

FISICA

La crisi della Fisica Classica

*Autore: **prof. Pappalardo Vincenzo***

*docente di **Matematica e Fisica***



La storia della fisica e del pensiero scientifico e filosofico contemporaneo è segnata, già a partire dalla fine del XIX secolo, dalla progressiva presa di coscienza di un lento ma inesorabile dileguarsi delle certezze, dei fondamenti teorici e pratici del sapere.

Una alla volta, tutte le categorie del pensare e dell'agire scientifico e filosofico, idee e concetti ritenuti immutabili come il Tempo, lo Spazio, il rapporto tra Causa ed Effetto (determinismo), sono stati messi alla prova.

Una delle prime verità venute a galla in questa ricerca di nuove fondamenta del sapere è che la scienza non è onnisciente,

La pretesa di conoscere il mondo senza errori è soltanto un mito, o al più una confortante ipotesi di lavoro.

L'epoca contemporanea ha dovuto rinunciare al sogno della fisica classica di conoscere il mondo in maniera completa a partire dalle componenti minime ed elementari, quello che potremmo chiamare il "[sogno di Cartesio](#)".

Gli sviluppi della scienza hanno prodotto inoltre un lento ma inesorabile smascheramento della nostra più fondata certezza: l'immagine di un mondo deterministico, un mondo, cioè, sui cui eventi e fenomeni è sempre possibile operare previsioni da cui far derivare leggi assolute.

E' svanito il sogno di Laplace, è sfumata la possibilità di prevedere l'evoluzione futura di ciascun fenomeno a partire dalla conoscenza della legge che lo regola e a vedere il mondo come un insieme di fenomeni semplici, le cui spiegazioni si trovano nella riduzione della varietà e della molteplicità delle variabili in gioco entro schemi generali e assoluti.

Il nuovo sapere deve mettere in discussione, uno dopo l'altro, tutti i suoi fondamenti, abbandonare il bisogno di ritrovare confermati i propri schemi mentali, le proprie strutture teoriche nella convinzione che la natura possa rispondere all'interrogazione sperimentale.

Insomma, il nuovo sapere deve interrogarsi proprio sulla legittimità e utilità del ricercare leggi nella natura.

Queste riflessioni non riguardano solo la fisica, e in generale la scienza, ma tutto l'universo culturale dell'uomo.

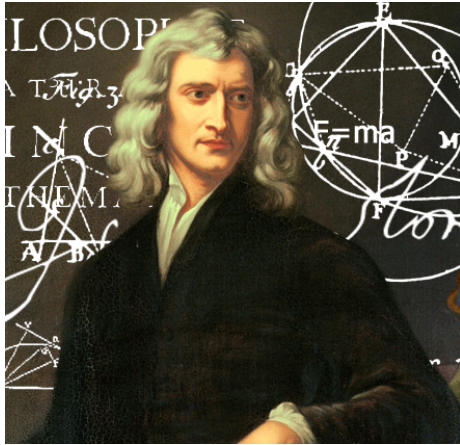
All'alba del Novecento si apre un nuovo universo di idee. Le avanguardie artistiche inaugurano la rivoluzione modernista. Nascono l'architettura funzionale ([Bauhaus](#)) e il design industriale come risposta alla civiltà delle macchine. Letteratura e teatro disgregano relativisticamente il personaggio-uomo ([Pirandello](#)). La pittura ([cubismo e astrattismo](#) in primis) rifiuta le immagini della percezione ottica, per indagare la realtà mentale delle cose.

La musica abbandona la tonalità ([Schonberg](#)). Tutto l'universo ottocentesco è rimesso in discussione.

Cambiano i costumi, i modi di pensare, i criteri etici, mentre compaiono esperienze inedite che domineranno il secolo, come la psicanalisi e il cinema.

Sull'opera di Einstein e sulla meccanica quantistica sarà avviato anche un dibattito filosofico estremamente impegnato (Bergson, Cassirer, Carnap, Reichenbach, Whitehead, Popper).

In tutti questi filosofi, e le correnti che incarnano, occupa un posto centrale la riflessione sul significato e i fondamenti dell'esperienza e sulla validità della scienza.



La concezione del mondo che fu trasformata dalle scoperte della fisica moderna era stata costruita sulla base del modello meccanicistico newtoniano dell'universo, che costituiva la struttura portante della fisica classica.

La **meccanica di Newton** costituiva un edificio teorico che sorreggeva graniticamente tutta la scienza e che per quasi tre secoli offrì una solida base alla filosofia naturale.

Lo scenario dell'universo newtoniano nel quale avevano luogo tutti i fenomeni fisici era lo spazio tridimensionale della geometria euclidea: **uno spazio assoluto sempre immobile e immutabile.**

Tutti i mutamenti che si verificano nel mondo fisico erano descritti in funzione di una dimensione separata, chiamata **tempo, anch'essa assoluta** che non aveva alcun legame con il mondo materiale e che fluiva uniformemente dal passato al futuro, attraverso il presente.

Gli elementi del mondo newtoniano che si muovevano in questo spazio e in questo tempo assoluti erano le particelle materiali.

Nelle equazioni matematiche queste venivano trattate come punti materiali e Newton le considerava oggetti piccoli, solidi e indistruttibili dei quali era costituita tutta la materia. Questo modello era del tutto simile a quello degli atomisti greci.

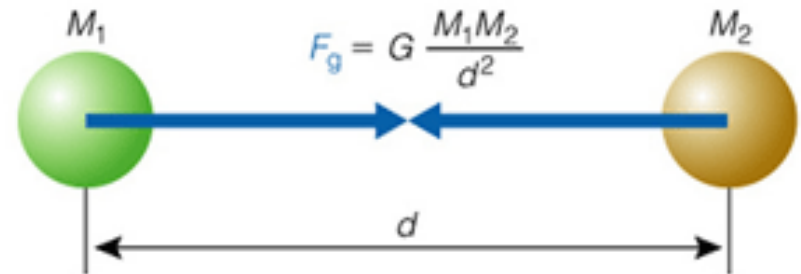
Tutti e due erano basati sulla distinzione tra pieno e vuoto, tra materia e spazio, e in entrambi i modelli le particelle rimanevano sempre identiche a se stesse in massa e forma; perciò la materia era sempre conservata ed essenzialmente inerte.

Nella meccanica di Newton, tutti gli eventi fisici sono ridotti al moto di punti materiali nello spazio, moto causato dalla loro reciproca attrazione, cioè dalla forza di gravità.

Le equazioni di Newton relative al moto dei corpi sono la base della meccanica classica; esse furono considerate le leggi immutabili secondo le quali si muovono i punti materiali e si pensava quindi che potessero spiegare tutti i mutamenti osservati nel mondo fisico.

$$\sum_i^N \vec{F}_i = m \vec{a}$$

Somma delle forze massa del corpo accelerazione



Secondo Newton, all'inizio Dio creò le particelle materiali, le forze che agiscono tra esse e le leggi fondamentali del moto. In questo modo tutto l'universo fu posto in movimento e da allora ha continuato a funzionare, come una macchina, governato da leggi immutabili.

La concezione meccanicistica della natura è quindi in stretto rapporto con un determinismo rigoroso. La gigantesca macchina cosmica era considerata completamente causale e determinata.

Tutto ciò che avveniva aveva una causa definita e dava luogo a un effetto definito. In linea di principio, si sarebbe potuto prevedere con assoluta certezza il futuro di una parte qualsiasi del sistema se si fosse conosciuto in un qualsiasi istante il suo stato iniziale (posizione e quantità di moto).

La base filosofica di questo determinismo rigoroso, che divenne l'ideale di tutta la scienza, era la divisione tra l'io e il mondo introdotta da [Cartesio](#): il mondo poteva essere descritto oggettivamente, senza tener conto dell'osservatore umano.

Incoraggiati dal brillante successo della meccanica newtoniana anche in astronomia, i fisici la applicarono al moto continuo dei fluidi e alle vibrazioni dei corpi elastici, e ancora una volta servì allo scopo. Infine, anche la teoria del calore fu ridotta alla meccanica quando si capì che il calore è l'energia associata a un complicato moto di agitazione delle molecole.



Lo straordinario successo della meccanica di Newton fece nascere nei fisici dell'inizio dell'Ottocento la convinzione che l'universo fosse in realtà un enorme sistema meccanico che funzionava secondo le leggi del moto di Newton.

Queste leggi furono viste come le leggi fondamentali della natura e la meccanica di Newton venne considerata la teoria definitiva dei fenomeni naturali e generalmente considerata nel XIX secolo *epistème*, sapere certo, costituito da proposizioni vere, indubitabili e definitive:

"è chiara la [...] necessità, e pertanto la loro origine a priori" (Kant)

Sulla base di questa dominante convinzione, la meccanica viene posta a fondamento sicuro dell'indagine scientifica del mondo. Se è *epistème*, allora ci dà un'immagine vera della realtà fisica, e tutti i fenomeni fisici devono essere descritti e spiegati in termini meccanici.

La crisi della fisica ha inizio quando il programma di ricerca meccanicistico si imbatte in difficoltà che sembrano insuperabili e che portano ad abbandonare l'idea della meccanica come base unitaria della fisica, nonché a ripensare in generale la natura e lo status epistemologico delle teorie scientifiche.

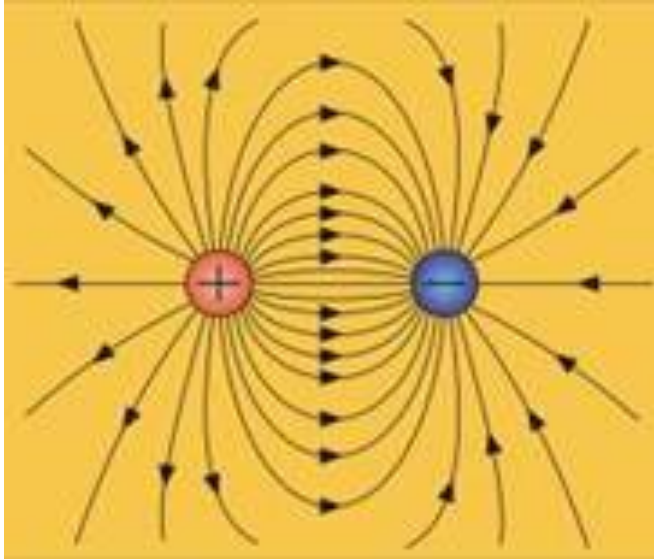
Questa presa di coscienza non si verificò improvvisamente, ma fu avviata da avvenimenti che erano già iniziati nel XIX secolo ([elettromagnetismo e termodinamica](#)) e che prepararono la strada alle rivoluzioni scientifiche (teoria della relatività e meccanica quantistica) del XX secolo.

L'**elettromagnetismo** non poteva essere descritto dal modello meccanicistico, e comportava l'esistenza di un nuovo tipo di forza.

Il passo importante fu compiuto da **Faraday** e da **Maxwell**, i quali, invece di interpretare l'interazione tra una carica positiva e una negativa dicendo semplicemente che le due cariche si attraggono tra loro come avviene per due masse nella meccanica newtoniana, trovarono più appropriato dire che ogni carica crea nello spazio circostante un campo, cioè una perturbazione o una condizione tale che un'altra carica, se presente avverte una forza.

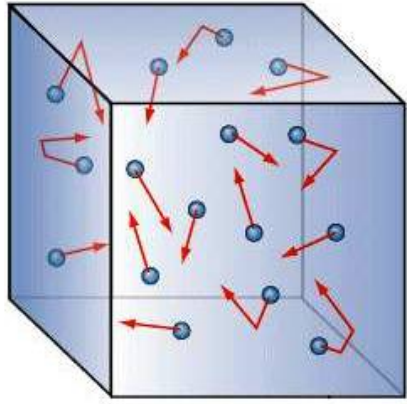
Era un mutamento profondissimo della concezione della realtà fisica da parte dell'uomo.

Nella visione newtoniana, le forze erano connesse ai corpi sui quali agivano, e agivano istantaneamente a qualsiasi distanza (azione a distanza).



Ora il concetto di forza veniva sostituito da quello di **campo**, il quale aveva una sua propria realtà, poteva essere studiato senza alcun riferimento ai corpi materiali, e non agiva istantaneamente una volta creato.

Il punto più alto raggiunto dall'elettromagnetismo fu la comprensione del fatto che la luce non è altro che un campo elettromagnetico rapidamente alternante e che si sposta nello spazio sotto forma di onda.



E' vero che in termodinamica brillanti progressi erano stati compiuti interpretando temperatura, calore, pressione di un gas all'interno della teoria cinetica della materia, ossia come effetti globali del moto caotico delle miriadi di particelle materiali che costituiscono i gas (e in generale i corpi).

Ma una difficoltà notevole era tuttavia costituita dal 2° principio della termodinamica, che introduceva l'irreversibilità dei fenomeni di cui non si riusciva a ottenere la spiegazione utilizzando leggi e principi della meccanica che sono tutti reversibili (ossia, che permettono di determinare lo stato futuro di un sistema, ma anche il suo stato passato).

Alla fine di molti sforzi teorici, una via d'uscita fu trovata: lo stato finale cui tende il processo fisico non è irreversibile, ma soltanto quello di massima probabilità; la reversibilità non è teoricamente impossibile, ma ha una probabilità talmente bassa che può essere praticamente escluso il suo verificarsi.

La riduzione della termodinamica alla meccanica era in tal modo ottenuta, ma a un prezzo notevole, ossia l'introduzione del punto di vista probabilistico nella scienza fisica, che intaccava il rigoroso determinismo della fisica tradizionale, vera colonna portante del meccanicismo.

L'ingresso del punto di vista probabilistico nella fisica precede la nascita della fisica quantistica, che introdurrà un probabilismo di tipo diverso, un probabilismo come legge di natura.

$$S = K_B \ln P$$

In definitiva, le due nuove branche della fisica ottocentesca, ossia l'elettromagnetismo e la termodinamica, risultarono alla fine irriducibili a sottocapitoli della meccanica. Nonostante questi mutamenti che aprivano nuovi orizzonti, la meccanica newtoniana mantenne inizialmente la sua posizione come fondamento di tutta la fisica.

All'inizio del Novecento, i fisici disponevano di due teorie valide, capaci di spiegare fenomeni differenti: la meccanica di Newton e l'elettrodinamica di Maxwell; di conseguenza, il modello newtoniano non costituiva più la base di tutta la fisica.

La fisica classica si era basata sull'assunto dell'obiettività della natura, sul fatto che l'universo fosse costituito da oggetti isolati, governati nei loro fenomeni da leggi oggettivamente valide. Fare esperienza di un fenomeno significava ricostruire in laboratorio un contesto in cui ogni suo aspetto venisse ricondotto ai dati essenziali, semplificato, o per meglio dire, purificato dalle possibili interferenze e perturbazioni.

Sistemi isolati ed esperimenti puri: con questa chiave di lettura, la fisica determinava la realtà isolandola e scomponendola nelle sue parti elementari, con un approccio che definiremmo, ovviamente, **riduzionista**.

Ma la nuova fisica (teoria della relatività e meccanica quantistica) del XIX secolo, mostrandoci l'esistenza di componenti sempre più piccole della materia e fenomeni di interazione dalla natura ambigua, ci svela il carattere puramente illusorio di tanta oggettività.

La crisi del riduzionismo ebbe quindi origine dall'elaborazione di una nuova concezione dell'atomo, divenuto un oggetto strano, apparentemente incoerente, incerto nella natura delle sue componenti, corpuscoli o onde, sfuggente nei suoi movimenti interni di elettroni e protoni, e in ultima analisi, indefinibile.

Insomma, a partire dagli ultimi decenni dell'Ottocento, la fisica in particolare, ma anche altre scienze, diventano sempre più scienze dell'inosservabile.

La transizione dall'osservazione del macroscopico al microscopico è di importanza fondamentale perché cambia profondamente il modo di interrogare la natura e la sua comprensione.

La fisica fino al termine dell'Ottocento studiava sostanzialmente fenomeni dell'ordine di grandezza dell'esperienza ordinaria o, come si dice talvolta, "macroscopici".

Nella fisica moderna, invece, sono gli enti microscopici stessi, gli inosservabili, l'oggetto di studio, ciò di cui si cerca di stabilire proprietà e leggi.

La risposta a questa crisi avvenne con un passaggio fondamentale, filosofico ed epistemologico, della scienza del nostro tempo: il passaggio dal concetto di struttura a quello di sistema, dall'idea di costituzione a quella di organizzazione. Si cominciano a vedere sotto una luce diversa tutti gli oggetti chiave della fisica, atomi e molecole, e a interpretarli come parti costituenti di sistemi.

Ma cos'è un sistema? È un insieme di unità in reciproca interazione, è cioè un **Tutto che funziona nella sua globalità** solo in virtù delle caratteristiche delle singole componenti in relazione fra loro.

In questo senso, il crollo dell'immagine del mondo creata da Newton e Galileo, si rivela inevitabile.

Né la descrizione né tantomeno la spiegazione dei fenomeni di un sistema fisico possono essere più affrontate agendo al livello delle singole parti, isolandole come oggetti reali.

Le caratteristiche fondamentali di un sistema sono la sua organizzazione, le sue relazioni interne ed esterne, nello stesso istante in cui lo scienziato frammenta il sistema nei suoi presunti componenti minimi, elementari e oggettivati, si preclude la possibilità di comprensione dei fenomeni, poiché l'organizzazione non può essere catturata dalla scomposizione.

La crisi del meccanicismo, quindi, è anche "crisi della visualizzabilità" degli enti della fisica, nel momento in cui essi appaiono come degli inosservabili che si tenta di comprendere mediante modelli intuitivi.

IL CROLLO DELLA VISIONE CLASSICA DEL MONDO

Affrontiamo, adesso, l'affascinante cammino che ha portato, nel primo quarto del XX secolo, all'elaborazione di quella rivoluzione scientifica rappresentata dalla meccanica quantistica, lo schema concettuale che, assieme alla teoria della relatività, ha mutato radicalmente le concezioni della fisica classica e che sta alla base di tutta la moderna visione del mondo.

In sintesi:

- Distrugge la tradizionale nozione di causalità, nel senso che le previsioni quantistiche non garantiscono certezze, ma, a differenza della meccanica newtoniana, descrivono solo in maniera probabilistica le modalità con cui accadono gli eventi.

- Ogni nozione, ogni conoscenza delle "cose" presenta certi limiti di natura intrinseca: quando ne possediamo una parte, esiste qualche altra parte che ci sfugge ([principio d'indeterminazione](#)).
- Termini come "[particella](#)", "[stato](#)", "[traiettoria](#)", "[misura](#)" [mutano il loro significato originario](#).

Raramente la nascita di una nuova teoria è stata altrettanto travagliata, ha richiesto così rilevanti sforzi da parte di alcune delle più brillanti menti di tutti i tempi e, pur avendo registrato un successo sul piano predittivo ineguagliato da ogni altro schema teorico nella storia della scienza, ha suscitato un così vivace e appassionante dibattito e controversie così accese circa il suo vero significato.

Questi fatti non risulteranno sorprendenti allorché avremo penetrato almeno in parte i segreti del microcosmo che il nuovo schema concettuale ci andrà svelando.

Questi segreti, le incredibili prodezze di cui scopriremo capaci i sistemi microscopici, risultano di fatto così innovativi e rivoluzionari rispetto alle concezioni classiche elaborate sulla base della nostra esperienza con i sistemi macroscopici, che risulta quasi naturale che l'elaborazione della nuova teoria sia stata tanto sofferta e che **tuttora il dibattito sulle sue implicazioni concettuali e filosofiche risulti notevolmente acceso.**

Le origini della meccanica quantistica vanno ricercate proprio nella fondamentale incapacità degli schemi concettuali classici di rendere conto di alcuni basilari fenomeni fisici.

L'assetto che alla fine dell'Ottocento aveva raggiunto la fisica classica, e cioè la meccanica, la termodinamica e l'elettromagnetismo, sembrava definitivo; rimanevano da sciogliere certe incongruenze, ma si pensava fossero dovute a limiti tecnologici e problemi di calcolo, non certo a carenze concettuali delle teorie.

Il quadro concettuale verso la fine del XIX secolo era: va riconosciuta una esistenza reale sia ai corpuscoli materiali discreti che ai campi continui.

Questi enti fisici evolvono in modo preciso nello spazio sotto l'influenza delle loro mutue interazioni codificate dalle equazioni della meccanica newtoniana e dalle equazioni di Maxwell, le quali dovrebbero consentire, almeno in linea di principio, la comprensione di tutti i processi del mondo fisico.

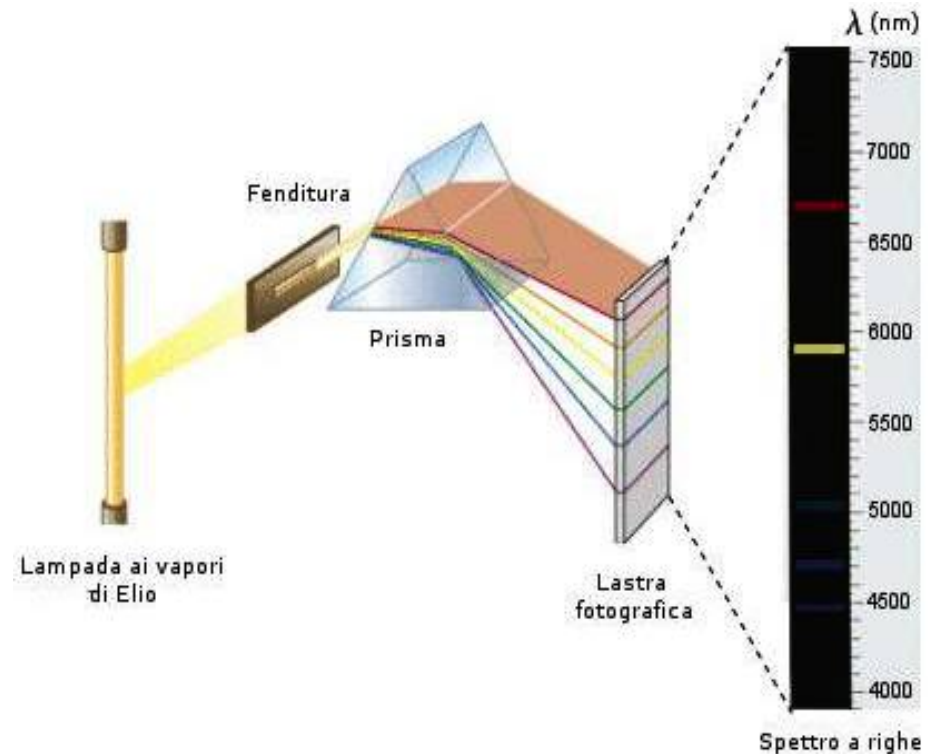
Verso la fine del XIX secolo la maggior parte degli studiosi era convinta che le leggi fondamentali della fisica fossero state ormai scoperte. Kelvin nel 1900 dichiarava.

“In fisica non c'è nulla di nuovo da scoprire ormai”

È facile immaginare la crisi che conseguì all'identificazione di alcuni processi fisici che risultavano **assolutamente incomprensibili secondo le teorie ora menzionate** e che resistevano ad ogni tentativo di ricondurli all'interno della visione classica del mondo.

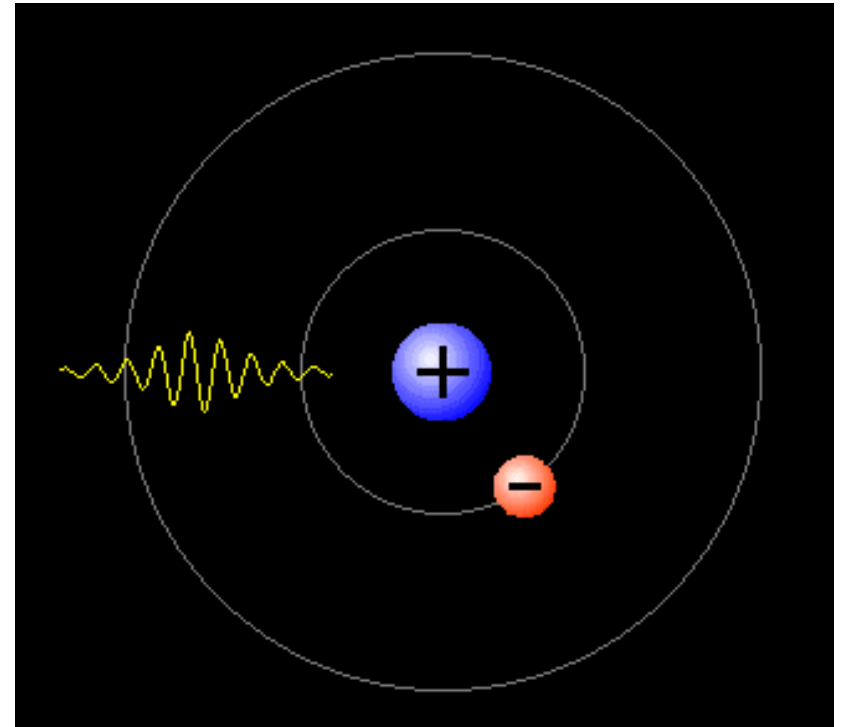
Analizziamone alcuni.

- Le righe spettrali: gli atomi possono emettere onde elettromagnetiche ma solo in impulsi di frequenze discrete molto specifiche, le righe spettrali. **Le frequenze che si osservano sono inspiegabili dal punto di vista della teoria classica.**



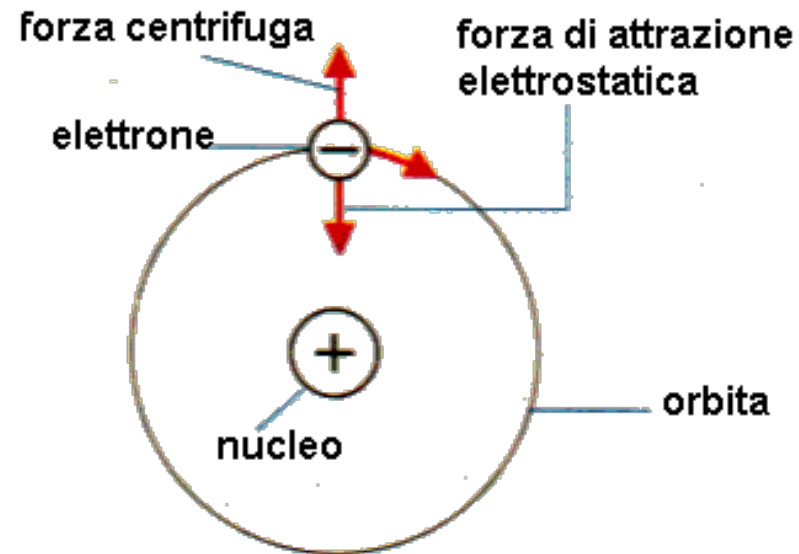
- La dipendenza dalla temperatura del colore degli oggetti:
Molti corpi, come una sbarra di ferro, cambiano colore al variare della loro temperatura. Il processo in esame coinvolge effetti termodinamici i quali comportano un aumento dell'agitazione termica dei costituenti del corpo materiale in oggetto.

Per questi costituenti (particelle elettricamente cariche), le leggi dell'elettromagnetismo implicano che cariche in moto non uniforme emettano radiazioni elettromagnetiche, in particolare luce sotto opportune condizioni.



I processi in gioco rientrano tutti nell'ambito della fisica classica, e, in linea di principio, è possibile renderne conto all'interno di questo schema concettuale. Malgrado gli sforzi della comunità scientifica **non risultò in alcun modo possibile spiegare un processo tanto comune in termini delle leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo classici.**

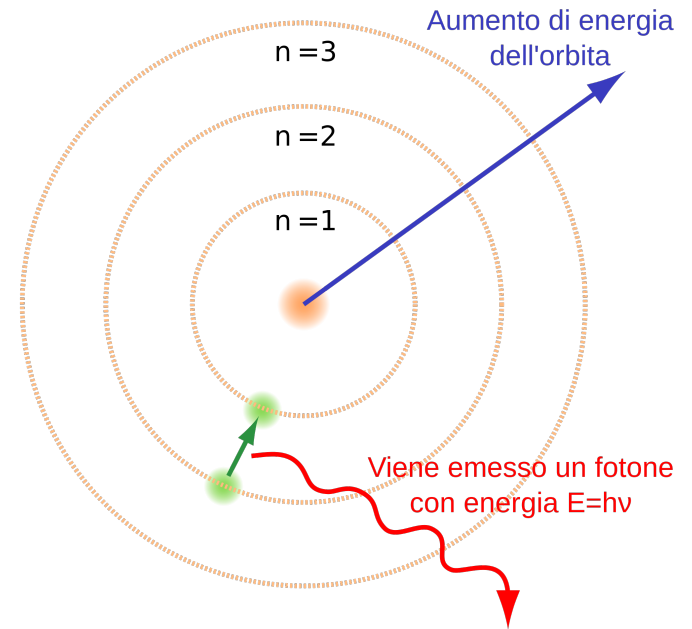
- Gli atomi e le loro proprietà: Alla fine del XIX secolo e agli inizi del XX, una serie di ricerche (**Rutherford**), avevano condotto a un modello dell'atomo concepito come un sistema planetario in miniatura, dove l'attrazione elettrostatica sostituisce l'attrazione gravitazionale.



Nonostante la sorprendente analogia abbastanza naturale tra la struttura atomica e quella di un sistema planetario, il modello risultava assolutamente insostenibile all'interno dello schema classico per vari motivi, tra cui il seguente:

Le cariche presenti nell'atomo, dovendo muoversi su orbite circolari o ellittiche, possiedono un'accelerazione. Ma, secondo le equazioni di Maxwell, una carica accelerata emette onde elettromagnetiche, cioè irraggia.

Irraggiando essa perde energia e quindi la sua orbita si restringe portando la particella a cadere, in tempi brevissimi, sul nucleo, il che contraddice tutta fenomenologia di siffatti sistemi.



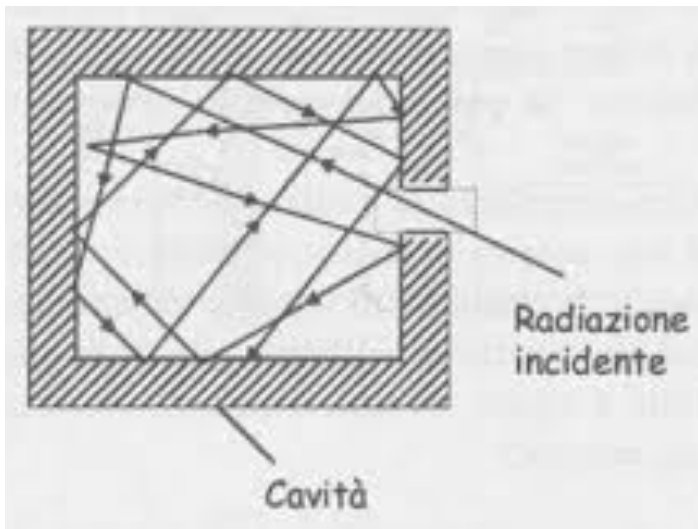
Iniziò così quella crisi che, grazie al lavoro di un gruppo assolutamente eccezionale di fisici come Planck, Einstein, Bohr, Schrodinger, Heisenberg, Dirac, Pauli, e tanti altri, scardinò alle fondamenta la visione classica del mondo, catapultando così il Novecento all'interno di una rivoluzione non solo scientifica, ma anche culturale, che ancora oggi è in atto.

Vediamo come **Planck (1858-1947)**, partendo dal problema dell'irraggiamento del corpo nero, arrivò a formulare *l'ipotesi dei quanti di energia*.

Un corpo che irraggia energia elettromagnetica deve anche assorbirne. Se ciò non avvenisse, tutta la sua energia andrebbe perduta e la sua temperatura raggiungerebbe lo zero assoluto.

La capacità di emettere radiazione elettromagnetica è tanto maggiore quanto più un corpo è assorbente. *Dunque un buon emettitore di radiazione è anche un buon assorbitore.*

Un **corpo nero** è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente (e quindi non ne riflette). Il corpo nero, per la conservazione dell'energia, irradia tutta la quantità di energia assorbita.

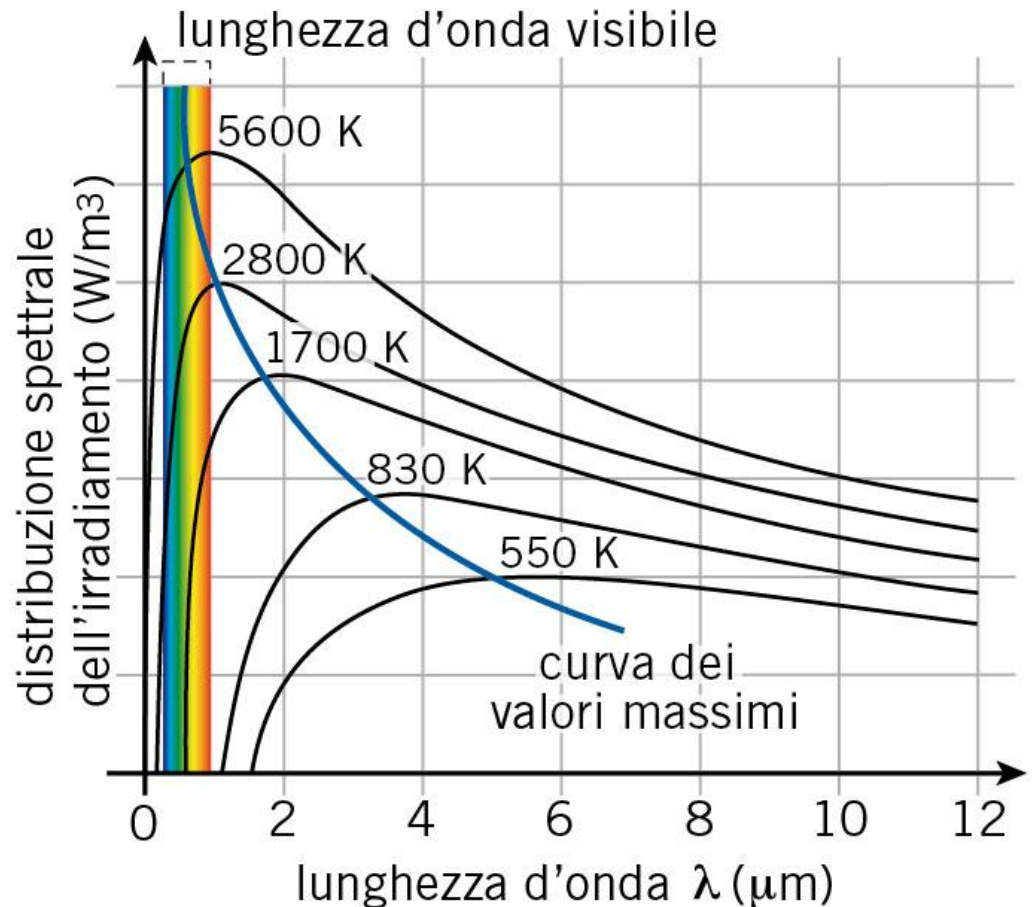


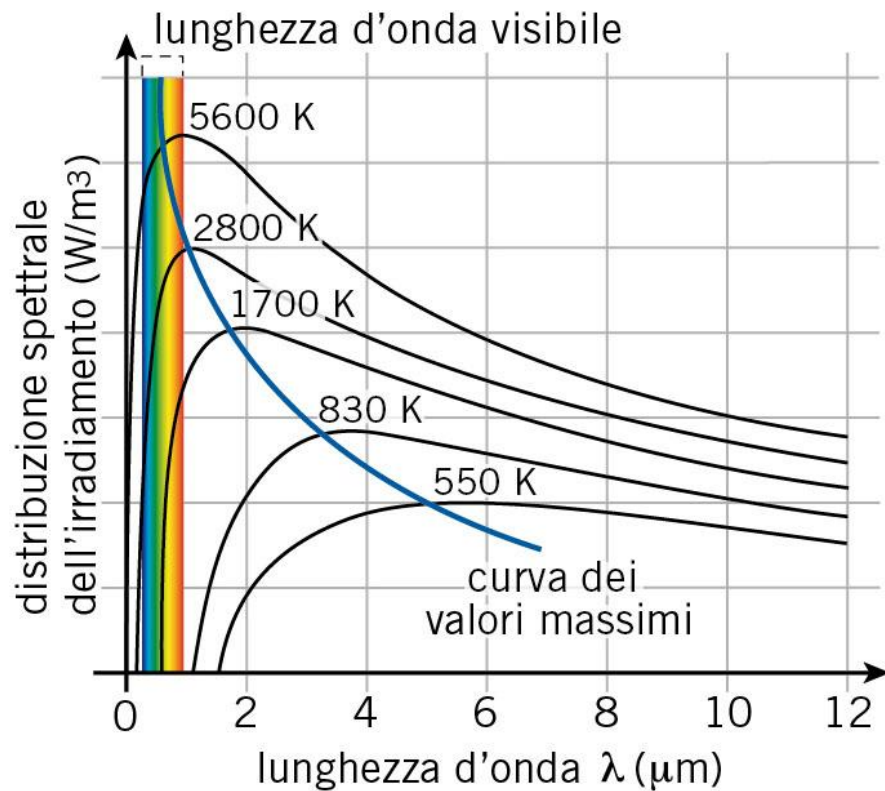
In natura non esiste il corpo nero, ma si può realizzare, con ottima approssimazione, mediante una cavità annerita con nero fumo e munita di un piccolo *foro*.

Una radiazione, che attraverso il *foro* penetra nella cavità, ha una probabilità molto piccola di uscire nuovamente, poiché per successive riflessioni è assorbita dalle pareti interne del corpo.

Si dimostra, attraverso la termodinamica, che il fenomeno legato all'assorbimento e all'emissione delle radiazioni elettromagnetiche di tutte le possibili lunghezze d'onda da parte delle pareti del corpo nero, dipende solo dalla temperatura.

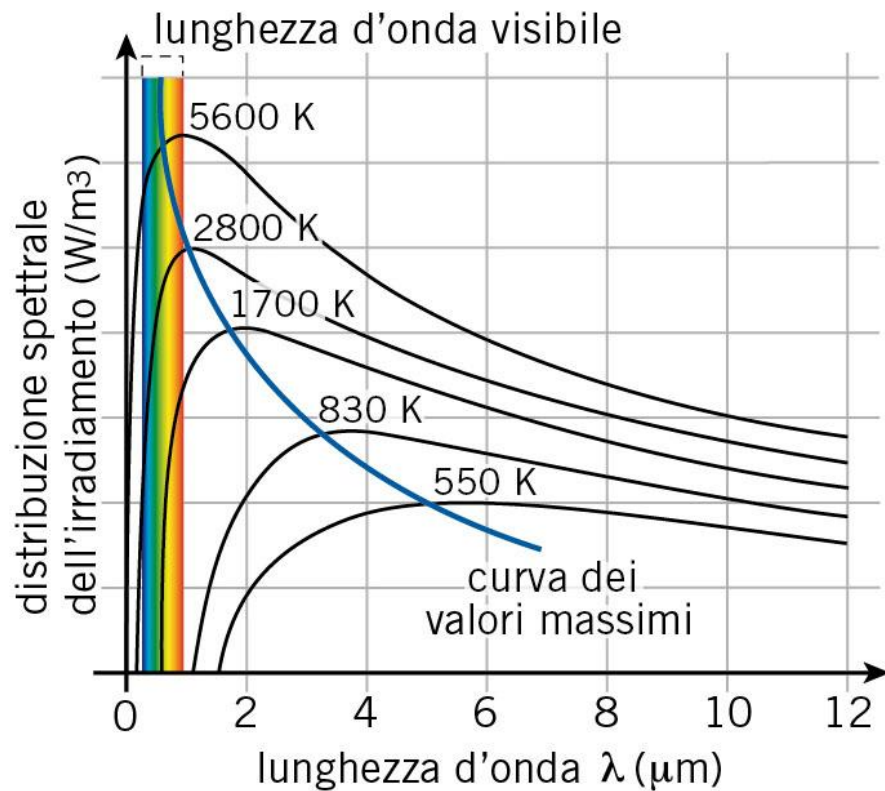
Lo spettro della radiazione emessa, dipendente solo dalla temperatura del corpo cavo, è il seguente:





Ogni curva del grafico descrive come, a una determinata temperatura, l'energia emessa è distribuita tra le diverse lunghezze d'onda.

Esempio: la seconda curva (830 K) mostra che non vi è emissione di energia per $\lambda < 1\mu\text{m}$; la radiazione emessa non è visibile all'occhio umano; il massimo di emissione avviene a circa $\lambda_{\text{max}} = 3,5\mu\text{m}$.

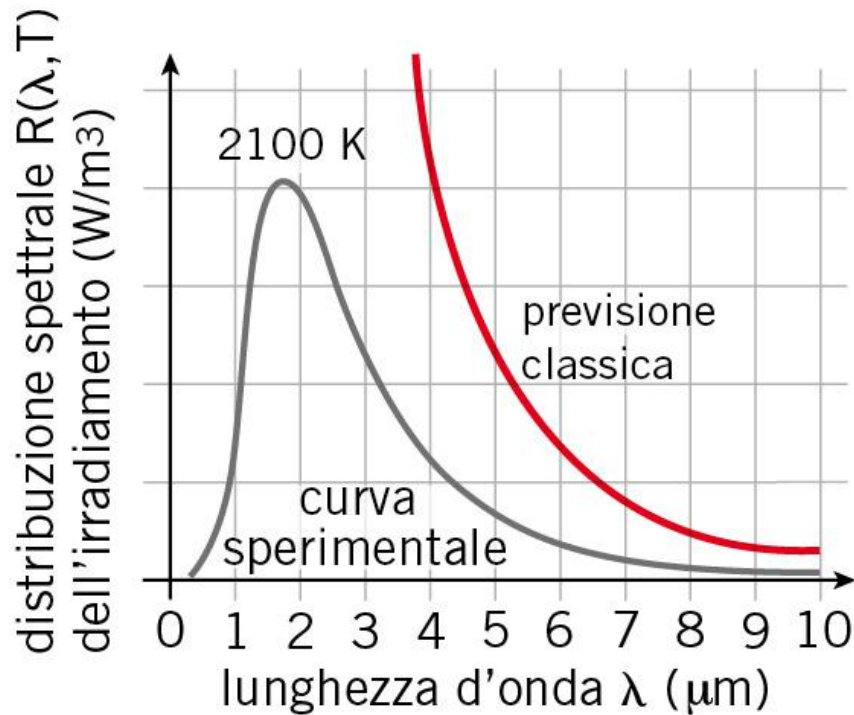


Al crescere della temperatura la lunghezza d'onda λ_{max} si sposta verso lunghezze d'onda sempre più basse. Pertanto il corpo emittente acquista un colore sempre più chiaro.

LEGGE DELLO SPOSTAMENTO DI WIEN

$$\lambda_{\text{max}} T = b$$

λ_{max} = lunghezza d'onda per la quale l'emissione è massima;
 T = temperatura assoluta della sorgente; $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$.



Ma la curva sperimentale indica anche che per lunghezze d'onda inferiori a λ_{max} gli spettri scendono rapidamente a zero, in contrasto con la previsione classica in cui gli spettri crescono indefinitamente.

Ciò comporta che, mentre l'area sotto la curva sperimentale ha valore finito ($R(\lambda, T)$ finito su tutte le lunghezze d'onda) in accordo con il principio di conservazione dell'energia, l'area sotto la previsione classica ha un valore infinito ([catastrofe ultravioletta](#)), in disaccordo con il principio di conservazione dell'energia.

Questa evidente violazione del principio di conservazione dell'energia mise in crisi i fisici della fine del XIX secolo, poiché tutti i tentativi di spiegare lo spettro d'irraggiamento di un corpo al variare della sua temperatura in termini delle teorie classiche erano miseramente falliti.

Come risolvere il problema?

Planck mostrò che una soluzione del problema poteva ottenersi ammettendo che gli scambi di energia tra radiazione e materia avvenissero non in modo continuo, come implicato dal modello classico, ma che un campo potesse scambiare energia con la materia solo in quantità fisse, ossia per “quanti” discreti.

Condizione di quantizzazione di Planck

Lo scambio di energia tra gli atomi della cavità e la radiazione avviene per quantità discrete di energie ΔE , legate alla frequenza di oscillazione dalla relazione:

$$\Delta E = hf$$

$h=6,62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ costante di Planck

Questi “pacchetti di energia” scambiati furono chiamati da Planck **quanti del campo elettromagnetico**.

Grazie all'ipotesi di quantizzazione, Planck ottenne per la distribuzione spettrale dell'irradiazione la seguente formula (14 dicembre 1900):

Distribuzione spettrale dell'irradiazione

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T} - 1}}$$

La formula di Planck è in perfetto accordo con i dati sperimentali, ossia riproduce lo spettro di emissione del corpo nero correttamente per tutte le lunghezze d'onda.

Planck, che era un uomo prudente e conservatore, nonostante la sua scoperta, si rifiutò di credere che l'energia elettromagnetica potesse esistere ed essere scambiata solo in piccole unità.

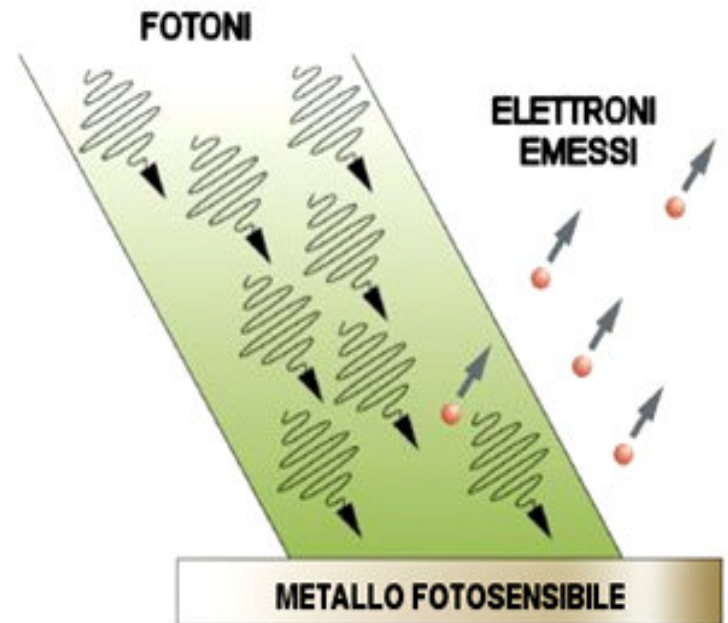
Considerò l'introduzione dei quanti un utile artificio matematico non corrispondente a un reale fenomeno fisico, anche se negli seguenti combattè strenuamente, senza riuscirci, per trovare una spiegazione accettabile del fatto che l'energia dovesse emergere così, a piccole quantità.

L'introduzione del concetto di "atomicità" nel regno dell'energia, che inizialmente sembrava imposta solo dalla necessità di risolvere un'inconsistenza nella descrizione teorica dell'irraggiamento del corpo nero si rivelò presto una delle teorie fondamentali per interpretare numerosi fenomeni, per i quali la fisica prequantistica non riusciva a fornire una valida spiegazione.

Solo cinque anni dopo l'ipotesi di Planck, il *quanto* venne riconosciuto, per merito di Einstein, come un'entità fisica reale.

Mentre Planck aveva quantizzato solo l'energia associata alla radiazione uscente dal corpo nero, per Einstein la discontinuità insita nella dottrina dei quanti divenne un concetto fondamentale, generalizzato a qualsiasi tipo di radiazione. Questa ipotesi, fra le altre conseguenze, permise di interpretare le leggi sperimentali dell'effetto fotoelettrico.

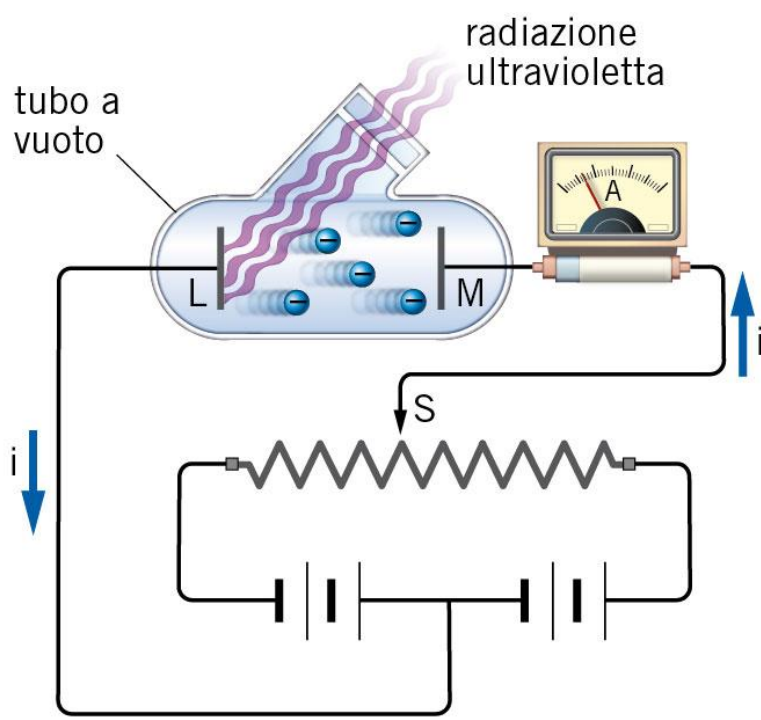
Nel 1887 Hertz aveva scoperto che, illuminando una placca metallica di zinco con una radiazione ultravioletta, il metallo si caricava elettricamente.



Solo dopo che gli elettroni furono riconosciuti, grazie alle misure di [Thomson nel 1897](#), come componenti elementari della materia, si capì che il fenomeno, chiamato poi [effetto fotoelettrico](#), era dovuto all'emissione di elettroni provocata nel metallo da radiazioni elettromagnetiche di frequenza sufficientemente elevata (raggi X, raggi ultravioletti e talvolta anche radiazioni luminose).

Però l'effetto fotoelettrico mostrava delle strane proprietà che non potevano essere spiegate con la teoria elettromagnetica classica.

Fu il fisico tedesco [Lenard \(1862-1947\)](#) a scoprire le leggi sperimentali dell'effetto fotoelettrico, ma fu [Einstein \(1879-1955\)](#) a darne la giusta interpretazione.



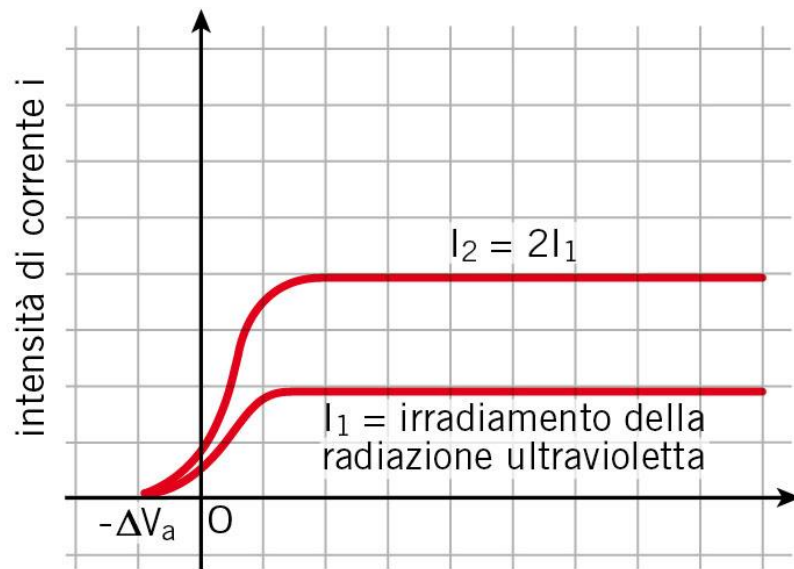
Descrizione

effetto

fotoelettrico – Nel tubo a vuoto una radiazione monocromatica ultravioletta, di lunghezza d'onda λ , colpisce una lastra metallica, producendo elettroni.

L'anodo M è connesso a un resistore variabile S in modo che la ddp tra il catodo L e l'anodo M possa assumere valori sia positivi che negativi.

Quando il potenziale di M è positivo e grande, tutti gli elettroni emessi da L sono raccolti e la corrente limite, misurata dall'amperometro A, è tanto maggiore quanto più grande è l'irradiazione del metallo.



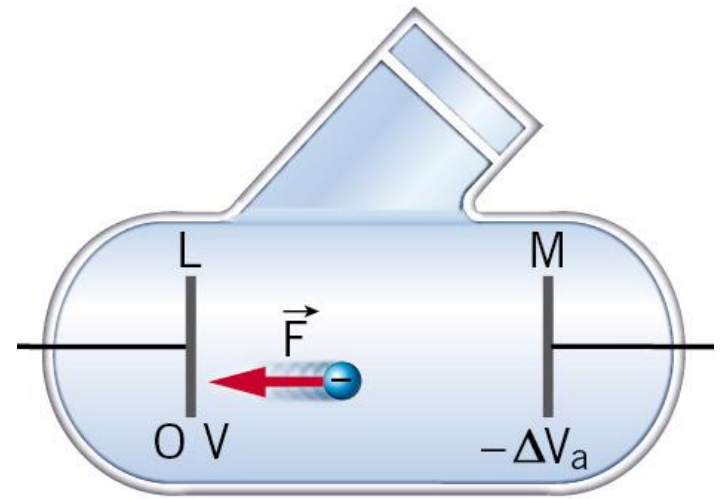
differenza di potenziale ΔV tra M e L

Come mostra la figura: la corrente limite è proporzionale all'irradiazione dovuta alla radiazione ultravioletta.

Quando M è più negativo rispetto a L, la corrente diminuisce fino a zero. Ciò accade per una $d\phi = -\Delta V_a$ che non dipende dall'irradiazione.

In sostanza, gli elettroni sono emessi dal catodo L con un'energia cinetica che varia da zero a un valore massimo $K_{\max}$ e $-\Delta V_a$ è la ddp che riesce ad arrestare anche gli elettroni più veloci prima che raggiungano M.

Esaminiamo la situazione in figura, e analizziamo il comportamento di un elettrone emesso da L con energia cinetica $K_{\max}$.



L'elettrone, emesso da L con una certa velocità iniziale, si dirige verso M. Ma sull'elettrone agisce una forza elettrica rivolta verso L, per cui l'elettrone subisce un progressivo rallentamento fino a fermarsi in prossimità di M.

Energia totale elettrone in
prossimità di L

$$E_{T_L} = K_{\text{iniziale}} + U_{\text{iniziale}} =$$
$$K_{\max} + 0 = K_{\max}$$

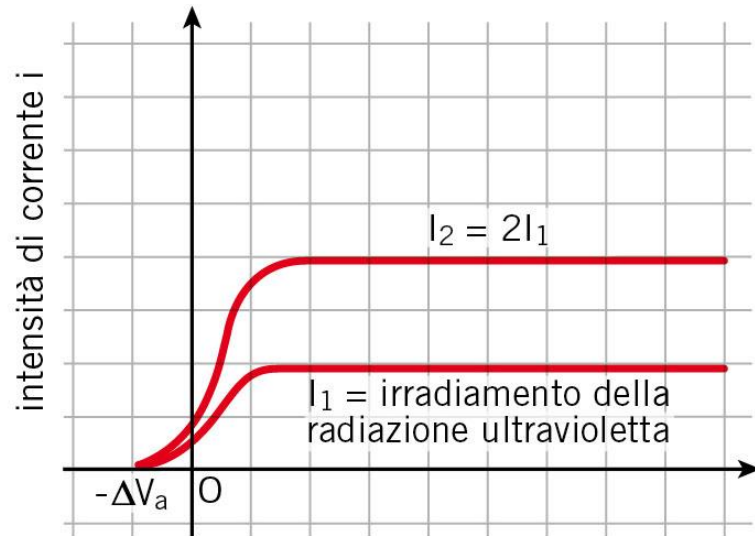
Energia totale elettrone in
prossimità di M

$$E_{T_M} = K_{\text{finale}} + U_{\text{finale}} =$$
$$0 + (-e) \cdot (-\Delta V_a) = e\Delta V_a$$

Per il principio di conservazione dell'energia:

$$E_{T_L} = E_{T_M} \Rightarrow K_{\max} = e\Delta V_a$$

Conoscendo il **potenziale di arresto** ΔV_a possiamo calcolare l'energia cinetica massima $K_{\max}$.



differenza di potenziale ΔV tra M e L

Il grafico tensione-corrente mostra che il valore di ΔV_a , e quindi di $K_{\max}$, non dipendono dall'irradiazione della radiazione ultravioletta.

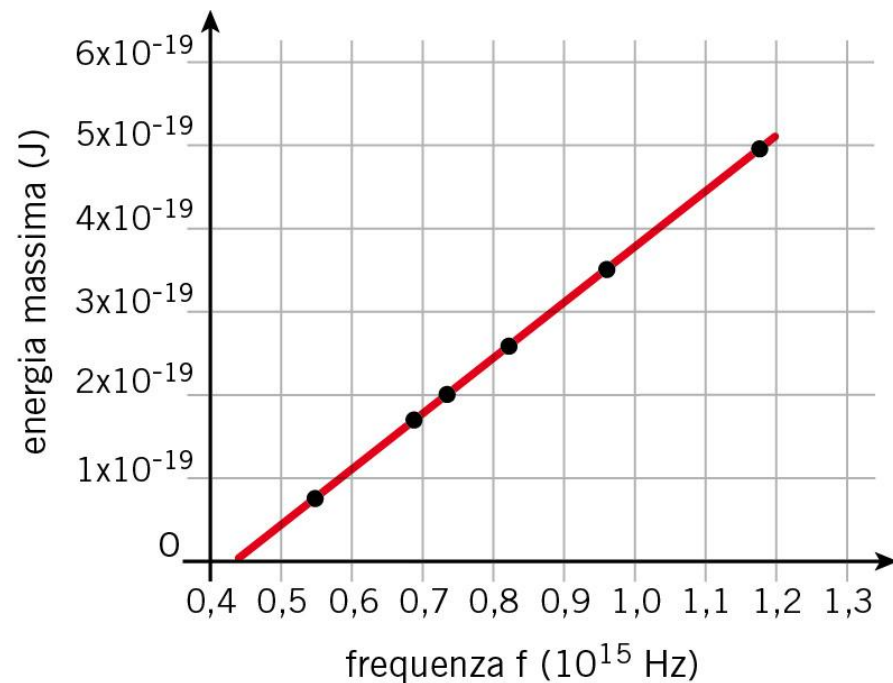
Questo risultato sperimentale non trova spiegazione con l'elettromagnetismo classico.

Infatti, secondo la teoria di Maxwell, è ragionevole aspettarsi che se l'energia della luce incidente è poca, il fenomeno non avvenga perché gli elettroni non hanno l'energia sufficiente per uscire dal metallo, e invece avvenga in presenza di energia sufficiente, che garantisce agli elettroni l'energia cinetica necessaria (superiore al lavoro di estrazione del metallo) per uscire dal metallo.

Invece ciò che succede è che il fenomeno, ossia $K_{\max}$, non dipende dall'irradiazione della radiazione incidente (come previsto dalla teoria dell'elettromagnetismo classico) ma dalla sua frequenza. In particolare:

Si ha emissione di elettroni per effetto fotoelettrico soltanto se la frequenza f della radiazione incidente è maggiore di un valore minimo $f_{\min}$ che dipende dal metallo.

Se $f > f_{\min}$, i dati sperimentali mostrano che $K_{\max}$ aumenta linearmente con $(f - f_{\min})$



Questi risultati sperimentali sono in contraddizione con la teoria di Maxwell: affinché un elettrone venga strappato al metallo, è sufficiente che il campo elettrico oscillante gli ceda un'energia maggiore del lavoro di estrazione W_e , e ciò dovrebbe avvenire con radiazione di qualunque frequenza purché il suo irradamento sia abbastanza grande.

Per spiegare l'effetto fotoelettrico, Einstein nel 1905, in uno dei suoi famosi articoli, ammise che la radiazione elettromagnetica fosse formata da pacchetti di energia, i quanti del campo elettromagnetico, successivamente chiamati fotoni. Insomma, prese come un fatto fisico la quantizzazione dell'energia ipotizzata da Planck:

QUANTIZZAZIONE DELLA LUCE

Ogni radiazione elettromagnetica, come la luce, può essere considerata, indipendentemente dalla sorgente, come una corrente di quanti (fotoni), ciascuno dei quali possiede l'energia:

The diagram shows the equation $E = hf$ centered within a yellow rectangular box. This box is itself inside a larger white rectangle with a blue border. Three lines extend from the equation to labels: one from E to the label 'energia (J)' at the bottom left, one from h to the label 'costante di Planck (J·s)' at the top right, and one from f to the label 'frequenza (Hz)' at the bottom right.

$$E = hf$$

energia (J) costante di Planck (J·s) frequenza (Hz)

L'ipotesi di Einstein sulla quantizzazione della luce spiega la formula introdotta da Planck per giustificare lo spettro del corpo nero: se la radiazione elettromagnetica è costituita di fotoni, ciascuno di energia hf , nell'interazione tra le pareti del corpo nero e la radiazione possono essere scambiati un numero intero di fotoni, e non una loro frazione.

Il modello dei fotoni di Einstein non è in contraddizione con la teoria elettromagnetica di Maxwell: l'enorme numero di fotoni che costituisce un fascio di luce ordinario si comporta come un'onda, esattamente come le molecole di un corpo, pur avendo proprietà «granulari», costituiscono un mezzo che appare continuo su scala macroscopica.

Spiegazione effetto fotoelettrico

Secondo l'ipotesi di Einstein, quando il metallo viene colpito dalla luce ultravioletta, si ha sempre e soltanto interazione di un singolo fotone con un solo elettrone.

L'elettrone può uscire dal metallo soltanto se l'energia E del fotone è almeno uguale al lavoro di estrazione W_e :

$$E \geq W_e \Rightarrow hf \geq W_e \rightarrow f \geq \frac{W_e}{h}$$

frequenza minima

Affinchè si abbia l'effetto fotoelettrico, la frequenza della luce monocromatica incidente non deve essere inferiore a un valore minimo:

$$f_{\min} = \frac{W_e}{h}$$

Una delle difficoltà dell'interpretazione dell'effetto fotoelettrico è così risolta.

Per studiare il secondo aspetto problematico, prendiamo in esame l'interazione elettrone-fotone: un elettrone che assorbe un fotone di energia $E = hf$ e non dissipa energia, a causa di urti con gli ioni del metallo, esce con energia cinetica $K_{\max}$.

La conservazione dell'energia permette di scrivere la seguente legge, che può essere considerata come la prima equazione della teoria quantistica dell'interazione fra radiazione e materia. :

$$E = K_{\max} + W_e \xrightarrow{E=hf} K_{\max} = hf - W_e \xrightarrow{f_{\min} = \frac{W_e}{h}} K_{\max} = h(f - f_{\min})$$

$K_{\max}$ dipende soltanto da f e non dall'irradiamento dell'onda elettromagnetica, cioè dal numero di fotoni che, ogni secondo, incidono sull'unità di area del metallo.

➤ Conclusione:

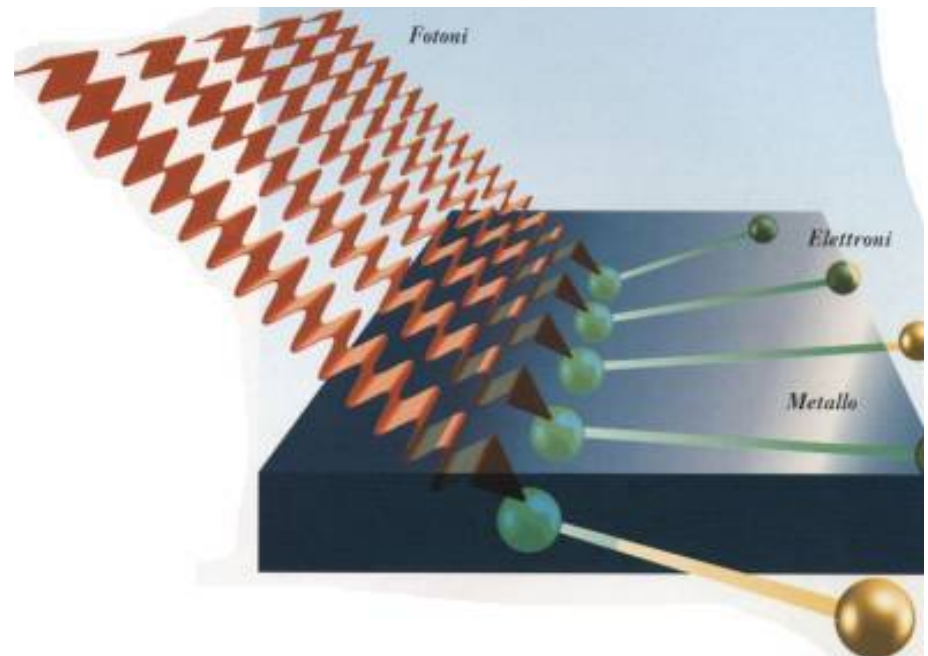
Immaginando che la luce arrivi in maniera granulare, pacchetti di energia, un elettrone viene sbalzato fuori dal suo atomo se il singolo grano che lo colpisce ha molta energia (frequenza elevata) e non se ci sono tanti grani, ma di bassa energia (bassa frequenza).

Luce molto intensa (energia elevata) ma costituita da fotoni di bassa energia (bassa frequenza), non fa avvenire il fenomeno; mentre, anche un singolo fotone, purchè abbia l'energia giusta (alta frequenza), può far avvenire il fenomeno.

SINTESI

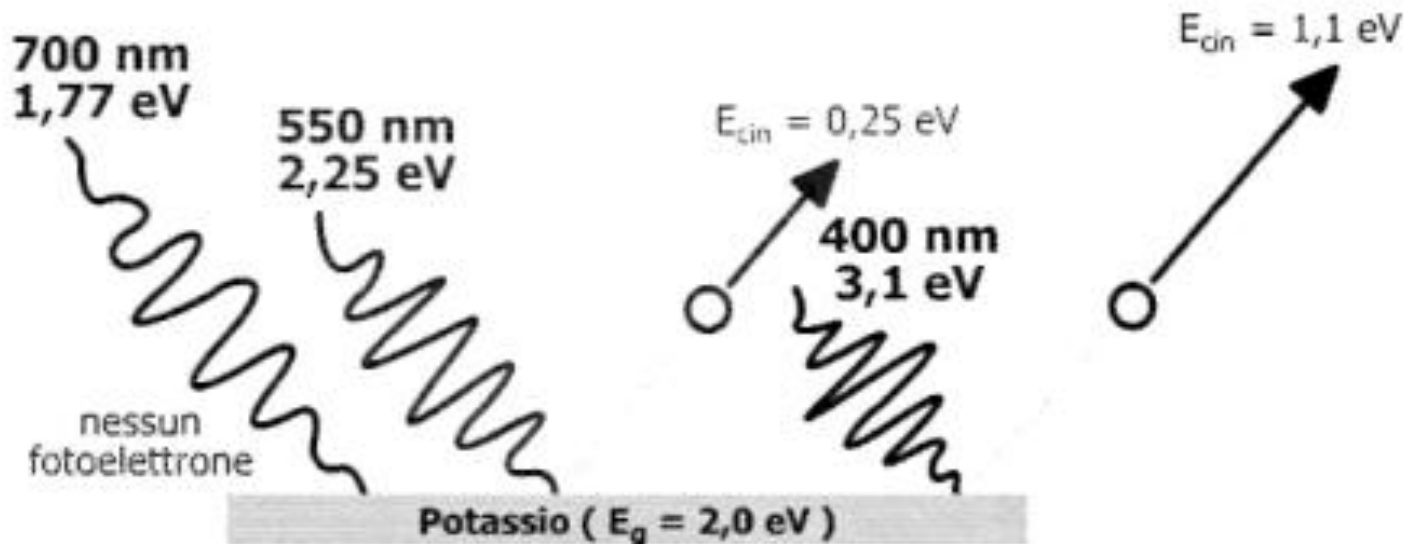
- ❑ Nella radiazione elettromagnetica, l'energia non è distribuita in modo uniforme sull'intero fronte dell'onda ma è concentrata in singoli quanti (pacchetti discreti) di energia, i fotoni. Un solo fotone per volta, e non l'intera onda nel suo complesso, interagisce singolarmente con un elettrone, al quale cede la sua energia.

$$E = hf$$



- Affinché si verifichi l'effetto fotoelettrico è necessario che il singolo fotone abbia un'energia sufficiente a rompere il legame elettrico che tiene legato l'elettrone all'atomo. Ossia, abbia una frequenza non inferiore a un valore minimo dipendente dal metallo:

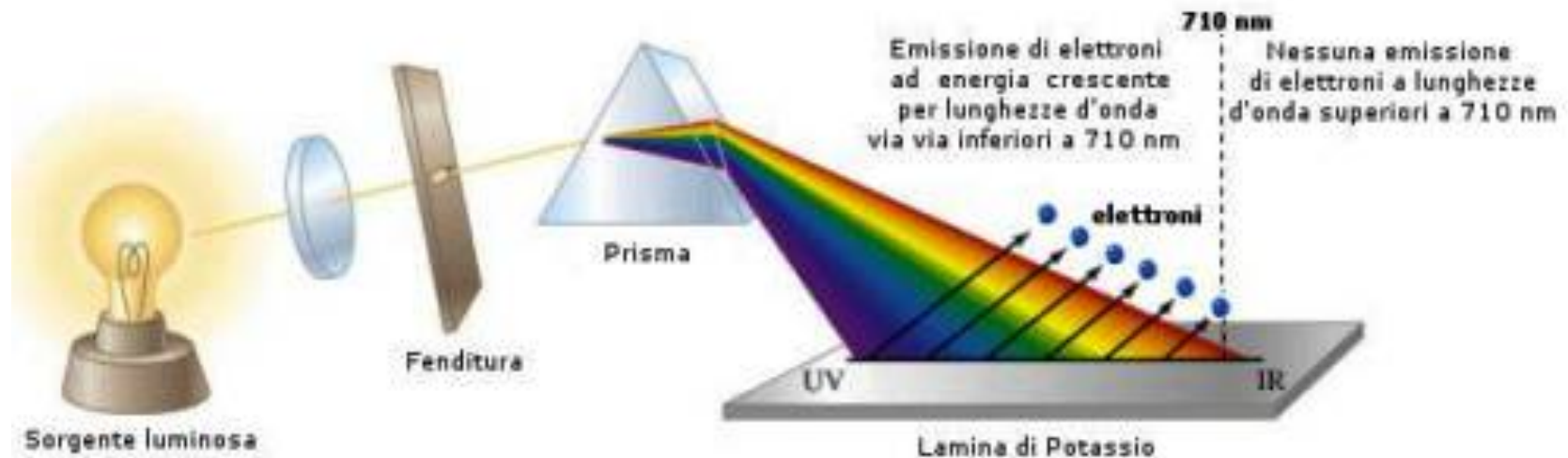
$$f_{\min} = \frac{W_e}{h}$$



- ❑ Un elettrone che assorbe un fotone di energia $E=hf$ esce con energia cinetica:

$$K_{\max} = h(f - f_{\min})$$

che dipende soltanto da f e non dall'intensità dell'onda elettromagnetica (numero di fotoni che, ogni secondo, incidono sull'unità di area del metallo). Ossia l'aumento dell'irradiazione provoca l'aumento degli elettroni estratti ma non la loro energia cinetica.



L'idea di Einstein sulla natura corpuscolare della luce non fu accettata, per molti anni, da tutto il mondo scientifico.

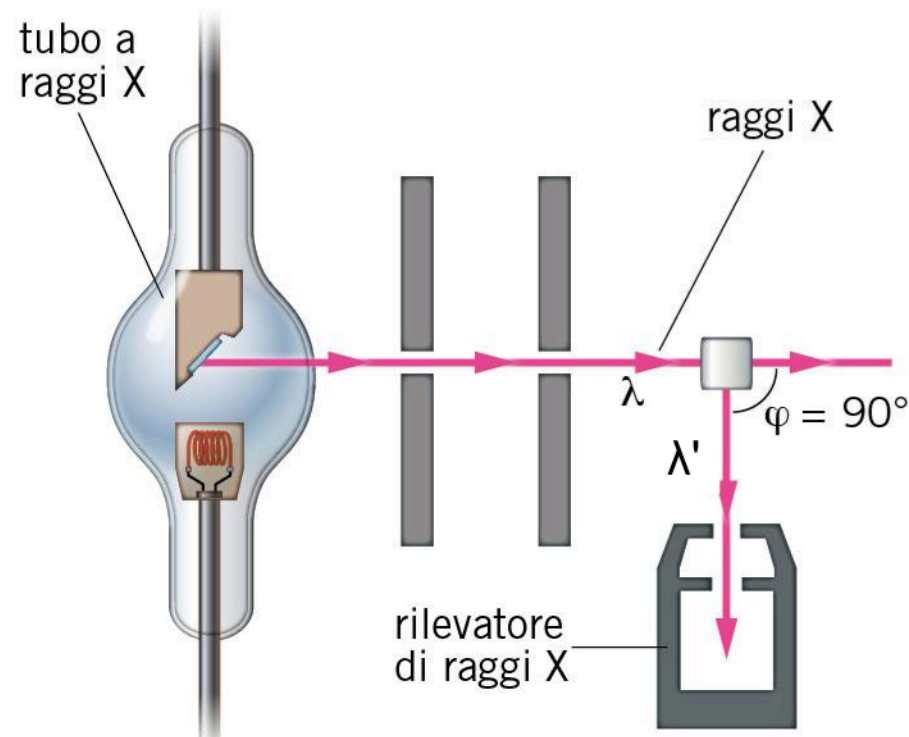
Nel 1923, il fisico americano [Compton \(1892-1962\)](#) pubblicò i risultati delle sue ricerche sulle proprietà della diffusione di raggi X da parte di elettroni (**effetto Compton**): la radiazione diffusa presenta una frequenza che dipende dall'angolo di diffusione ed è minore di quella incidente.

Invece, secondo la teoria classica, quando un'onda elettromagnetica interagisce con una particella carica, la radiazione diffusa, qualunque sia la sua direzione, deve avere la stessa lunghezza d'onda (frequenza) della radiazione incidente.

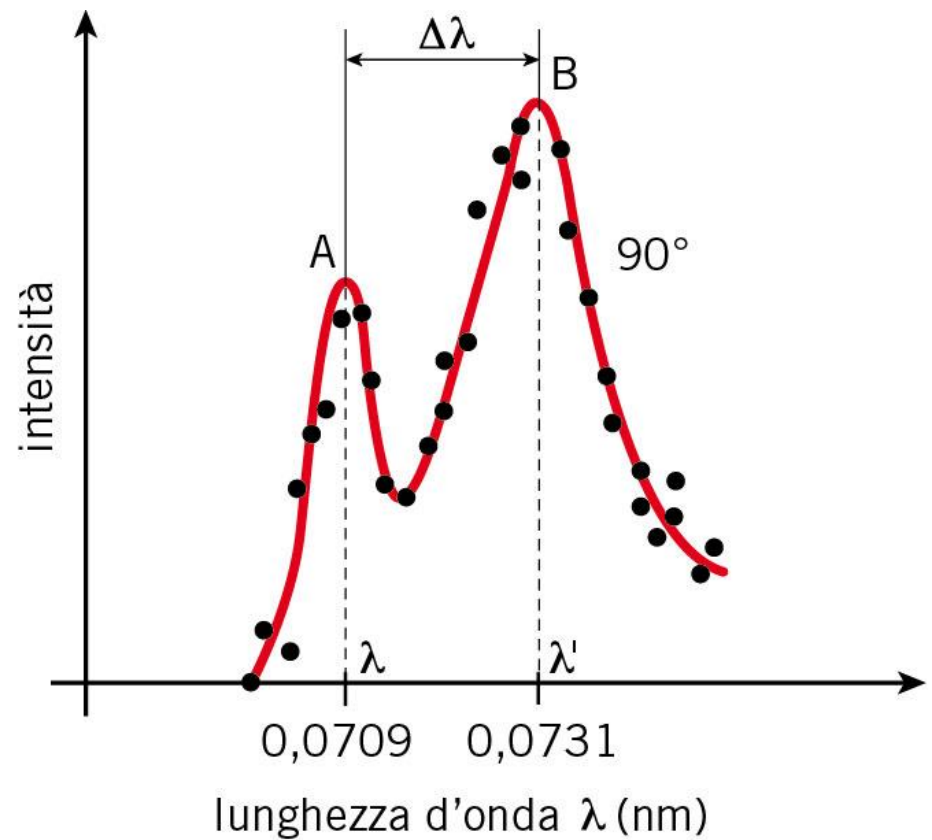
L'effetto Compton rappresenta una delle più importanti prove sperimentali della validità dell'interpretazione quantistica della radiazione elettromagnetica, nonché una conferma delle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto a livello microscopico.

Descrizione effetto Compton

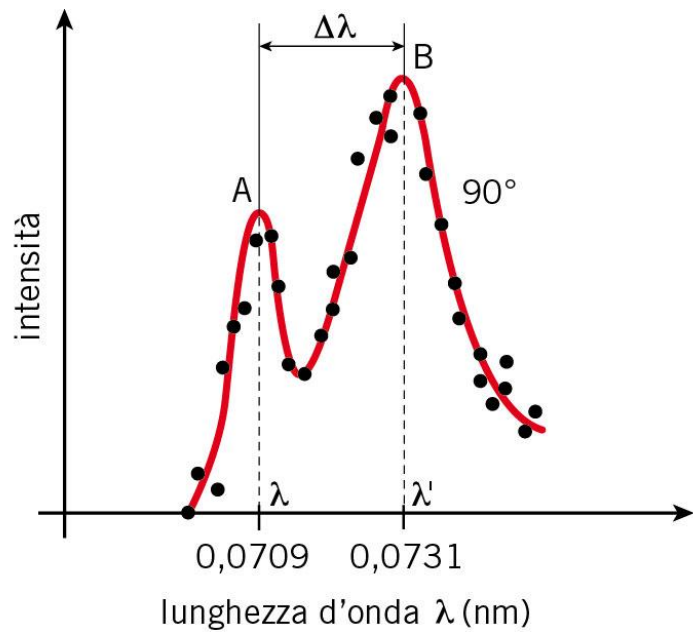
Un fascio monocromatico di raggi X viene inviato contro un bersaglio di grafite e si misura la lunghezza d'onda della radiazione diffusa in qualunque direzione.



Risultato: oltre ai raggi X della stessa $\lambda=709\text{nm}$, a 90° rispetto alla radiazione incidente, Compton osservò raggi X con $\lambda'=731\text{nm}$ più grande.



La diffusione di onde elettromagnetiche con λ' maggiore di quella iniziale λ non può essere spiegata dall'elettromagnetismo classico.



Secondo la teoria di Maxwell tutti gli elettroni, essendo debolmente legati si possono considerare praticamente liberi, si mettono a oscillare con la stessa frequenza $f=c/\lambda$ della radiazione incidente.

Pertanto, emettono radiazioni che hanno la stessa frequenza (stessa lunghezza d'onda λ) della radiazione incidente. In questo modo si spiega il picco A.

L'esperimento mostra che il picco B, osservato a 90° dalla radiazione incidente, è spostato rispetto ad A di una quantità $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=731-709=22\text{nm}$ che è indipendente dal materiale e dalla lung. d'onda della radiazione incidente.

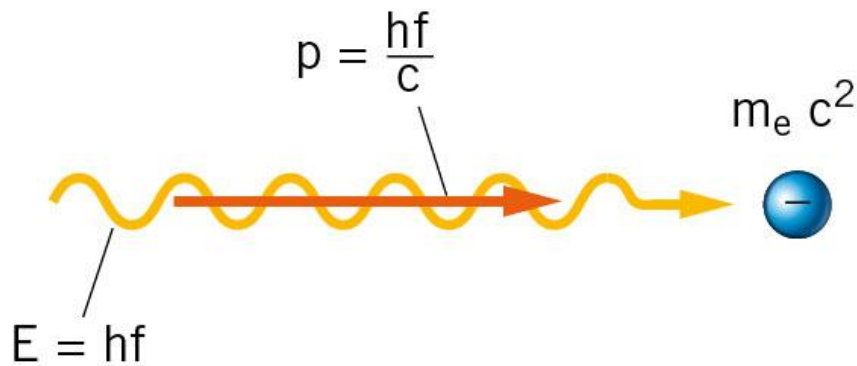
La teoria classica non spiega il picco B.

Interpretazione effetto Compton

La presenza del picco B fu spiegata da Compton utilizzando l'ipotesi di Einstein:

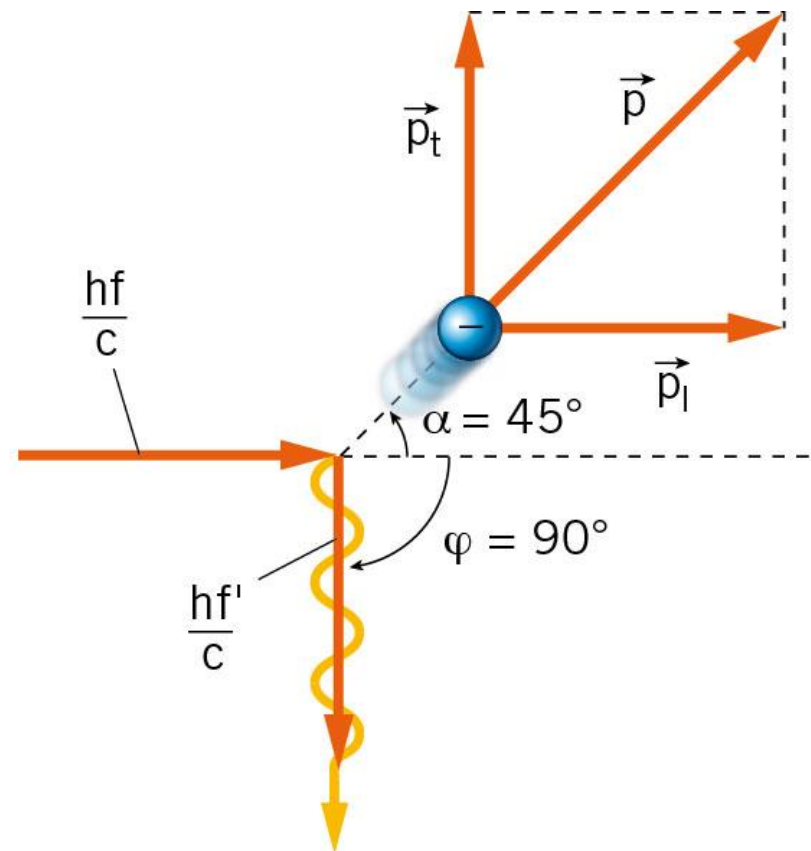
La radiazione elettromagnetica è composta di quanti (fotoni) che interagiscono con gli elettroni come particelle singole.

Gli elettroni, praticamente liberi, l'interazione fotone-elettrone può essere descritta come un urto perfettamente elastico, quindi è possibile utilizzare, oltre al principio di conservazione della quantità di moto, il principio di conservazione dell'energia cinetica



Prima dell'urto: elettrone fermo con energia di riposo $m_e c^2$ e fotone in movimento che trasporta un'energia $E=hf$ e una quantità di moto $p=hf/c$.

Dopo l'urto: il fotone diffuso a 90° ha energia $E'=hf'$, mentre l'elettrone ha una quantità di moto **p**.



Per il principio di conservazione della quantità, le componenti di $\mathbf{p}=(\mathbf{p}_i;\mathbf{p}_t)$ sono uguali alle quantità di moto dei due fotoni:

$$p_i = \frac{hf}{c} \quad p_t = \frac{hf'}{c}$$

Poiché le componenti $\mathbf{p}_i$ e $\mathbf{p}_t$ differiscono di pochissimo (in base ai dati sperimentali di Compton), allora le lunghezze d'onda λ' e λ (e quindi f' e f) sono praticamente uguali, e quindi $p_i \cong p_t$.

Pertanto, l'elettrone viene diffuso a 45° e la sua energia cinetica vale:

$$K_e = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{2m_e} m_e^2 v^2 = \frac{p^2}{2m_e} \xrightarrow{\text{teorema pitagora}} = \frac{(\sqrt{2} p)^2}{2m_e} = \frac{h^2 f^2}{m_e c^2}$$

Per il principio di conservazione dell'energia:

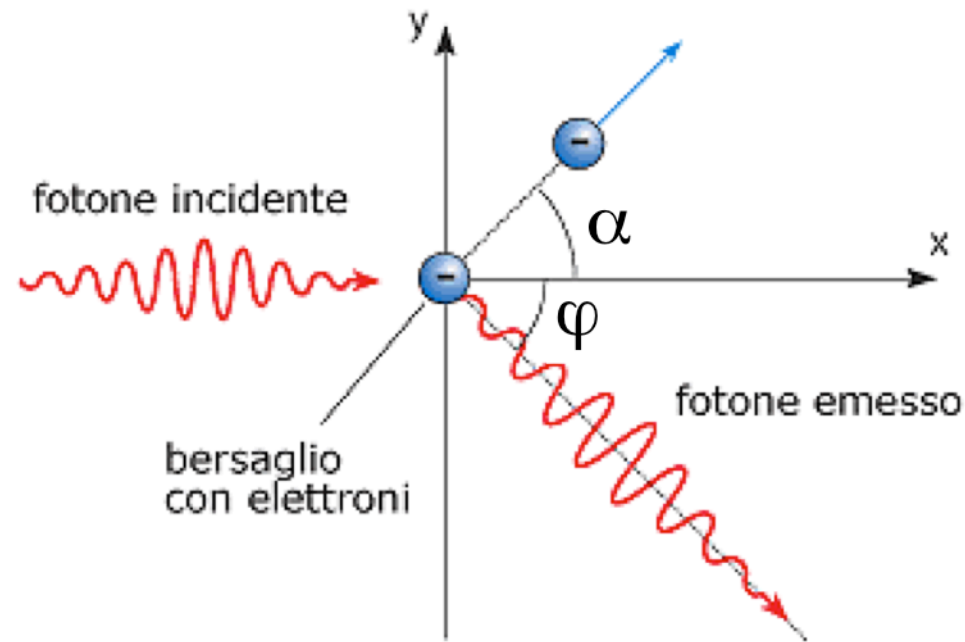
$$K_e = hf - hf' = \frac{h^2 f^2}{m_e c^2} \xrightarrow[\text{i membri per } h]{\text{dividiamo ambo}} f - f' = \frac{hf^2}{m_e c^2} \xrightarrow[f = \frac{c}{\lambda}]{\lambda} \frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda'} = \frac{h}{m_e \lambda^2}$$

Da cui si ricava:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} \frac{\lambda\lambda'}{\lambda^2} \xrightarrow{\lambda \cong \lambda'} \Delta\lambda \cong \frac{h}{m_e c} = 24 \text{ nm}$$

che è in ottimo accordo con il dato sperimentale $\Delta\lambda=22\text{nm}$.

La trattazione analitica completa dell'effetto Compton, tenendo conto anche della relatività ristretta, fornisce la seguente relazione:



SPOSTAMENTO COMPTON DELLA LUNGHEZZA D'ONDA

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

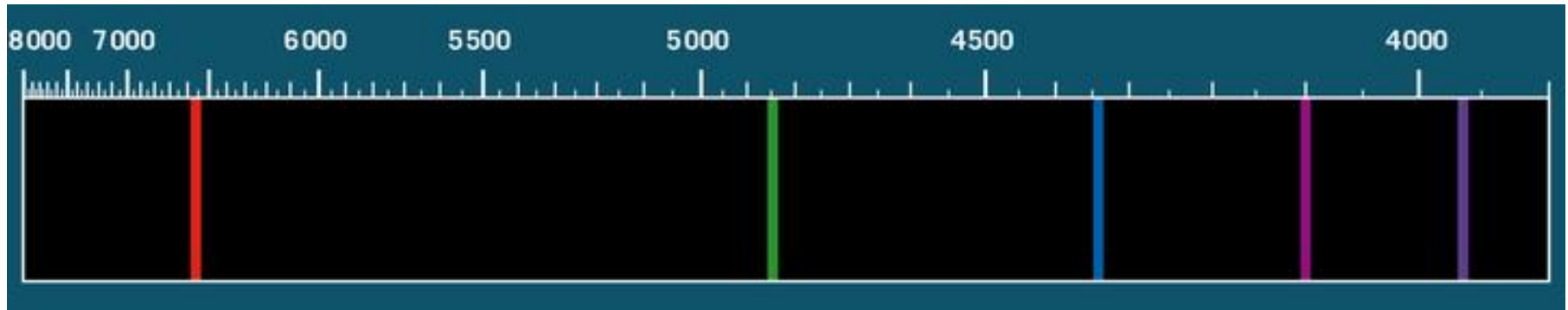
L'effetto Compton eliminò tutti i dubbi sulla natura corpuscolare della radiazione: i fotoni, in certe condizioni, interagiscono individualmente con la materia subendo gli stessi urti elastici (e ubbidendo alle stesse leggi) che regolano le interazioni tra particelle, purchè il fotone si muova a velocità costante c e che, oltre a trasportare un'energia $E=hf$, abbia una quantità di moto $p=hf/c$.

SPETTRO DELL'ATOMO DI IDROGENO

Le sostanze gassose ad alta temperatura o attraversate da una corrente elettrica, emettono uno **spettro di righe**, che appare come un insieme di righe brillanti e separate.

Se analizziamo lo spettro di emissione dell'atomo di idrogeno, si nota che le righe si addensano verso le lunghezze d'onda più piccole (frequenze più alte).

scala in angstrom $\text{\AA}$ (10^{-10} m)



Nel 1885 il fisico svizzero *Balmer (1825-1898)*, elaborando una notevole mole di dati sperimentali raccolti da un gran numero di spettroscopisti, riuscì per primo a trovare una relazione tra la successione delle frequenze delle righe.

La legge empirica che le frequenze visibili nello spettro dell'idrogeno monoatomico seguono, è la seguente:

SERIE DI BALMER

$$f = cR_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \quad n = \text{numero intero} > 2$$

La serie di Balmer contiene le righe di emissione dell'idrogeno che si trovano nell'ambito della luce visibile.

Grazie a nuove tecniche sperimentali, agli inizi del XIX secolo fu scoperta l'esistenza di nuove serie spettrali, nella zona non visibile della luce (una nell'infrarosso e l'altra nell'ultravioletto).

Grazie a nuove tecniche sperimentali, agli inizi del XIX secolo fu scoperta l'esistenza di nuove serie spettrali, nella zona non visibile della luce (una nell'infrarosso e l'altra nell'ultravioletto).

In tutti questi casi le frequenze delle diverse onde elettromagnetiche emesse dall'atomo di idrogeno sono calcolabili mediante la formula:

$$f = cR_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \begin{array}{l} m \text{ e } n \text{ numeri interi,} \\ \text{con } n > m \end{array}$$

Ancora una volta la fisica classica non dava nessuna risposta sul perché ogni elemento chimico dovesse avere un ben preciso spettro di emissione.

La soluzione del problema richiese nuove conoscenze sulla struttura della materia e nuove idee e modelli teorici.

Modello atomico di Thomson

L'esistenza degli atomi era stata argomento di intenso dibattito scientifico e filosofico durante tutto il XIX secolo. Ma la loro realtà era stata accertata, al di là di ogni ragionevole dubbio, grazie a due decisive prove scientifiche: la spiegazione di Einstein del moto browniano e la scoperta di Rutherford della trasformazione radioattiva degli elementi.

Le conoscenze acquisite con lo studio dei raggi catodici, l'elettrolisi, l'effetto fotoelettrico, i raggi X, la radioattività, gli spettri di emissione e di assorbimento dei gas, avevano indotto i fisici a considerare l'atomo come un sistema complesso dotato di una struttura interna.

Era quindi naturale cercare di elaborare un modello di atomo che potesse interpretare i fatti sperimentali della fisica atomica. Logicamente, ogni rappresentazione modellistica doveva tener conto di due fatti:

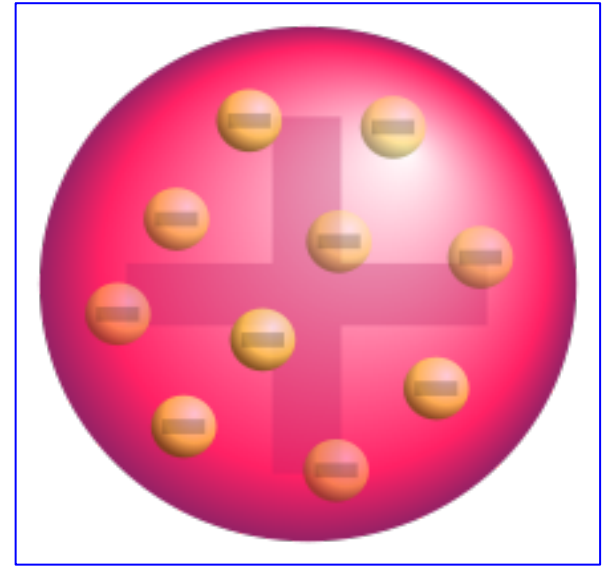
1. ogni elemento di materia in condizioni normali è elettricamente neutro, quindi un atomo deve possedere una carica positiva uguale a quella negativa dei suoi elettroni;
2. la massa atomica è molto più grande di quella elettronica, per cui la carica positiva deve essere associata alla quasi totalità della massa dell'atomo.

Sulla base di queste considerazioni si presentò dapprima il problema di stabilire il numero degli elettroni esistenti negli atomi degli elementi chimici conosciuti e di vedere poi come le cariche, equamente bilanciate, erano distribuite nell'edificio atomico.

Nei primi anni del secolo XX furono ideati vari modelli che, pur riuscendo a interpretare qualche risultato sperimentale, erano incompleti e approssimati, soprattutto perché fondati solo sulla cosiddetta fisica classica.

Un tentativo di dare un'immagine concreta alla struttura atomica fu fatto da Thomson nel 1902.

L'atomo veniva raffigurato come una sfera materiale di raggio $\approx 10^{-10}\text{m}$, nella quale la carica positiva era distribuita uniformemente, mentre gli elettroni, in numero tale da equilibrare la carica positiva dell'elemento considerato, erano disseminati all'interno della materia (come l'uvetta nel panettone = **modello a panettone**).



Gli elettroni rimanevano in uno stato di equilibrio, in quanto erano soggetti sia a una forza elettrostatica attrattiva verso il centro dell'atomo, centro di simmetria della carica positiva, sia alle mutue forze di repulsione elettrica.

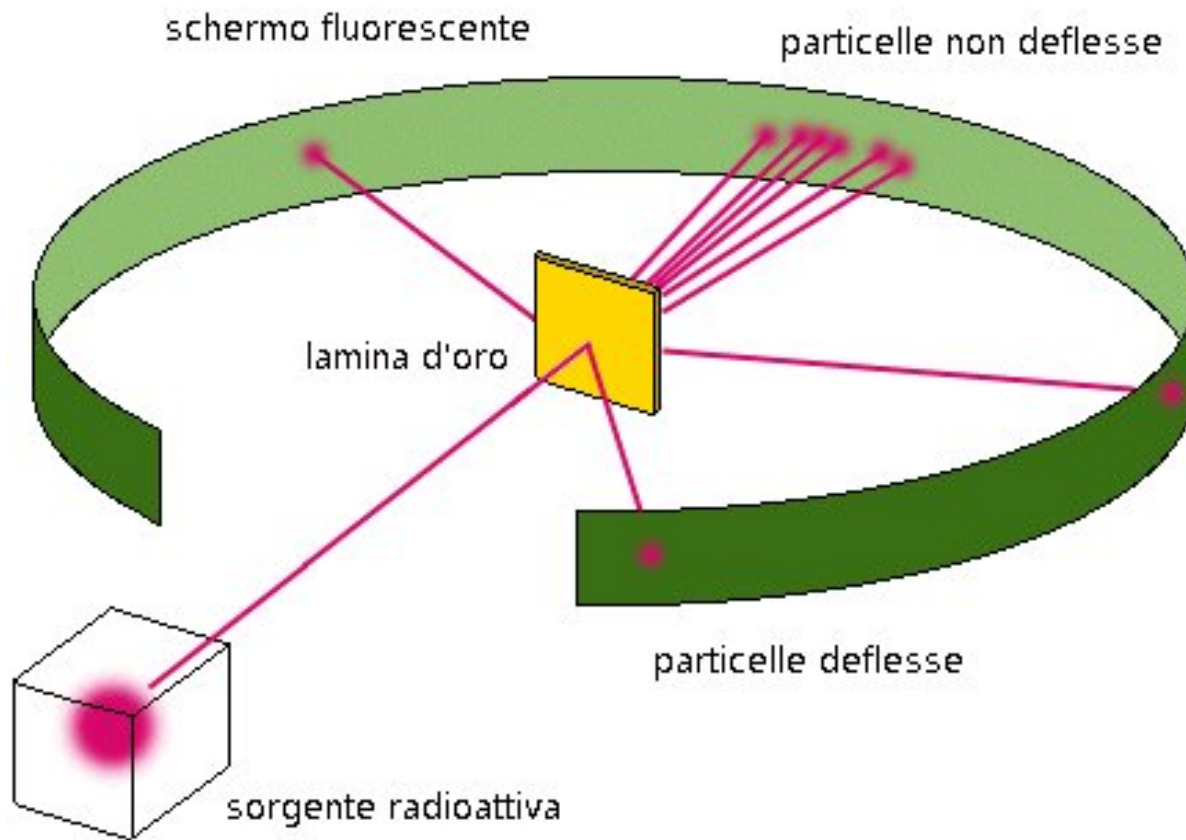
Secondo i calcoli di Thomson, per avere stabilità sotto l'effetto delle forze di Coulomb in gioco, gli elettroni dovevano muoversi in modo approssimativamente circolare all'interno della carica positiva.

Secondo il modello di Thomson, quando la materia acquista energia, gli atomi vengono eccitati e gli elettroni cominciano a vibrare come tanti oscillatori, emettendo onde elettromagnetiche di frequenza corrispondente alla frequenza di oscillazione. Attraverso complicati calcoli basati solo sulla meccanica classica, Thomson e i suoi allievi riuscirono a ricavare, anche se in modo approssimato, alcune frequenze delle righe spettrali emesse dagli atomi energeticamente eccitati.

Esperimento di Rutherford

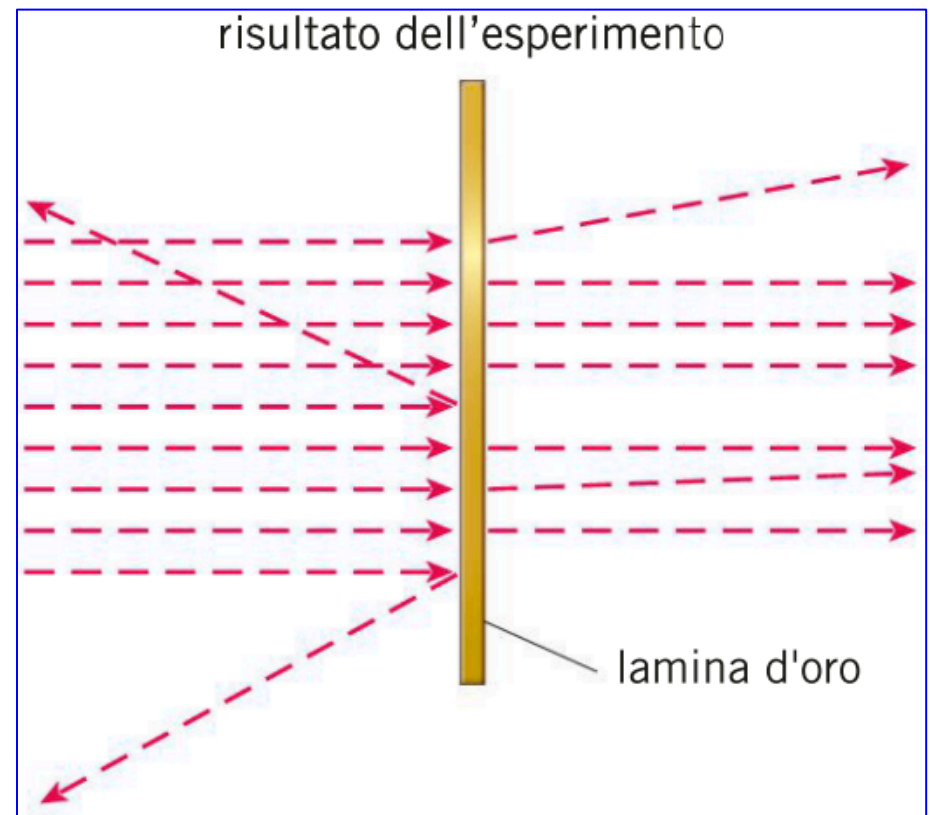
Rutherford (1871–1937; Premio Nobel) non era troppo convinto del modello atomico di Thomson ed elaborò il cosiddetto *modello planetario degli elettroni* o *modello dell'atomo nucleare*.

L'esperimento che contribuì alla nascita del modello nucleare dell'atomo consisteva nel bombardare una lamina sottile di metallo con particelle α (alfa), che non sono altro che fasci di ioni di elio carichi positivamente ed emessi ad altissima energia ($\approx 10^7$ m/s) da atomi instabili e capaci di attraversare sottili strati di materia.



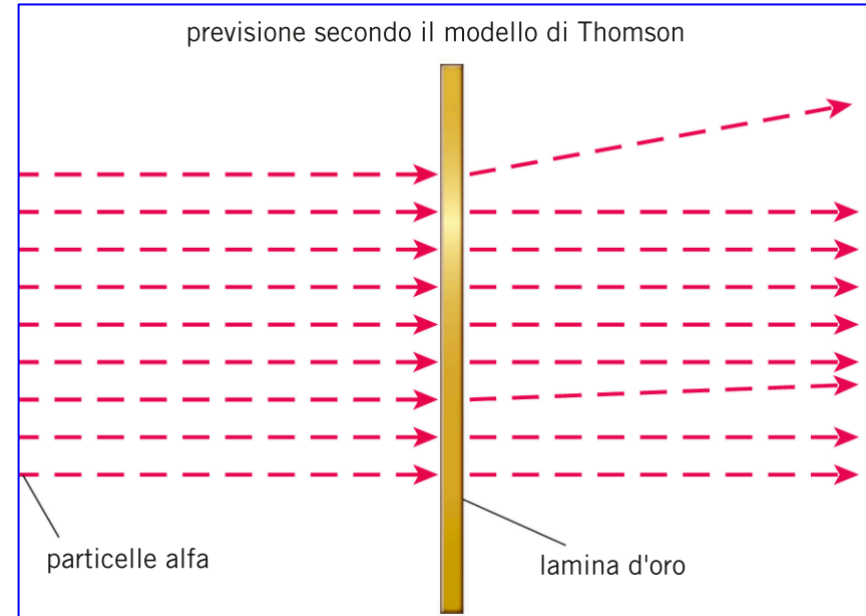
Durante l'interazione con le particelle cariche dell'atomo, le particelle alfa devono essere deviate dalla loro traiettoria originaria e la conseguente diffusione del fascio deve fornire informazioni sulla distribuzione delle cariche elettriche all'interno degli atomi.

Il risultato degli esperimenti fu che la diffusione delle particelle alfa attraverso le lamine metalliche era considerevole.



Sebbene un gran numero di particelle del fascio incidente mantenesse la propria direzione originaria, ossia attraversasse le lamine come se non esistessero e conseguentemente intercettate dallo schermo fluorescente, almeno altrettante venivano deflesse di molti gradi ed alcune erano addirittura riflesse all'indietro.

Questo risultato non si adattava al modello atomico di Thomson, secondo il quale, essendo le masse e le cariche elettriche distribuite uniformemente in tutto l'atomo, le particelle alfa dovevano subire angoli di diffusione piccoli.

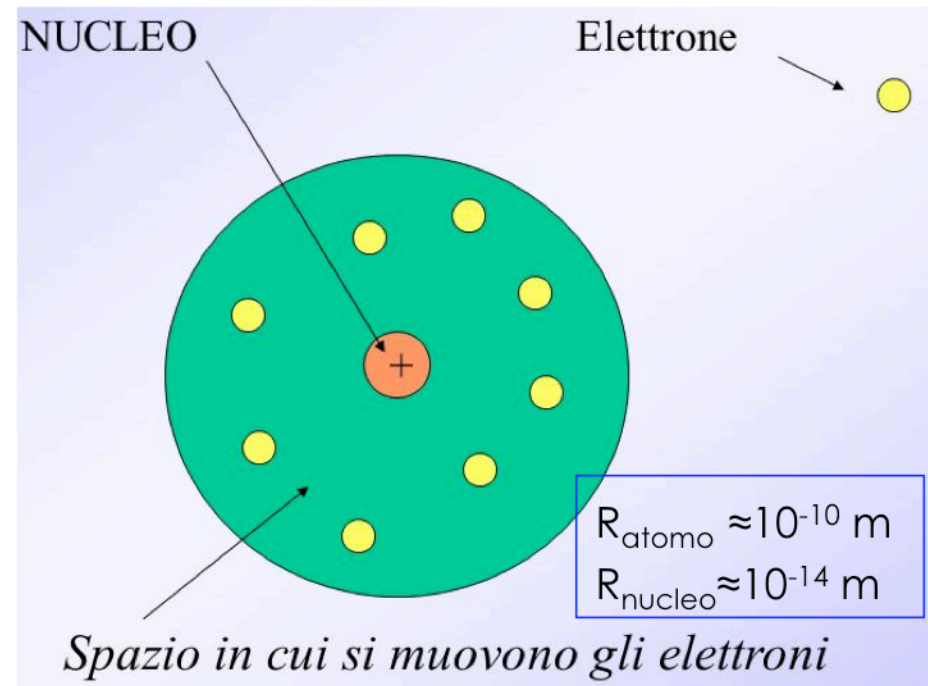


L'unica spiegazione accettabile era che l'atomo fosse un sistema quasi del tutto vuoto, con una parte impenetrabile, molto piccola rispetto alle dimensioni atomiche, nella quale era concentrata la carica positiva e quasi totalità della massa di un atomo.

Al di fuori di questo nucleo, la maggior parte del volume dell'atomo doveva costituire lo spazio in cui orbitavano gli elettroni ed essere pertanto quasi privo di materia.

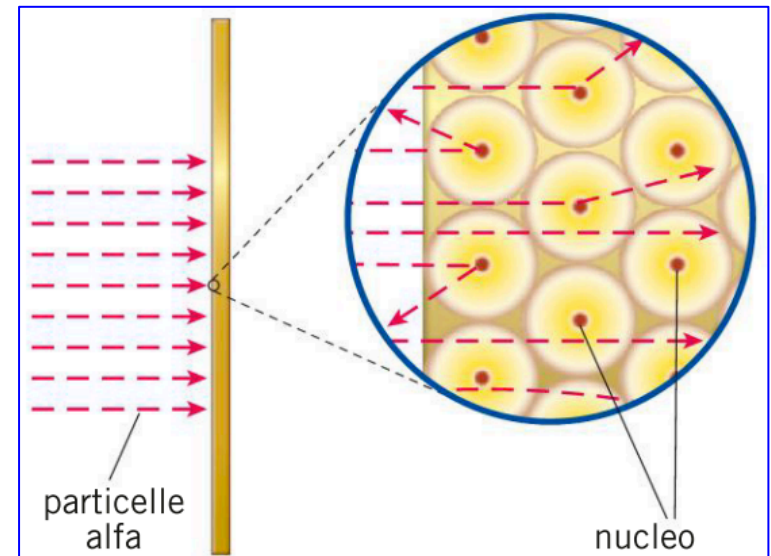
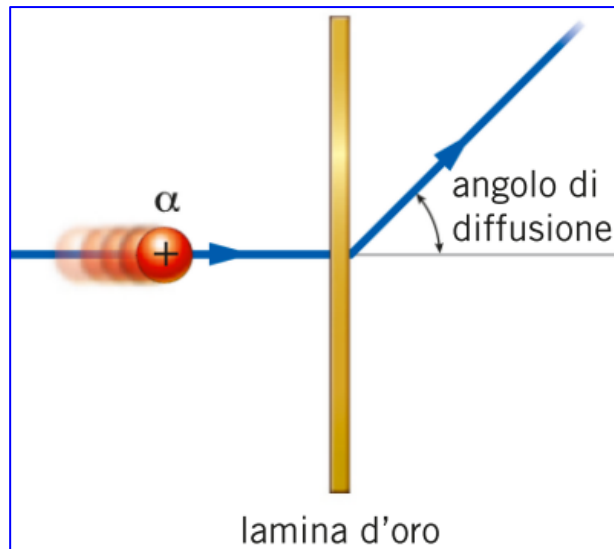
Modello atomico di Rutherford

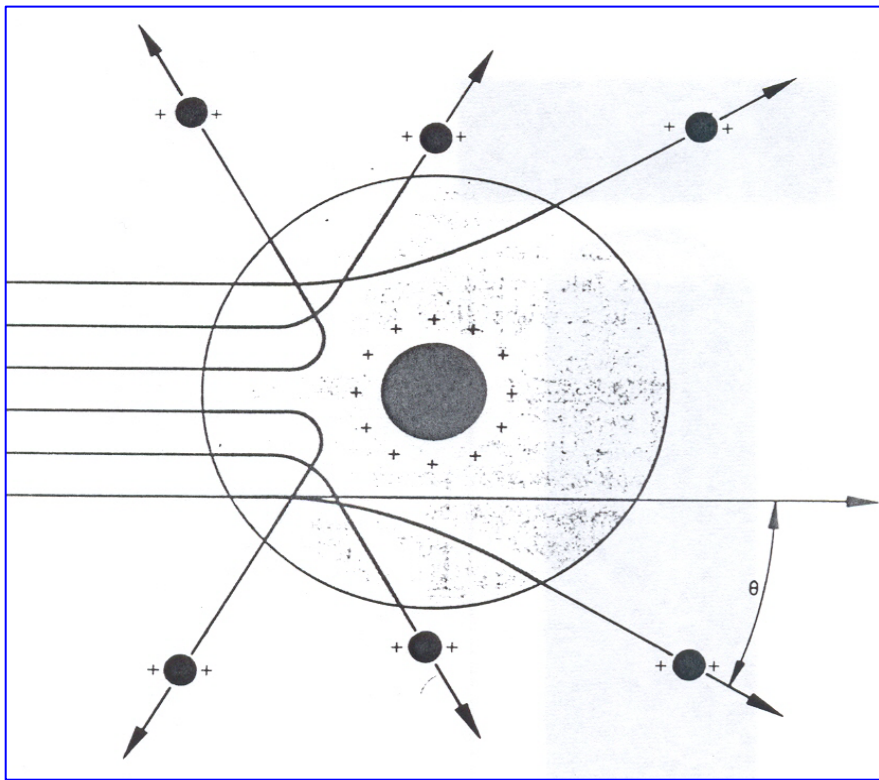
L'atomo è costituito da un nucleo positivo molto piccolo posto al centro di una sfera molto più grande, dove la carica negativa degli elettroni è distribuita in modo più o meno uniforme.



Ponendo al centro dell'atomo un nucleo positivo, fu naturale pensare che gli elettroni ruotassero attorno al nucleo come i pianeti intorno al Sole, con la forza elettrostatica che sostituisce quella gravitazionale (**modello planetario**).

Misurando gli angoli di diffusione delle particelle alfa si ottengono informazioni sulla struttura dei bersagli contro cui esse hanno urtato.





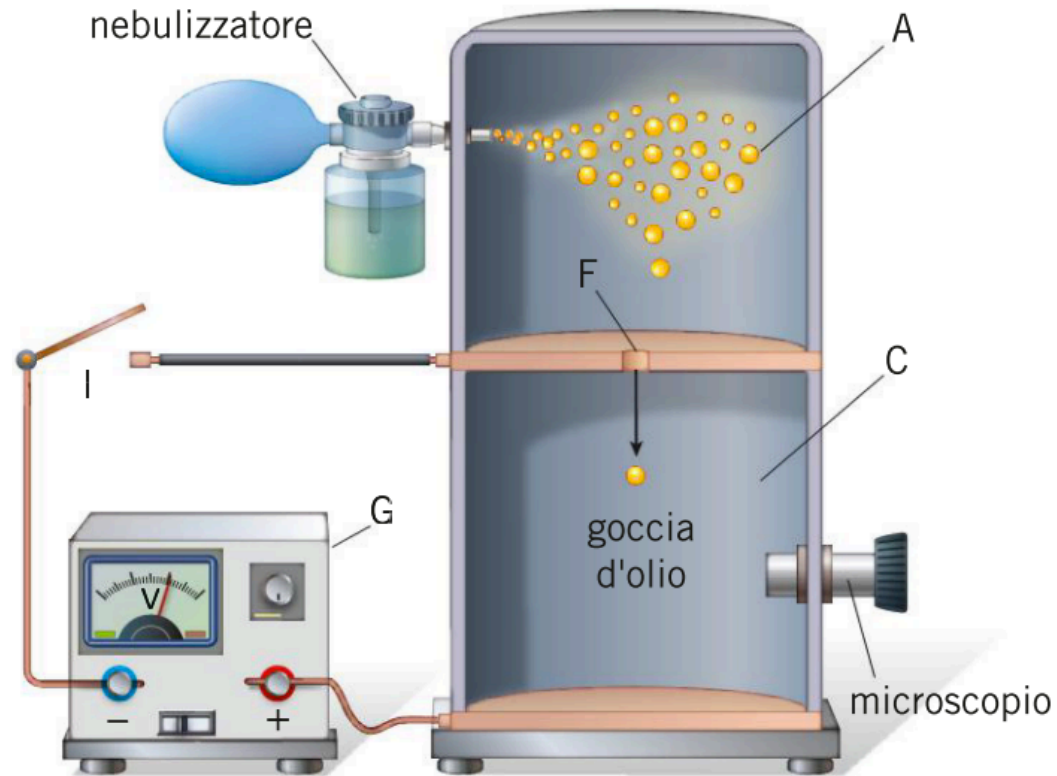
La formula, in accordo con i dati sperimentali, che esprime la deflessione subita dalle particelle che passano a varie distanze dal centro di repulsione, è la seguente:

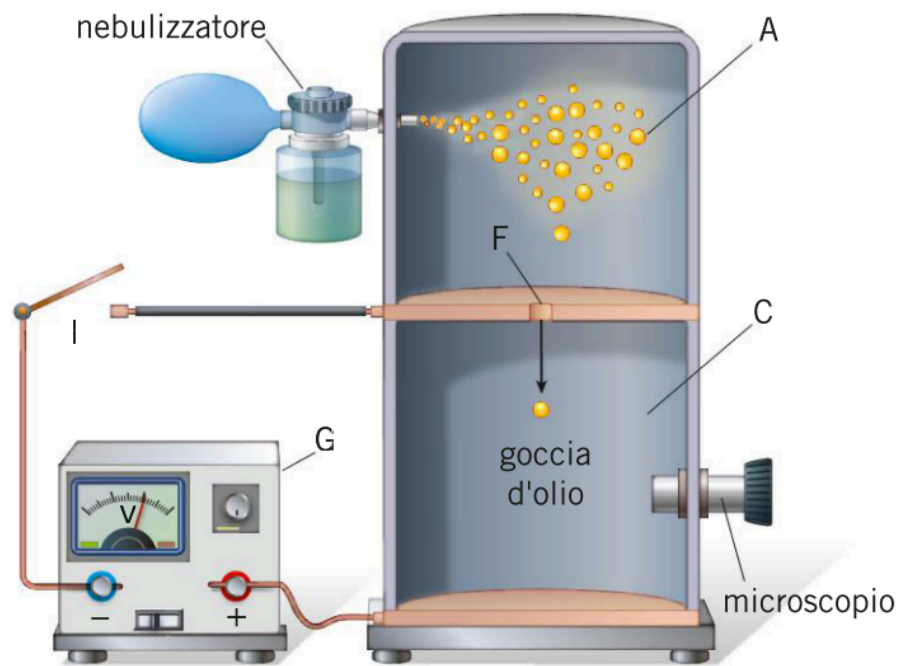
$$dN = nN \left(\frac{ze^2}{mv^2} \right)^2 \cdot \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

ESPERIMENTO DI MILLIKAN

Fu grazie all'esperimento di **Millikan** (1868-1953, Premio Nobel) che si riuscì a calcolare la carica dell'elettrone ($e=1,6022 \times 10^{-19}$ C).

Nell'apparato sperimentale, un nebulizzatore spruzza goccioline d'olio che, per strofinio contro il cannello del nebulizzatore, si elettrizzano con cariche di entrambi i segni.





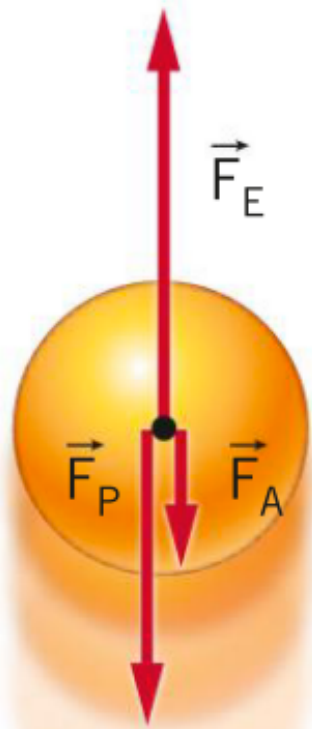
Alcune di queste goccioline entrano nella zona C (un condensatore) attraverso il forellino F. La ddp ai capi del condensatore (s distanza tra le armature) genera un campo elettrico uniforme di intensità:

$$E = \frac{\Delta V}{s}$$

Le goccioline si muoveranno di moto rettilineo uniforme all'interno di C quando il condensatore è scarico.

Vediamo attraverso il microscopio cosa succede a una gocciolina nella zona C quando chiudiamo l'interruttore I.

1. se la goccia è scarica, non osserviamo alcuna variazione nel suo comportamento;
2. se la goccia è carica negativamente, la vediamo accelerare verso il basso, perché la forza elettrica che si genera ha lo stesso verso della forza-peso della goccia;
3. se la goccia è carica positivamente, la vediamo rallentare o addirittura invertire il proprio moto. In questo caso, infatti, la forza elettrica è rivolta verso l'alto, nel senso opposto della forza-peso.



Esaminiamo il terzo caso, il più interessante (il secondo caso si studia allo stesso modo).

Sulla gocciolina (microsfera di plastica nella versione moderna dell'esperimento) agiscono tre forze:

$\mathbf{F}_E$ =forza elettrica verso l'alto

$\mathbf{F}_p$ =forza peso verso il basso

$\mathbf{F}_A$ =forza attrito (opposta al moto) verso il

I moduli delle forze sono:

$$F_E = qE = q \frac{\Delta V}{s}; \quad F_P = mg;$$

$$F_A = 6\pi\eta rv$$

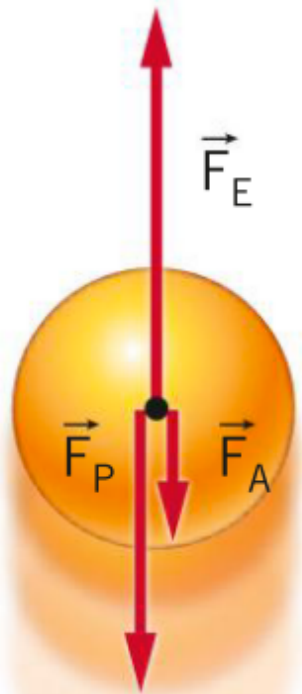
Legge di Stokes
nota dalla
meccanica dei
fluidi

q =carica incognita; m =massa nota microsfera; r =raggio noto microsfera; η =viscosità aria; v =velocità microsfera

Applichiamo il 1° principio della dinamica:

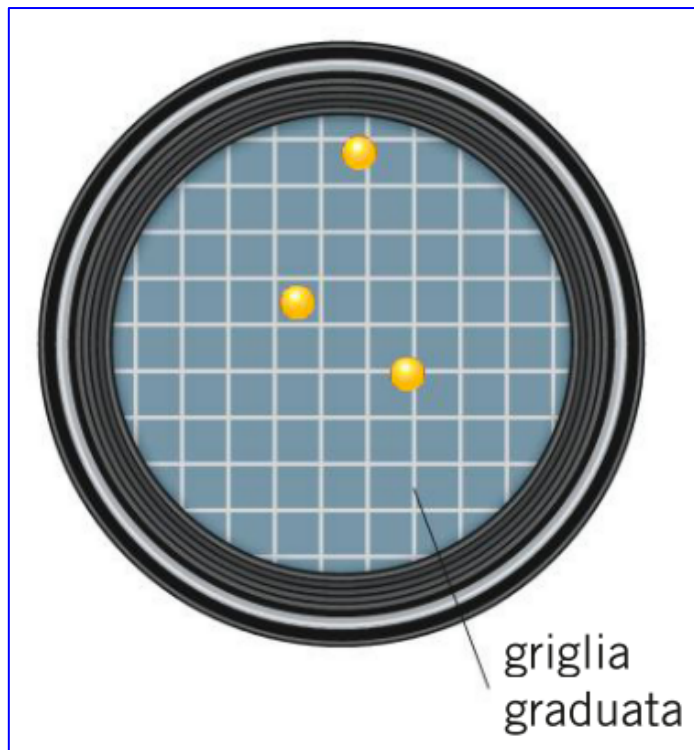
$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

$$F_E = F_A + F_P \Rightarrow q \frac{\Delta V}{s} = 6\pi\eta rv + mg$$



Dall'equazione ottenuta ricaviamo la carica q incognita:

$$q = (6\pi\eta rv + mg) \frac{s}{\Delta V}$$



Grazie al microscopio, fornito di un reticolo graduato, è possibile calcolare la velocità v come rapporto tra la distanza percorsa dalla microsfera (nota essendo la distanza tra due divisioni del reticolo) e il tempo (noto, misurato con un cronometro).

Risultato esperimento di Millikan

Millikan osservò che i valori misurati di q non erano casuali, ma tutti multipli (positivi o negativi) di una carica fondamentale che, alla luce dei modelli atomici, non poteva che essere la carica dell'elettrone.

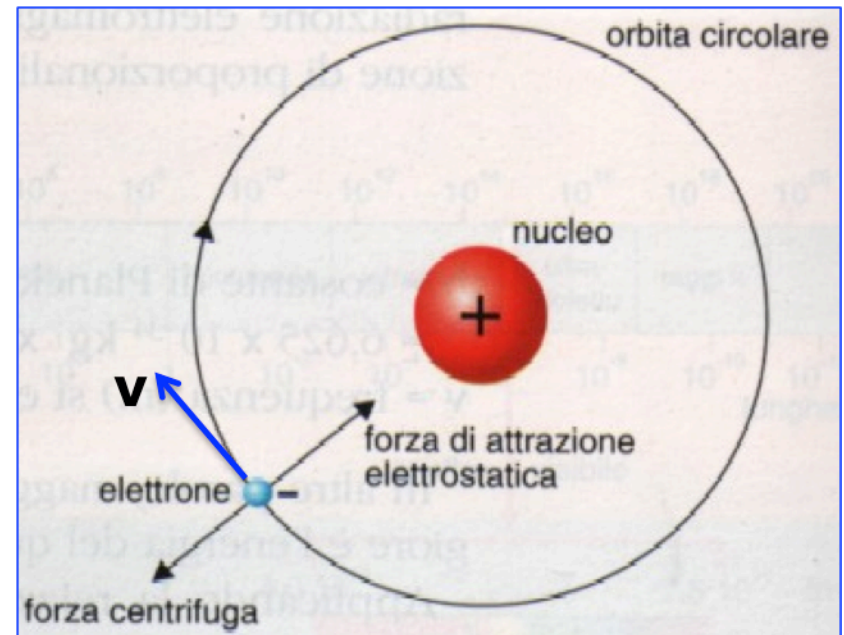
Infatti, l'elettrone è l'unica particella dell'atomo libera di muoversi da un corpo all'altro e, a seconda che sia in eccesso o in difetto, a determinarne la carica negativa o positiva. Conclusione:

La carica elettrica è quantizzata, ossia assume soltanto un insieme di valori ben definiti.

L'ATOMO DI BOHR E L'ORIGINE DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Analizziamo, utilizzando le leggi della meccanica newtoniana e dell'elettromagnetismo, la struttura di un atomo di idrogeno prevista dal modello planetario.

Secondo tale modello, l'atomo di idrogeno è composto da un elettrone di massa m_e e carica $-e$ che percorre (con una velocità di modulo v) una circonferenza di raggio r attorno a un nucleo di carica $+e$.



Un moto circolare uniforme richiede la presenza di una forza centripeta che mantenga il punto materiale m_e sulla circonferenza:

$$F_c = m_e a_c = m_e \frac{v^2}{r}$$

Nel caso dell'elettrone, tale forza è rappresentata dall'attrazione di Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(-e)(+e)}{r^2} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

Quindi:

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

da cui è possibile ricavare il quadrato della velocità e, di conseguenza, l'energia cinetica posseduta dalla carica durante il suo moto circolare uniforme:

$$v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 m_e} \frac{e^2}{r}$$

$$K = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

L'energia potenziale, invece, è data da (capitolo potenziale elettrico):

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

L'energia totale del sistema elettrone-nucleo è:

$$E_{tot} = U + K = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

L'energia totale è negativa in quanto il sistema è legato.

Un atomo con elettroni stazionari disposti intorno ad un nucleo positivo sarebbe instabile, perché gli elettroni con la loro carica negativa sarebbero irresistibilmente attratti verso il nucleo. E anche se si muovessero intorno al nucleo, come i pianeti intorno al Sole, l'atomo ugualmente sarebbe destinato al collasso.

Newton aveva mostrato che qualunque corpo in moto circolare subisce un'accelerazione, e Maxwell che tale corpo, se è una particella carica come l'elettrone, emette continuamente energia sotto forma di radiazione elettromagnetica.

La prima difficoltà che **Bohr** (1885-1962, Premio Nobel) dovette superare era che, se fosse stata vera la teoria di Rutherford, gli atomi sarebbero potuti esistere solo per una piccolissima frazione di secondo.

Infatti, quando l'elettrone perde energia, il raggio della sua orbita diminuisce. Perciò la sua traiettoria non è più circolare, ma è una spirale che si avvicina sempre più al nucleo, finché l'elettrone vi cade sopra in un intervallo di tempo dell'ordine di 10^{-7} s.

Perciò Bohr suppose che, a livello atomico, le leggi classiche della meccanica e dell'elettromagnetismo non valessero più e che al loro posto fosse necessario introdurre nuove leggi della fisica, allora tutte da scoprire.

Per spiegare la stabilità degli atomi Bohr introdusse alcune ipotesi, allora arbitrarie, ma che in seguito sono state spiegate nel quadro di una teoria più generale:

POSTULATI PER LA QUANTIZZAZIONE DELLE ORBITE E DELL'ENERGIA

1. il raggio delle orbite degli elettroni attorno al nucleo può avere soltanto un certo insieme di valori permessi;
2. quando l'elettrone percorre una di queste orbite (dotate di un'energia totale ben definita) non irraggia.

Nell'atomo di Bohr il raggio r dell'orbita, la velocità v dell'elettrone e la sua energia totale E_{tot} non possono assumere valori qualunque, ma solo un insieme di valori ben definiti.

Tutti i fatti descritti non lasciavano alcun dubbio sulla correttezza dell'idea formulata da Bohr sulla quantizzazione dell'energia meccanica, ma restavano da scoprire le regole di tale quantizzazione, in particolare occorre stabilire un criterio per determinare le orbite accessibili all'elettrone.

Bohr risolse il problema quantizzando il momento angolare dell'elettrone secondo la seguente condizione:

CONDIZIONE DI QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

Il modulo L del momento angolare dell'elettrone rispetto al nucleo è un multiplo intero della costante h di Planck:

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad n = 1, 2, \dots \text{ numero quantico principale}$$

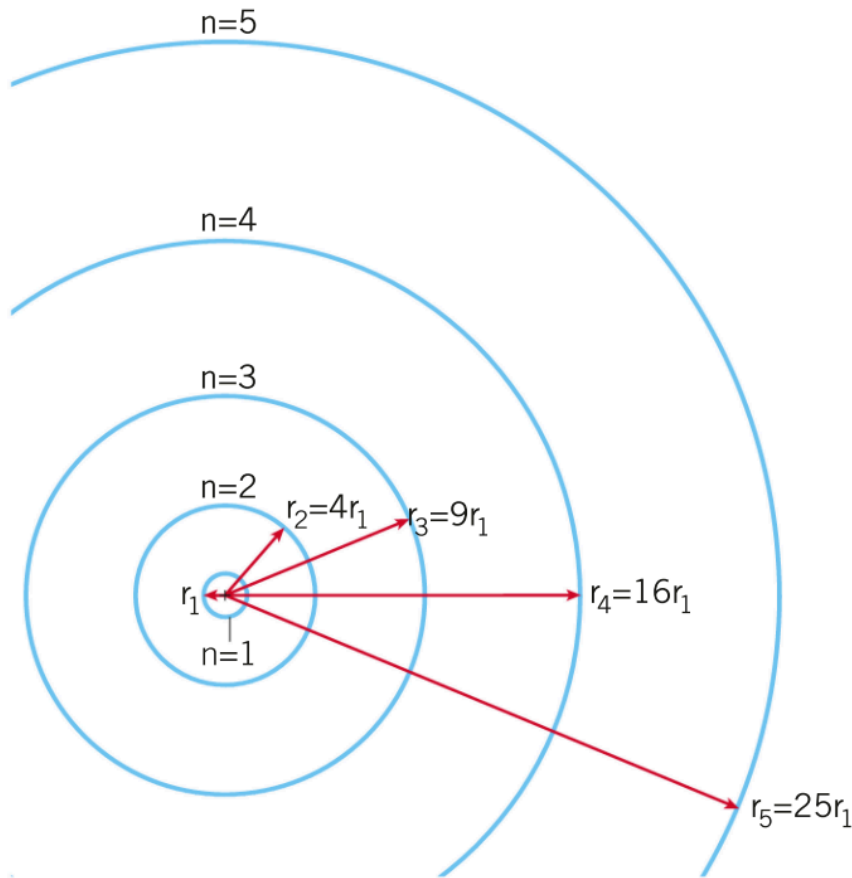
In questo modo i valori dell'energia e dei raggi per gli stati stazionari permessi per l'elettrone nell'atomo di idrogeno, ossia le orbite sulle quali l'elettrone è libero di muoversi senza irradiare energia, sono dati da:

$$E(n) = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}$$

I valori di energia $E(n)$, chiamati **livelli energetici** dell'atomo, sono quantizzati e inversamente proporzionali al quadrato del numero quantico principale n .

- $n=1$, $E_1=-13,6 \text{ eV}$, livello fondamentale e il corrispondente stato quantico è lo stato fondamentale.
- $n>1$, livelli eccitati e i corrispondenti stati quantici si chiamano stati eccitati.

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = (5,29 \times 10^{-11} \text{ m}) n^2$$

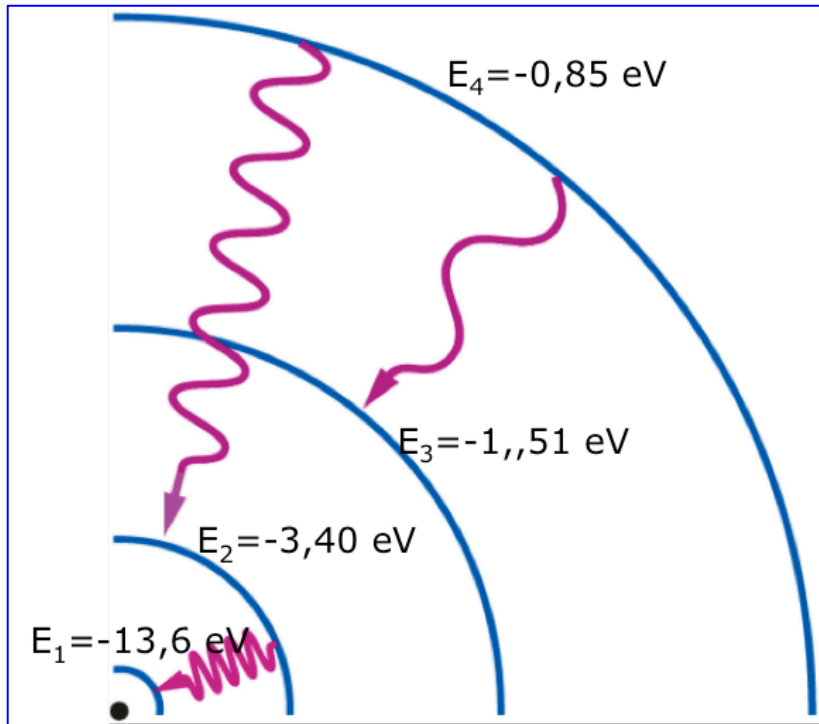


I raggi r_n delle orbite permesse sono direttamente proporzionali al quadrato del numero quantico principale n .

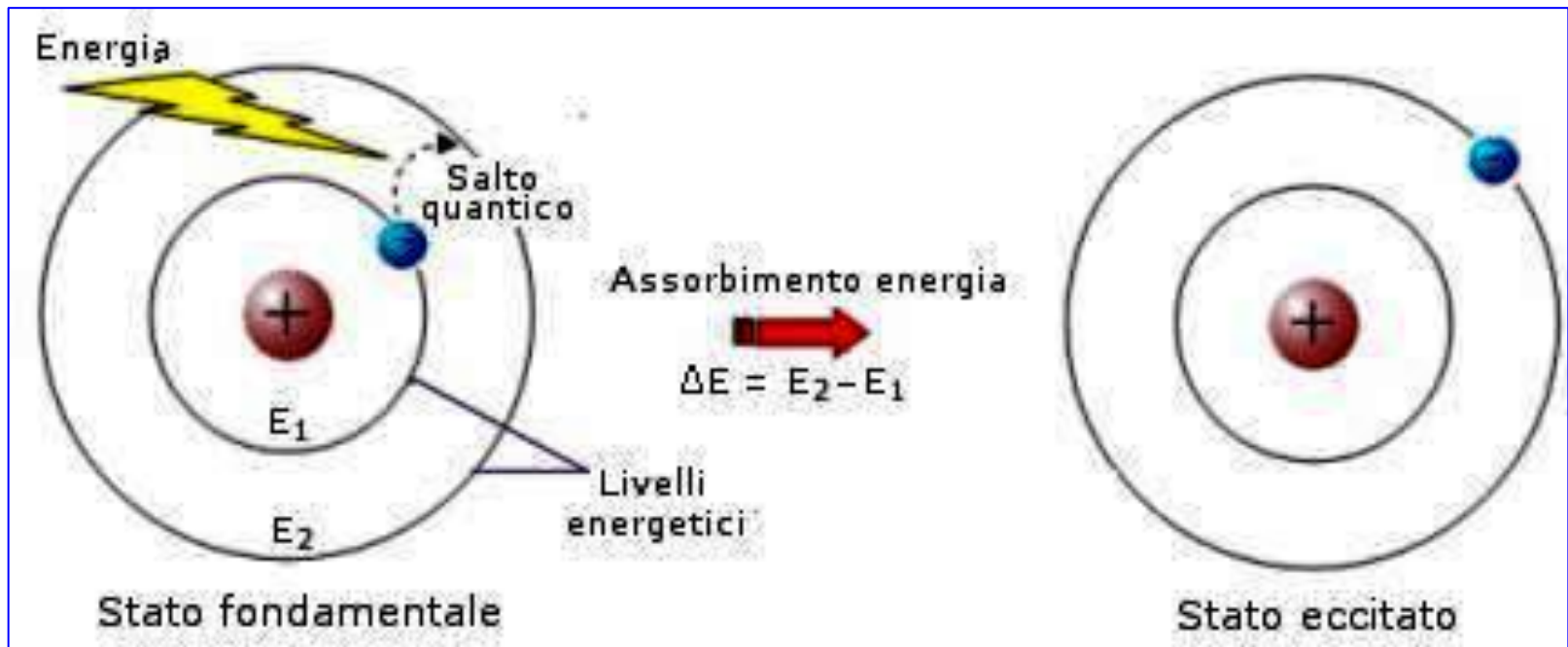
Raggi delle orbite permesse per l'elettrone dell'atomo di idrogeno.

GIUSTIFICAZIONE SPETTRO ATOMO DI IDROGENO

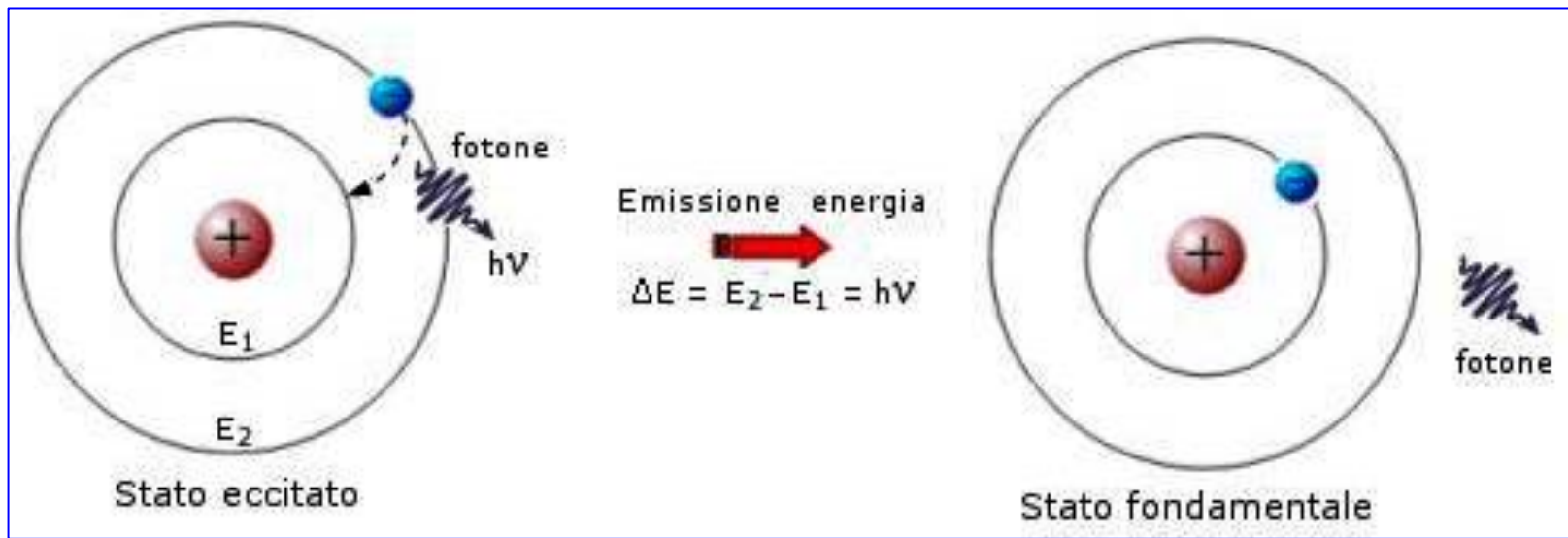
Secondo il modello di Bohr, un elettrone che percorre un'orbita permessa non irraggia. Allora, poichè un gas attraversato da una corrente elettrica emette luce (tubo al neon), dobbiamo chiederci come avviene l'emissione dei fotoni da parte degli atomi. Bohr postulò che:



Un fotone è emesso da un atomo quando un suo elettrone passa da un'orbita permessa di energia maggiore (più esterna) a un'altra orbita permessa di energia minore (più interna).



L'atomo di idrogeno ha un solo elettrone. Esso può ricevere energia dall'esterno e passare a un'orbita di numero quantico n , con energia $E(n)$ maggiore di quella iniziale.



L'atomo, così disturbato, si trova in un «stato eccitato», che è instabile. Dopo un intervallo di tempo che è di solito molto breve (minore di 10^{-8} s), l'elettrone salta su un'orbita di numero quantico m (con $m < n$) la cui energia $E(m)$ è minore di $E(n)$.

La differenza di energia (salto energetico):

$$\Delta E = E(n) - E(m)$$

è liberata sotto forma di un fotone di frequenza:

$$\Delta E = hf \Rightarrow f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E(n) - E(m)}{h}$$

Sapendo che:

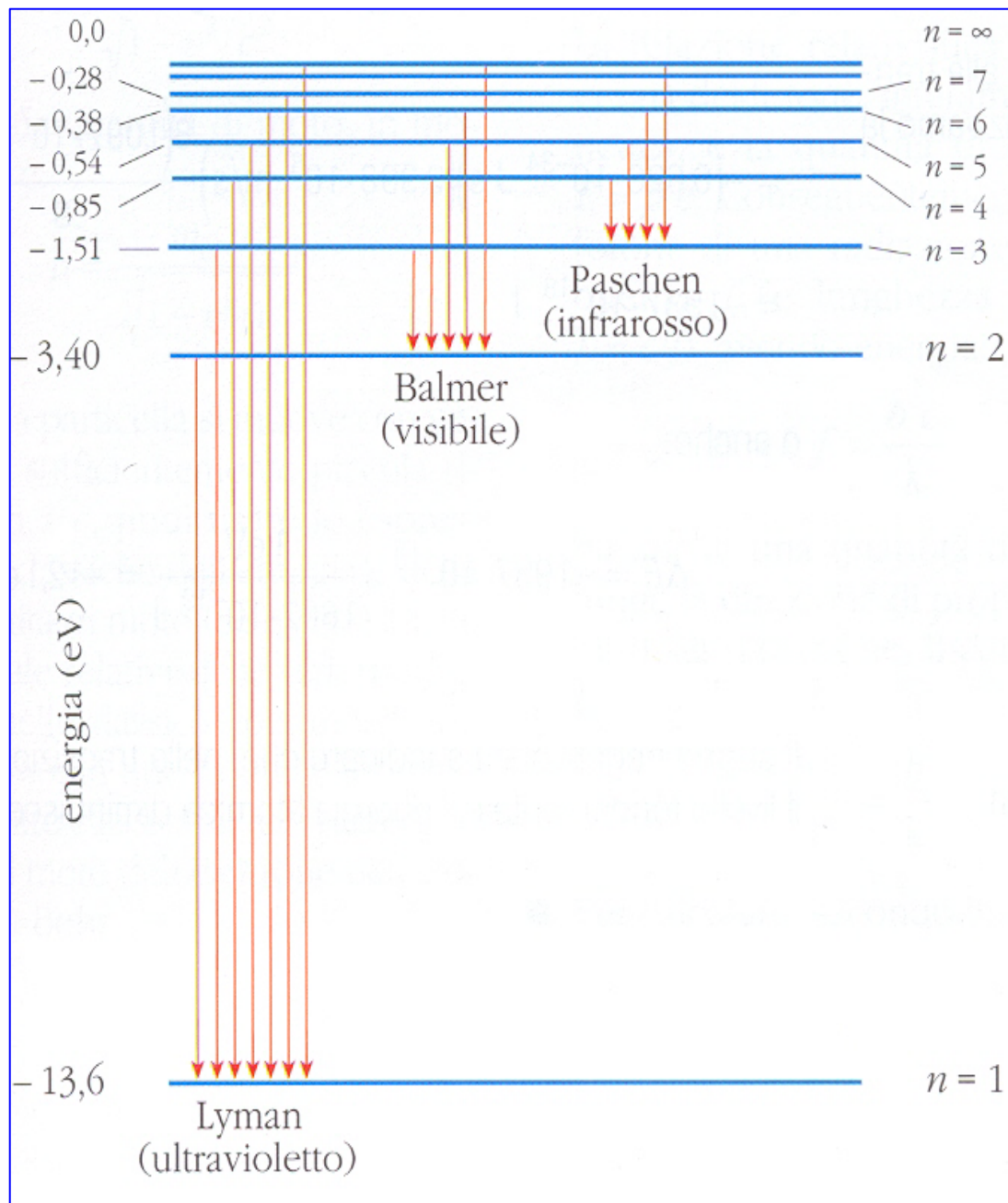
$$E(n) = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}$$

si ottiene:

$$f = cR_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{dove: } cR_H = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$$

$R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ costante di Rydberg

La formula è identica a quella di Balmer, ricavata empiricamente, ma è stata ottenuta partendo dalle ipotesi di quantizzazione di Bohr. Anzi, la formula di Balmer è un caso particolare di una formula più generale.



Infatti, dalla relazione ricavata si ottengono tutte le serie spettroscopiche.

In definitiva, nel modello di Bohr, soltanto alcune energie possono essere emesse e assorbite dall'atomo.

Nel caso dell'emissione, resta così spiegato lo spettro di righe dell'atomo di idrogeno. Nel caso dell'assorbimento, ciò è stato confermato dall'esperimento di Franck e Hertz (che analizzeremo dopo).

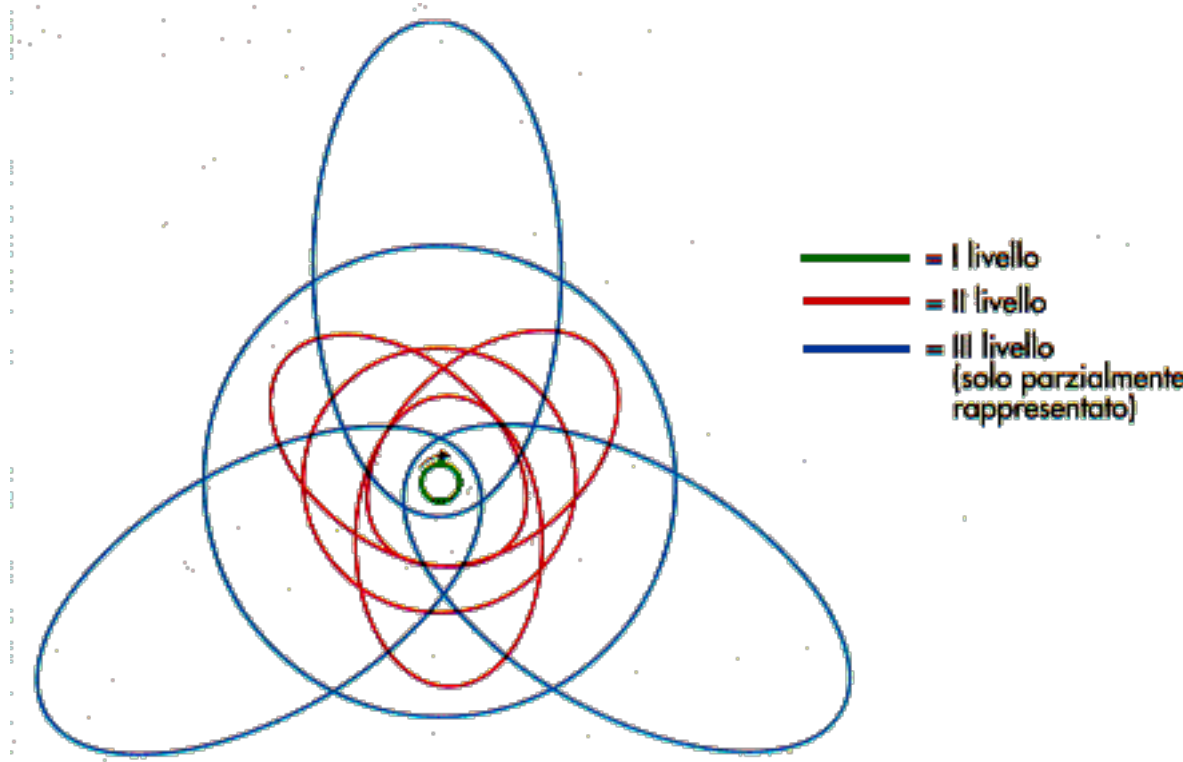
Nonostante i limiti della teoria legati soprattutto all'introduzione di ipotesi ad hoc e all'uso non perfettamente coerente di idee quantistiche in un contesto classico, il modello di Bohr, per la sua relativa semplicità, deve essere considerato un geniale contributo scientifico di importanza storica, nonché un'incomparabile sorgente di ispirazione per ricerche teoriche e sperimentali successive. L'atomo quantistico, disse Rutherford, fu “un trionfo della mente sulla materia”.

L'atomo di Bohr, però, incontrava difficoltà nel spiegare sistemi atomici con più di un elettrone e la cosiddetta struttura fine, ossia lo sdoppiamento delle righe.

Infatti, se si osserva la materia eccitata mediante un spettroscopio dotato di un alto potere risolutivo, in grado cioè di separare componenti cromatiche la cui lunghezza d'onda differisce anche solo di pochi angstrom, alcune righe mostrano una *configurazione a multipletti*. Per esempio, la riga gialla emessa dal sodio è costituita da un doppietto le cui componenti hanno lunghezze d'onda separate di circa 6 angstrom.

Sommerfeld (1868-1951) risolse il problema modificando il modello atomico di Bohr, sostituendo le orbite circolari degli elettroni con orbite ellittiche.

Modello Bohr-Sommerfeld



Il numero quantico n nel modello di Bohr specificava uno stato stazionario, un'orbita elettronica circolare permessa, e il corrispondente livello energetico. Il valore di n determinava anche il raggio di una data orbita circolare.

Viceversa, per definire la forma di un'ellisse sono necessari due numeri, perciò Sommerfeld introdusse l , il numero quantico orbitale, per quantizzare la forma di un'orbita ellittica.

Di tutte le forme possibili per un'orbita ellittica, l determinava quelle che erano permesse per un dato valore di n . Nel modello modificato di Sommerfeld, il numero quantico principale n determinava i valori che l poteva assumere.

Per diversi anni il modello atomico di Bohr-Sommerfeld rappresentò lo schema fondamentale per interpretare i fatti sperimentali della fisica atomica.

Tuttavia, nonostante i brillanti successi, aveva lasciato spazio a molte perplessità.

L'introduzione dei postulati di quantizzazione sembrava in effetti del tutto arbitraria. Ci si rese conto ben presto che non era corretto estendere al mondo atomico le leggi del mondo macroscopico: gli atomi, gli elettroni, i quanti di energia e le altre entità microscopiche non potevano essere trattati come gli oggetti osservati nella realtà di ogni giorno.

La via per arrivare a formulare una nuova fisica atomica iniziò verso il 1924 con due diverse teorie: la **meccanica ondulatoria** di Schrodinger e **la meccanica delle matrici** di Heisenberg.

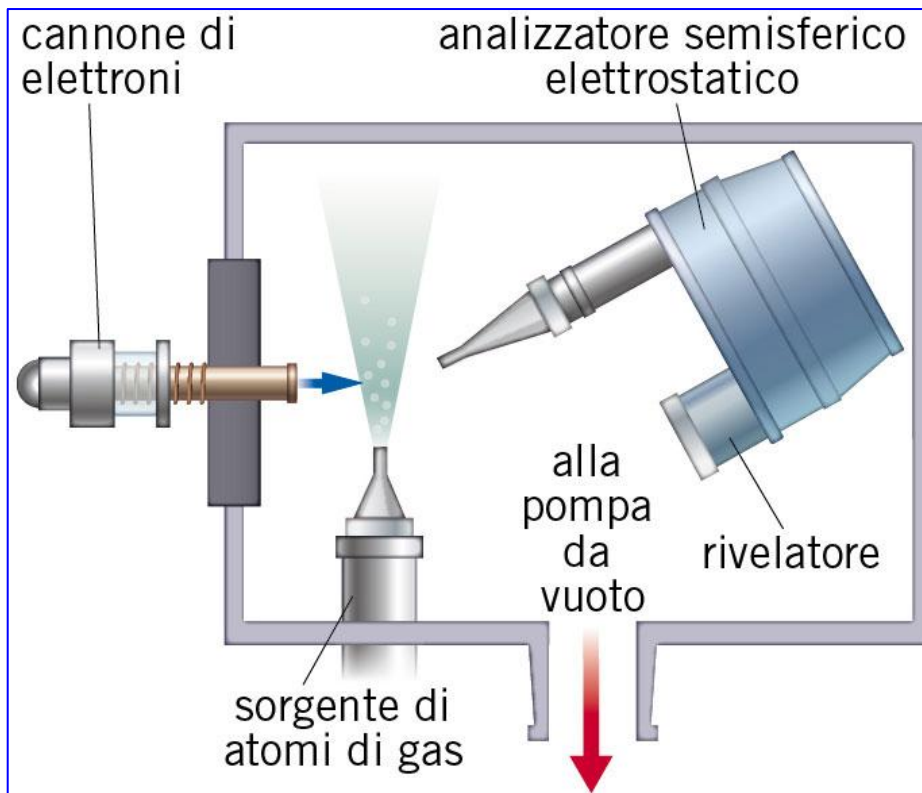
Come la meccanica relativistica, nata dalla revisione di concetti come lo spazio e il tempo, contiene la meccanica classica, così, da una sistematica revisione del modello di Bohr, si costruì una nuova meccanica che potesse dare risultati conformi all'esperienza nelle applicazioni ai domini microscopici e, nello stesso tempo, tendesse alla fisica classica per quei fenomeni nei quali le discontinuità quantistiche diventano trascurabili.

PRINCIPIO DI CORRISPONDENZA

Le previsioni della meccanica quantistica devono concordare con quelle della meccanica classica man mano che il sistema quantistico si ingrandisce verso dimensioni macroscopiche. Quando, cioè, la meccanica quantistica è applicata al mondo macroscopico, essa deve essere in grado di riprodurre le leggi classiche.

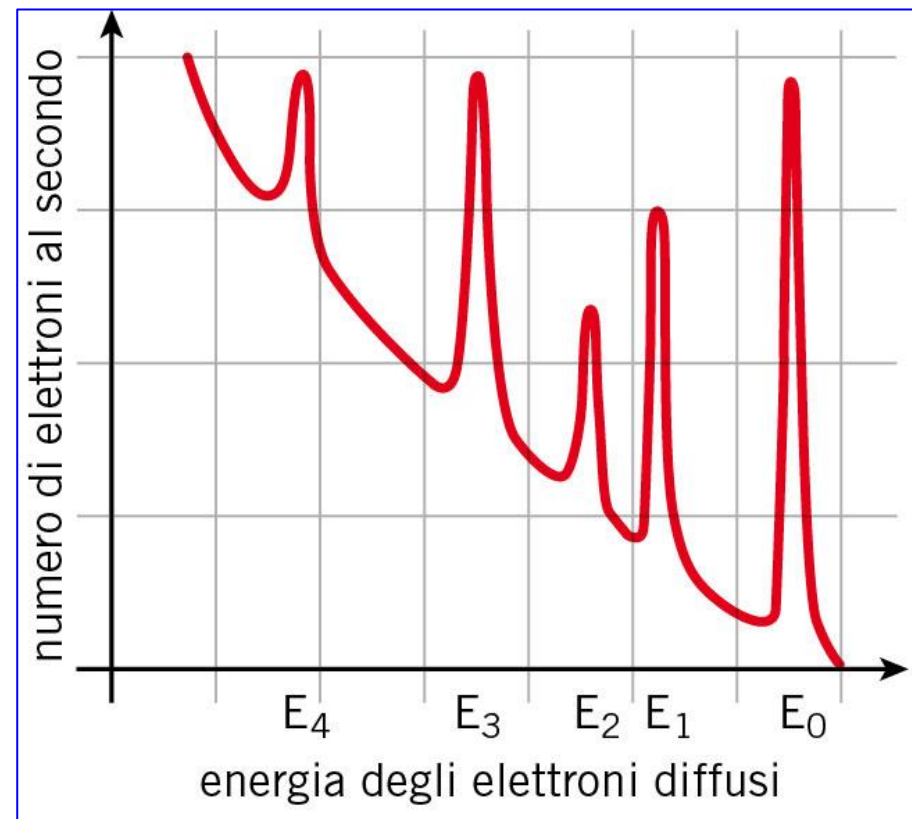
L'ESPERIMENTO DI FRANCK E HERTZ

Nel 1914 Franck e Hertz (premi Nobel) eseguirono un esperimento che dimostrò in maniera inequivocabile che l'energia degli atomi è quantizzata.



Un «cannone» emette elettroni, tutti della stessa energia E_0 . Gli elettroni urtano gli atomi di un gas e, ceduta una parte della loro energia, sono rivelati con un analizzatore di energia.

Lo spettro degli elettroni rivelati mostra una serie di energie definite (E_0 , E_1 , E_2 , ...): soltanto a queste energie la probabilità di diffusione degli elettroni è grande.

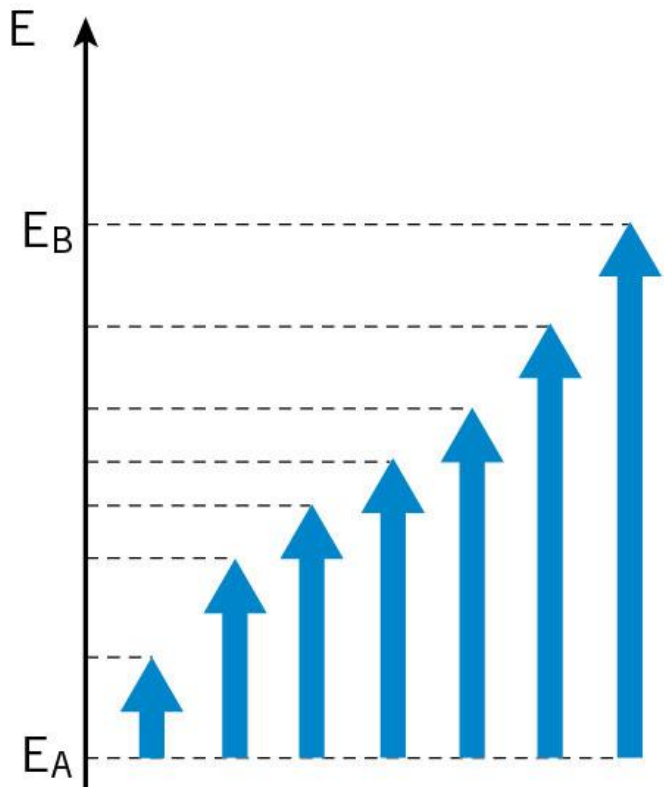


Il picco all'energia E_0 è quello dovuto alla diffusione di elettroni su atomi che non cambiano energia quando sono urtati. Si tratta di urti elastici perché in un urto elastico gli elettroni rimbalzano mantenendo la propria energia iniziale E_0 .

Il picco all'energia $E_1 < E_0$, dimostra che, in una certa frazione di urti, si ha un urto anelastico e l'atomo assorbe l'energia. I due picchi separati mostrano però che l'atomo non può assorbire energie che sono comprese tra 0 e $(E_0 - E_1)$.

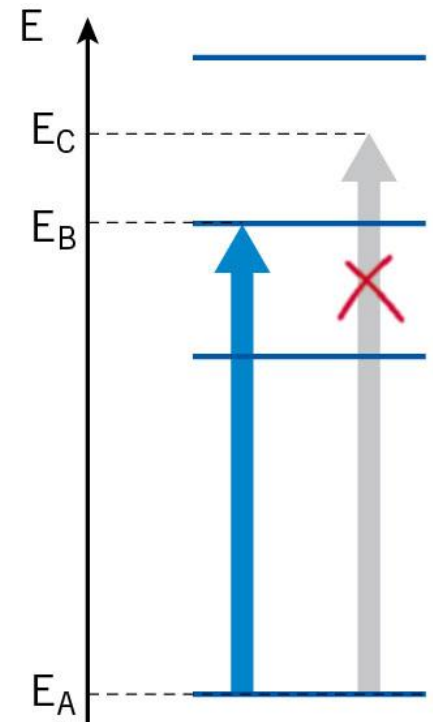
Lo stesso ragionamento si applica agli altri picchi.

La particolare sequenza di picchi dipende dall'atomo bersaglio, ma è una prova inconfutabile del fatto che un atomo è in grado di assorbire, per urto, soltanto valori ben definiti di energia.



Un sistema fisico classico (non quantizzato) può scambiare quantità ΔE arbitrarie di energia, passando da un valore iniziale E_A a un valore finale arbitrario $E_B = E_A + \Delta E$.

Invece, in un sistema dove l'energia è quantizzata è ammesso soltanto lo scambio di determinate quantità di energia. Il sistema passa dall'energia E_A a E_B , ma non da E_A a E_C .



In conclusione:

non soltanto gli scambi di energia tra radiazione e materia sono quantizzati, come aveva proposto Planck, ma la quantizzazione dell'energia è una proprietà intrinseca degli atomi, che si manifesta qualunque sia il tipo di scambio di energia coinvolto.