assolutamente innovativa e controintuitiva.

Due postulati sono alla base dell'atomo di Bohr-Rutherford:

1) Non tutte le orbite sono permesse, ma solo una **sequenza discreta** di esse. A ogni orbita corrisponde una **ben definita energia**. Negli stati stazionari gli elettroni non emettono radiazioni;

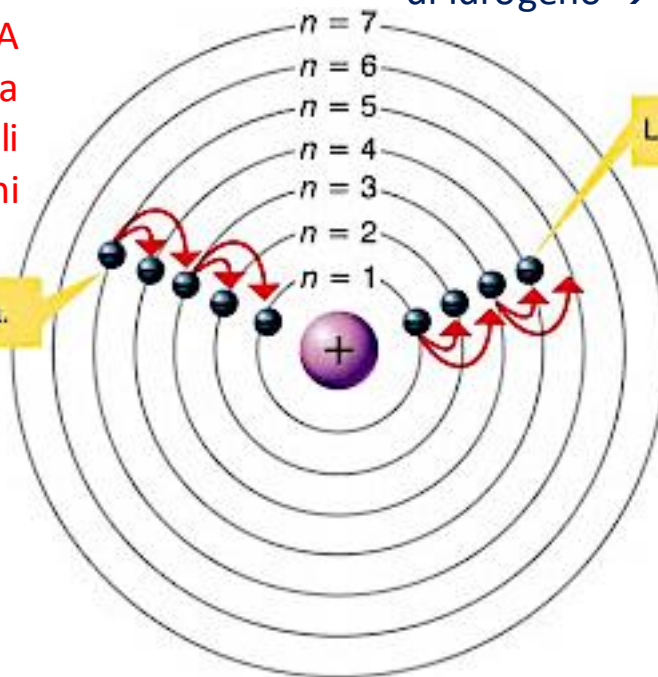
L'atomo emette energia.

La relazione tra i due stati stazionari è data dalla relazione:

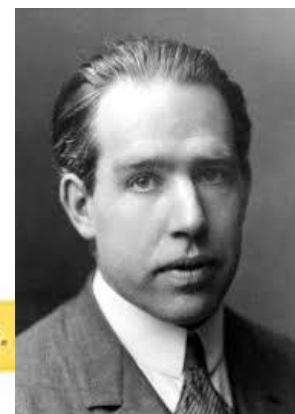
$$E_2 - E_1 = h\nu$$

dove E_1 ed E_2 sono le energie delle due orbite

Raggio dell'atomo
di Idrogeno $\rightarrow a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$



L'atomo assorbe energia.



Niels Bohr

2) Negli **stati eccitati** un elettrone passa da un livello energetico a un altro, **assorbendo** l'energia di un fotone. Il ritorno allo stato iniziale fa sì che l'elettrone **emetta** un fotone di uguale energia.

L'Atomo di Bohr

Questi due semplici postulati permisero una sistemazione dell'analisi spettroscopica, fornendo nuove basi fisiche per interpretare la **struttura della tavola periodica degli elementi...**

Tavola Periodica di Mendeleev (1869)

- Dmitrij Mendeleev (1869) fu il primo a organizzare sistematicamente gli elementi conosciuti (63 all'epoca) in una **tavola periodica** basata sulle masse atomiche e sulle proprietà chimiche.
- La sua grande intuizione fu **lasciare spazi vuoti per elementi non ancora scoperti**, prevedendone le proprietà con sorprendente accuratezza (es. gallio, germanio e scandio).
- Nel 1871 affinò la sua tavola, correggendo l'ordine di alcuni elementi per rispettare meglio le loro proprietà chimiche.

Таблица II.
Вторая попытка Менделѣева выстроить систему химических элементовъ. Перепечатана безъ измѣненій изъ „Журнала Русскаго Химическаго Общества“, т. III, стр. 31 (1871 г.).

	Группа I.	Группа II.	Группа III.	Группа IV.	Группа V.	Группа VI.	Группа VII.	Группа VIII, перенесенъ въ группу I.
Теоретическіе элементы.	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
1. I. Рядъ 1-й.	Na=23	Mg=24	Al=27.4	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
2. II. Рядъ 2-й.	K=39	Ca=40	Sc=44	Ti=50.7	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=58, Cu=63
3. III. Рядъ 3-й.	(Ca)=40	Zn=65	Y=68	Zr=72	As=75	Sa=76	Br=80	
4. IV. Рядъ 4-й.	Rb=85	Se=87	Yt=88.7	Zn=90	Nb=94	Mo=96	— 100	Ra=104, Rb=104, Pd=104, Ag=106
5. V. Рядъ 5-й.	(Ag)=108	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=120	Te=128	J=127	
6. VI. Рядъ 6-й.	Cs=133	Ba=137	— 137	Ce=138.5	—	—	—	
7. VII. Рядъ 7-й.	—	—	—	—	—	—	—	
8. VIII. Рядъ 8-й.	—	—	—	—	—	—	—	
9. IX. Рядъ 9-й.	(Au)=197	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	Os=197, Ir=197, Pt=197, Au=197
10. X. Рядъ 10-й.	—	—	—	—	—	—	—	
Высшая содѣлка окисл. состоянія	H ₂ O	R ₂ O ₃ или RO	R ₂ O ₃	R ₂ O ₃ или RO ₂	R ₂ O ₃	R ₂ O ₃ или RO ₂	R ₂ O ₃	R ₂ O ₃ или RO ₂
Нижнее окислительное состояніе	—	—	(RH) ₃	RH ₄	RH ₃	RH ₃	RH	—

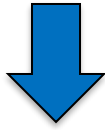
Erano noti solo 63 elementi

La scoperta di Moseley e il numero atomico

Henry Moseley, un fisico inglese, condusse esperimenti di spettroscopia sui raggi X emessi dagli elementi. Studiando le frequenze dei raggi X caratteristici emessi da diversi elementi, scoprì che la radice quadrata della frequenza di questi raggi era **proporzionale a un numero intero progressivo**. Questo numero intero era quello che oggi chiamiamo **numero atomico (Z)**.

Prima di Moseley, il numero atomico era semplicemente la posizione dell'elemento nella tavola periodica di Mendeleev, ma non aveva un significato fisico preciso. Moseley dimostrò che il numero atomico **non** era solo un'assegnazione arbitraria, ma corrispondeva a una proprietà fondamentale degli atomi.

(1913) Basata sul numero atomico degli elementi
(più tardi interpretato come numero di protoni o elettroni presenti nell'elemento)



1 1A 1 H 1.00794	2 2A 3 Li 6.941 4 Be 9.01218																	13 3A 5 B 10.811 12.011 6 C 12.011 7 N 14.0067 8 O 15.9994 9 F 18.9984 10 Ne 20.1797	14 4A 11 Na 22.98977 12 Mg 24.304	15 5A 13 Al 26.981538 14 Si 28.08558 15 P 30.973762 16 S 32.06 17 Cl 35.4527 18 Ar 39.948	16 6A 19 K 39.0983 20 Ca 40.078 21 Sc 44.955912 22 Ti 47.867 23 V 50.9415 24 Cr 51.9961 25 Mn 54.938045 26 Fe 55.845 27 Co 58.933195 28 Ni 58.6934 29 Cu 63.546 30 Zn 65.38 31 Ga 69.723 32 Ge 72.61 33 As 74.9216 34 Se 78.96 35 Br 79.904 36 Kr 83.80	17 7A 37 Rb 85.4678 38 Sr 87.62 39 Y 88.90584 40 Zr 91.224 41 Nb 92.90638 42 Mo 95.94 43 Tc 98.9062 44 Ru 101.07 45 Rh 102.9055 46 Pd 106.42 47 Ag 107.8682 48 Cd 112.411 49 In 114.818 50 Sn 118.710 51 Sb 121.757 52 Te 127.60 53 I 126.90447 54 Xe 131.29	18 8A 55 Cs 132.90545 56 Ba 137.327 57 La 138.9047 58 Ce 140.12 59 Pr 140.90768 60 Nd 144.242 61 Pm 144.9127 62 Sm 150.36 63 Eu 151.964 64 Gd 157.25 65 Tb 158.92535 66 Dy 162.50 67 Ho 164.93032 68 Er 167.259 69 Tm 168.93472 70 Yb 173.045 71 Lu 174.967												
*Lanthanide series																																			
†Actinide series																																			

Erano noti solo 86 elementi

Erano noti solo 86 elementi

L'Atomo di Bohr

Questi due semplici postulati permisero una sistemazione dell'analisi spettroscopica, fornendo nuove basi fisiche per interpretare la **struttura della tavola periodica degli elementi**...

Tavola Periodica degli Elementi

Nuovo IA		Nuovo Originale		Metalli alcalini		Attinidi		C Solidi		13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA		18 VIIIA																																																																																																																																																																																																																																																																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22																																																																																																																																																																																																																																																																					
1 H Idrogeno 1,00784	2 He Elio 4,002602	3 Li Litio 6,941	4 Be Berillio 9,012182	5 B Boro 10,811	6 C Carbonio 12,0107	7 N Azoto 14,00644	8 O Ossigeno 15,9994	9 F Fluoro 18,9984032	10 Ne Neon 20,1797	11 Na Sodio 22,989770	12 Mg Magnesio 24,3050	13 Al Alluminio 26,981538	14 Si Silicio 28,0855	15 P Fosforo 30,973761	16 S Zolfo 32,065	17 Cl Cloro 35,453	18 Ar Argon 39,948	19 K Potassio 39,0983	20 Ca Calcio 40,078	21 Sc Scandio 44,955910	22 Ti Titanio 47,887	23 V Vanadio 50,9415	24 Cr Cromo 51,9961	25 Mn Manganese 54,938045	26 Fe Ferro 55,845	27 Co Cobalto 58,933200	28 Ni Nichel 58,6934	29 Cu Rame 63,546	30 Zn Zinco 65,409	31 Ga Gallio 69,723	32 Ge Germanio 72,64	33 As Arsenico 74,921595	34 Se Selenio 78,96	35 Br Bromo 79,904	36 Kr Krypton 83,798	37 Rb Rubidio 85,4678	38 Sr Stronzio 87,62	39 Y Ittrio 88,90585	40 Zr Zirconio 91,224	41 Nb Niobio 92,90638	42 Mo Molibdeno 95,94	43 Tc Tecnezio (98)	44 Ru Rutenio 101,07	45 Rh Rodio 102,90550	46 Pd Palladio 106,42	47 Ag Argento 107,8682	48 Cd Cadmio 112,411	49 In Indio 114,818	50 Sn Stagno 118,710	51 Sb Antimonio 121,760	52 Te Tellurio 127,60	53 I Iodio 126,90447	54 Xe Xeno 131,293	55 Cs Cesio 132,90545	56 Ba Bario 137,327	57 to 71	72 Hf Hafnio 178,49	73 Ta Tantalio 180,9479	74 W Tungsteno 183,84	75 Re Renio 186,207	76 Os Osmio 190,23	77 Ir Iridio 192,217	78 Pt Platino 195,078	79 Au Oro 196,96655	80 Hg Mercurio 200,59	81 Tl Tallio 204,3833	82 Pb Piombo 207,2	83 Bi Bismuto 208,98038	84 Po Polonio (209)	85 At Astatina (210)	86 Rn Radon (222)	87 Fr Francio (223)	88 Ra RADIO (226)	89 to 103	104 Rf Rutherfordio (261)	105 Db Dubnio (262)	106 Sg Seaborgio (266)	107 Bh Bohrio (264)	108 Hs Hassio (265)	109 Mt Meitnerio (268)	110 Ds Darmstadtio (11)	111 Rg Roentgenio (11)	112 Uub Ununbio (285)	113 Uut Ununtrio (284)	114 Uuq Ununquadio (289)	115 Uup Ununpentio (288)	116 Uuh Ununhexio (292)	117 Uus Ununseptio (291)	118 Uuo Ununoctio (294)	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	

Le masse atomiche tra sono quelle degli isotopi più stabili o più comuni.

Design Copyright © 1997 Michael Dayeh [michael@dayeh.com], <http://www.dayeh.com/periodic/>

Nota: il sotto gruppo dei numeri 1-18 è stato adottato nel 1984 dalla International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). I nomi degli elementi 112-118 sono gli equivalenti latini di quei nomi.

57 La Lantanio 138,9055	58 Ce Cerio 140,116	59 Pr Praseodimio 140,90765	60 Nd Neodimio 144,24	61 Pm Promezio (145)	62 Sm Samario 150,36	63 Eu Europio 151,964	64 Gd Gadolinio 157,25	65 Tb Terbio 158,92534	66 Dy Dysprosio 162,50	67 Ho Olimio 164,93032	68 Er Erbio 167,259	69 Tm Terbicio 168,93421	70 Yb Itterbio 173,04	71 Lu Lutezio 174,967	72 Hf Hafnio 178,49	73 Ta Tantalio 180,9479	74 W Tungsteno 183,84	75 Re Renio 186,207	76 Os Osmio 190,23	77 Ir Iridio 192,217	78 Pt Platino 195,078	79 Au Oro 196,96655	80 Hg Mercurio 200,59	81 Tl Tallio 204,3833	82 Pb Piombo 207,2	83 Bi Bismuto 208,98038	84 Po Polonio (209)	85 At Astatina (210)	86 Rn Radon (222)	87 Fr Francio (223)	88 Ra RADIO (226)	89 Ac Attinio (227)	90 Th Torio 232,0381	91 Pa Protattinio 231,03588	92 U Uranio 238,02891	93 Np Nettunio (237)	94 Pu Plutonio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Curio (247)	97 Bk Berkelio (247)	98 Cf Californio (251)	99 Es Einsteinio (252)	100 Fm Fermio (257)	101 Md Mendelevio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Laurencio (262)	104 Rf Rutherfordio (261)	105 Db Dubnio (262)	106 Sg Seaborgio (266)	107 Bh Bohrio (264)	108 Hs Hassio (265)	109 Mt Meitnerio (268)	110 Ds Darmstadtio (11)	111 Rg Roentgenio (11)	112 Uub Ununbio (285)	113 Uut Ununtrio (284)	114 Uuq Ununquadio (289)	115 Uup Ununpentio (288)	116 Uuh Ununhexio (292)	117 Uus Ununseptio (291)	118 Uuo Ununoctio (294)	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	
----------------------------------	------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	--------------------------------	------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	----------------------------------	------------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	------------------------------	-------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------	-------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	------------------------------	---------------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--

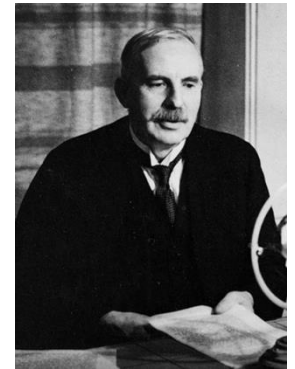
Nota: il sotto gruppo dei numeri 1-18 è stato adottato nel 1984 dalla International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). I nomi degli elementi 112-118 sono gli equivalenti latini di quei nomi.

Attualmente sono noti **118 elementi chimici**, ordinati nella **Tavola Periodica** in base al loro numero atomico crescente. Di questi, i primi **92 elementi** (dall'idrogeno all'Uranio) si trovano in natura, mentre i restanti **26 elementi** (dal Nettunio in poi) sono di solito sintetizzati artificialmente in laboratorio.

L'Atomo di Bohr

Questi due semplici postulati permisero una sistemazione dell'analisi spettroscopica, fornendo nuove basi fisiche per interpretare la **struttura della tavola periodica degli elementi**, ma sollevarono subito **nuovi problemi** di cui Rutherford e lo stesso Bohr si resero immediatamente conto. Un'idea è data da questo stralcio di una **lettera di Rutherford a Bohr**, datata 20 marzo 1913:

«Caro dott. Bohr, il suo modello funziona molto bene, ma il miscuglio delle idee di Planck con quelle della meccanica tradizionale rende molto difficile formarsi un concetto fisico di ciò che sta alla base del fenomeno [...] Come fa l'elettrone a decidere dove fermarsi quando passa da uno stato stazionario all'altro? Mi pare che si debba ammettere che l'elettrone sappia in partenza dove arriverà...»



Risultava evidente che l'introduzione dei salti quantici nel modello planetario dell'atomo eliminava la chiarezza classica dell'idea originale di Rutherford, che prevedeva orbite ben definite nello spazio e nel tempo. **Cosa succedeva all'elettrone durante i salti? E cosa erano queste orbite permesse che l'elettrone percorreva come invisibili gradini?** Lo stesso Bohr capì la transitorietà del suo modello e pensò che, in un modo o in un altro, le cose si sarebbero chiarite con l'apparire di una teoria dei fenomeni quantistici più completa e organica. In realtà **un passo avanti notevole era stato fatto**: si era passati dalla numerologia alla Balmer, che permetteva ugualmente di trovare le righe spettrali, a una teoria che ritrovava i dati spettroscopici e in più ne chiariva l'origine in relazione a una più ampia visione dei rapporti tra radiazione e materia.

Il Modello di Bohr-Sommerfeld



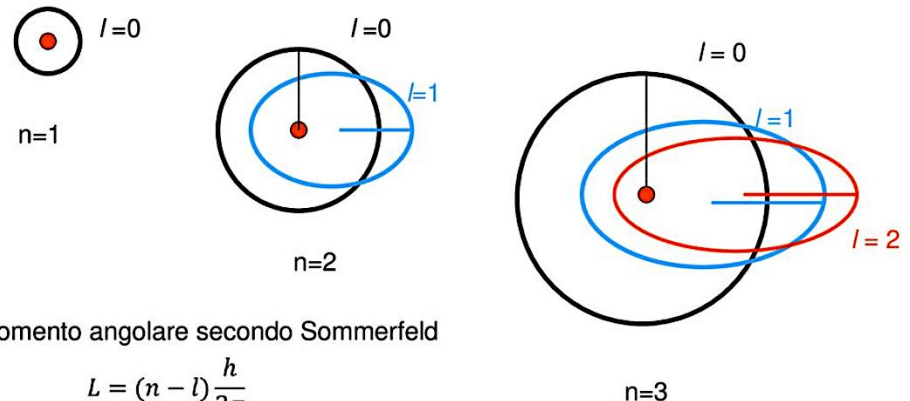
Per di più, la teoria si mostrò feconda di qualche sviluppo. Poco dopo, infatti, **Arnold Sommerfeld (1968-1951)** utilizzò orbite ellittiche invece che circolari, tenendo conto dell'aumento della massa con la velocità previsto dalla relatività. In questo modo riuscì a rendere conto della struttura fine dello spettro, cioè del fatto che, all'aumentare del potere risolutivo degli spettroscopi, righe che apparivano uniche si rivelavano in realtà due o più.

Questo fatto indicava un **più complesso gioco di emissione** su diverse frequenze, dovuto sia all'orbita dell'elettrone che alla sua rotazione intorno a un proprio asse (**spin**).

Va detto che i risultati ottenuti sono, per l'idrogeno e per gli atomi idrogenoidi (con un solo elettrone), in ottimo accordo con quelli che si ricavano dalla rigorosa **equazione quanto-relativistica di Paul Dirac**, che si svilupperà più tardi, nell'ambito della meccanica quantistica matura. Dunque si trattava di una buona teoria. Ma **bisognava prendere atto che la chiarezza cristallina dei modelli classici era irrimediabilmente compromessa...**

Orbite ellittiche di Sommerfeld

il nucleo dell'atomo occupa uno dei fuochi



il momento angolare secondo Sommerfeld

$$L = (n - l) \frac{h}{2\pi}$$

Il Dualismo Onda-Corpuscolo

In effetti il vero salto di qualità nella genesi della teoria quantistica ebbe luogo nel 1924, quando il fisico francese **Louis De Broglie** (1892-1987; Nobel 1929) concepì un'idea che avrebbe cambiato il corso della fisica moderna. A quell'epoca era ben noto che bisognava assegnare un'energia e un momento anche a un'onda elettromagnetica (tramite il cosiddetto «vettore di Poynting»), dunque questo doveva valere anche per il **fotone** associato all'onda elettromagnetica. A ben guardare il fotone, introdotto da Planck, Einstein e Bohr, doveva essere una particella molto particolare: esso **non ha infatti massa a riposo**, poiché **viaggia sempre alla velocità della luce**, e la sua vita va dall'atto dell'emissione all'atto dell'assorbimento nei vari processi fisici in cui è coinvolto.



Luis De Broglie



Il Dualismo Onda-Corpuscolo

In effetti il vero salto di qualità nella genesi della teoria quantistica ebbe luogo nel 1924, quando il fisico francese **Louis De Broglie** (1892-1987; Nobel 1929) concepì un'idea che avrebbe cambiato il corso della fisica moderna. A quell'epoca era ben noto che bisognava assegnare un'energia e un momento anche a un'onda elettromagnetica (tramite il cosiddetto «vettore di Poynting»), dunque questo doveva valere anche per il **fotone** associato all'onda elettromagnetica. A ben guardare il fotone, introdotto da Planck, Einstein e Bohr, doveva essere una particella molto particolare: esso **non ha infatti massa a riposo**, poiché **viaggia sempre alla velocità della luce**, e la sua vita va dall'atto dell'emissione all'atto dell'assorbimento nei vari processi fisici in cui è coinvolto.



Luis De Broglie

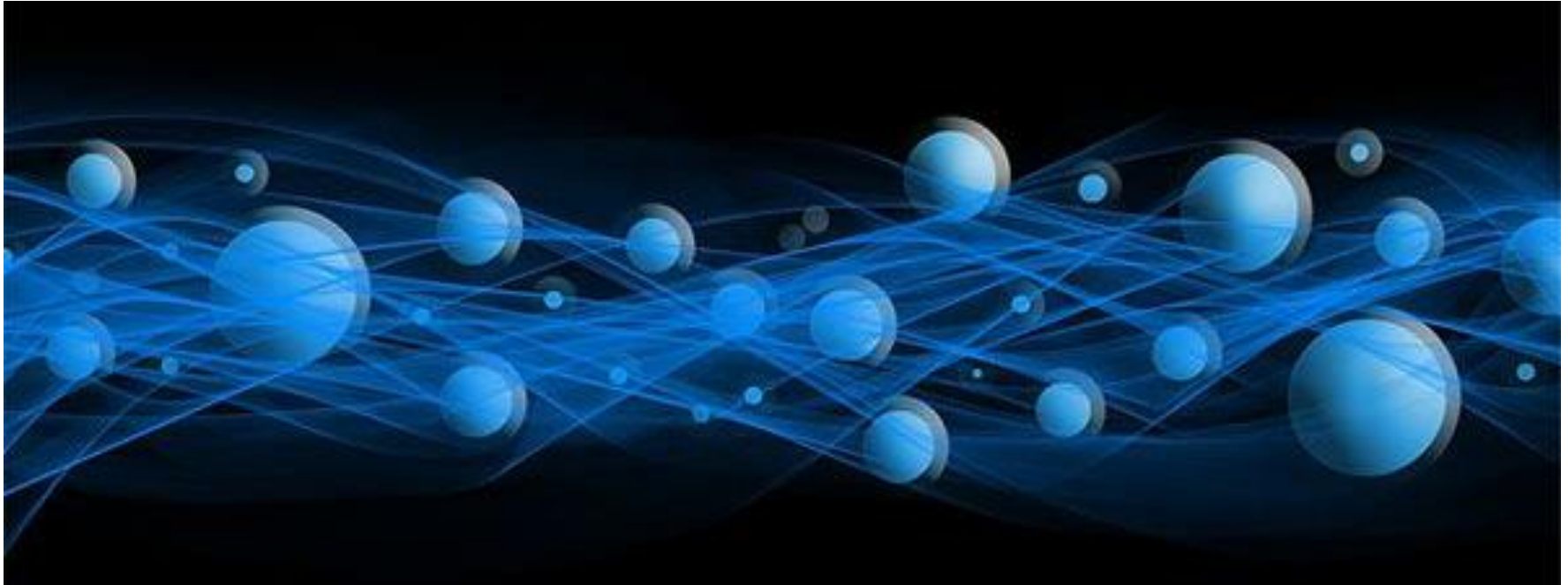
Ora, secondo la **Relatività**, per una particella con $m_0 = 0$ la relazione tra energia E e quantità di moto p diventa $E = pc$ e, combinando questa equazione con la formula di

Planck e con la relazione $c = \lambda\nu$, si otteneva immediatamente: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ (5)

A questo punto De Broglie, riflettendo con considerazioni relativistiche sulla simmetria dei comportamenti naturali, ipotizzò che l'ultimo membro della (5), non contenendo esplicitamente c , la velocità della luce, dovesse **valere anche per particelle con massa a riposo diversa da zero**, $m_0 \neq 0$, velocità $v < c$ e quantità di moto $p = mv...$

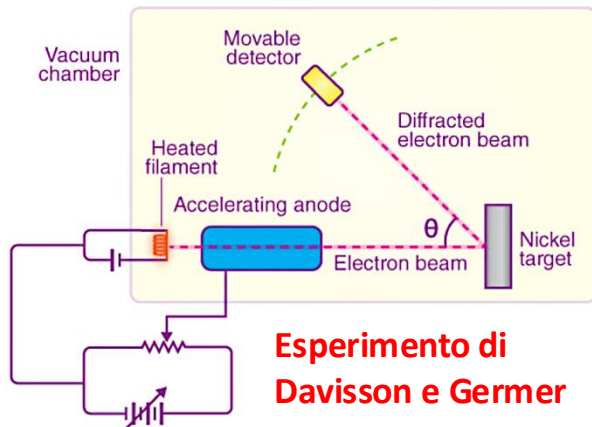
Il Dualismo Onda-Corpuscolo

Questo voleva dire che le due relazioni $E = h\nu$ e $p = \frac{h}{\lambda}$ dovevano valere non solo per il fotone ma **per ogni tipo di particelle materiali**, e che le due modalità di trasmissione dell'energia, particellare (caratterizzata da proprietà quali posizione, massa, carica) e ondulatoria (caratterizzata da frequenza ed ampiezza), sono legate tra loro. **In questo consiste il dualismo onda-corpuscolo: a ogni particella è associato un comportamento ondulatorio e a ogni onda un comportamento particellare.** Da De Broglie in poi si comincia quindi a parlare di «**onde di materia**» o «**onde materiali**», eliminando definitivamente la distinzione classica tra sorgenti e campi alla base della fisica di Newton e Maxwell.

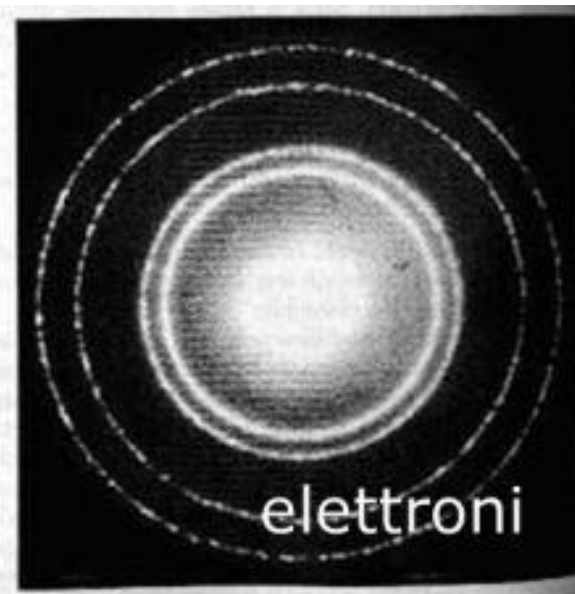
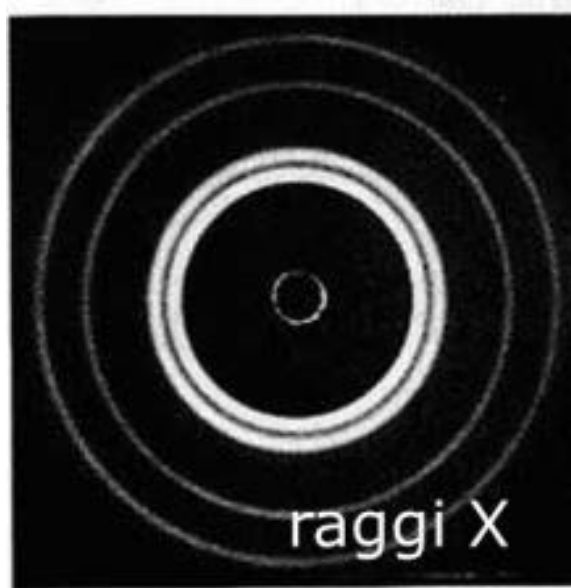


Il Dualismo Onda-Corpuscolo

Dalla formula di De Broglie derivava che, se delle particelle qualsiasi attraversano una fenditura la cui larghezza è dell'ordine della lunghezza d'onda a esse associata, si devono produrre delle **figure di diffrazione** analoghe a quelle prodotte dalla luce.



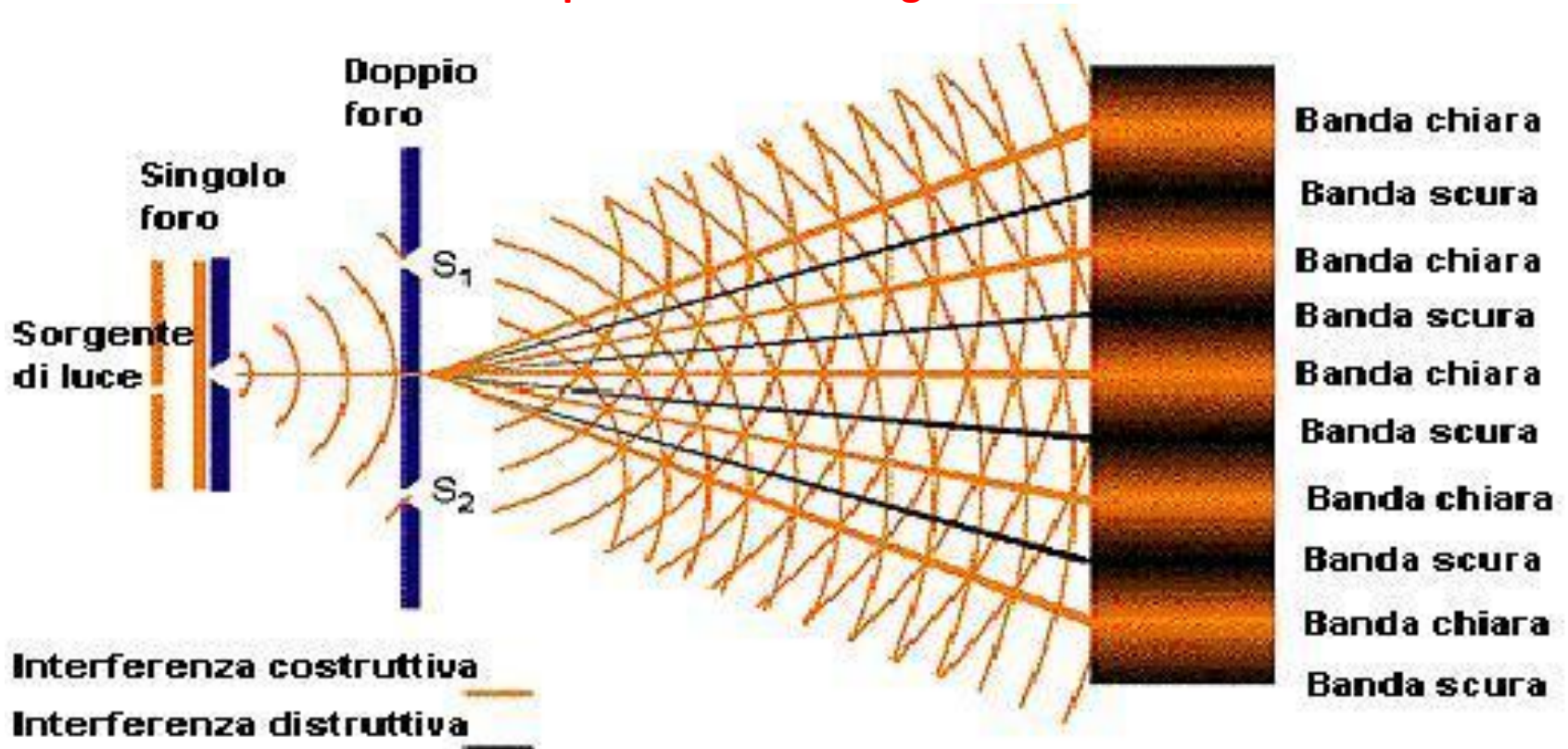
Nel 1927 **C.J. Davisson e L.H. Germer**, e separatamente G.P. Thomson, con metodi diversi, osservarono effettivamente tali **figure di diffrazione per gli elettroni**, consistenti in anelli concentrici con zone di maggiore intensità (più elettroni) e minore intensità (pochi o nessun elettrone). Per questo a De Broglie fu conferito il Nobel nel 1929, ai due sperimentatori nel 1937.



Esperimenti con due fenditure

Negli anni successivi esperimenti analoghi con gli elettroni furono condotti al fine di riprodurre con essi la tipica **figura di interferenza** prodotta dalla luce che attraversa due fenditure (proprio con questo tipo di esperimenti **Young**, a inizio Ottocento, aveva evidenziato la natura ondulatoria della luce). I risultati di questi esperimenti appaiono, ancora oggi, abbastanza impressionanti: non a caso **Richard Feynman** li definì «il cuore della meccanica quantistica».

Esperimento di Young

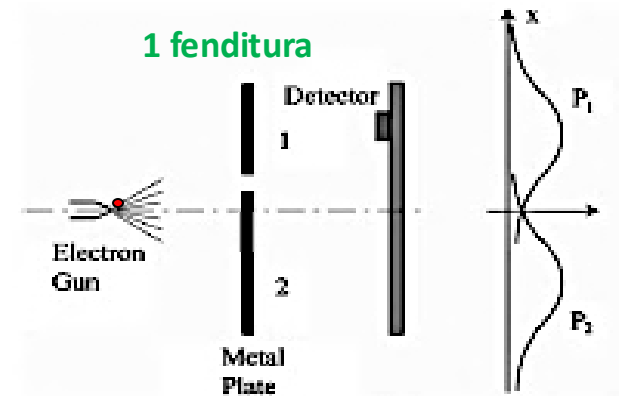


Esperimenti con due fenditure

Negli anni successivi esperimenti analoghi con gli elettroni furono condotti al fine di riprodurre con essi la tipica **figura di interferenza** prodotta dalla luce che attraversa due fenditure (proprio con questo tipo di esperimenti **Young**, a inizio Ottocento, aveva evidenziato la natura ondulatoria della luce). I risultati di questi esperimenti appaiono, ancora oggi, abbastanza impressionanti: non a caso **Richard Feynman** li definì «il cuore della meccanica quantistica».

Immaginiamo dapprima di lasciare aperta *solo una fenditura* (**A**): inviati **uno alla volta**, gli elettroni si comportano come **particelle classiche**, percorrono traiettorie rettilinee e vengono rivelati in corrispondenza della fenditura aperta.

A

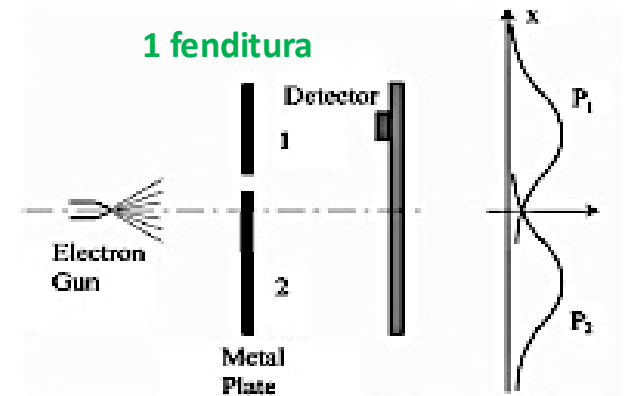


Esperimenti con due fenditure

Negli anni successivi esperimenti analoghi con gli elettroni furono condotti al fine di riprodurre con essi la tipica **figura di interferenza** prodotta dalla luce che attraversa due fenditure (proprio con questo tipo di esperimenti **Young**, a inizio Ottocento, aveva evidenziato la natura ondulatoria della luce). I risultati di questi esperimenti appaiono, ancora oggi, abbastanza impressionanti: non a caso **Richard Feynman** li definì «il cuore della meccanica quantistica».

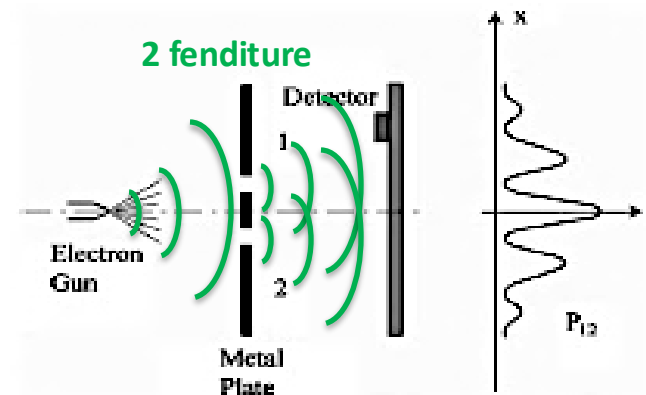
Immaginiamo dapprima di lasciare aperta *solo una fenditura* (A): inviati **uno alla volta**, gli elettroni si comportano come **particelle classiche**, percorrono traiettorie rettilinee e vengono rivelati in corrispondenza della fenditura aperta.

A



Apriamo adesso *entrambe le fenditure* (B) e inviamo nuovamente gli elettroni **uno alla volta**. Incredibilmente, stavolta gli elettroni **non seguono più traiettorie rettilinee** e vengono rivelati in corrispondenza delle **frange di interferenza costruttiva**, esattamente quelle che sarebbero prodotte da analoghe onde luminose.

B

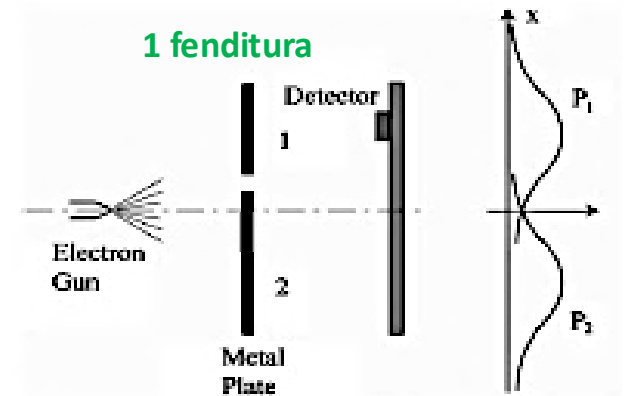


Esperimenti con due fenditure

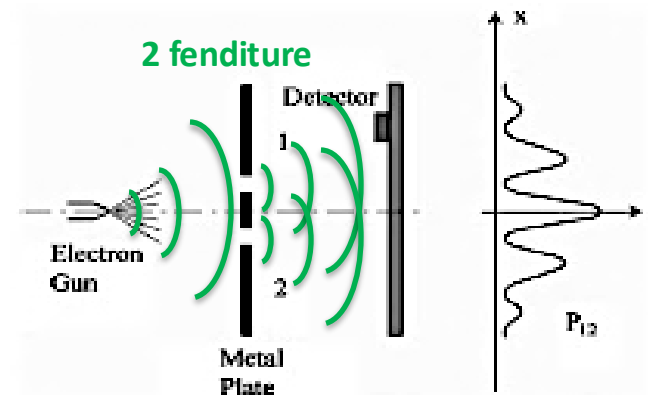
Negli anni successivi esperimenti analoghi con gli elettroni furono condotti al fine di riprodurre con essi la tipica **figura di interferenza** prodotta dalla luce che attraversa due fenditure (proprio con questo tipo di esperimenti **Young**, a inizio Ottocento, aveva evidenziato la natura ondulatoria della luce). I risultati di questi esperimenti appaiono, ancora oggi, abbastanza impressionanti: non a caso **Richard Feynman** li definì «il cuore della meccanica quantistica».

Immaginiamo dapprima di lasciare aperta *solo una fenditura* (A): inviati **uno alla volta**, gli elettroni si comportano come **particelle classiche**, percorrono traiettorie rettilinee e vengono rivelati in corrispondenza della fenditura aperta.

A

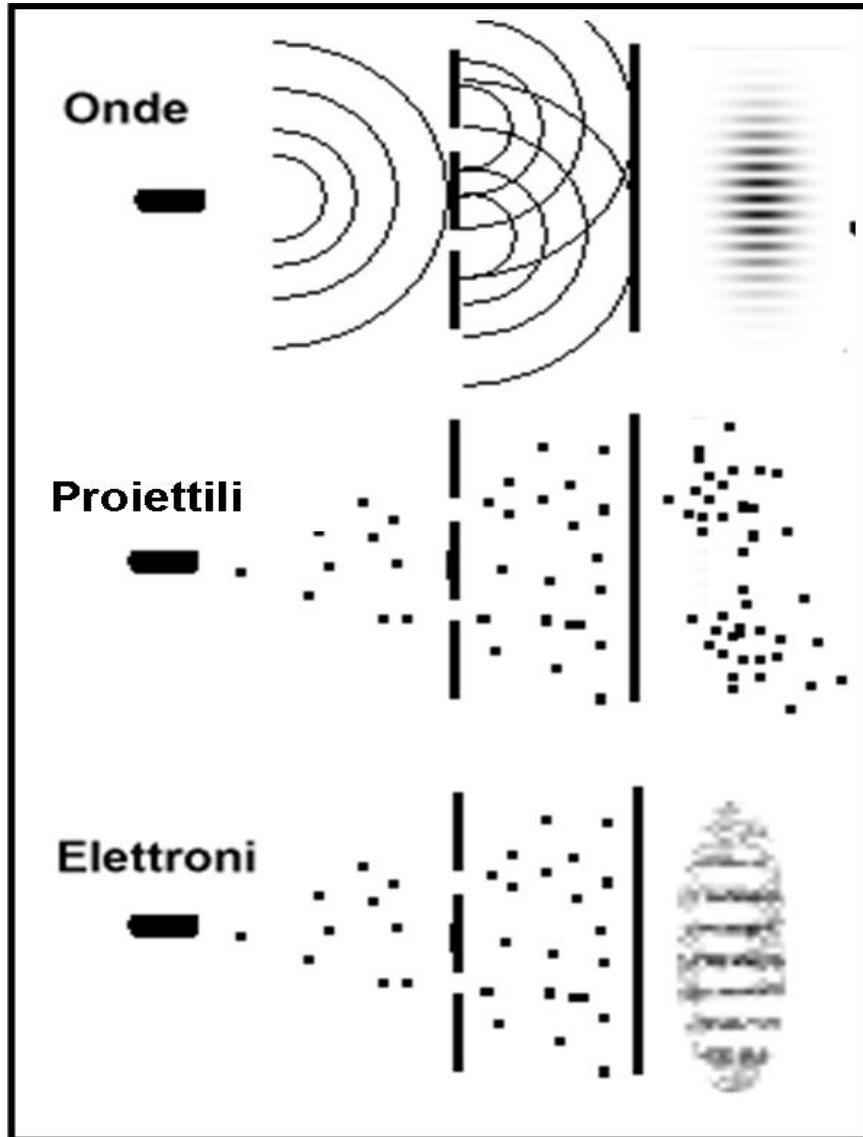


B



Ma – ed è questa la domanda cruciale! – **con chi interferiscono gli elettroni in questo caso, visto che vengono inviati uno alla volta?** E quando passano dalla loro fenditura, come fanno a sapere che l'altra fenditura è aperta?

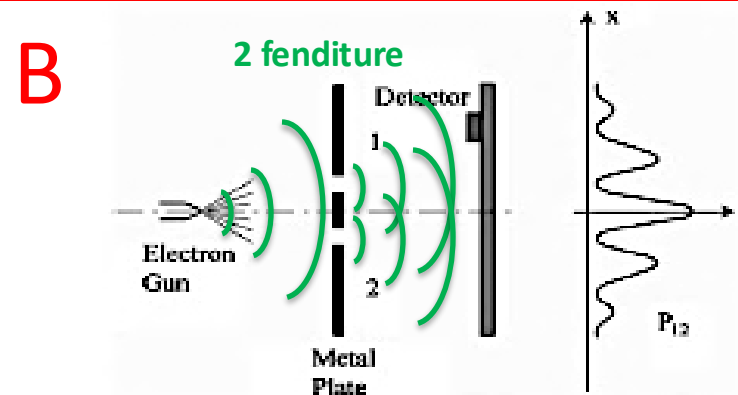
Esperimenti con due fenditure



La risposta della Meccanica Quantistica è **sconcertante**: in realtà, quando le fenditure sono entrambe aperte, **l'elettrone** non passa più attraverso un'unica fenditura, come faceva nel primo esperimento quando si comportava come una particella classica.

In questo caso l'elettrone si comporta, **quantisticamente**, come un'onda di materia di De Broglie, quindi **attraversa entrambe le fenditure contemporaneamente!**

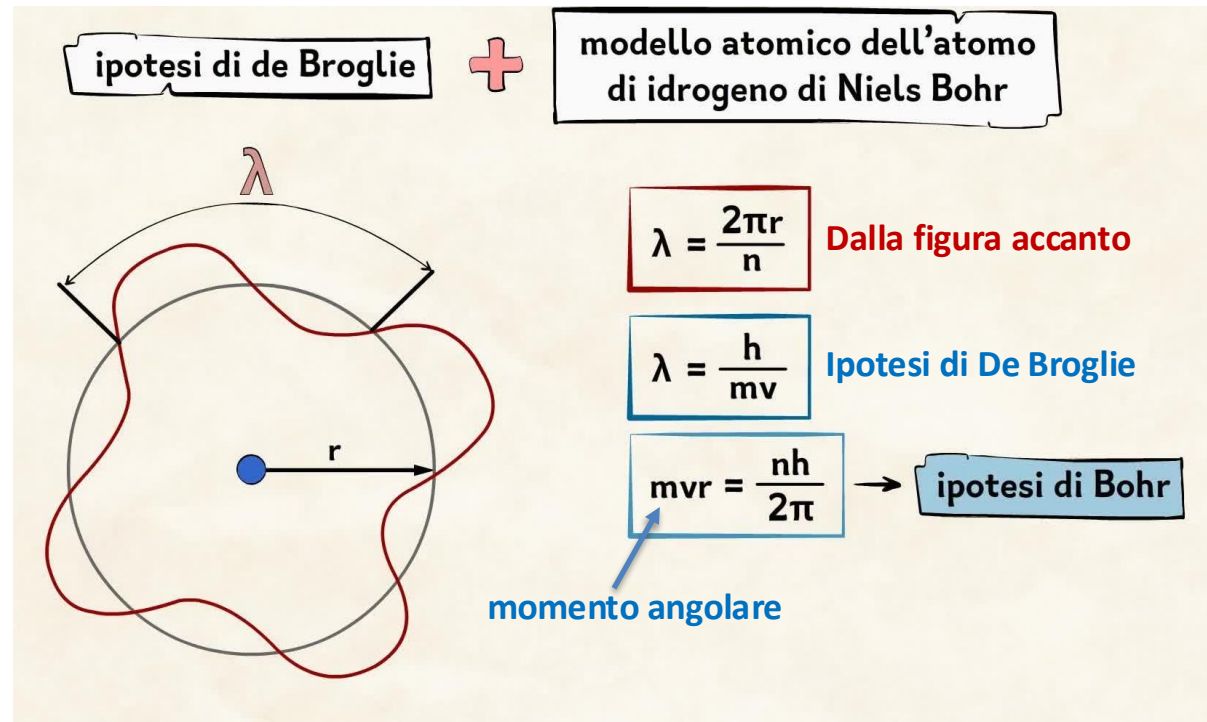
E da questo segue anche che ciascun elettrone **interferisce con se stesso...**



Conseguenze per l'atomo di Bohr

La semplice relazione di De Broglie si dimostrò subito di grande potenza, anche teorica. Da essa è infatti possibile **ricavare la struttura dell'atomo di Bohr** da semplici considerazioni e dedurre le condizioni che invece Bohr aveva postulato. L'idea essenziale dell'atomo planetario è infatti che **gli elettroni sono legati al nucleo in orbite quantizzate**. Nel linguaggio delle onde si dice che un'onda è stazionaria se la sua energia non è uniformemente distribuita, ma è concentrata o staziona in alcuni punti. Da ciò che è noto, l'unica energia attribuibile all'onda di materia è quella associata alla particella che accompagna. Da qui è facile ottenere la **quantizzazione del momento angolare** di Bohr.

In termini ondulatori, infatti, per esprimere il fatto che l'elettrone è legato, bisogna immaginare che **la sua onda sia stazionaria lungo una circonferenza**. Perché questo sia possibile deve verificarsi la condizione che intorno alla circonferenza ci sia un numero intero di lunghezze d'onda, cosicché l'onda si chiuda (vedi figura).

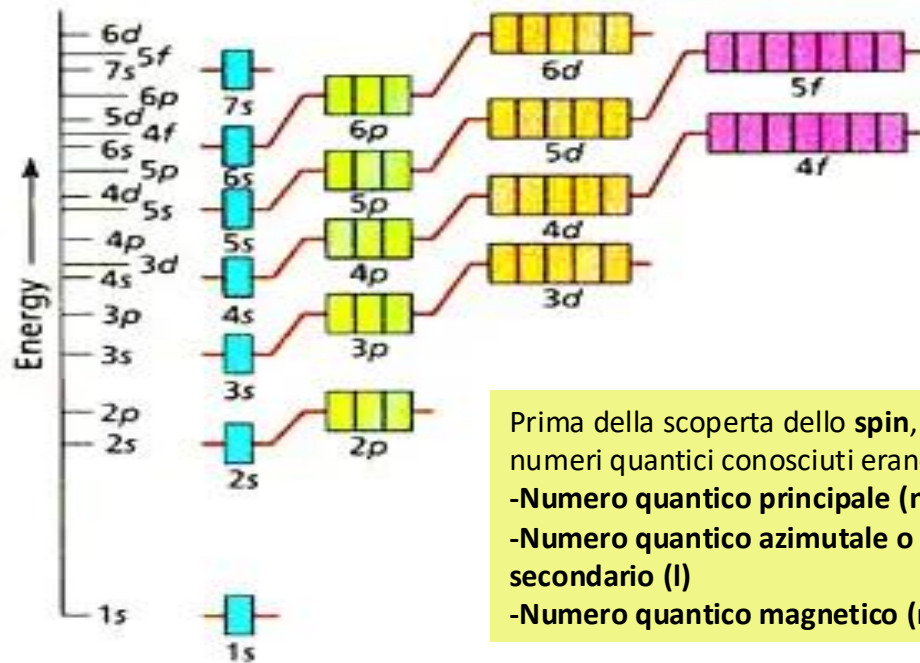


Il Principio di Esclusione di Pauli



Wolfgang Pauli

Nonostante questi successi, rimanevano però alcune anomalie che il modello di Bohr non riusciva ancora a spiegare, come la **struttura fine degli spettri atomici** e il comportamento di alcuni elementi nella tavola periodica. Nel 1925 il fisico austriaco **Wolfgang Pauli** (1900-1958; Nobel 1945) sfruttò una recente scoperta di due fisici olandesi (**Uhlenbeck** e **Goudsmit**, poi inquadrata teoricamente da Dirac), relativa all'esistenza di un «**momento angolare intrinseco**» delle particelle subatomiche detto **spin**, per enunciare un principio che risolse molti di quei problemi:



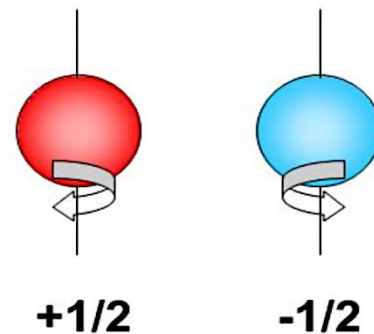
Prima della scoperta dello **spin**, i tre numeri quantici conosciuti erano:

- Numero quantico principale (n)
- Numero quantico azimutale o secondario (l)
- Numero quantico magnetico (m)

Il principio di esclusione di Pauli.

Esiste un ulteriore numero quantico definito numero quantico di spin m_s , che può assumere valori di $-1/2$ o $+1/2$ (per elettrone). Nessuna coppia di elettroni può avere gli stessi 4 numeri quantici e quindi un orbitale può "ospitare" solo 2 elettroni. Questa regola non ha eccezioni.

(per i fermioni)



L'Equazione d'Onda di Schrödinger

Una volta accertato il comportamento ondulatorio della materia, il problema diventava quello di **trovare un'equazione per un'onda di materia** che ne descrivesse il comportamento nel caso in cui il corpuscolo ad essa associato fosse sottoposto all'azione di un campo di forza. In questo caso infatti – **classicamente** – la particella modifica la sua energia e quantità di moto, dunque – **quantisticamente** – l'onda materiale doveva modificare la sua lunghezza d'onda e la sua frequenza.

Colpito dalle idee di De Broglie, nel 1926 il fisico austriaco **Erwin Schrödinger** (1887-1961; Nobel 1933) mise a punto la sua celebre equazione che collega il comportamento delle onde di materia – definite dalla **funzione d'onda** $\Psi(r, t)$ – con una grandezza, detta Hamiltoniana, che rappresenta **l'energia totale del sistema** e che contiene l'energia potenziale del particolare campo di forze considerato:

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \right] \Psi \quad (6)$$

Diagrammatic annotations for the equation above:

- $-i\hbar$: unità immaginaria
- $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$: (indicated by an arrow from the text below)
- Δ : laplaciano
- $V(r)$: energia potenziale
- The bracketed term $\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \right]$ is labeled **Hamiltoniana H**
- $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (si legge «h tagliato»)



Erwin Schrödinger

L'equazione di Schrödinger è dunque l'equivalente quantistico delle leggi di Newton, che descrivono il moto dei corpi nel mondo macroscopico, e ci dice come cambia nel tempo (deterministicamente!) la **funzione d'onda** di una particella soggetta a delle forze.

Cos'è la Funzione d'Onda?

Dal punto di vista matematico l'**equazione di Schrödinger** somiglia ad una tipica **«equazione di diffusione»**, di quelle utilizzate in fisica classica per descrivere ad esempio l'evoluzione nel tempo della diffusione di un gas in un certo volume. In questo caso, analogamente, essa dovrebbe quindi descrivere la diffusione nello spazio, al trascorrere del tempo, della funzione d'onda che rappresenta quantisticamente la particella materiale.

A questo proposito, è importante sottolineare che, quando scrisse la sua equazione, Schrödinger pensava che la funzione d'onda $\Psi(r, t)$ rappresentasse – ad esempio – la **densità continua di carica dell'elettrone** e che le caratteristiche diffusive che l'equazione assegnava al processo indicassero che tale densità **si disperdesse nel tempo**, proprio come una nuvola di gas si disperde nello spazio.

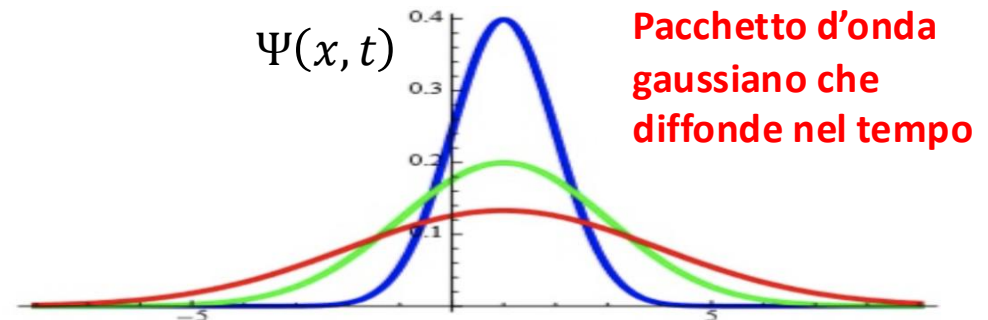


Erwin Schrödinger

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \right] \Psi \quad (6)$$

Annotations:

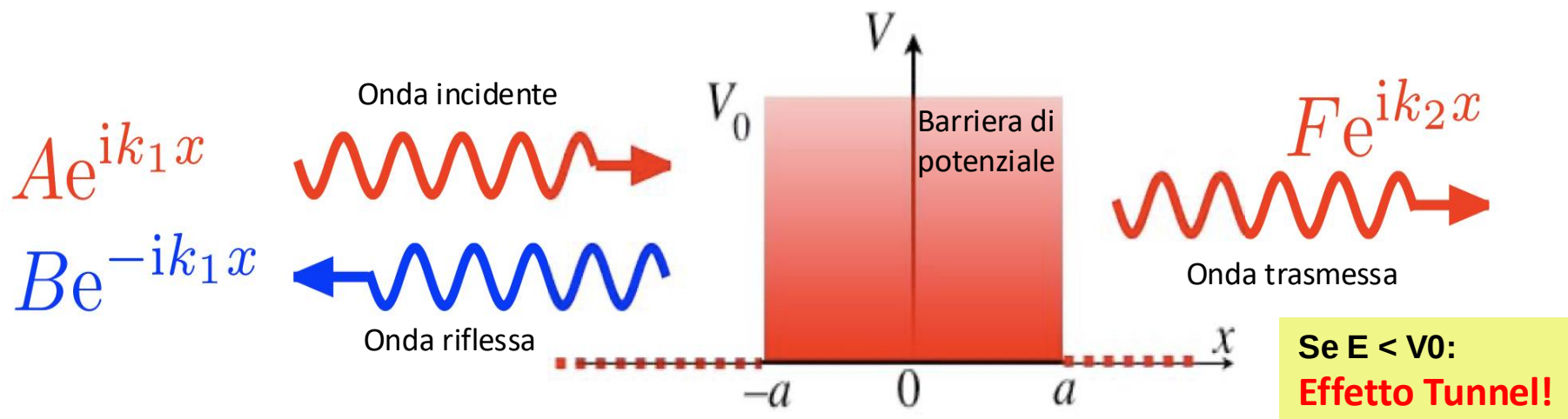
- $-i\hbar$: unità immaginaria
- $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$: (si legge «h tagliato»)
- Δ : laplaciano
- $V(r)$: energia potenziale
- The bracketed term $\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \right]$ is labeled **Hamiltoniana H** .



Cos'è la Funzione d'Onda?

Questa interpretazione di Schrödinger in termini di densità di carica si rivelò presto **infondata**, in quanto non spiegava come mai nei **processi di riflessione/trasmissione** dell'onda che descrive un elettrone che incide su una barriera di potenziale non si rivelassero mai frazioni di carica ma sempre e solo la carica totale dell'elettrone.

Ciò nonostante essa è **storicamente rilevante** in quanto conferma che, quando nel 1926 introdusse la sua equazione – che immediatamente si rivelò di grande utilità per la descrizione dei sistemi atomici –, Schrödinger non pensava affatto ad una interpretazione probabilistica della funzione d'onda, ossia a quella che oggi va sotto il nome di «interpretazione ortodossa» o «standard». Il che significa che **i risultati fondamentali della fisica quantistica non dipendono affatto dall'interpretazione in termini di probabilità**, ma discendono invece – come abbiamo visto – dalla relazione di De Broglie.



Cos'è la Funzione d'Onda?

Questa interpretazione di Schrödinger in termini di densità di carica si rivelò presto **infondata**, in quanto non spiegava come mai nei **processi di riflessione/trasmmissione** dell'onda che descrive un elettrone che incide su una barriera di potenziale non si rivelassero mai frazioni di carica ma sempre e solo la carica totale dell'elettrone.

Ciò nonostante essa è **storicamente rilevante** in quanto conferma che, quando nel 1926 introdusse la sua equazione – che immediatamente si rivelò di grande utilità per la descrizione dei sistemi atomici –, Schrödinger non pensava affatto ad una interpretazione probabilistica della funzione d'onda, ossia a quella che oggi va sotto il nome di «interpretazione ortodossa» o «standard». Il che significa che **i risultati fondamentali della fisica quantistica non dipendono affatto dall'interpretazione in termini di probabilità**, ma discendono invece – come abbiamo visto – dalla relazione di De Broglie.



W.Heisenberg



E.Schrödinger

MQ



P.A.M.Dirac

E questo **vale anche per le altre due diverse formulazioni della meccanica quantistica (MQ)**, che erano state elaborate nel 1925 dal fisico tedesco **Werner Heisenberg** (1901-1976; Nobel 1932) e dal già citato fisico francese **Paul A.M. Dirac** (1902-1984; Nobel 1933) e che si basavano rispettivamente, sulle matrici (da cui il nome «meccanica delle matrici») e su operatori e vettori di stato.

Cos'è la Funzione d'Onda?

Questa interpretazione di Schrödinger in termini di densità di carica si rivelò presto **infondata**, in quanto non spiegava come mai nei **processi di riflessione/trasmissione** dell'onda che descrive un elettrone che incide su una barriera di potenziale non si rivelassero mai frazioni di carica ma sempre e solo la carica totale dell'elettrone.

Ciò nonostante essa è **storicamente rilevante** in quanto conferma che, quando nel 1926 introdusse la sua equazione – che immediatamente si rivelò di grande utilità per la descrizione dei sistemi atomici –, Schrödinger non pensava affatto ad una interpretazione probabilistica della funzione d'onda, ossia a quella che oggi va sotto il nome di «interpretazione ortodossa» o «standard». Il che significa che **i risultati fondamentali della fisica quantistica non dipendono affatto dall'interpretazione in termini di probabilità**, ma discendono invece – come abbiamo visto – dalla relazione di De Broglie.



W.Heisenberg



E.Schrödinger

MQ



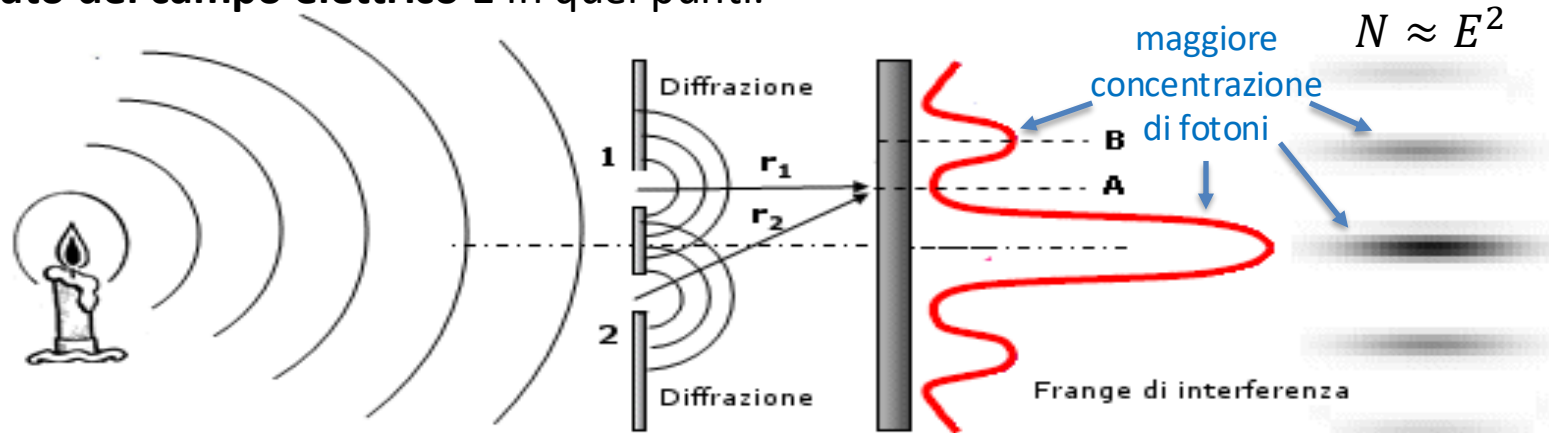
P.A.M. Dirac

Ben presto molti teorici, tra cui lo stesso Schrödinger e il fisico austriaco **Wolfgang Pauli** (1900-1958; Nobel 1945) dimostrarono che **le tre formulazioni della Meccanica Quantistica erano equivalenti**. Questo significa che **la teoria quantistica è stata creata ed ha fornito grossi servizi nell'indagine del mondo a livello microfisico ancor prima di essere interpretata...**

Verso l'interpretazione di Copenhagen

Solo nel 1927, in occasione del 5° Congresso Solvay, cominciò infatti a prendere piede e ad affermarsi **l'interpretazione probabilistica della Meccanica Quantistica, detta anche Interpretazione di Copenhagen** perché si ispirò ai lavori svolti nella capitale danese principalmente da Niels Bohr e Werner Heisenberg. L'idea essenziale e lo sviluppo matematico di questa interpretazione, che oggi rappresenta **l'ortodossia** in MQ, vanno accreditati al fisico tedesco naturalizzato britannico **Max Born** (1882-1970; Nobel 1954), ma il suggerimento iniziale gli era stato dato dal solito Einstein...

Einstein aveva infatti osservato che, nella teoria ondulatoria classica, **l'intensità della radiazione elettromagnetica** in un certo punto dello spazio era proporzionale al quadrato del valore del campo elettrico in quel punto. Essendo la radiazione elettromagnetica costituita quantisticamente da **fotoni**, questo significava che, in un esperimento come quello di Young a doppia fenditura, era intuitivo immaginare che le frange di interferenza costruttiva fossero costituite da un numero N di fotoni anch'esso **proporzionale al quadrato del campo elettrico E** in quei punti.



L'Interpretazione di Copenaghen

Nel 1926 **Max Born** pensò di estendere le considerazioni di Einstein anche alle onde di materia introdotte da De Broglie due anni prima e descritte dall'equazione d'onda appena proposta da Schrödinger. Il pilastro portante della sua interpretazione è la **concezione probabilistica della funzione d'onda**, comunemente nota come **regola di Born**, secondo la quale **il modulo quadro della funzione d'onda** $\Psi(r,t)$ che descrive, ad esempio, una particella che si muove nello spazio, fornisce la **probabilità che la particella venga trovata al tempo t in un certo punto r se si esegue su di essa una misura di posizione.**

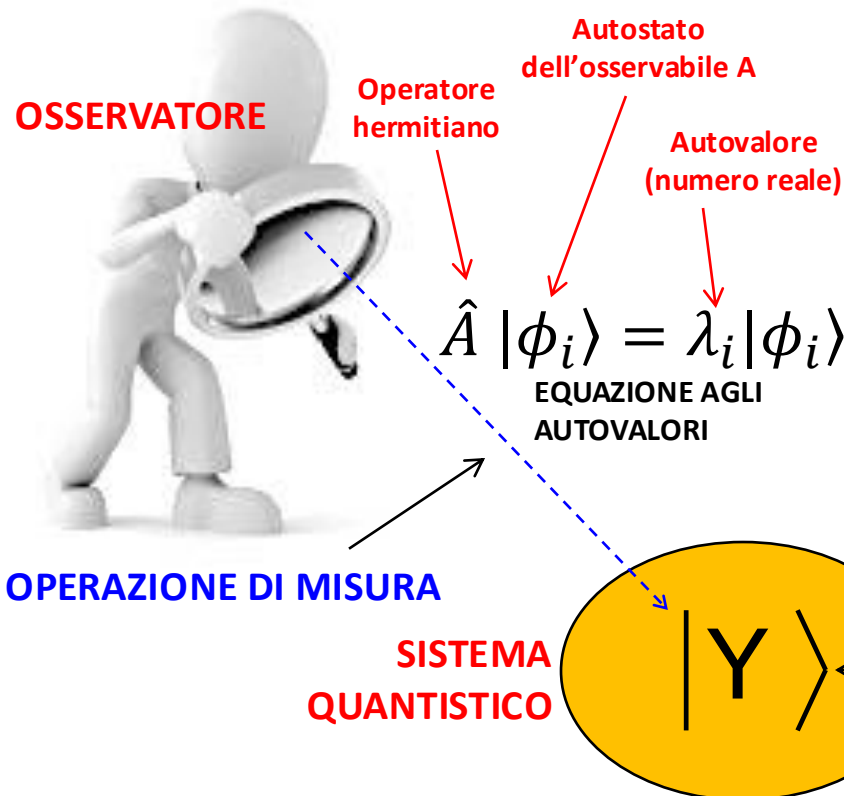
Assiomi Matematici della MQ (interpretazione di Copenaghen):

- Le grandezze fisiche osservabili A sono associate ad **operatori hermitiani** $\hat{A}$. Consideriamo per semplicità una osservabile che possa assumere solo valori discreti λ_i (ad es. energia, spin, etc...)
- La funzione d'onda del sistema osservato si esprime come una combinazione lineare (**sovrapposizione**) dei possibili autostati di $\hat{A}$ in cui il sistema può essere trovato: $\Psi = \sum c_i \phi_i$, con $c_i \in \mathbb{C}$
- L'operazione di misura** consiste nel far agire l'operatore $\hat{A}$ sul vettore di stato del sistema $|\Psi\rangle$, proiettandolo su tutti i suoi possibili autostati e ottenendo così le **ampiezze**: $\langle \phi_i | \Psi \rangle = c_i$
- Il **modulo quadro** dell'i-esima ampiezza $|c_i|^2$ fornirà la probabilità che il sistema preparato in $|\Psi\rangle$ venga osservato in ϕ_i .

Max
Born

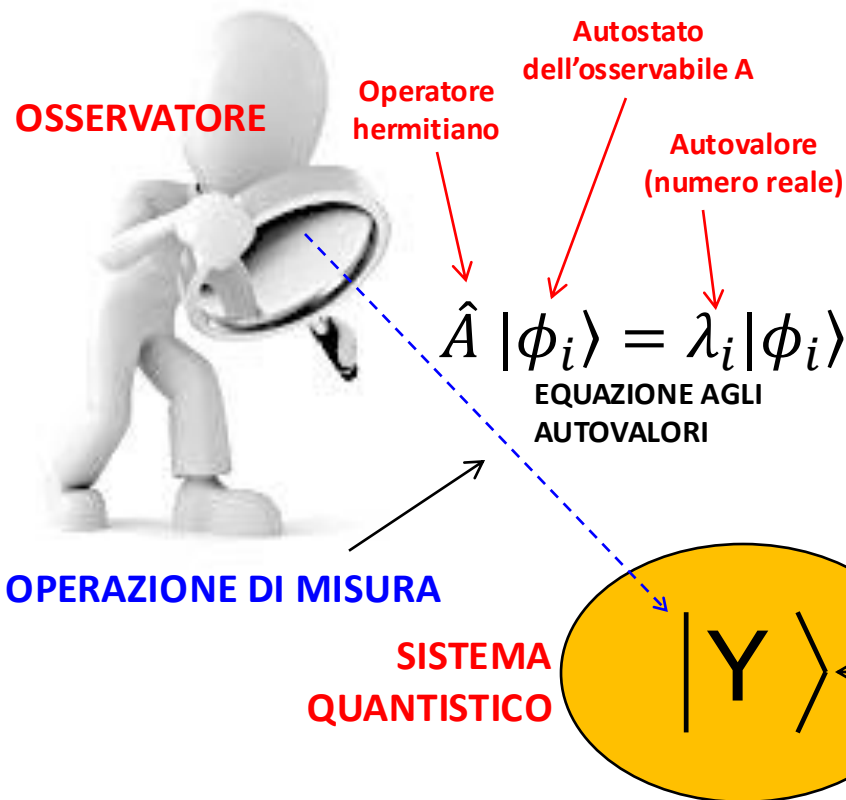


**«VETTORE DI STATO» CHE
DESCRIVE LO STATO IN CUI
VIENE PREPARATO IL SISTEMA**



L'Interpretazione di Copenhagen

Nel 1926 **Max Born** pensò di estendere le considerazioni di Einstein anche alle onde di materia introdotte da De Broglie due anni prima e descritte dall'equazione d'onda appena proposta da Schrödinger. Il pilastro portante della sua interpretazione è la **concezione probabilistica della funzione d'onda**, comunemente nota come **regola di Born**, secondo la quale il **modulo quadro della funzione d'onda** $\Psi(r,t)$ che descrive, ad esempio, una particella che si muove nello spazio, fornisce la **probabilità che la particella venga trovata al tempo t in un certo punto r se si esegue su di essa una misura di posizione.**



MA COS'E' CHE, NEL MONDO REALE, DETERMINA IL PASSAGGIO DA QUESTA SOVRAPPOSIZIONE DI AUTOSTATI $\Psi = \sum c_i \phi_i$ AL SINGOLO AUTOSTATO ϕ_i CHE ALLA FINE FORNIRA' IL VALORE λ_i DELL'OSSERVABILE A COME RISULTATO DELL'OPERAZIONE DI MISURA?

«VETTORE DI STATO» CHE DESCRIVE LO STATO IN CUI VIENE PREPARATO IL SISTEMA

Max Born

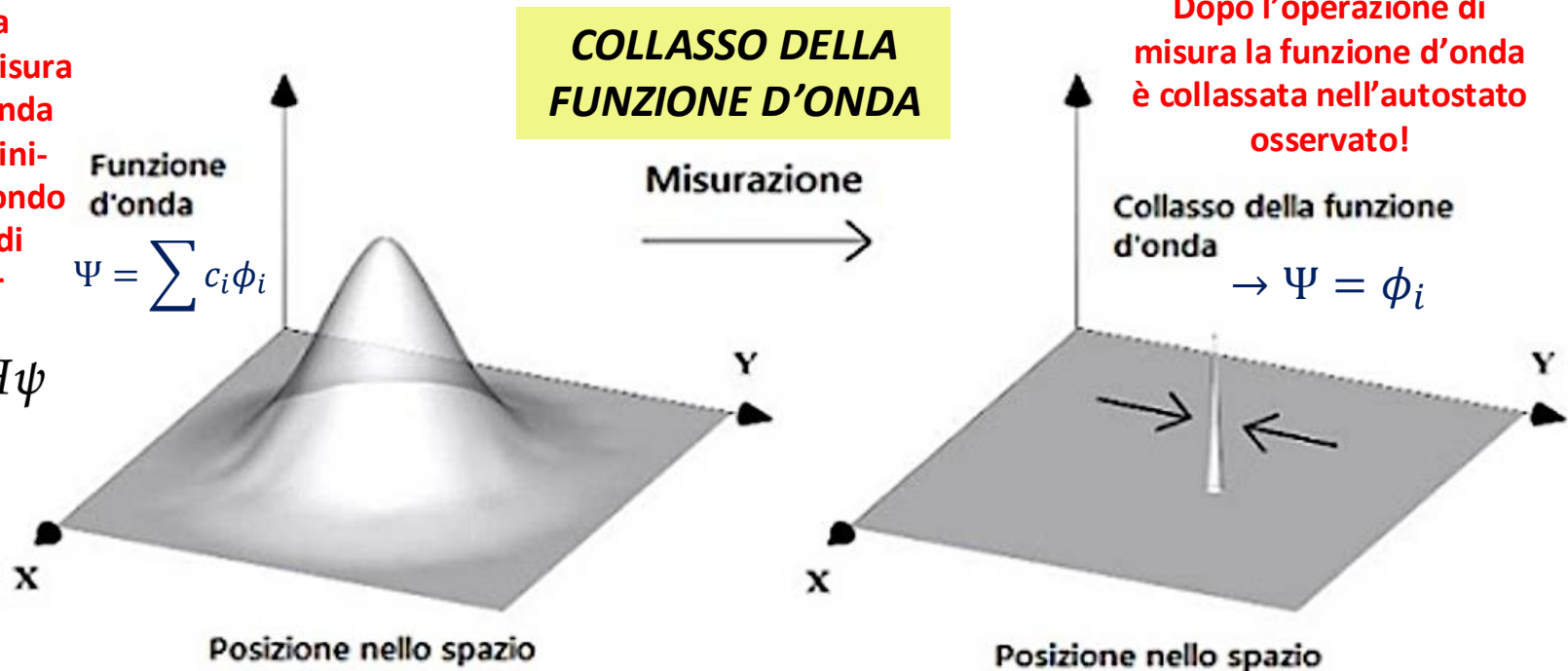


L'Interpretazione di Copenhagen

Secondo l'interpretazione di Copenhagen, le **affermazioni probabilistiche della meccanica quantistica sono irriducibili**, nel senso che non riflettono una nostra mancanza di conoscenza relativa a qualche variabile nascosta, ma rivelano la **natura intrinsecamente indeterminata del mondo microscopico**. Dunque sarebbe privo di senso domandarsi "**dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione?**", in quanto la teoria standard prende in considerazione esclusivamente quantità osservabili mediante processi di misurazione. Ed è proprio **l'atto della misurazione a causare il cosiddetto «collasso della funzione d'onda»**, che "costringe" la particella osservata ad assumere solo *uno* dei valori permessi (autovalori), con probabilità stabilite con precisione dal formalismo della teoria.

Prima di una
operazione di misura
la funzione d'onda
evolve determini-
sticamente secondo
l'equazione di
Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$$



Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



Bohr



De Broglie



Heisenberg



Schodinger



Born

- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenhagen



Bohr



De Broglie



Heisenberg



Schodinger



Born

- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenhagen
- 1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione



Il **PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE** di Heisenberg implica che esiste un **limite fondamentale alla precisione con cui alcune coppie di osservabili** (corrispondenti, matematicamente, ad operatori che non commutano tra loro) **possono essere misurate simultaneamente**. Ad esempio, se si misura con grande precisione la **posizione** di una particella (Δx molto piccolo), la sua **quantità di moto** diventa altamente incerta (Δp molto grande), e viceversa. Lo stesso vale anche per altre coppie di osservabili, come ad es. **energia e tempo**.

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



Bohr



De Broglie



Heisenberg



Schrodinger



Born

- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen
- 1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione



Sempre nel 1927, sulla scia del principio di indeterminazione, Bohr enuncia il suo **PRINCIPIO DI COMPLEMENTARITA'**, un altro pilastro dell'interpretazione standard della Meccanica Quantistica, secondo cui il duplice aspetto (**DUALISMO**) di alcune rappresentazioni dei fenomeni a livello atomico e subatomico (ad es. onda e particella, posizione e quantità di moto, energia e tempo, ...) fa sì che le corrispondenti grandezze fisiche **non possono essere osservate contemporaneamente durante lo stesso esperimento**.

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



Bohr



De Broglie



Heisenberg



Schodinger



Born

- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen
- 1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione

Gli assiomi e i principi sulla base dei quali si è sviluppata ed imposta l'interpretazione ortodossa della MQ (**descrizione probabilistica, collasso della funzione d'onda, relazioni di indeterminazione, complementarità**) costituivano certamente una **rottura radicale** rispetto al concetto di realtà fisica a cui ci aveva abituati la fisica classica, anche se limitatamente alla scala microscopica dei fenomeni quantistici. Non sorprende quindi che alcuni scienziati dell'epoca, tra cui svariati padri della teoria quantistica, non fossero disposti ad abbandonare così facilmente una **descrizione realista del mondo**. In occasione del 5° Congresso Solvay del 1927, dunque, si scontrarono **due opposte fazioni...**

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenhagen



Bohr



De Broglie



Heisenberg



Schodinger



Born

1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati

1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone

1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici

1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria

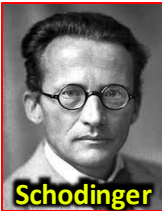
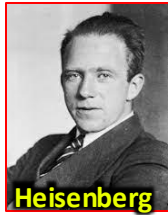
1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda

1927 → Nasce l'interpretazione di Copenhagen

1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione



Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati

1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone

1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici

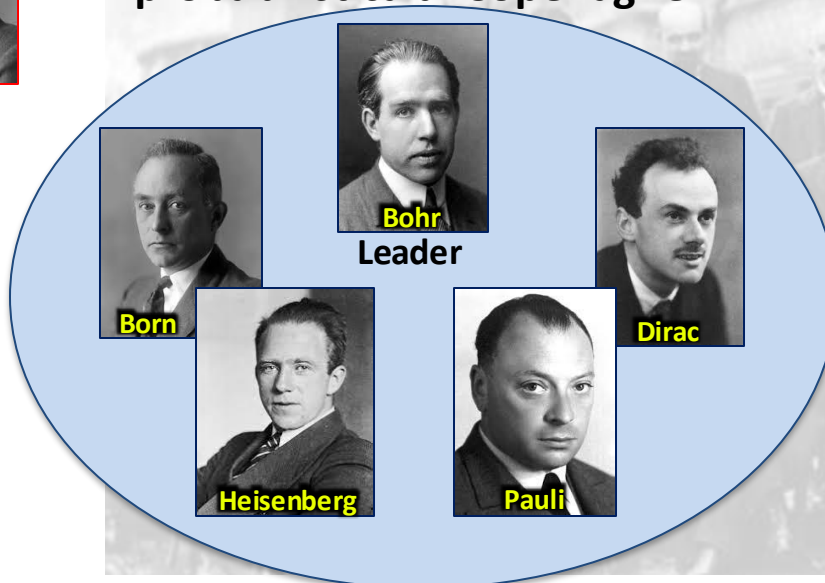
1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria

1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda

1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen

1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione

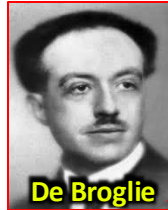
Sostenitori dell'Interpretazione probabilistica di Copenaghen



Scettici rispetto all'Interpretazione probabilistica di Copenaghen



Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati

1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone

1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici

1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria

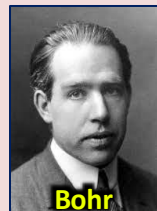
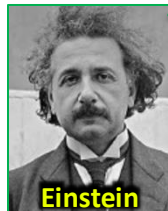
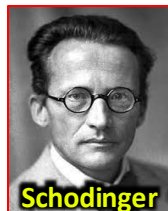
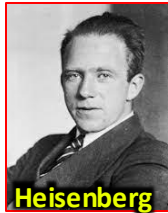
1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda

1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen

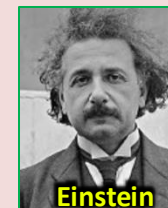
1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione

1927 → Prima fase del dibattito Bohr-Einstein

1930 → Seconda fase del dibattito Bohr-Einstein



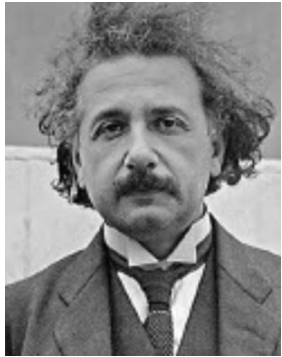
**Lo scontro
Einstein-Bohr:**



**Dio gioca o non gioca
a dadi?**

Lo scontro Einstein-Bohr:

Dio gioca o non gioca a dadi?



Come è noto, **ad Einstein non piaceva l'indeterminismo della meccanica quantistica**. La sua frase più famosa è probabilmente "***God does not play dice***", ma non è esatto dire che questo fosse l'aspetto della meccanica quantistica a preoccuparlo di più.

Ma se non era la perdita del determinismo a preoccuparlo, allora cosa? Da questa sua frase forse possiamo capirlo:

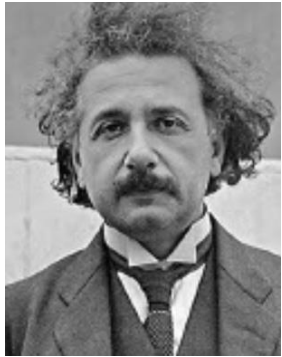
"Sembra difficile dare un'occhiata alle carte di Dio. Ma che giochi a dadi e usi metodi "telepatici" (come l'attuale teoria quantistica richiede da lui) è qualcosa a cui non posso credere per un solo momento". Da ciò si deduce come la

sua preoccupazione non fosse tanto l'indeterminismo, quanto invece **l'azione a distanza** (*telepathic methods*), o meglio la **non-località** della meccanica quantistica. Pertanto, egli ideò astuti *Gedanken experiments* (esperimenti mentali) al fine di provare che la visione ortodossa fosse sbagliata, o almeno incompleta. E fu proprio nell'ambito di questi tentativi che **Einstein trovò nell'amico Bohr un formidabile avversario intellettuale...**



Lo scontro Einstein-Bohr:

Dio gioca o non gioca a dadi?



La **differenza fondamentale** tra il punto di vista di Einstein e quello di Bohr consisteva nel fatto che il fisico tedesco insisteva sulla necessità di avere una **descrizione completa di un sistema fisico che fosse indipendente dall'osservatore (realismo)**, andando quindi al di là del legame sistema-apparato, e che inoltre evitasse di fare ricorso a forme di interazione non-locale per **evitare contraddizioni con la sua Teoria della Relatività**.

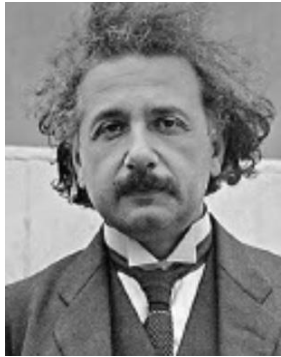
Bohr invece conferiva alle teorie fisiche uno **statuto unicamente epistemologico**, non preoccupandosi dunque né del realismo né di eventuali violazioni della condizione di località einsteiniana. In particolare, il fisico danese si basava sul suo **Principio di Complementarità**, secondo il quale – come abbiamo già visto – il duplice aspetto delle rappresentazioni fisiche dei fenomeni a livello atomico e subatomico non poteva essere osservato simultaneamente durante lo stesso esperimento.



Nel contesto della visione realista di Einstein queste forme di dualismo non erano invece accettabili, in quanto secondo la sua concezione **qualunque teoria fisica che pretendesse di essere fondamentale doveva assumere una posizione chiara circa lo statuto ontologico del micromondo**.

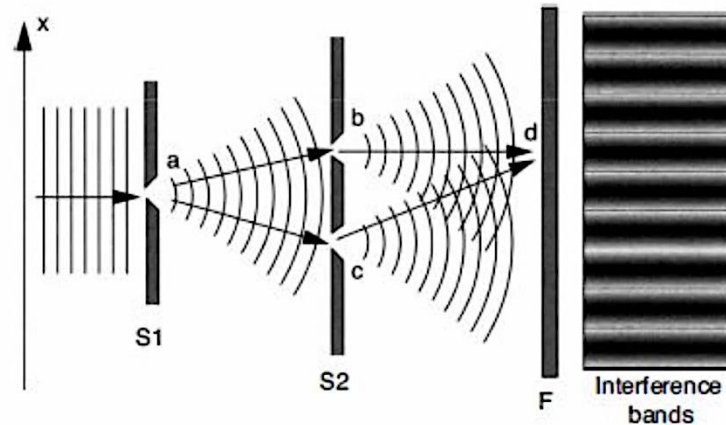
Lo scontro Einstein-Bohr:

Dio gioca o non gioca a dadi?



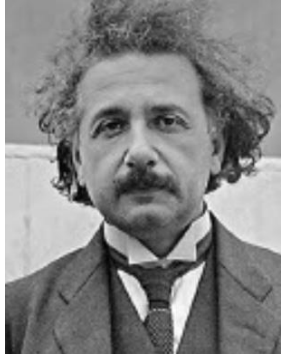
Storicamente, il **primo attacco di Einstein** alla concezione ortodossa, che stava crescendo sempre più nei consensi, avvenne durante il **Quinto Congresso di Fisica nell'Istituto di Solvay nel 1927**.

In quella circostanza lui si chiese se fosse possibile usare le leggi di conservazione dell'impulso e dell'energia per ottenere **conoscenze aggiuntive** riguardo lo stato (posizione e velocità) delle particelle nei processi di interferenza (tipo doppia fenditura). In questo modo, **voleva dimostrare che il principio di indeterminazione di Heisenberg fosse sbagliato**.



Lo scontro Einstein-Bohr:

Dio gioca o non gioca a dadi?



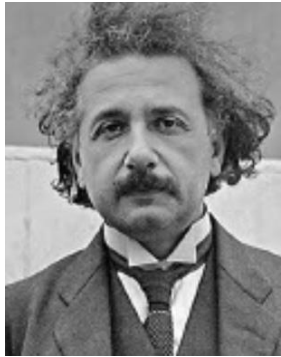
Storicamente, il **primo attacco di Einstein** alla concezione ortodossa, che stava crescendo sempre più nei consensi, avvenne durante il **Quinto Congresso di Fisica nell'Istituto di Solvay nel 1927**.

In quella circostanza lui si chiese se fosse possibile usare le leggi di conservazione dell'impulso e dell'energia per ottenere **conoscenze aggiuntive** riguardo lo stato (posizione e velocità) delle particelle nei processi di interferenza (tipo doppia fenditura). In questo modo, **voleva dimostrare che il principio di indeterminazione di Heisenberg fosse sbagliato**.

Secondo i documenti ufficiali, **Bohr uscì vincitore** da questo primo scontro. In realtà, seppur senza ammetterlo esplicitamente, **Bohr fu costretto a modificare certe sue precedenti asserzioni** circa lo status dei macrosistemi ed il ruolo che essi giocano nella misurazione delle variabili microscopiche. In particolare, egli dovette riconoscere, a differenza di quanto affermato in precedenza, che tali sistemi (cioè gli **apparati di misura**) non possono essere sempre considerati come sistemi classici.



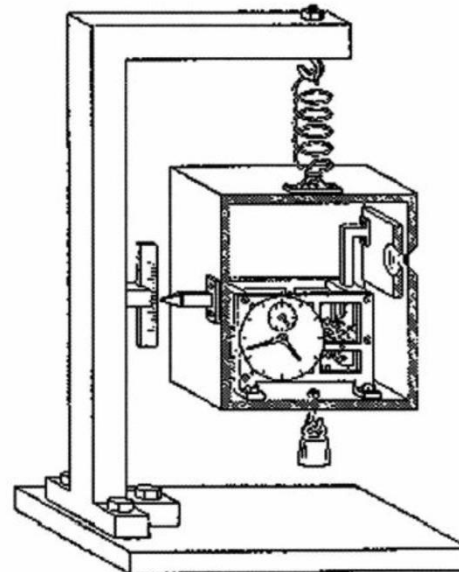
Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?



Alla **sesta Conferenza di Solvay del 1930**, le relazioni di indeterminazione furono oggetto di un nuovo serio attacco da parte di Einstein, stavolta nella loro **versione energia-tempo**. La sua argomentazione era semplice ma apparentemente inattaccabile. Dopo una notte insonne, però, anche in questo caso **Bohr riuscì ad avere la meglio**, peraltro utilizzando proprio il **principio di equivalenza** tra massa inerziale e gravitazionale messo da Einstein a fondamento della Relatività Generale...

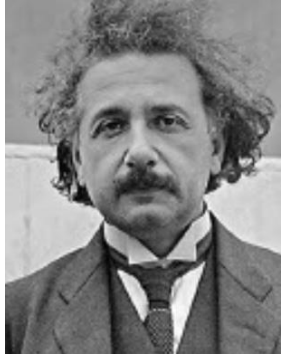
«Fu un vero shock per Bohr... che, a tutta prima, non ne vedeva una soluzione. Per tutta la sera fu estremamente angustiato, e continuava a passare da uno scienziato all'altro, cercando di persuaderli che non poteva essere, che sarebbe stata la fine della fisica se Einstein avesse avuto ragione; ma non riusciva a trovare un modo di confutare il paradosso [...] Il mattino dopo vide il trionfo di Bohr...»

Léon Rosenfeld



Lo scontro Einstein-Bohr:

Dio gioca o non gioca a dadi?

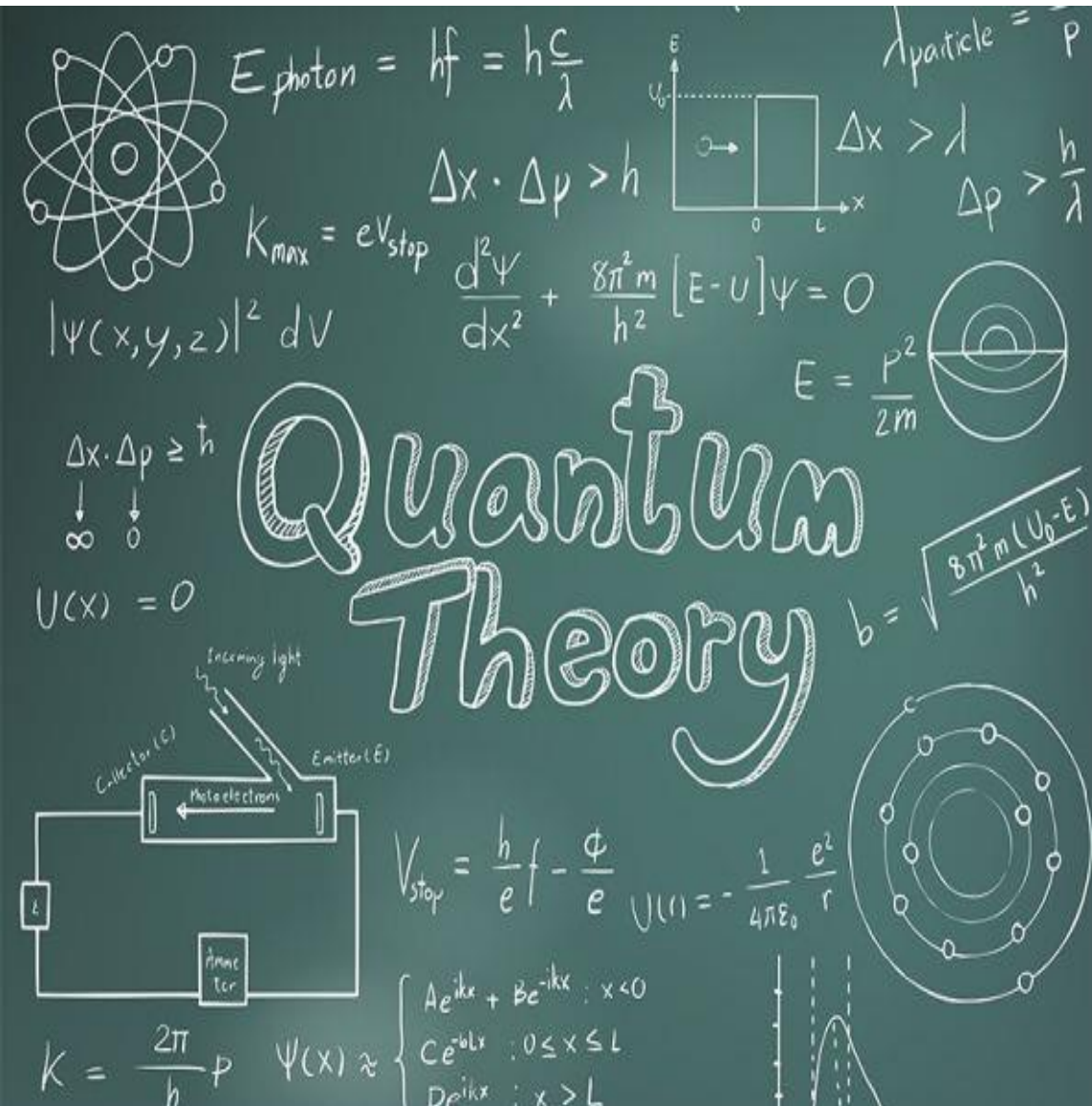


Questo episodio, e l'anno in cui si verificò (1930), segnarono un **cambiamento decisivo** nell'atteggiamento di Einstein nei confronti della meccanica quantistica. Sembrava adesso convinto che esistessero limitazioni, in linea di principio, alla possibilità di determinare con la precisione desiderata la velocità e la posizione di una particella, **accettando così il principio di indeterminazione**. Ma mantenne la ferma convinzione che queste proprietà potessero essere considerate come appartenenti ai sistemi, e non come "create" dall'atto di misurazione. **Da questo momento in poi, i suoi attacchi non saranno più rivolti contro l'incoerenza della teoria, ma contro la sua presunta incompletezza**. In altre parole, come abbiamo accennato prima, Einstein era molto riluttante all'idea di accettare la natura non-epistemica delle probabilità quantistiche, e insisteva sul fatto che la teoria non raccontasse l'intera storia. **Fu questa la linea di pensiero che, come vedremo, avrebbe poi portato David Bohm a formulare il primo esempio esplicito di teoria a variabili nascoste non-locali...**



Prossimamente: **David Bohm**

Interpretazioni Realiste della Meccanica Quantistica



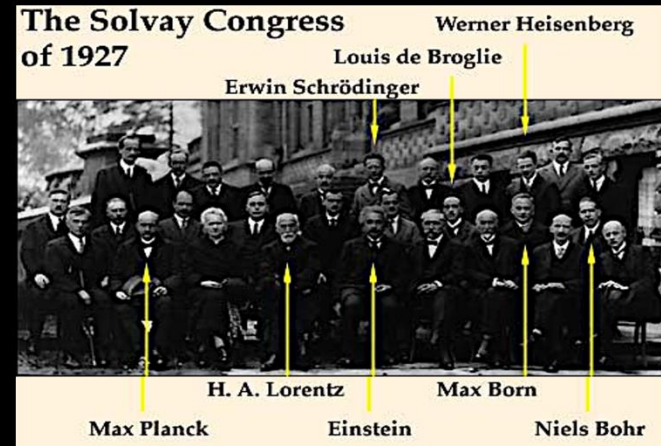
Testo di riferimento:



Corso di Storia della Fisica ed Epistemologia – A.A. 2024-25 – DFA UNICT

PLANCK, BOHR, HEISENBERG

Nascita e Sviluppi della Meccanica Quantistica



Corso di Storia della Fisica ed Epistemologia – A.A. 2024-25 – DFA UNICT

David Bohm

Interpretazioni Realiste della Meccanica Quantistica

