

La Teoria del... **quasi** Tutto!

Un viaggio nel
Modello Standard

Introduzione alla fisica delle particelle elementari

- *Un po' di storia*
- *Le particelle elementari*
- *Le forze*
- *Il Modello Standard*
- *Bosone di Higgs, LHC ed oltre ...*

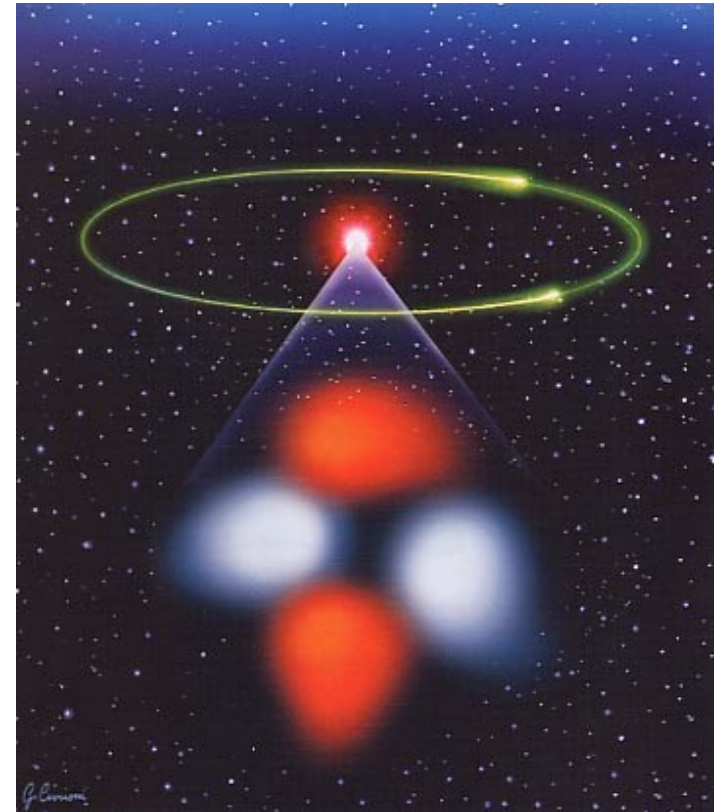


« Se tutta la conoscenza scientifica dovesse andare distrutta in qualche cataclisma, e soltanto una frase fosse trasmessa alle generazioni successive, quale affermazione conterrebbe la maggior quantità di informazione nel minor numero di parole? Io credo si tratti dell'ipotesi atomistica, la quale sostiene che tutte le cose sono fatte di piccole particelle che si muovono di moto proprio... »

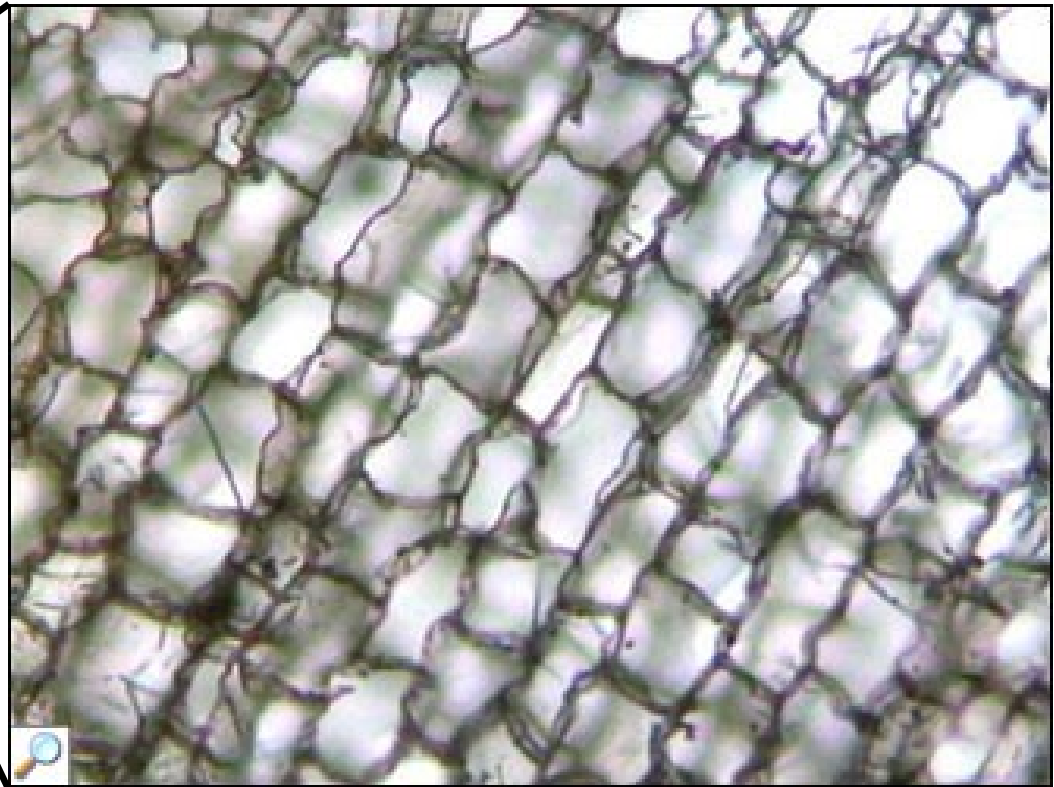
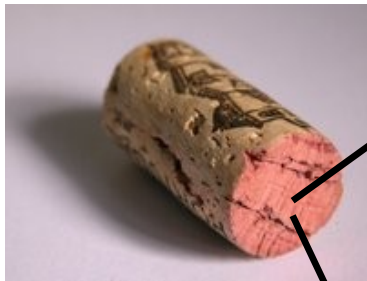
Richard P. Feynman

In questa presentazione illustreremo, nel modo più semplice possibile, cos'è quello che i fisici del giorno d'oggi chiamano il **MODELLO STANDARD**, cioè la teoria più completa che possediamo per interpretare tutto quanto ci circonda.

Questo modello richiede oltre un secolo per essere elaborato, corretto, sottoposto a verifica sperimentale. Per comprenderlo compiremo assieme una specie di "zoom infinito" che ci porterà dal nostro mondo macroscopico fino alle soglie dell'infinitamente piccolo.



Consideriamo un tappo di sughero e tagliuzziamolo in parti sempre più piccole. Ad un certo punto potremo vedere le pareti delle cellule di cui è composto...



Sezione di sughero eseguita con lametta, 200 ingrandimenti, osservata al microscopio

Ma fino a che punto potremo continuare a sminuzzare il nostro tappo di sughero? All'infinito, o ad un certo punto saremo costretti a fermarci?

Questa domanda assillò a lungo i filosofi greci.

Aristotele da Stagira (384-322 a.C.) era convinto che la suddivisione potesse essere proseguita all'infinito...

Aristotele ritratto da Raffaello nella "Scuola d'Atene" (1509-1511)



...mentre **Democrito di Abdera** (460-370 a.C.) pensava che, a furia di tagliare, si sarebbe arrivati ad una particella non più frazionabile, l'**atomo** (dal greco "non divisibile").

Durante il Medioevo cristiano la sua intuizione, indubbiamente non dimostrabile con i mezzi dell'epoca, venne accantonata perché Democrito riteneva che gli atomi si aggregassero e disgregassero a caso, in contrasto con la fede cristiana nella Provvidenza.

« Democrito che 'l mondo a caso pone »

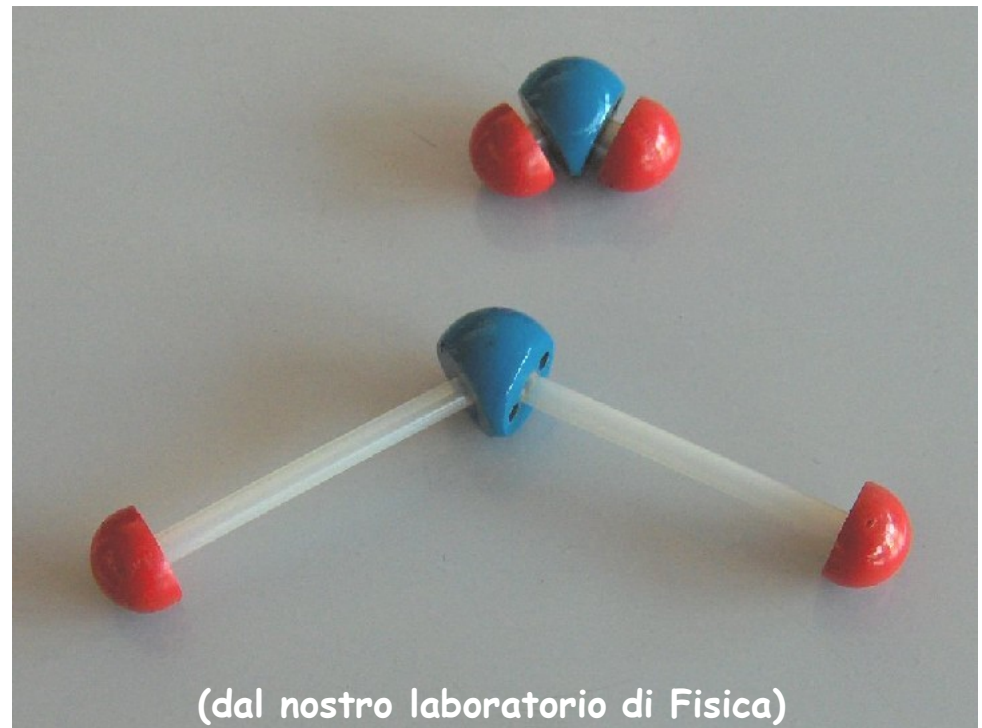
Dante, Inferno IV, 136



All'inizio dell'ottocento la teoria atomica venne riportata in auge non dai filosofi, ma dai fisici **John Dalton** e **Joseph-Louis Proust**, per spiegare come mai gli elementi chimici entrano nelle reazioni solo in proporzioni definite, espresse da rapporti tra numeri interi.

Un volume di acqua si ottiene da due volumi di idrogeno e da uno di ossigeno. Perché? Come mostra il modellino 3-D qui a fianco, la molecola d'acqua è formata da due atomi di idrogeno e da uno di ossigeno!

L'atomo ha partita vinta!



Una facile dimostrazione dell'esistenza di atomi e molecole si può realizzare in casa propria provando a mescolare 250 ml di acqua e 250 ml di alcool. Usando un semplice misuratore da cucina si constaterà facilmente che la miscela NON corrisponde esattamente a 500 ml di volume, ma a poco meno. Perché?



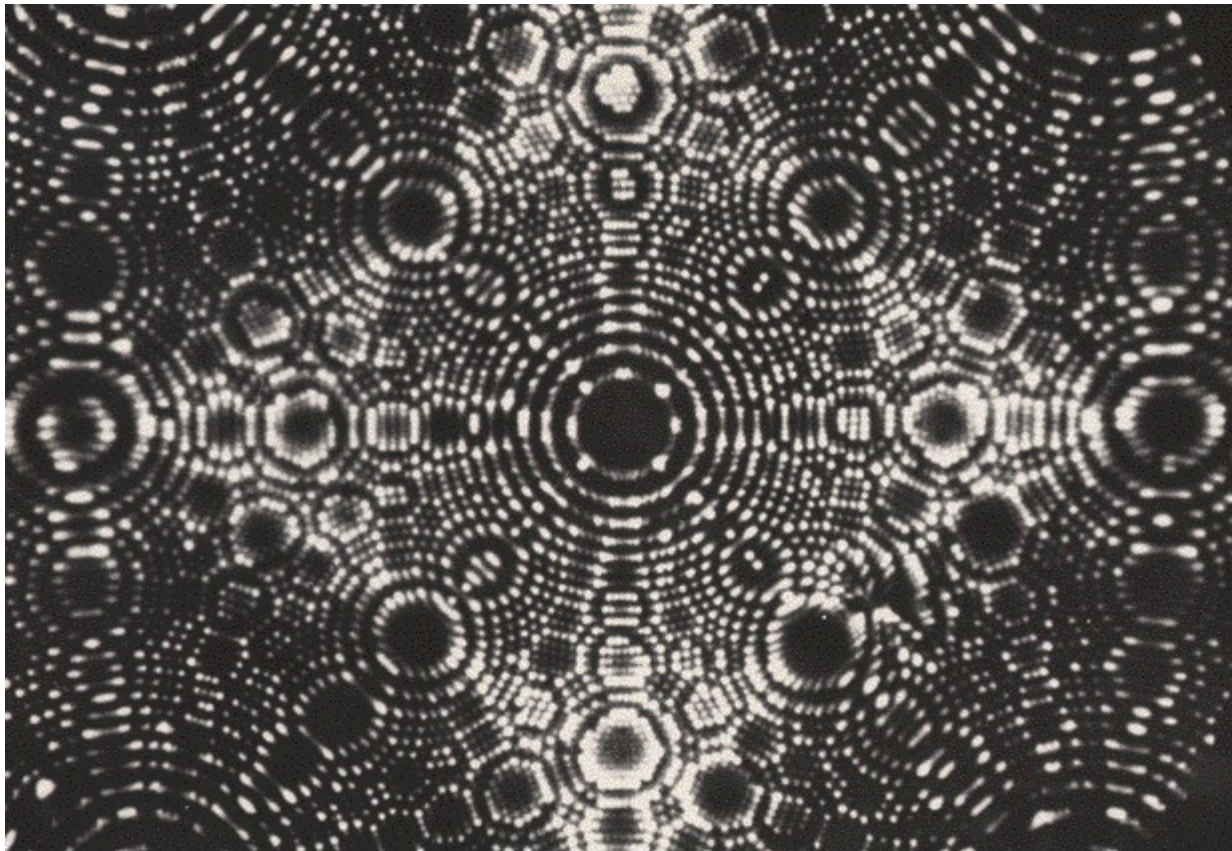
Il fatto è che le molecole di alcool hanno una forma particolare, e ciò consente loro di "riempire" gli invisibili interstizi che vi sono tra le molecole di acqua. Il logico risultato è che il volume complessivo della miscela risulta inferiore a 500 ml!

Nel corso del XIX secolo i chimici scoprirono che bastano un centinaio circa di tipi di atomi diversi per costruire tutta la materia che conosciamo, dai fiori alle galassie, da voi che leggete alla carta su cui sono impresse queste parole.

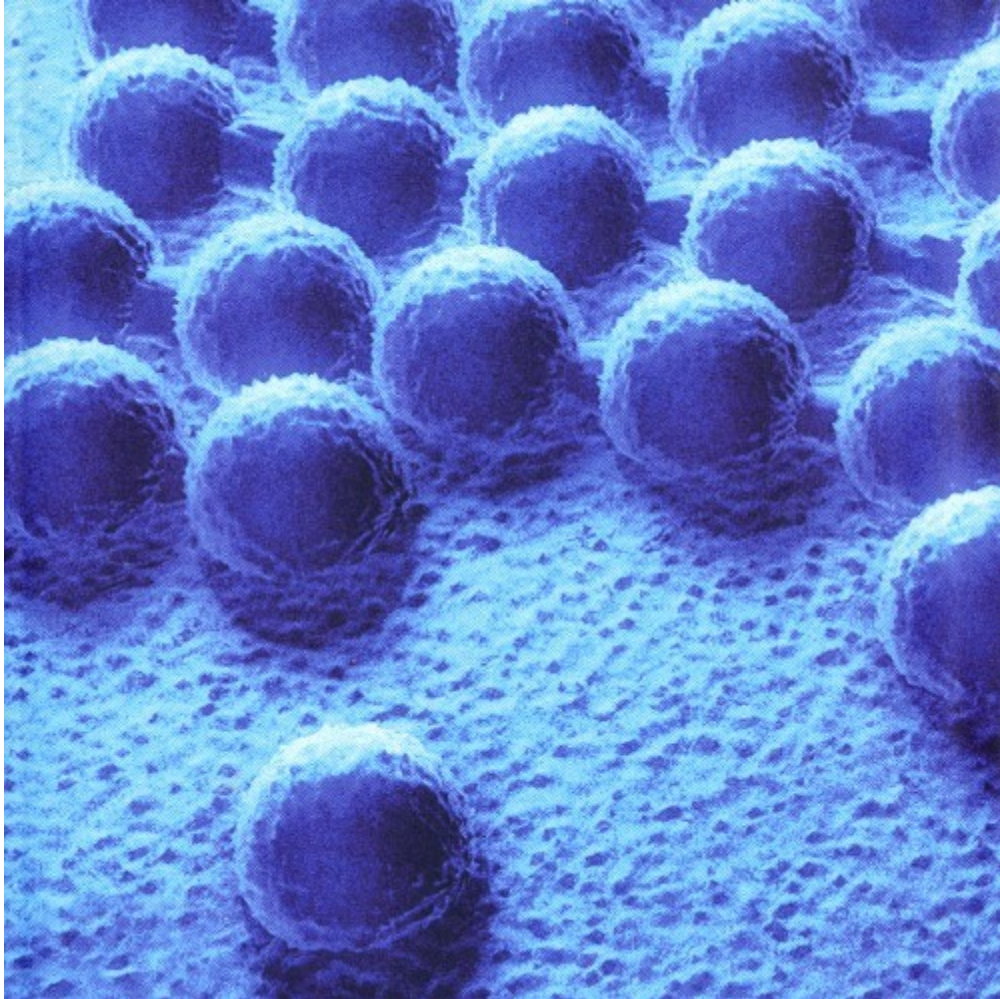


A tutt'oggi si conoscono **119 tipi diversi di atomi**, corrispondenti ai 119 elementi chimici. 119 mattoni soltanto per fabbricare tutto l'universo!!!

La realizzazione del microscopio elettronico ci ha permesso di percepire visivamente la presenza degli atomi. Ecco una foto realizzata con un microscopio a campo ionico di una punta in lega di platino-iridio; le figure che si vedono sono dovute alla **diffrazione** delle onde intorno ai singoli atomi!



Ancora migliori immagini ha permesso di ottenere, in tempi più recenti, il cosiddetto "microscopio a forza atomica", basato sull'interazione tra la materia e una leva elettrizzata di dimensioni microscopiche:



Decisamente questi atomi, che ci appaiono come delle **sferette**, sembrano fare onore al loro nome, che come sappiamo significa "indivisibile"!

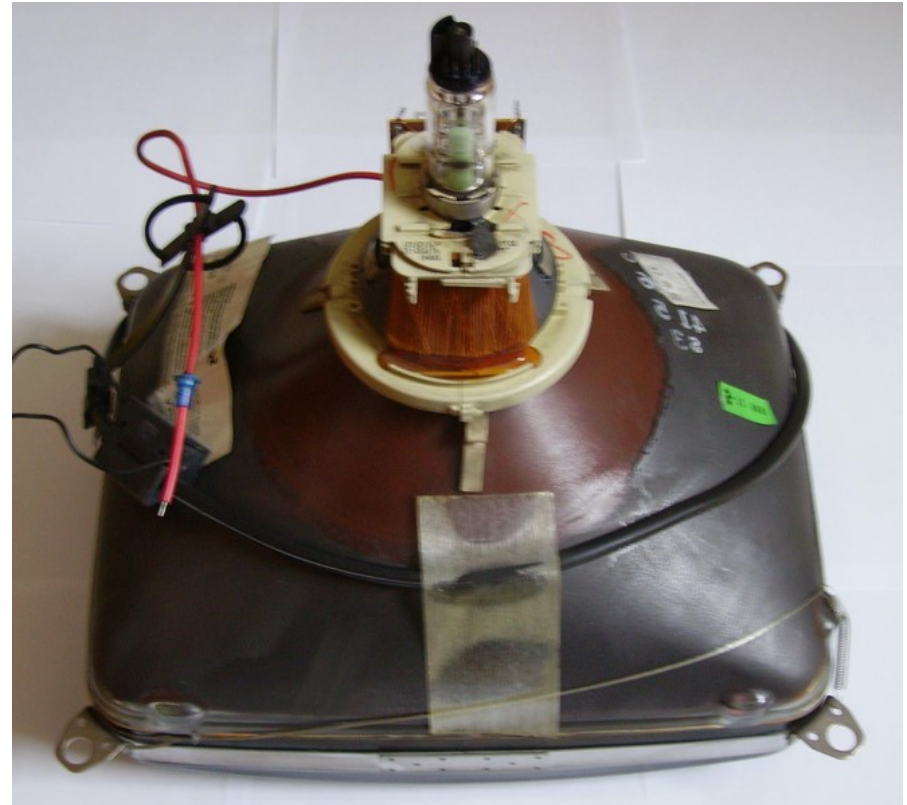
...Ma è proprio così?



Nel 1857 il tedesco **Heinrich Geissler** (1814-1876) inventò quelli che da lui presero il nome di Tubi di Geissler. In essi un gas inerte (Neon, Xenon, Argon) viene attraversato da una scarica elettrica ed inizia ad emettere luce. Oggi tutti conoscono questo fenomeno, perché un esempio di tubo di Geissler è la **lampada al neon**.

Il colore del tubo di Geissler dipende dal gas in esso contenuto. Ma perché? E perché i gas percorsi da elettricità producono luce?

William Crookes intuì che dentro il gas vengono prodotti misteriosi raggi da lui chiamati **catodici**, perché sembravano provenire dal catodo, cioè dal polo negativo, muovendosi verso quello positivo.



Ben presto si scoprì che questi raggi erano dotati di **massa**, perché facevano girare un mulinello, e di **carica elettrica negativa**, perché venivano deviati da un campo magnetico. I raggi catodici sono oggi sfruttati dentro gli schermi dei Pc e dei televisori; gli **screen saver** furono inventati proprio perché la massa di questi raggi, picchiando contro lo schermo, avrebbero finito per rovinarlo e per lasciarvi un'immagine impressa, se essa non fosse mutata in continuazione!

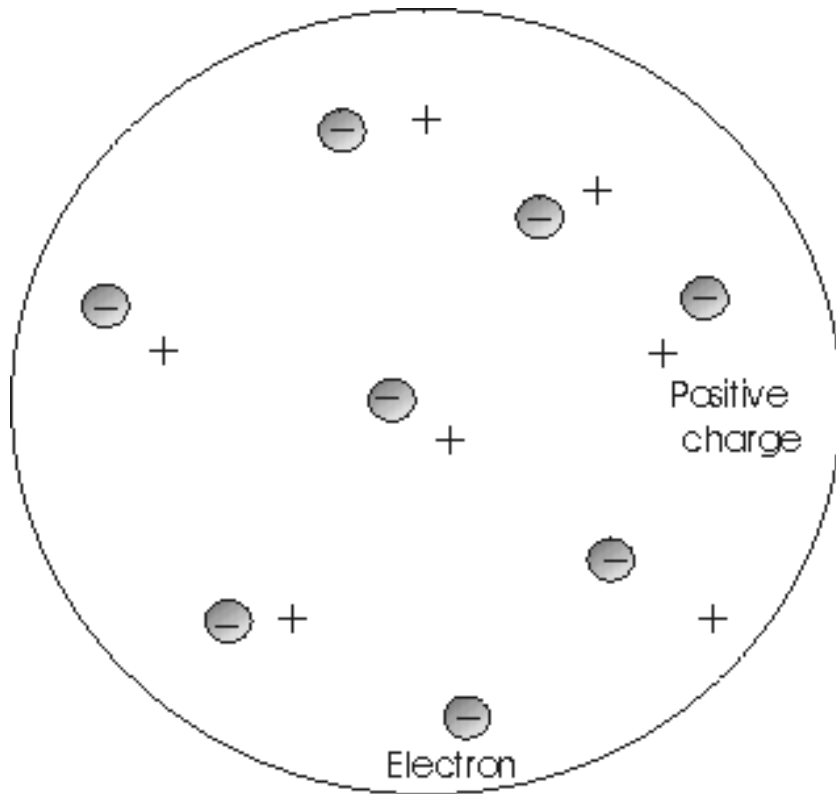
Il fisico inglese **Joseph John Thomson** (1856-1940) comprese che anche questi raggi avevano una struttura atomica; cioè, erano formati da minuscole particelle, fatte di pura carica elettrica negativa, che per questo chiamò **elettroni**.



Ma questi elettroni da dove sbucavano fuori? Vi era una sola possibilità: **essi venivano da dentro gli atomi**.

Un'affermazione del genere era a dir poco rivoluzionaria: per la prima volta, dai tempi dei Greci, gli atomi non risultavano più particelle indivisibili!!

Thomson ideò per primo un modello che guardava DENTRO L'ATOMO. Secondo lui esso era una sfera di carica positiva, in cui gli elettroni erano dispersi come l'uvetta nel panettone. Per questo si parla di "atomo a panettone".

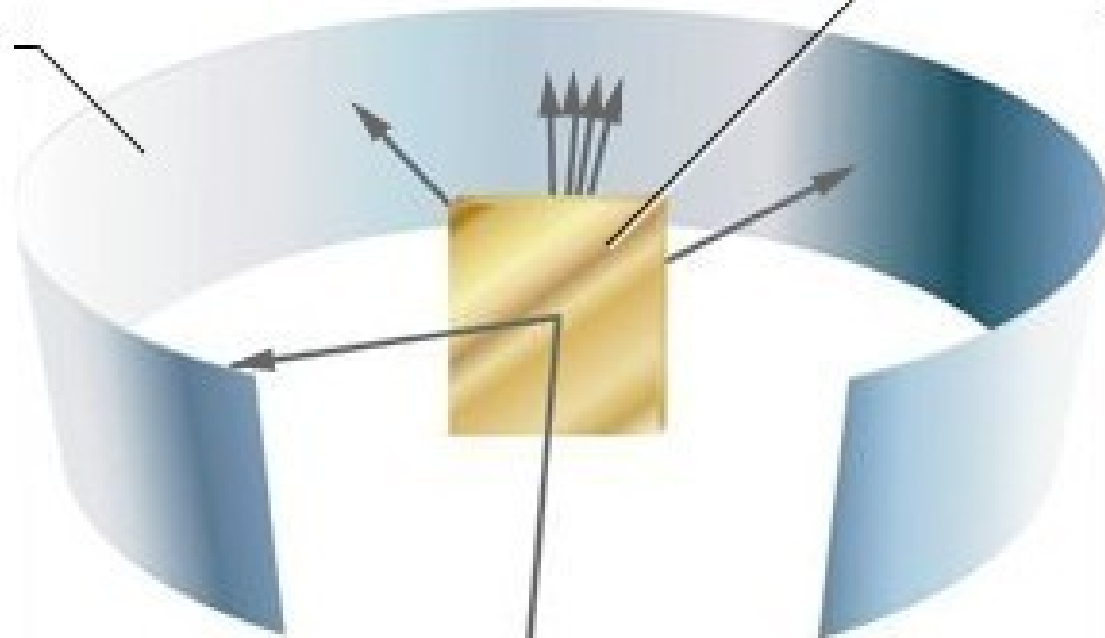




Nel 1911 il fisico neozelandese **Ernest Rutherford** (1871-1937), insieme ai suoi assistenti, bombardò una sottilissima lamina d'oro con **particelle Alfa**. Le particelle Alfa sono uno dei prodotti degli elementi radioattivi, ed oggi sappiamo che sono molto pesanti perché rappresentano degli atomi d'elio privati dei loro elettroni. Se il modello di Thomson fosse stato veritiero, le particelle Alfa sarebbero state deviate molto poco, così come dei proiettili sono ben poco deviati se si spara contro un covone di paglia. Ed invece...

Schermo
fluorescente

Lamina d'oro

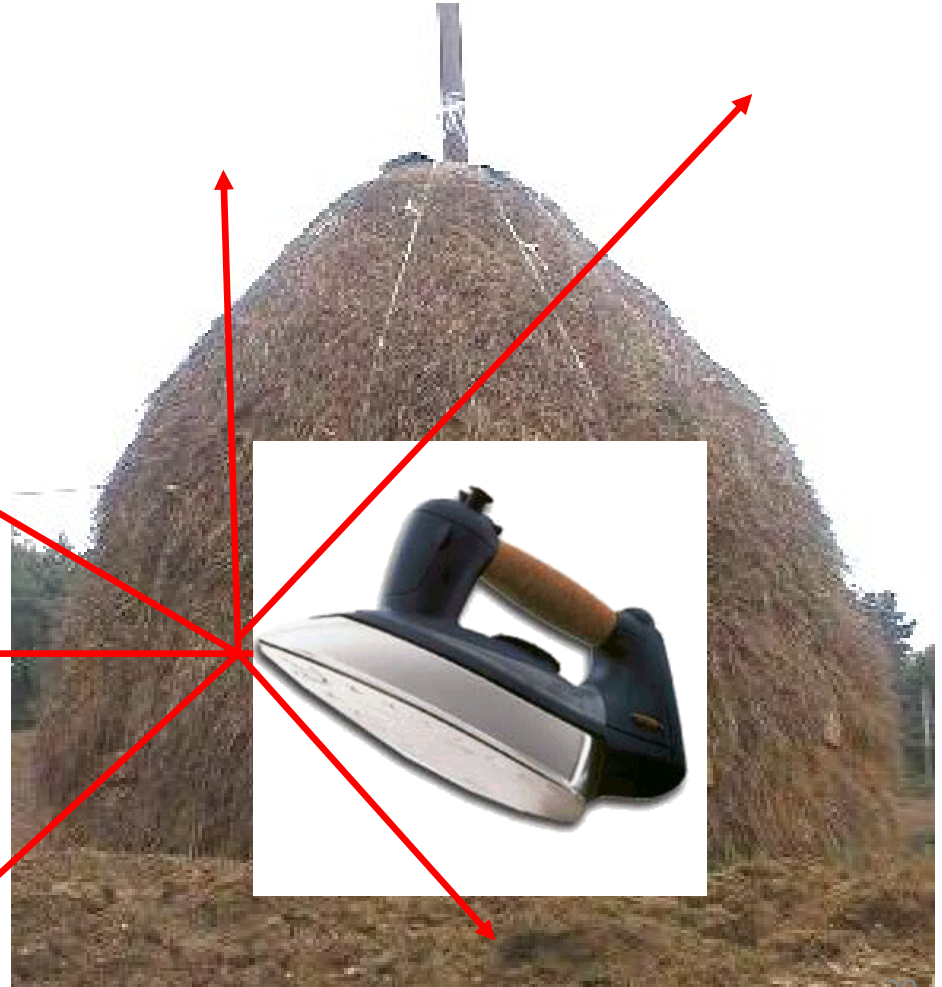


Invece le particelle alfa di Rutherford erano deviate di angoli grandi, e talora **tornavano addirittura indietro**. Com'era possibile?

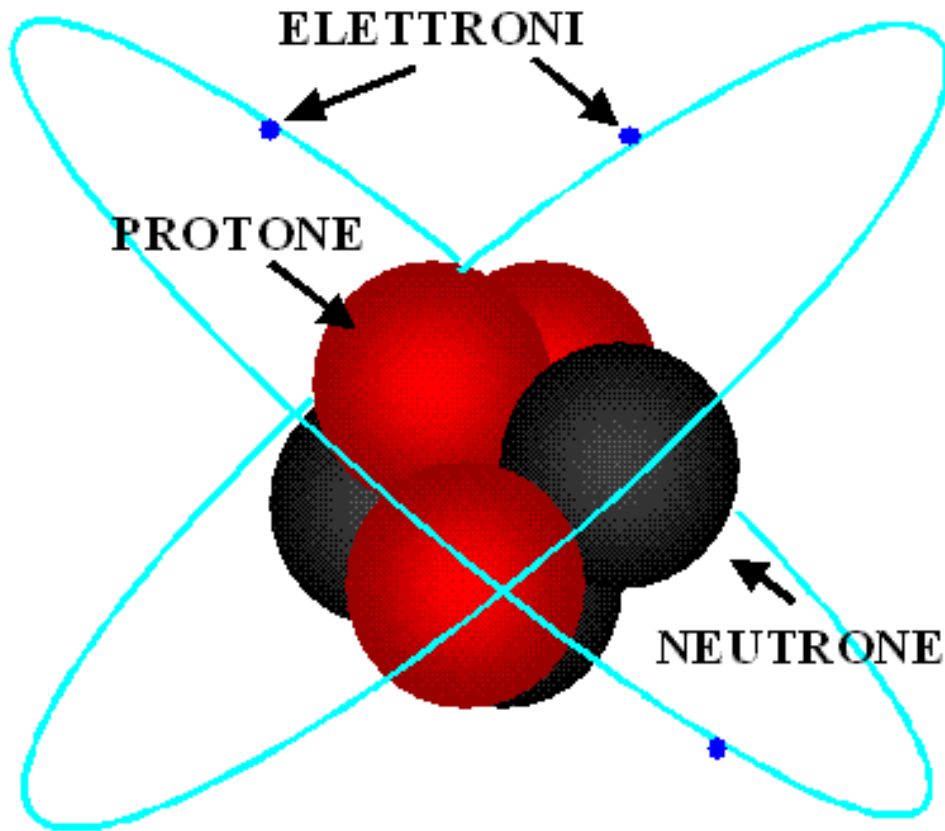
Particelle alfa

Se però nel covone fosse nascosto un ferro da stiro, i proiettili, rimbalzando su di esso, potrebbero anche essere deviati di molto.

Rutherford concluse perciò che nell'atomo ci deve essere una specie di "nocciolo", che lui chiamò **nucleo**.



Rutherford propose così un nuovo modello di atomo, nel quale gli elettroni ruotano attorno ad un nucleo 10.000 volte più piccolo dell'atomo, come i pianeti ruotano attorno al sole. È il "modello planetario".



Più tardi si scoprì che neanche il nucleo è indivisibile: è formato da particelle chiamate **protoni** (con carica uguale a quella dell'elettrone, ma positiva) e **neutroni** (senza carica). Un protone e un neutrone hanno una massa 2000 volte più grande di quella di un elettrone.

Con solo tre particelle (protone, neutrone, elettrone) sembrò possibile costruire tutti gli elementi a quel tempo ,conosciuti. Davvero la teoria atomica sembrò vicina a rappresentare la "**Teoria del Tutto**", cioè la tanto desiderata teoria fisica in grado di spiegare tutto quanto cade sotto i nostri sensi, ricercata dagli scienziati moderni così come i cavalieri di re Artù cercavano il mitico Santo Graal.



Anche il moderno Graal si rivelò però ben presto assai difficile da trovare. E questo, per "colpa" di un fisico scozzese, **James Clerk Maxwell**, vissuto nell'ottocento.

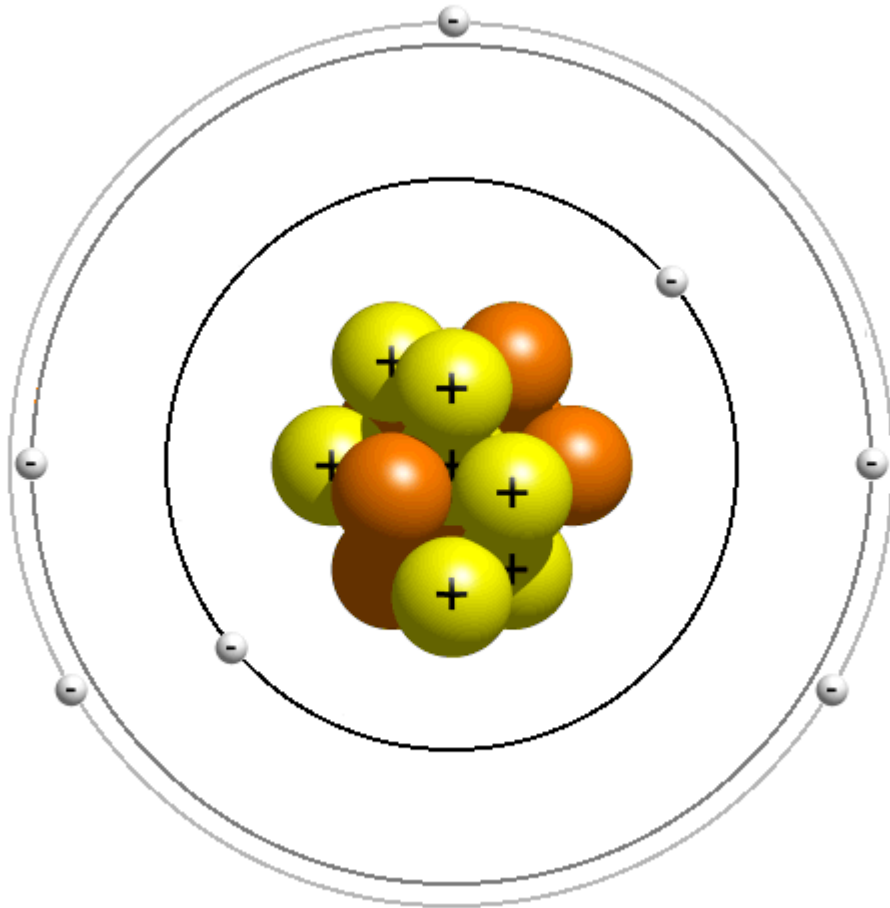
Maxwell, padre della teoria elettromagnetica, aveva infatti dimostrato che una particella che si muove di moto accelerato irraggia fatalmente tutta la propria energia. E questo era un disastro, perché gli elettroni in moto attorno al nucleo sono proprio accelerati dall'attrazione di questo. Ma allora gli elettroni dovrebbero perdere tutta la propria energia in una frazione infinitesimale di secondo, e ricadere sul nucleo.

Conclusione: **l'atomo di Rutherford è instabile.**



A salvare capra e cavoli venne un fisico danese, **Niels Bohr** (1885-1962). Questi dimostrò che, se gli elettroni possono seguire solo particolari "strade" attorno al nucleo, ruotano in esse **senza perdere energia.**

In altre parole, l'elettrone può possedere solo ben precisi valori di energia. Si dice che Bohr ha "quantizzato" l'atomo, costringendo l'energia dell'elettrone ad assumere particolari quantità (da cui il nome) di energia.



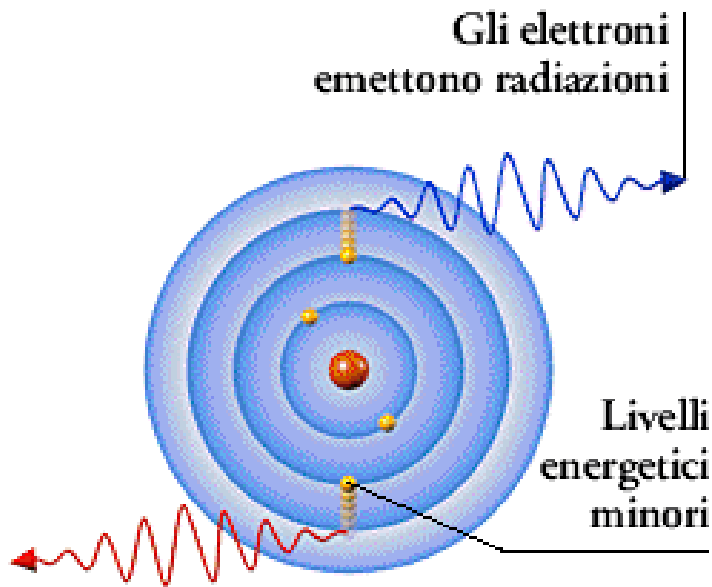
L'atomo di **AZOTO** secondo il modello di Bohr: solo orbite ben definite sono percorribili dagli elettroni.

Questa scoperta segnava il tramonto della meccanica classica ideata da Galileo e Newton, e ritenuta valida per 300 anni, e la nascita della meccanica quantistica, in cui l'energia non può assumere valori qualsiasi, ma può essere scambiata solo sotto forma di multipli interi di "pacchetti" fondamentali chiamati **QUANTI**.



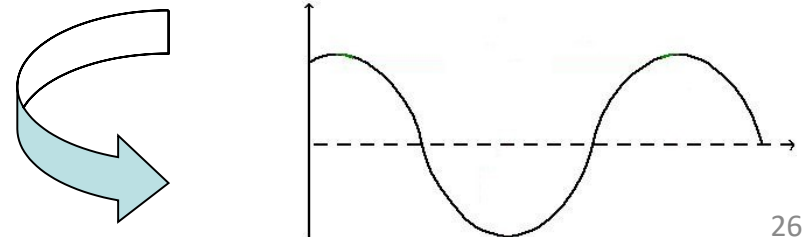
Le **uova** sono un semplice esempio di quantizzazione. Nessuno andrà mai a comprare mezzo uovo o tre quinti di uovo al mercato: si possono solo comprare multipli interi dell'unità fondamentale, cioè, appunto, un uovo.

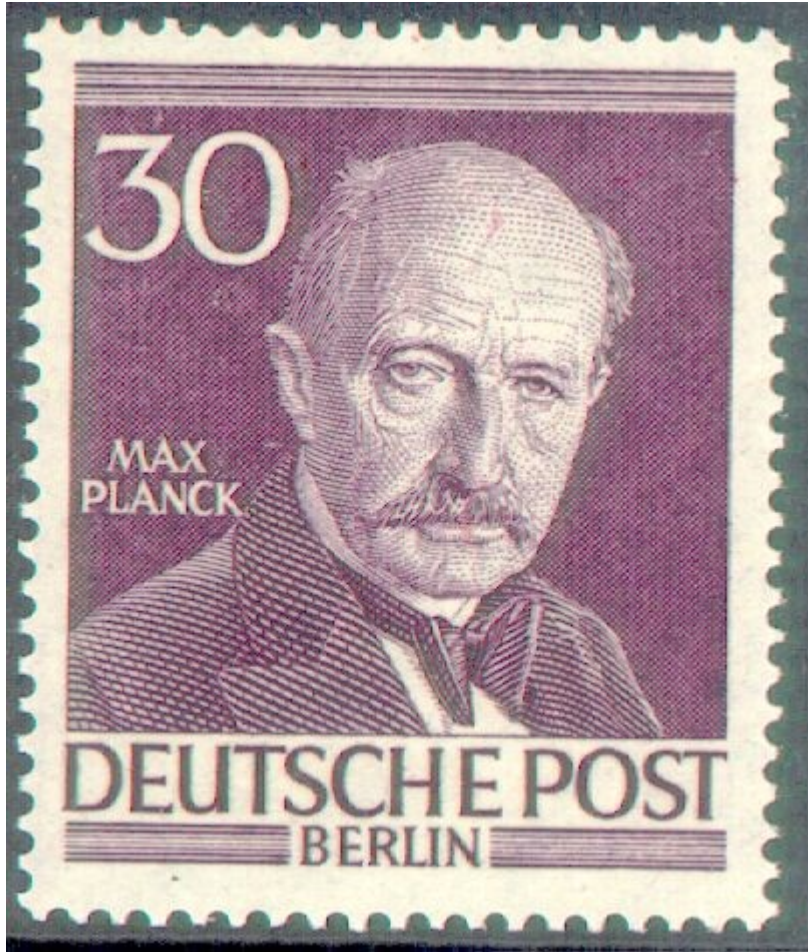
L'uovo in fisica è rappresentato dal quanto di energia.



Il modello quantistico dell'atomo permette anche di spiegare i colori assunti dalle fiamme. Infatti, scaldando gli atomi, i loro elettroni **SI ECCITANO**, saltano cioè su orbite più elevate, ma poi tendono a ritornare su quelle di partenza, e così emettono la differenza di energia tra queste due orbite sotto forma di radiazione

elettromagnetica, cioè di luce. Più è calda la fiamma, più energetica è l'emissione. Ma il fisico tedesco **Max Planck** (1858-1947) dimostrò che l'energia E di ogni quanto è proporzionale alla **FREQUENZA** f della radiazione, cioè raddoppiando l'energia raddoppia anche il numero di oscillazioni che essa compie in un secondo.



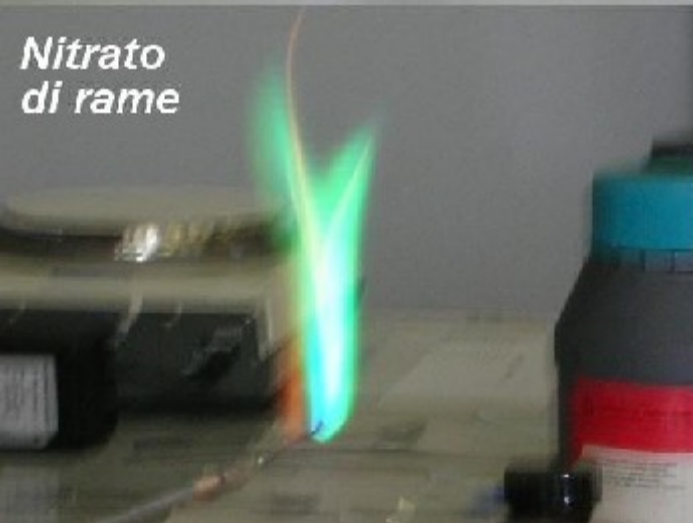
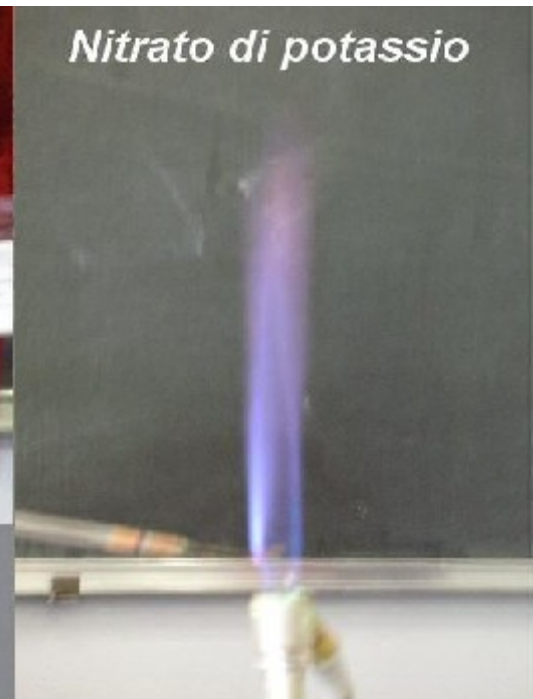


La luce rossa ha una frequenza minore, quindi meno energia; la luce blu ha invece una frequenza ed un'energia maggiori.

Ciò spiega tra l'altro perchè le stelle più fredde appaiono rosse, le stelle più calde azzurre. Ogni sostanza, scaldata alla fiamma, emette solo luce di una particolare frequenza (si dice che ha un suo particolare **SPETTRO**), e ciò non sarebbe possibile se gli elettroni non fossero vincolati a seguire orbite ben definite!

$$E = h f$$

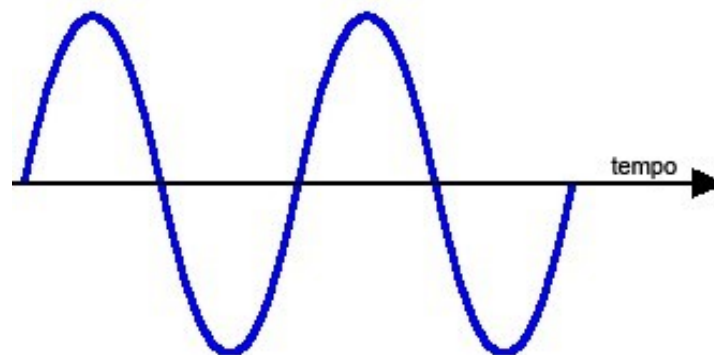
h = costante di Planck



Saggi alla fiamma

Dimostrazione, effettuata nel laboratorio di chimica, del fatto che ogni materiale, scaldato, emette solo una particolare frequenza luminosa.

Se però passiamo dalla meccanica classica a quella quantistica, succedono cose davvero strane, molto lontane dalla nostra vita quotidiana e dal senso comune. Il primo a rendersene conto fu il fisico francese **Louis Victor de Broglie** (1892-1989).



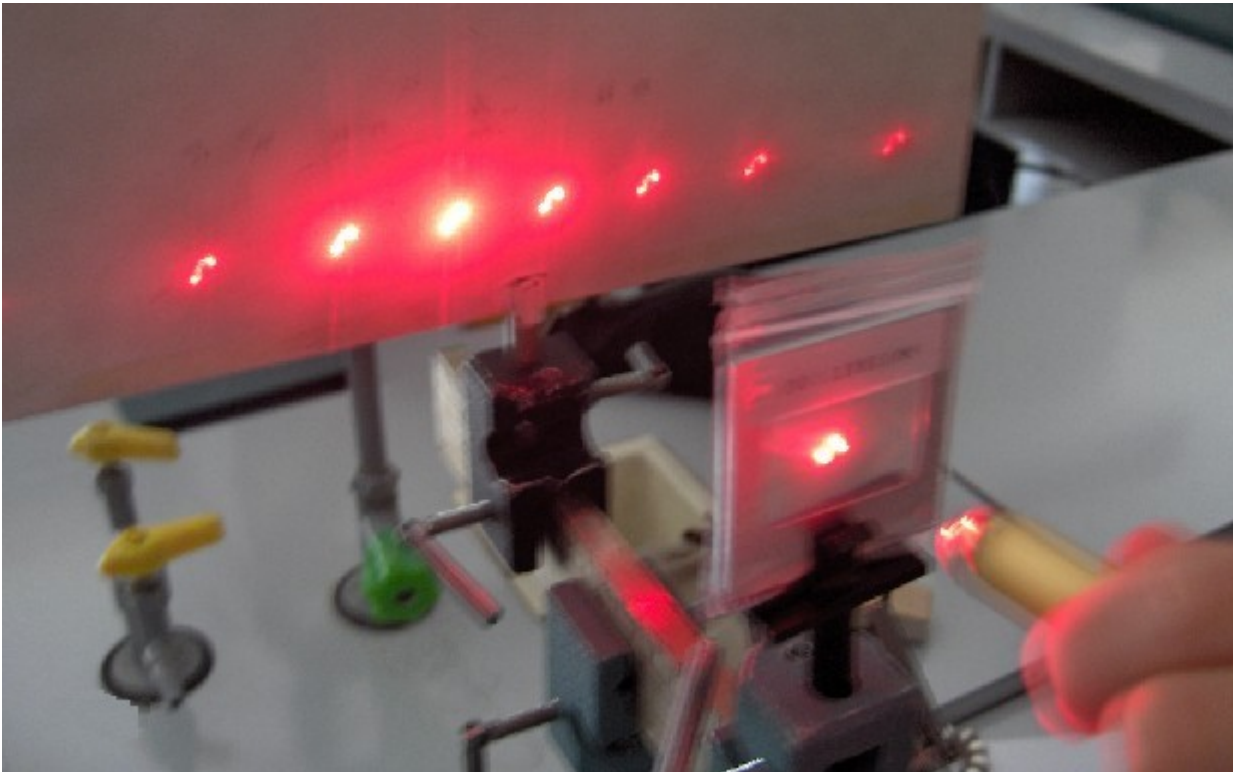
Nella sua tesi di laurea, de Broglie avanzò per primo l'ipotesi che le particelle abbiano una doppia natura, potendosi anche comportare come ONDE. Egli parlò per primo di **dualismo onda-particella**.

Un'onda è qualunque fenomeno che si propaga nel tempo e nello spazio. Lungo una corda agitata con una mano si propaga un'onda, ed anche la superficie del mare agitata dal vento viene increspata da onde, che si possono propagare per centinaia di Km.



Un'onda marina fotografata a Capo Verde

Che la luce è un'onda, e precisamente un'onda elettromagnetica, era stato dimostrato dal fisico inglese Thomas Young fin dal 1800, mostrando che essa presenta fenomeni tipicamente ondulatori come la **diffrazione**, cioè la capacità di aggirare gli ostacoli (cosa che i proiettili di una pistola non riescono certo a fare), o **l'interferenza**, cioè la capacità di due onde di raddoppiare o annullare la propria intensità quando si incontrano.



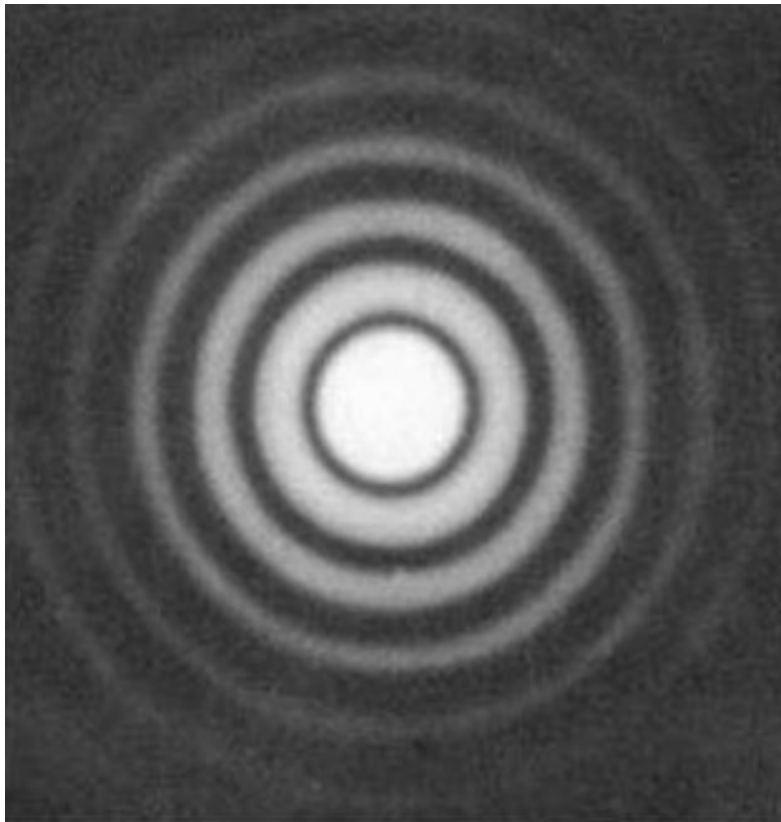
(interferenza
ottenuta con un
laser nel
laboratorio: si
notino i massimi e i
minimi alternati)

Tuttavia **Albert Einstein** (1879-1955) dimostrò che la luce, oltre ad essere un'onda, è anche formata da pacchetti discreti di energia (quanti) detti **FOTONI** (dal greco Phos, "luce"); questo è l'unico modo possibile per spiegare un fenomeno come l'**effetto fotoelettrico**, cioè l'emissione di elettroni dalla materia colpita dalla luce. Oggi questo fenomeno, per la cui interpretazione Einstein ricevette il Premio Nobel nel 1921, è alla base del funzionamento delle comunissime cellule fotoelettriche, nonché dei pannelli solari.



Pannelli fotovoltaici al Museo della Scienza e della Tecnica di Milano

Se però è difficile comprendere come la luce possa essere contemporaneamente un'onda e un fotone, da un punto di vista intuitivo proprio non si capisce cosa possano avere in comune l'oscillazione di una corda e una particella di materia.



Eppure, **George Paget Thomson** (1892-1975), per ironia della sorte proprio il figlio di quel Joseph John Thomson famoso per aver dimostrato che l'elettrone è una particella, mostrò come l'elettrone presenti anche fenomeni di interferenza e diffrazione, cioè una serie di massimi e di minimi alternati, come mostra la foto a sinistra, e quindi si comporta **ANCHE COME UN'ONDA!**

Il fisico austriaco **Erwin Schrödinger** (1887-1961) sostenne che, quando raggiunge una fenditura, l'elettrone si "trasforma" effettivamente in un'onda, detta **ONDA DI MATERIA**, e si "scioglie" in tutta la regione di spazio circostante, dando vita alla suddetta figura di diffrazione.



Egli scrisse anche una complicata equazione, detta oggi **equazione di Schrödinger**, che descrive il moto ondulatorio di qualsiasi particella, così come la legge di Newton $F = m a$ descrive il moto di ogni corpo secondo la meccanica classica.

F = forza, m = massa, a = accelerazione

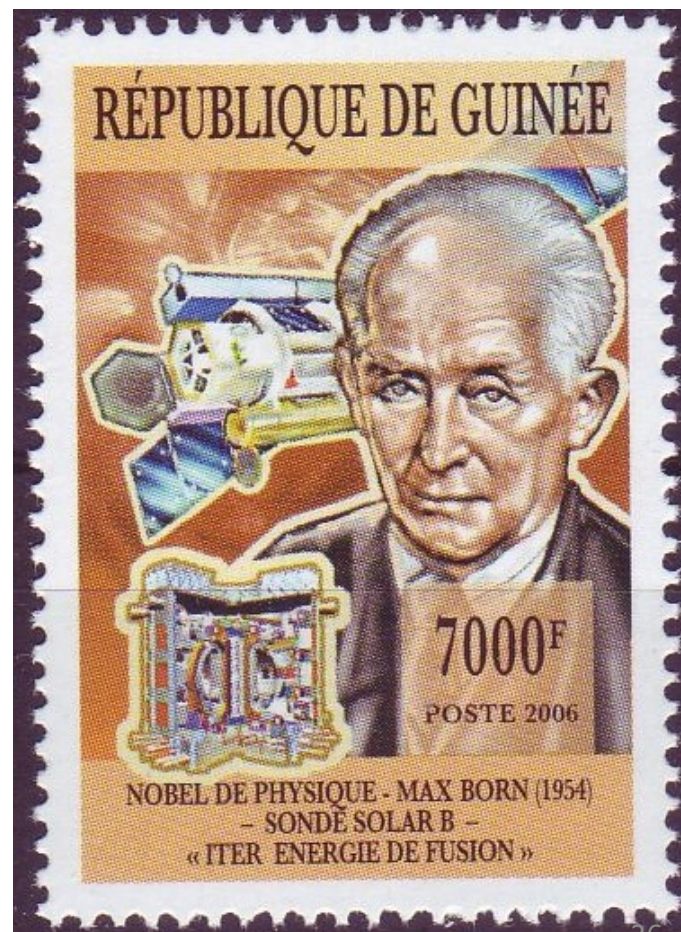
Un'esemplificazione del punto di vista dello scienziato austriaco è il cosiddetto paradosso del "**Gatto di Schrödinger**", un esperimento concettuale che richiede di sacrificare un povero gatto. In una stanza è chiuso quest'animale assieme ad una pistola puntata su di esso, comandata dal decadimento di un elemento radioattivo. Nella nostra intuizione comune, o l'elemento decade oppure no (TERTIUM NON DATUR), e non sono possibili vie di mezzo; dunque o il gatto è al 100 % vivo, o è al 100 % morto.



Invece, secondo Schrödinger, in uno stesso stato quantistico coesistono un 50 % di probabilità che l'elemento sia decaduto e un 50 % che non lo sia, **CONTEMPORANEAMENTE** (si dice che lo stato finale è una "sovrapposizione" dei due). Ne consegue che il gatto è, contemporaneamente, al 50 % vivo e al 50 % morto!

In tal modo il dualismo della meccanica quantistica fa clamorosamente irruzione nel mondo macroscopico, dove pensavamo che non avremmo mai avuto a che fare con simili paradossi.

Una possibile soluzione al problema del dualismo fu avanzata dal tedesco **Max Born** (1882-1970)

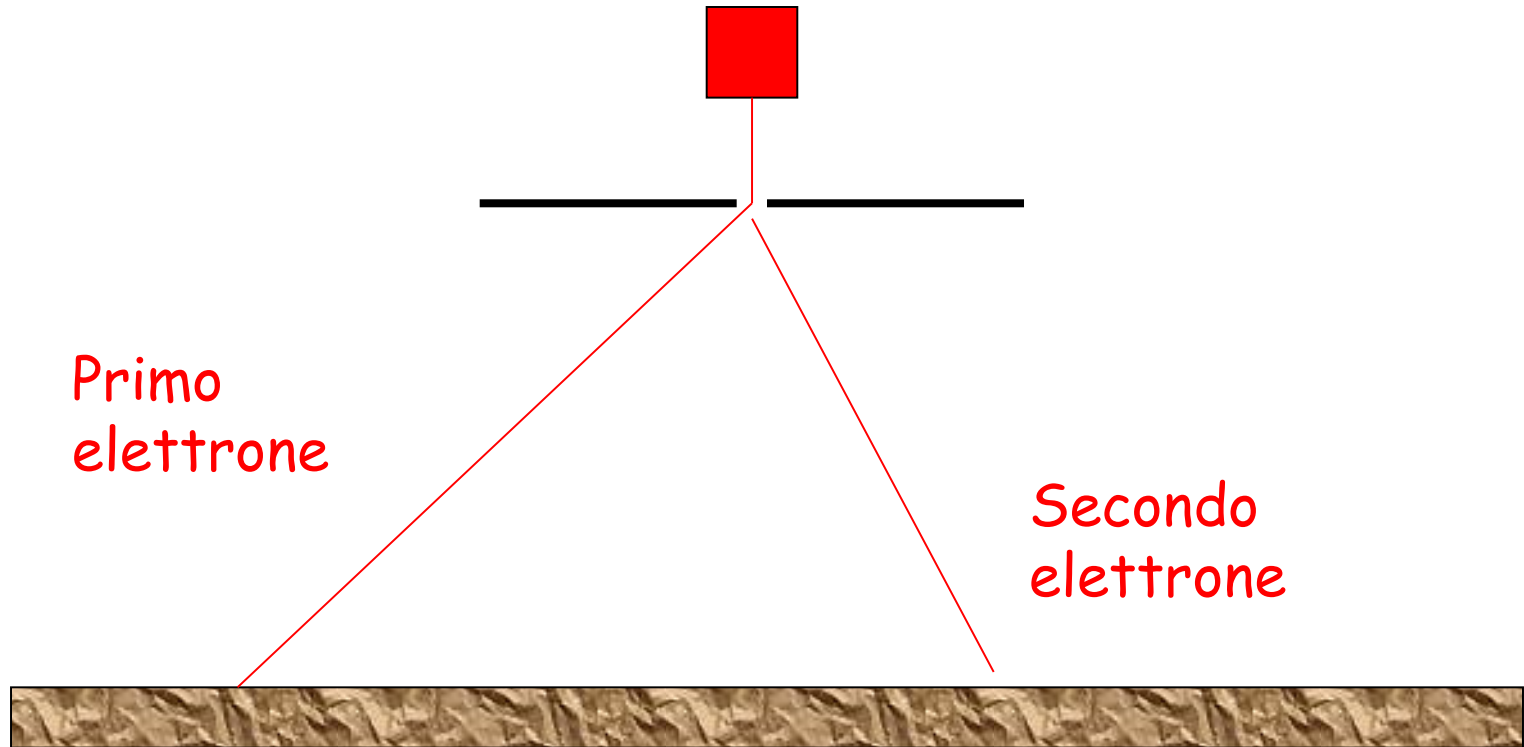


Secondo Born, tutto il dilemma è da ricondursi al concetto di **PROBABILITÀ**. La probabilità di un evento incerto è data dal rapporto tra il numero di casi favorevoli ad esso ed il numero di casi possibili. Ad esempio, la probabilità che esca testa lanciando una moneta è $1/2 = 50\%$, perchè su due casi possibili, testa e croce, solo uno è favorevole.

Ora, secondo Born, mentre la fisica classica è deterministica, cioè ammette una soluzione ben determinata per ogni problema, la meccanica quantistica è probabilistica, cioè io posso conoscere solo la probabilità che le particelle hanno di seguire una certa traiettoria.



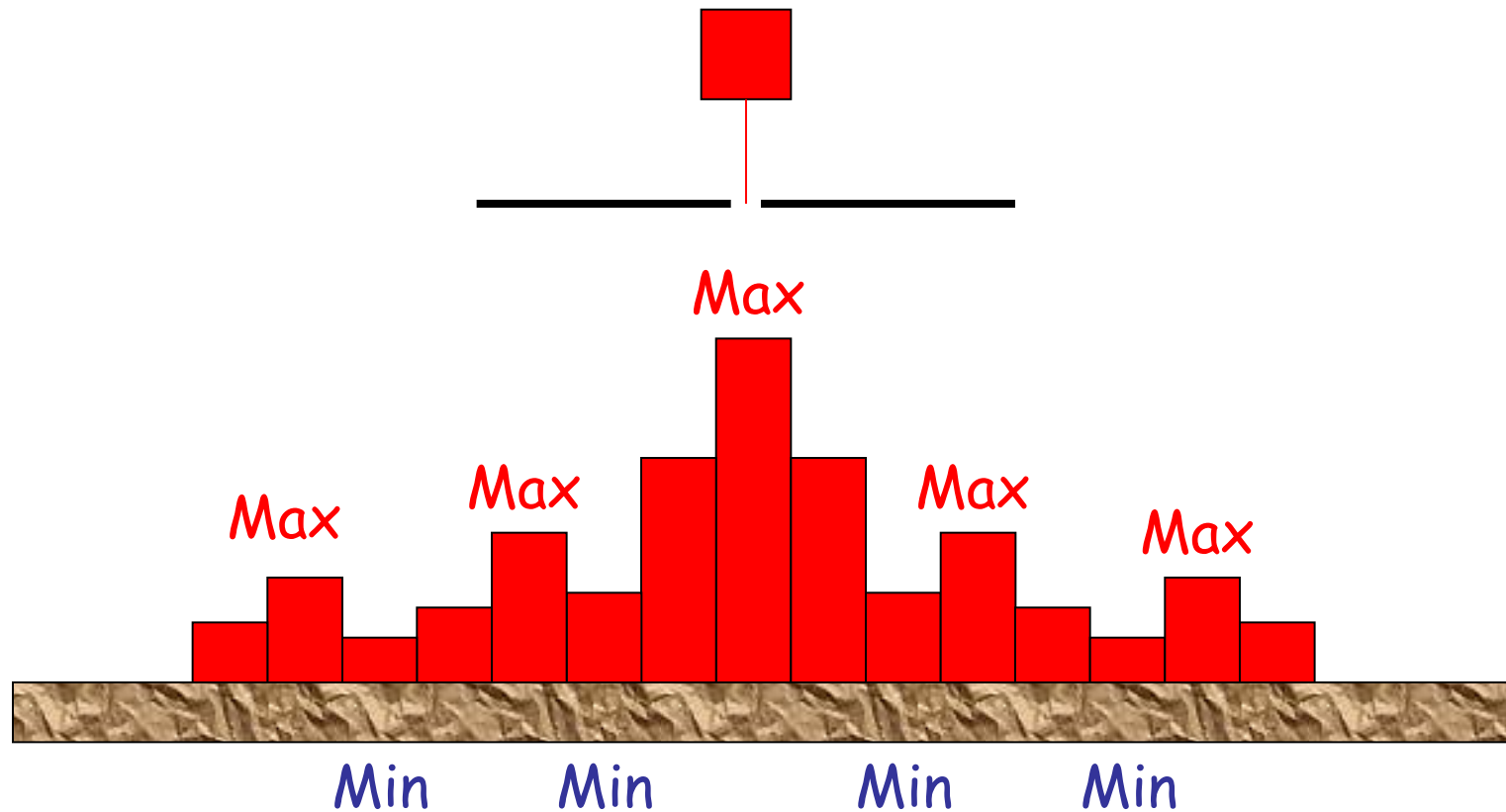
Così, immaginiamo che il mio tubo catodico possa emettere un solo elettrone. Dopo aver attraversato la fenditura, esso andrà in una certa posizione, senza sciogliersi in alcuna onda.



Se ne emette un secondo, anch'esso andrà in una determinata posizione, ma DIVERSA da quella del primo elettrone!

Così, se emetto un gran numero di elettroni, scopro che la distribuzione di probabilità che essi hanno di raggiungere lo schermo nei suoi vari punti, è identica alla figura di diffrazione con massimi e minimi alternati osservata da John Paget Thomson!

Conclusione: l'onda di materia degli elettroni è un'ONDA DI PROBABILITÀ!

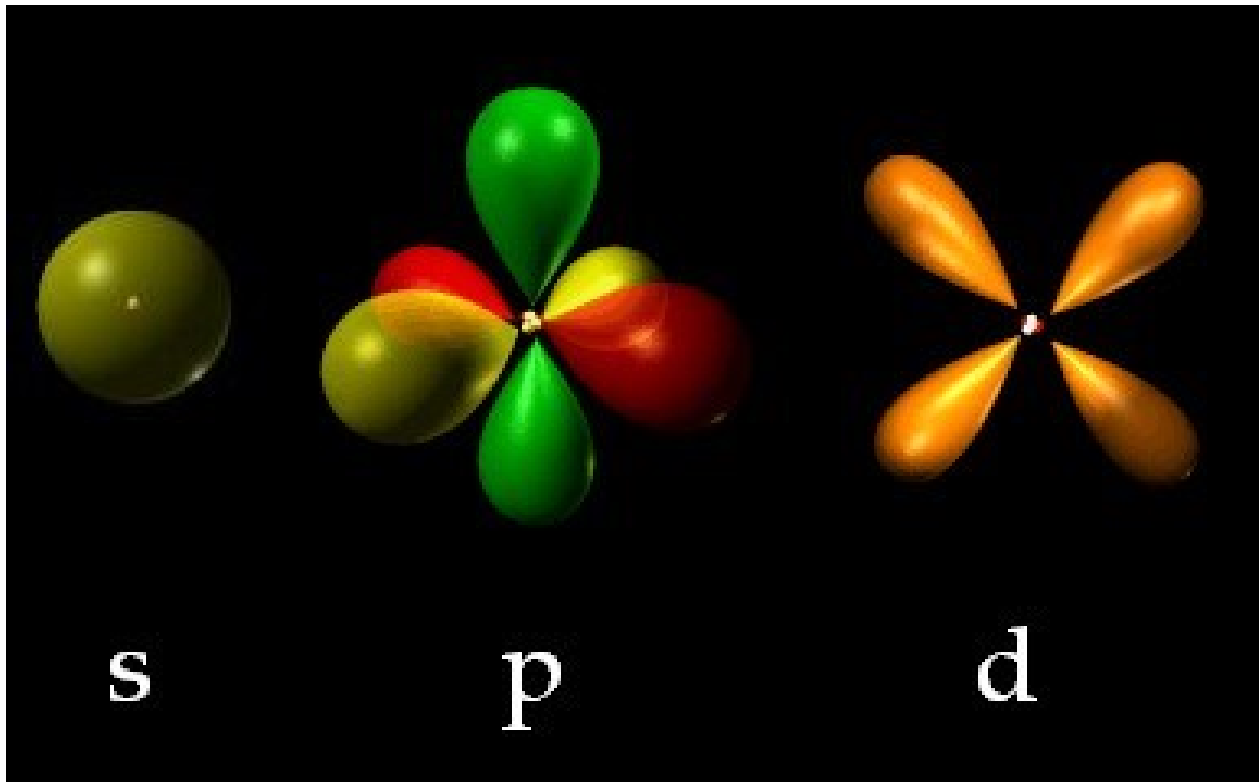


Il colpo di grazia alla visione "classica" del mondo fu data dal fisico tedesco **Werner Heisenberg** (1901-1976), il quale dimostrò che non si può conoscere con ugual precisione la posizione e la velocità di una particella quantistica.



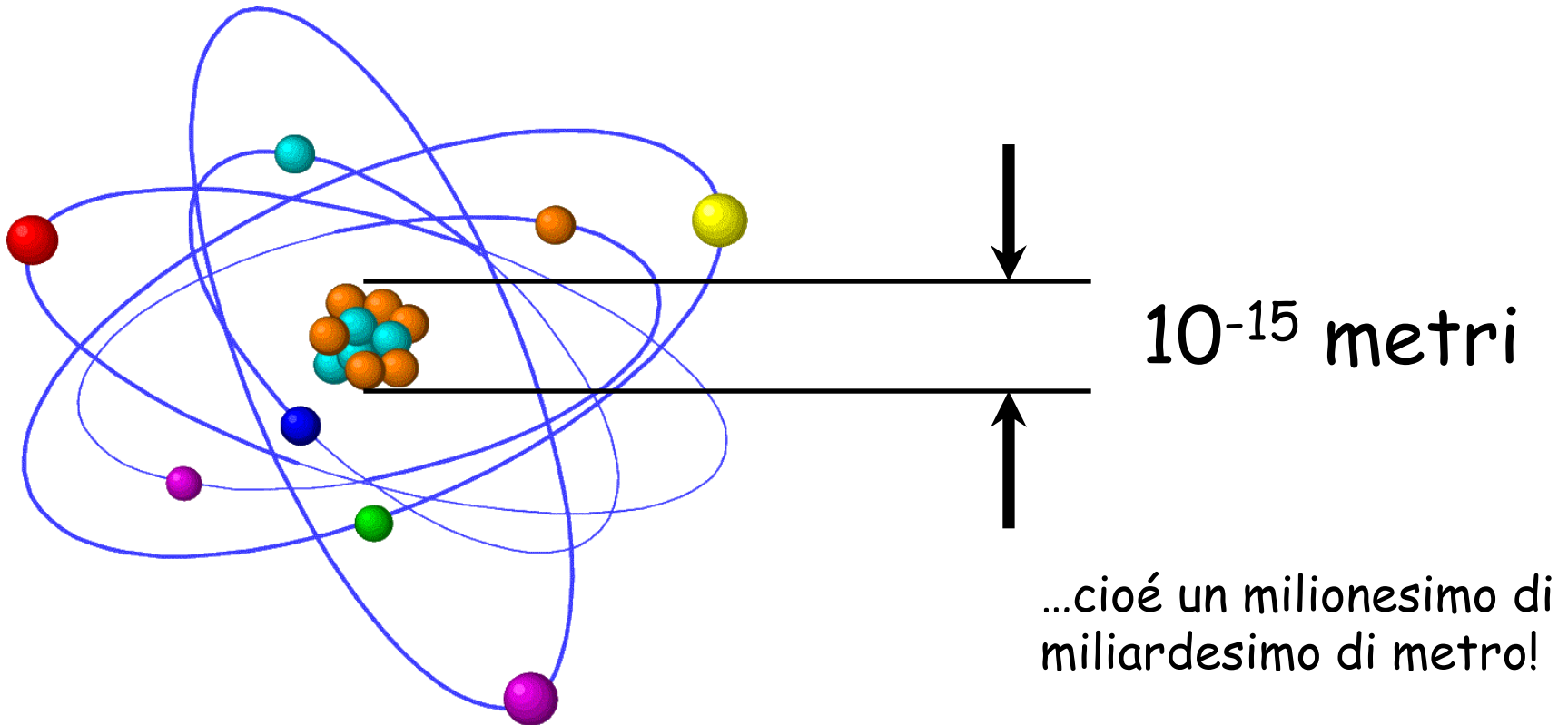
Meglio conosco la posizione, peggio conosco la velocità. Se so esattamente a che velocità va, ignoro dov'è, e viceversa. Questo fenomeno, noto ai fisici con il nome di **PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE**, pone un limite insormontabile alla nostra conoscenza del mondo subatomico, mentre invece la fisica classica prometteva di farci conoscere ogni grandezza con la precisione voluta.

Alla luce di tutto ciò, piuttosto che come un sistema solare in miniatura, l'atomo si configura come un nucleo circondato da "nuvole di probabilità", cioè da zone in cui vi è una certa probabilità, ma non la certezza, di trovare gli elettroni. Queste "nuvole" vengono chiamate **ORBITALI**, vengono indicate con lettere dell'alfabeto (s, p, d...) ed hanno forme artistiche, come mostra la figura: da una semplice sferetta fino a figure con molti lobi.



Fin qui abbiamo investigato con successo la struttura dell'atomo. Ma come investigare il cuore di esso, cioè il **NUCLEO**?

L'atomo è davvero piccolo: ce ne vogliono dieci milioni per coprire la lunghezza di un millimetro. Ma il nucleo è ancora enormemente più piccolo: se un atomo crescesse fino ad avere le dimensioni di un campo di calcio, il nucleo sarebbe piccolo come un pisello!

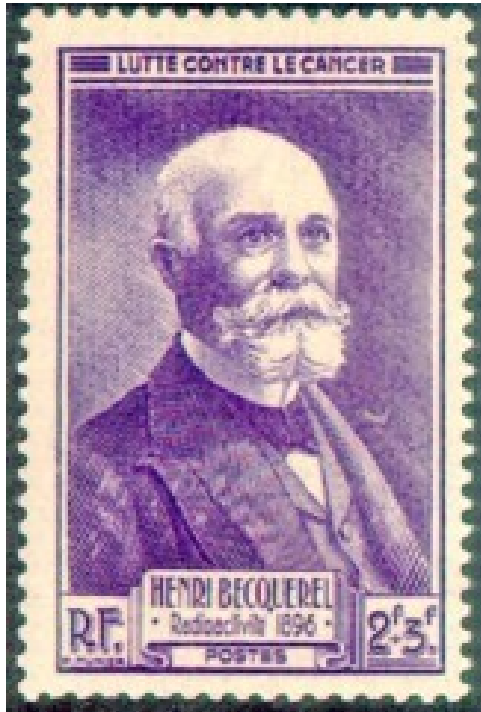


Come investigare su scale di grandezza così piccole?
L'impresa fu possibile non ad un uomo, bensì... ad una donna, e precisamente a **Marie Curie** (1867-1934), la più grande ricercatrice di tutti i tempi, insignita di ben due premi Nobel, uno per la fisica ed uno per la chimica!

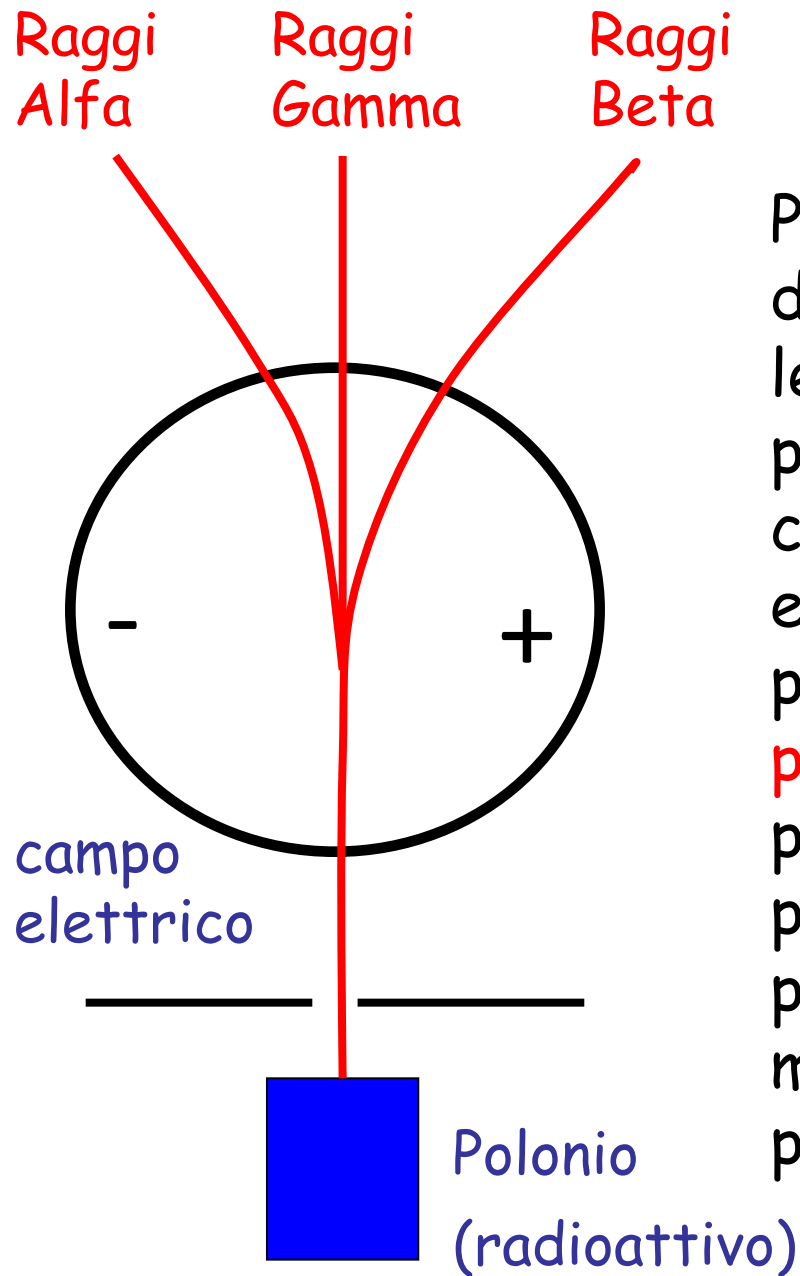


Maria Skłodowska era polacca ma, trasferitasi a studiare alla Sorbona di Parigi, conobbe il prof. Pierre Curie, che poi divenne suo marito.

Nel 1896 il francese **Henri Becquerel** (1852-1908) mise per caso delle lastre fotografiche protette nello stesso cassetto del suo studio in cui teneva dei sali d'uranio, e si avvide che esse erano rimaste impressionate comunque. Egli ebbe il merito di comprendere che ciò era dovuto ad ignoti raggi sprigionati dall'uranio. Era stata scoperta la **RADIOATTIVITÀ**.



I coniugi Pierre e Marie Curie fecero passare questi raggi attraverso un campo elettrico, e scoprirono che essi sono di tre tipi: raggi **ALFA** positivi, raggi **BETA** negativi e raggi **GAMMA** privi di carica elettrica.



Poco dopo Rutherford (il padre dell'atomo planetario) scoprì che le **particelle Alfa**, assai poco penetranti (basta un foglio di carta a fermarle), sono nuclei di elio, cioè sono formate da due protoni e due neutroni, mentre le **particelle Beta**, più penetranti, sono elettroni o positroni, che però non provengono dalle orbite atomiche, ma dall'interno del nucleo. Per la prima volta il nucleo era violato!

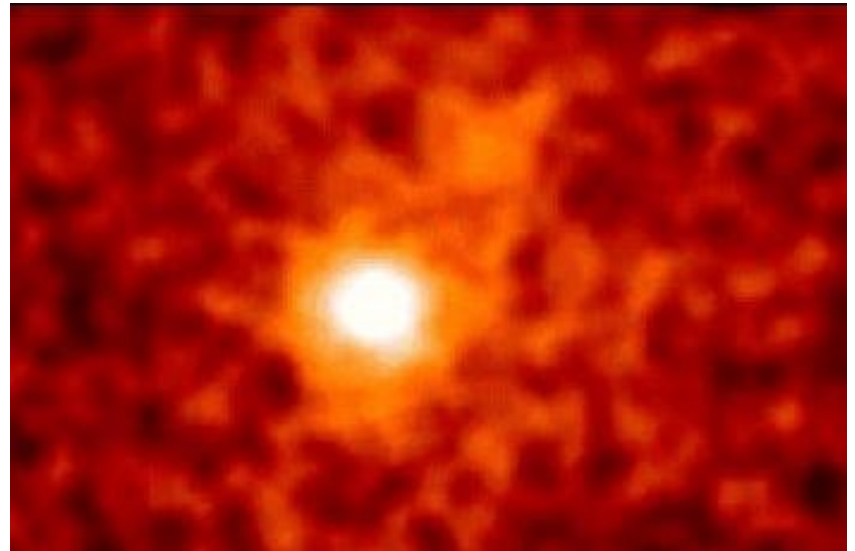
E i raggi Gamma?

Nel 1895, il tedesco **Wilhelm Röntgen** (1845-1923) scoprì dei raggi assai penetranti, da lui chiamati **raggi X** perché ne ignorava la natura, in grado di attraversare i muscoli umani (ma non le ossa). Questi raggi permisero le prime radiografie (la foto a destra è quella della mano dell'assistente di Röntgen) Si scoprì poi che i raggi X sono composti di fotoni, come la luce, ma con energia molto più elevata, e questa permette loro di attraversare il corpo umano, a differenza della luce visibile.



Anche i raggi Gamma, come si scoprì più tardi, sono costituiti da fotoni, cioè sono onde elettromagnetiche come la luce e i raggi X, ma hanno un'energia ancora più elevata, e quindi sono molto più penetranti: per fermarli non basta una parete di calcestruzzo. Essi risultano estremamente pericolosi per la salute umana, causando tumori e leucemie. Oggi sappiamo che essi provengono dalla **DISECCITAZIONE DEL NUCLEO**, così come la luce delle fiamme proveniva dalla diseccitazione degli elettroni atomici!

Nello spazio si verificano a volte terrificanti esplosioni di raggi Gamma, la cui natura è tuttora in parte ignota.





Vista la pericolosità delle radiazioni, occorre maneggiare le sostanze radioattive entro contenitori di materiali molto pesanti, come il **piombo**, in grado di arrestare tutti i tipi di raggi. I primi scienziati, presi dall'entusiasmo, maneggiavano le sostanze radioattive con troppa disinvoltura, e morirono tutti precocemente di tumore. Questo fu anche il destino di Marie Curie.

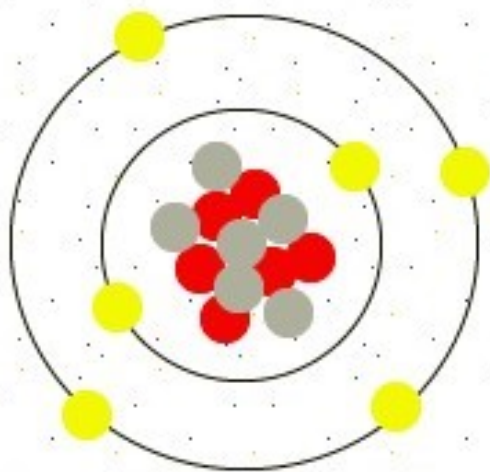
Tutto questo ci consente di affermare che le energie in gioco nel nucleo sono più alte di quelle in gioco nell'atomo.

La radioattività però ha una importantissima conseguenza: essa è in grado di trasformare un elemento chimico in un altro. È quella che si chiama la **TRASMUTAZIONE** degli elementi chimici.

Come sognava Harry Potter, sarebbe possibile trasformare il piombo in oro, realizzando la mitica PIETRA FILOSOFALE!



Ricordiamo che il **numero atomico Z** è il numero dei protoni di un atomo, la sua **massa atomica A** è il numero complessivo dei suoi nucleoni, cioè protoni e neutroni. Il carbonio-12 ha massa atomica $A = 12$ e numero atomico $Z = 6$, perché ha 6 protoni e $12 - 6 = 6$ neutroni.



Atomo di carbonio C
6 protoni
6 elettroni
6 neutroni
 $A = 12$

Se un elemento chimico subisce un decadimento di tipo Alfa, cioè se emette una particella Alfa, ovvero un atomo di elio che ha 2 protoni e 2 neutroni, esso si trasforma in un altro elemento con due protoni e due neutroni in meno. Per esempio, se il Radon-222 (che ha 86 protoni e 136 neutroni) subisce decadimento Alfa, si trasforma in un elemento che ha:

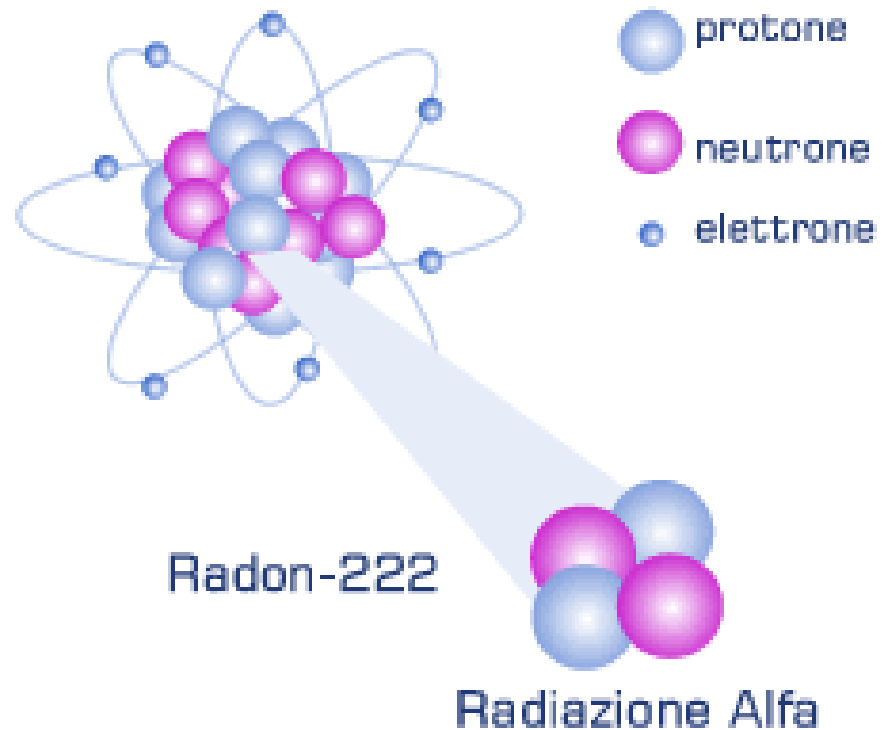
Numero atomico $Z = 86 - 2 = 84$

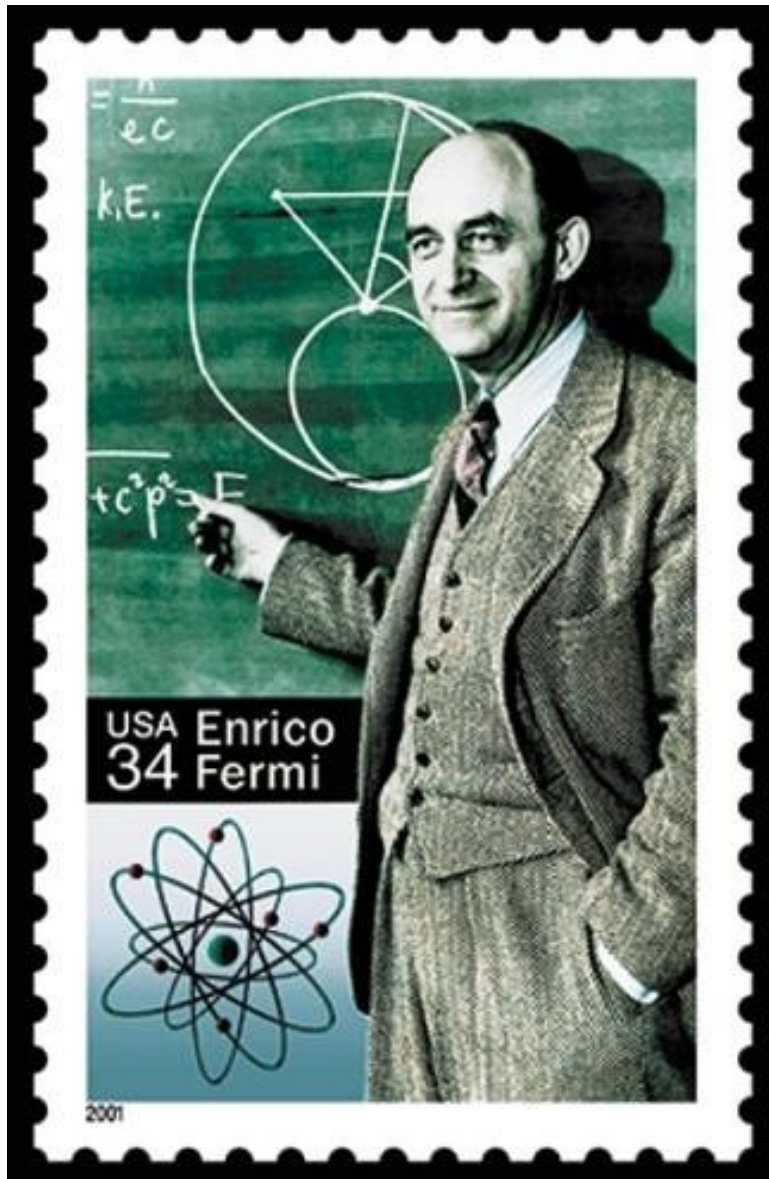
Massa atomica $A = 222 - 4 = 218$

L'elemento con 82 protoni non è più il Radon, ma il Polonio.
Ne consegue che, decadendo Alfa, un elemento trasmuta in uno più leggero (in questo caso Polonio-218).

E il decadimento Beta?
Come fa un elettrone a scaturire dal nucleo, se esso contiene solo protoni e neutroni?

La risposta fu fornita dal fisico italiano **Enrico Fermi** (1901-1954) presso l'istituto di Fisica di Roma in via Panisperna.





Fermi scoprì che un neutrone è stabile all'interno del suo nucleo ma, in condizioni particolari, può decadere in un protone, un elettrone e una particella leggerissima da lui chiamata **neutrino**, che fu osservata più tardi, nel 1956, da F. Reynes e C. Cowan. Se perciò un neutrone del nucleo diventa un protone, ciò significa che A resta lo stesso (le due particelle hanno circa la stessa massa), ma il numero atomico Z aumenta di uno!!

Si consideri un nucleo di Cobalto-60, che ha 27 protoni e 33 neutroni. Se esso subisce un decadimento Beta, si trasforma in un altro elemento che ha:

Numero atomico $Z = 27 + 1 = 28$ e Massa atomica $A = 60$

L'elemento con 28 protoni non è più il Cobalto ma il Nichel. Ne consegue che, decadendo Beta, un elemento trasmuta in uno con più protoni, in questo caso Nichel-60, emettendo proprio un elettrone (e^-) e un antineutrino (simbolo $\bar{\nu}$).

Decadimento β nucleare

