

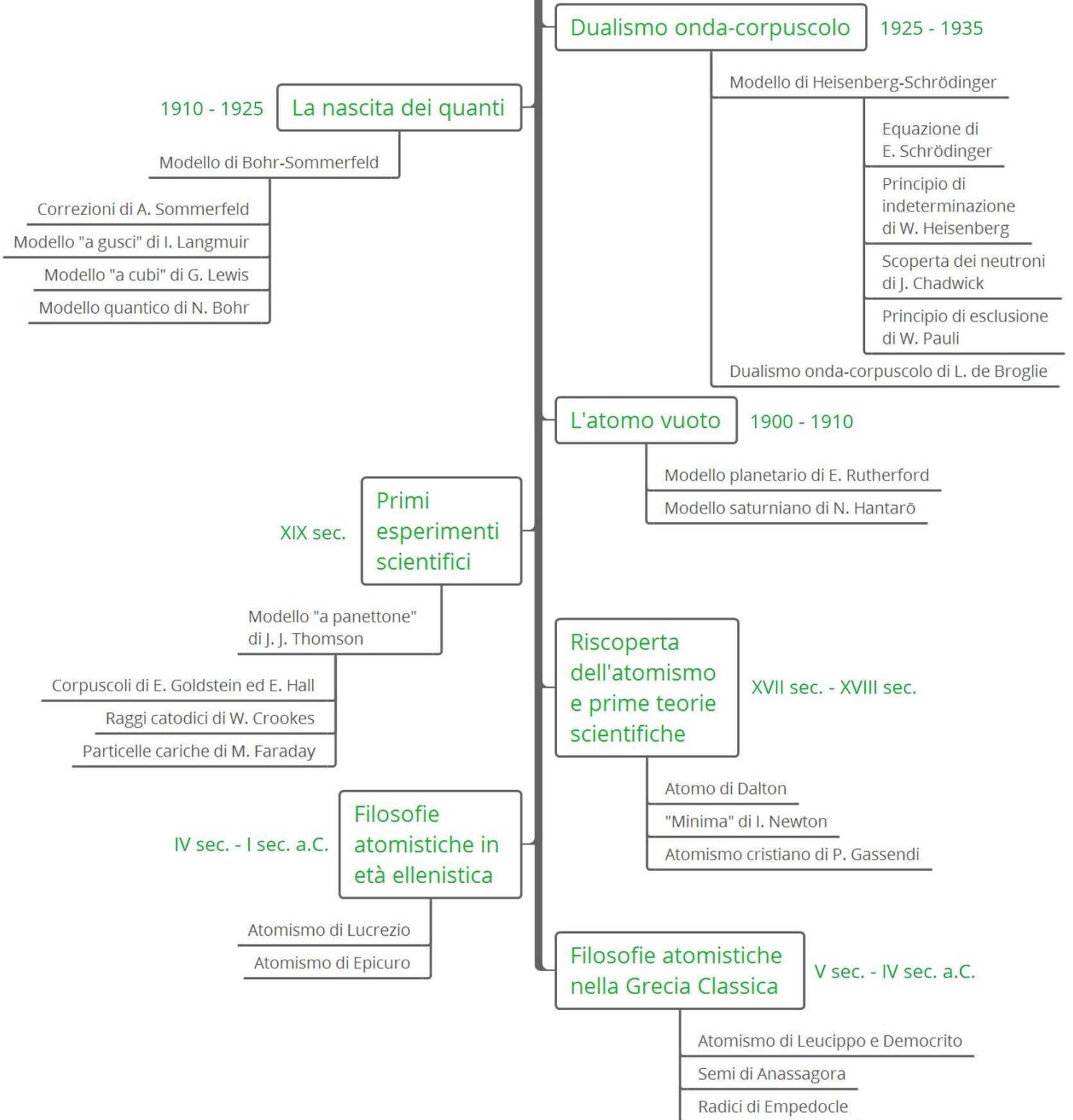
L'atomo

Dalle teorie filosofiche alle evidenze scientifiche

- **Filosofie atomistiche nella Grecia Classica**
- **Filosofie atomistiche in età ellenistica**
- **Riscoperta dell'atomismo e prime teorie scientifiche**
- **Primi esperimenti scientifici**
- **L'atomo vuoto**
- **La nascita dei quanti**
- **Dualismo onda-corpuscolo**
- **Modello Standard**

ATOMO

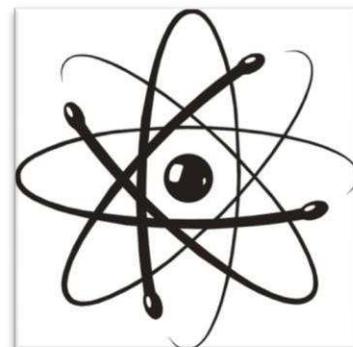
Oggi **Modello Standard**



In questo approfondimento andrò ad analizzare l'evoluzione dell'idea di atomo dalla nascita delle dottrine atomistiche alla forma con cui lo conosciamo noi oggi, attraverso un graduale passaggio dalle teorie filosofiche alle dimostrazioni scientifiche.

«Se si dovesse ridurre la storia della scienza a una dichiarazione importante, sarebbe questa:
tutte le cose sono composte da atomi.»

R. P. Feynman



Filosofie atomistiche nella Grecia Classica

Intorno al VII secolo a.C. nasce in Grecia la filosofia occidentale che, a differenza di quella orientale di stampo maggiormente religioso, cerca di dare una **spiegazione razionale** alle esperienze sensibili. Uno dei primi temi presi in esame, infatti, fu l'essere e, di conseguenza, la materia.

La visione della realtà dei primi grandi pensatori fu quella pluralista, secondo la quale la materia nella sua totalità è formata dall'aggregazione di più sostanze e non da un elemento unico.

Secondo **Empedocle** (V sec. a.C.) gli **elementi**, che lui chiamerà **radici** (rhizòmata), che **si uniscono e si disgregano** sono eterni e nel numero di 4, aria, acqua, terra e fuoco; le forze che determinano le interazioni tra radici sono quelle contrapposte di Amore (philia) e Odio (néikos): l'uno agisce come attrazione del dissimile, l'altro come separazione del simile. Quando prevale l'Amore si genera lo *sfero*, ovvero lo spazio

«Ma d'ogni parte uguale e per tutto infinito,
Sfero rotondo che di sua avvolgente solitudine gode»¹

mentre, quando a prevalere è l'Odio, la separazione totale dà origine al *caos*. Ogni situazione intermedia è chiamata *cosmo*.

Le cose emanano degli *effluvi* che, passando attraverso i pori degli elementi, permettono di essere percepite.

Anassagora (496 ca - 428 ca a.C.) espone una concezione della materia leggermente diversa da Empedocle. Nella sua filosofia, infatti, tutto è formato da una mescolanza di **semi** (spérmata), che obbediscono all'organizzazione di una materia più sottile, l'*intelletto* (noûs). L'uomo percepisce la materia in varie forme perché è in grado di riconoscere solamente le qualità dei semi prevalenti. In comune con le radici di Empedocle, i semi hanno solo la caratteristica di essere **infinitamente divisibili**.

¹ Empedocle, framm. 31 B 28

«Del piccolo infatti non c'è il minimo ma sempre un più piccolo (in effetti è impossibile che ciò che è non sia) - ma anche del grande c'è sempre un più grande: e per quantità è uguale al piccolo e in relazione a se stessa ogni (cosa) è grande e piccola.»²

Alle filosofie pluraliste appartiene anche la **teoria atomistica** di **Leucippo** (V sec. a.C.), che verrà poi ripresa con poche variazioni da **Democrito** (460 ca - 370 ca a.C.), tanto da risultare difficile, a causa anche delle poche e incerte opere arrivateci del primo, una distinzione tra i due. Secondo l'atomismo la materia è costituita da **particelle elementari impercettibili e indivisibili** (per questo successivamente furono chiamate **atomi**) che si muovono nel vuoto e si aggregano, secondo principi di complementarietà, formando i corpi. L'essere è costituito quindi da atomi **vaganti nel vuoto** e ciò che l'uomo percepisce non è la cosa reale, ma la sensazione data da dei simulacri (*éidōla*), minuscoli corpi che si staccano dall'oggetto e colpiscono gli organi sensoriali umani. Il mondo percepibile dunque è formato dalla miscela di atomi e vuoto, che non potrebbero essere percepiti se isolati.

«Apparenza è il dolce, apparenza l'amaro, apparenza il caldo, apparenza il freddo, apparenza il colore; realtà solo gli atomi e il vuoto.»³

Agli atomi appartengono solo le caratteristiche relative al **peso** e alla **forma geometrica**, mentre tutte le altre sono proprie dei corpi generati dall'aggregazione degli atomi stessi.

La dottrina democritea subì le dure critiche di quelle platonica e aristotelica, motivo per il quale la sua diffusione non fu particolarmente eccezionale, tuttavia non cadde nell'oblio grazie alla sua ripresa nella filosofia di Epicuro.

Filosofie atomistiche in età ellenistica

Epicuro (341 - 271 a.C.) ripropose quasi invariata la teoria atomica di Democrito, compreso l'aspetto dei simulacri. Le forme degli atomi, però, non solo non sono più infinite, ma addirittura in numero abbastanza piccolo da essere concepito dalla mente umana.

«Anche fra i corpi, poi, alcuni sono aggregazioni, altri sono gli elementi da cui si formano le aggregazioni: e questi ultimi sono indivisibili e immutabili [...], ma certi elementi perdurano saldi anche nella dissoluzione degli aggregati, perché sono di per sé compatti e non esiste modo o parte in cui si possano dissolvere: ne consegue che gli elementi primari da cui i corpi sono costituiti sono necessariamente per natura indivisibili.»⁴

² Anassagora, framm. 3

³ Democrito, framm. 3

⁴ Epicuro, Epistola ad Eradoto, 40-41

Agli atomi anche nella filosofia epicurea appartengono solo le caratteristiche di forma, grandezza e peso, ma quelle *sintomali*, che riguardano solo i corpi composti, non sono più considerate meno “autentiche”, come avveniva in Democrito.

«Bisogna inoltre ammettere che gli atomi non hanno nessuna proprietà delle cose del mondo fenomenico, se non la figura, il peso e la grandezza [...]»⁵

La vera novità è il moto degli atomi: non sono più dispersi nel vuoto, ma, avendo un proprio peso, sono **soggetti alla gravità**, per cui cadono verticalmente. La caduta verticale può subire una minima declinazione (*parénklisis*), che comporta l’aggregazione tra più atomi, quindi la nascita delle cose.

A **Lucrezio** (94 ca - 50 ca a.C.) si deve, in epoca romana, la rinascita della teoria atomica. Nel poema didascalico *De Rerum Natura*, Lucrezio riprende in toto le considerazioni Epicuree sull’atomismo.

Il **vuoto**, in cui è posta la materia, **deve obbligatoriamente esistere**, altrimenti non solo non esisterebbe il movimento, ma neanche il divenire.

*«Tum porro locus ac spatium, quod inane vocamus,
si nullum foret, haut usquam sita corpora possent
esse neque omnino quoquam diversa meare.»⁶*

Se non esistesse l’estensione e lo spazio, che chiamiamo vuoto, i corpi non potrebbero esser posti in alcun luogo, né muoversi verso alcun luogo per diverse vie.

È interessante però la precisazione di Lucrezio sulla natura degli atomi: se corpo e vuoto sono entità opposte, che si respingono, **è necessario che gli atomi**, chiamati **principi** o **corpi primi**, **siano pieni**. Questo aspetto probabilmente ha influenzato, data la scarsità di evidenze scientifiche e il grado non elevato della conoscenza scientifica, i primi modelli atomici proposti degli scienziati del XIX secolo ed è curioso paragonarlo alle scoperte del ‘900.

*«nam qua cumque vacat spatium, quod inane vocamus,
corpus ea non est; qua porro cumque tenet se
corpus, ea vacuum nequaquam constat inane.
sunt igitur solida ac sine inani corpora prima.»⁷*

Difatti, dovunque si estende lo spazio, che chiamiamo vuoto, lì non v’è corpo; d’altra parte, dovunque sta un corpo, lì non v’è assolutamente uno spazio sgombro, vuoto. Sono dunque solidi e senza vuoto i corpi primi.

⁵ ibidem, 54

⁶ Lucrezio, *De Rerum Natura* I, vv. 426-428

⁷ ibidem, vv. 507-510

Lucrezio allega all'enunciato delle sue tesi spiegazioni approfondite. Proprio lo stato solido degli atomi, viene giustificato mostrando come corpi solidi possano generare un fluido, ma corpi fluidi non possano generare un solido.

*«[...] solidissima materiai
corpora cum constant, possint tamen omnia reddi,
mollia quae fiunt, aer aqua terra vapores,
quo pacto fiant et qua vi quaeque gerantur,
admixtum quoniam semel est in rebus inane.
at contra si mollia sint primordia rerum,
unde queant validi silices ferrumque creari.»⁸*

[...] sebbene i primi corpi della materia siano solidissimi, tuttavia le cose molli che si producono, l'aria, l'acqua, la terra, i vapori, si può spiegare in che modo si producano e per qual forza tutte si svolgano, una volta che nelle cose è commisto il vuoto. Ma per contro, se supponiamo molli i primi principi delle cose, non si potrà spiegare come possano crearsi le dure rocce e il ferro.

Nel poema non mancano confutazioni delle altre dottrine, in particolare contro le radici di Empedocle, che non spiegava come da sole quattro radici si formassero corpi così diversi, e i semi di Anassagora. La critica più dura è verso coloro che considerano i corpi infinitamente divisibili:

*«Praeterea nisi erit minimum, parvissima qua eque
corpora constabunt ex partibus infinitis
[...]
ergo rerum inter summam minimamque quod escit,
nil erit ut distet; nam quamvis funditus omnis
summa sit infinita, tamen, parvissima quae sunt,
ex infinitis constabunt partibus aequae.»⁹*

D'altronde, se non ci sarà un minimo, tutti i corpi più piccoli consteranno di parti infinite [...]. E allora tra la somma delle cose e la più piccola non ci sarà alcuna differenza: infatti, per quanto l'universo in tutto il suo insieme sia infinito, tuttavia le cose più piccole consteranno egualmente di parti infinite.

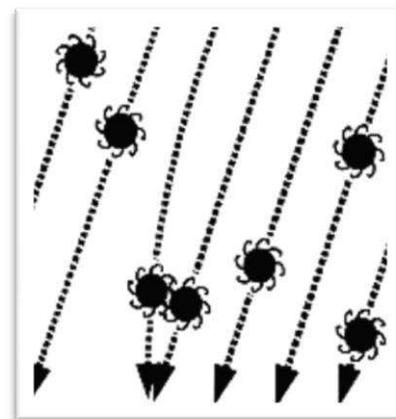
L'autore latino ripropone anche il ruolo fondamentale degli atomi nella visione meccanicistica del mondo. Le deviazioni, adesso chiamate **clinamen**, sono le uniche forze in grado di creare qualcosa, in quanto niente può nascere dal nulla e **niente può essere creato dagli dèi**. Tutto quindi è dovuto al caso.

⁸ ibidem, vv. 465-471

⁹ ibidem, vv. 615-616 / 619-622

«Quod nisi declinare solerent, [...]
nec foret offensus natus nec plaga create
principiis: ita nil umquam natura creasset.»¹⁰

*Se non usassero deviare, non si produrrebbero scontri né urti fra
gli elementi: così la natura non avrebbe mai creato nulla.*



Clinamen secondo Lucrezio

In **epoca romana** l'atomismo si dovette scontrare con una religione ben radicata nella società, che ovviamente non accettò una dottrina in cui gli dèi non avessero una parte attiva nella vita umana; a questo si aggiunse la forte gerarchia sociale, che vedeva nella dottrina epicurea una mina vagante: una delle conseguenze dell'atomismo illustrate da Lucrezio è l'**uguaglianza di tutti gli uomini**. Troppo moderna come concezione per avere successo nella società romana.

Riscoperta dell'atomismo e prime teorie scientifiche

Nel **Medioevo**, con la diffusione della **fede cristiana**, l'atomismo venne completamente abbandonato, almeno nel mondo occidentale. Con l'invenzione della stampa iniziarono ad apparire alcune rare copie del De Rerum Natura, riportando così alla luce la dottrina epicurea. In ogni caso l'Epicureismo fu protagonista principalmente dell'etica e anche le rare proposte atomistiche furono scorporate dal significato originale e **rivisitate in chiave cristiana**.

Si torna a parlare di atomi solo nel **XVII secolo** con **Pierre Gassendi** (1592 - 1655) che adattò la dottrina epicurea al cristianesimo, in particolare formulò l'ipotesi degli atomi sì come costituenti primi della materia, ma **creati da Dio** e da Lui "gestiti".

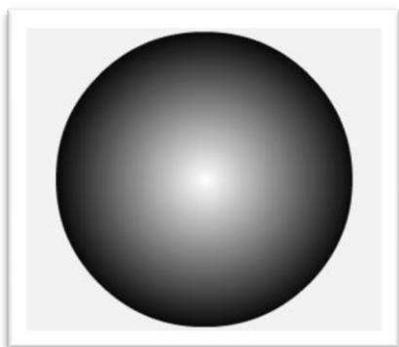
«Può essere supposto che i singoli atomi abbiano ricevuto da Dio [...] la forza necessaria a loro per muoversi e per trasmettere il movimento agli altri atomi [...], tutto nella misura in cui Lui prevedeva sarebbe stato necessario perché si realizzasse ogni disegno che gli aveva destinato.»¹¹

Questo permise a scienziati come Boyle e Newton di descrivere alcuni fenomeni scientifici come conseguenza dell'esistenza degli atomi senza subire l'**opposizione dell'ideologia cristiana**.

Robert Boyle (1627 - 1691) usò l'atomismo per spiegare le reazioni chimiche, che altro non sono che l'aggregazione e la disgregazione degli atomi. Anche **Isaac Newton** (1642 - 1727) sostenne l'atomismo e provò a spiegare alcune caratteristiche dei **minima**, gli atomi: infatti affermava che i corpi rimanessero nel loro stato di aggregazione per qualche forza particolare, che individuò nell'**attrazione elettrica**.

¹⁰ Lucrezio, De Rerum Natura II, vv. 221 / 223-224

¹¹ P. Gassendi, Opera Omnia - Fisica, p. 243



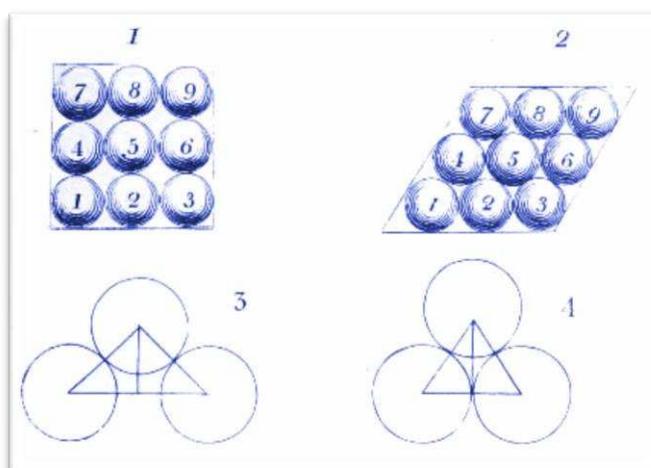
Atomo di Dalton

Si deve a **John Dalton** (1766 – 1844) il primo modello atomico su base scientifica: l'atomo è **la più piccola parte di un elemento che presenta le caratteristiche chimiche dell'elemento stesso**. Gli atomi venivano descritti come **corpi pieni**, probabilmente **sferici**, che intervengono nelle reazioni chimiche in numeri interi e piccoli (quella che poi sarà conosciuta come legge delle proporzioni multiple); inoltre un atomo di un elemento non può essere convertito nell'atomo di un altro elemento.

«The ultimate particles of all homogeneous bodies are perfectly alike in weight, figure & c.»¹²

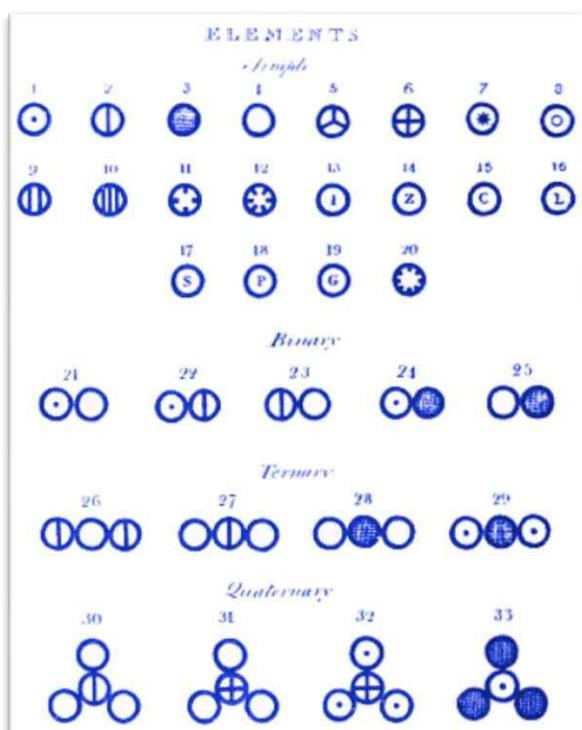
Le particelle prime di ogni corpo sono perfettamente simili in peso, sembianze, etc.

Dalton riuscì anche a trovare una spiegazione del perché, nonostante gli atomi siano sempre uguali, la materia si presenta in stati diversi. Infatti gli atomi sferici possono disporsi in più modi, pur restando sempre attaccati tra loro; la distanza tra questi avrebbe significato una maggiore o minore solidità.



▲ Dimostrazione geometrica dei diversi stati della materia secondo Dalton

◀ Atomi elencati da Dalton e possibili combinazioni



¹² J. Dalton, A New System of Chemical Philosophy (1808), Volume 1, capitolo 2, p. 143

Primi esperimenti scientifici

Tuttavia il modello atomico di Dalton non spiegava i fenomeni elettrici che in quegli stessi anni stava occupando la ricerca di Michael Faraday.

Michael Faraday (1791 - 1867), il cui contributo nel campo dell'elettromagnetismo è cospicuo, ipotizzò che l'elettricità fosse costituita da un flusso di **particelle cariche**. Questa ipotesi accordò anche il filosofo e chimico **Richard Laming** (1798 - 1879) e il fisico **George Johnstone Stoney** (1826 - 1911) che giustificarono così alcune **caratteristiche chimiche** e fisiche dell'atomo.

«There is an immensity of facts which justify us in believing that the atoms of matter are in some way endowed or associated with electrical powers, to which they owe their most striking qualities, and amongst them their mutual chemical affinity.»¹³

Esiste un'immensità di evidenze che ci giustificano nel credere che gli atomi in qualche modo abbiano a che fare con le proprietà elettriche, alle quali devono molte delle loro qualità più sorprendenti e la loro affinità chimica reciproca.

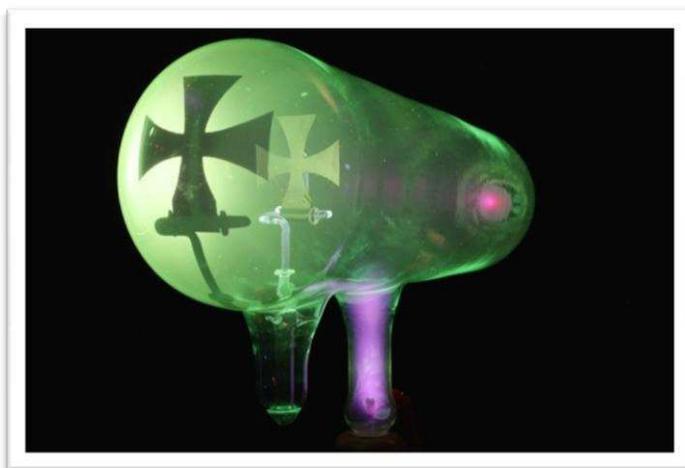
Le prime evidenze scientifiche dell'esistenza di queste particelle cariche arrivano soltanto nella seconda metà del XIX secolo con Crookes e Goldstein.

Nel **1860 William Crookes** (1832 - 1919) inserì due lamine metalliche in un **tubo** di vetro contenente un gas rarefatto. Collegando queste piastre a un generatore di corrente continua notò che dal **catodo** (polo negativo) si dipartiva una **luce** diretta verso l'**anodo** (polo positivo). Inoltre questa luce cambiava colore in dipendenza del gas contenuto nel tubo.

Nel **1876 Eugene Goldstein** (1850-1930) dimostrò per la prima volta che il bagliore di questi **raggi**, che chiamò **catodici**, era di **natura corpuscolare**. Infatti inserendo un mulinello all'interno del tubo, al passaggio dei raggi, questo veniva messo in rotazione; inserì anche una lamina metallica a forma di croce di Malta e notò che l'ombra che questa proiettava era a **margini netti**, quindi il bagliore non era propriamente luce.

Crookes fece un ulteriore passo mostrando che i raggi catodici, inseriti in un **campo magnetico**, vengono **deflessi**.

Parallelamente anche **Edwin Hall** (1855 - 1938) giunse a un risultato analogo illustrando il cosiddetto *effetto Hall*, secondo il quale facendo passare una corrente in un conduttore metallico immerso in un campo magnetico, all'interno del conduttore si crea una differenza di potenziale dovuta alla



Esperimento di Goldstein

¹³ M. Faraday, Experimental Researches in Electricity (1839), section 852

deflessione delle cariche che genera un loro accumulo. L'ipotesi che avanzò fu quella di un **nuovo stato della materia** in cui le particelle cariche negativamente vengono espulse ad alta velocità.

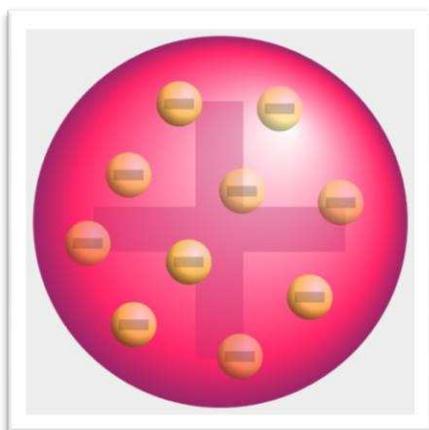
Nel **1896 Joseph John Thomson** (1856 - 1940) osservò che le particelle dei raggi catodici sono le stesse che vengono emesse anche dai **materiali riscaldati** e dai **materiali radioattivi** (osservazione poi confermata poco tempo dopo da Henry Becquerel nei suoi studi sulla radioattività). Le particelle furono chiamate, su suggerimento del già citato G. J. Stoney, **elettroni**, dal greco ἤλεκτρον (elektron), ovvero ambra, perché presso i greci era noto che strofinando l'ambra, questa attirava corpi di piccola massa.

Queste sono considerate le prime dimostrazioni scientifiche dell'esistenza dell'elettrone, tanto che valse a Thomson il premio Nobel per la fisica nel 1906.

Intanto, almeno per Thomson, era da tempo evidente che gli elettroni non potessero che essere **componenti degli atomi**:

«As the cathode rays carry a charge of negative electricity, are deflected by an electrostatic force as if they were negatively electrified, and are acted on by a magnetic force in just the way in which this force would act on a negatively electrified body moving along the path of these rays, I can see no escape from the conclusion that they are charges of negative electricity carried by particles of matter.»¹⁴

Dal momento che i raggi catodici trasportano cariche elettriche negative, sono deflessi da un campo elettrico come se fossero caricati negativamente e un campo magnetico agisce su di essi come agirebbe su corpi carichi negativamente che si muovono lungo la traiettoria di essi, non vedo via di fuga dalla conclusione che essi sono cariche elettriche negative trasportate da particelle della materia.



Modello atomico di Thomson

Nel 1904 di fronte a questa evidenza propose un nuovo **modello atomico**, detto **a panettone**: l'atomo è una massa di carica positiva che contiene gli elettroni.

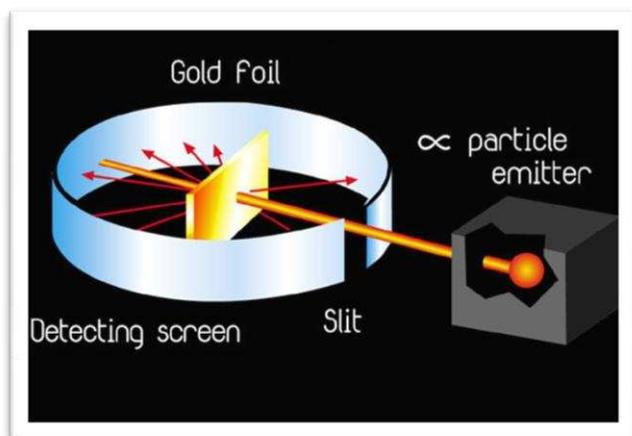
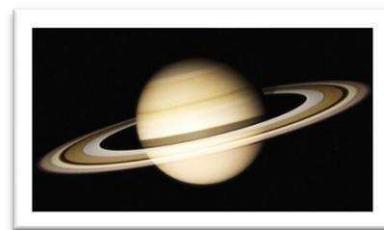
«Gli atomi degli elementi consistono in un certo numero di corpuscoli caricati negativamente chiusi in una sfera di elettrificazione positiva uniforme.»¹⁵

¹⁴ J. J. Thomson, Philosophical Magazine (1987), 44, 293

¹⁵ J. J. Thomson

L'atomo vuoto

Lo stesso anno **Nagaoka Hantarō** (1865 - 1950) rifiutò il modello di Thomson poiché cariche elettriche opposte dovrebbero essere impenetrabili. Propose un **modello planetario** in cui gli elettroni ruotano attorno ad un grande nucleo per **forza elettrostatica**. Nelle proporzioni paragonò l'atomo a Saturno con i suoi anelli, per questo è conosciuto anche come **modello saturniano**.



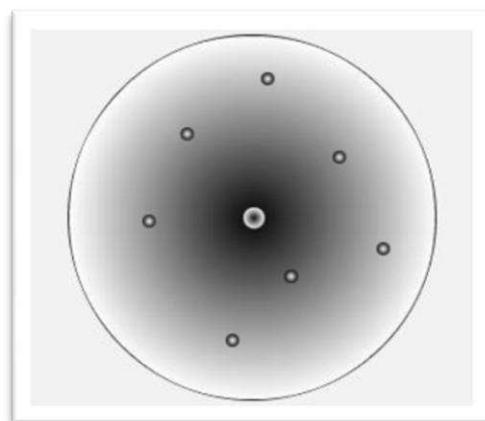
Esperimento di Rutherford

Nel **1909 Ernest Rutherford** (1871 - 1937) per verificare il modello di Thomson sparò un fascio di **particelle α** contro una sottilissima lamina d'oro, circondata da lastra fotografica, che registrasse il passaggio del fascio. Secondo il modello thomsoniano il fascio avrebbe dovuto passare attraverso la lamina indisturbato o, come in realtà dimostrarono precedenti esperimenti, con **angoli di deviazione minimi**. In realtà non solo una piccola parte di particelle α subì una **deviazione considerevole**, ma alcune addirittura **rimbalzarono sulla lamina**, tornando indietro. Questo fenomeno, che viene chiamato *scattering*,

fu giustificato da Rutherford dal fatto che solo una parte dell'atomo permettesse il passaggio delle particelle α . Propose un **modello atomico planetario** in cui il nucleo, la vera massa dell'atomo e quindi il responsabile della deviazione delle particelle, aveva un diametro di circa 1/100000 dell'intero atomo. In sostanza **l'atomo è vuoto**.

«Considerando le prove nel loro complesso, è più semplice supporre che l'atomo contenga una carica centrale distribuita in un volume molto piccolo, e che le grandi deviazioni individuali siano dovute alla carica centrale nel suo complesso, e non ai suoi costituenti.»¹⁶

Questo modello, tuttavia, **non era stabile**. Infatti secondo le leggi dell'elettromagnetismo, una particella carica che subisce un'accelerazione (in questo caso centripeta) dovrebbe emettere energia sotto forma di onda elettromagnetica. Questo avrebbe implicato, per l'elettrone, una progressiva perdita di energia fino al collasso sul nucleo (**teoria del collasso**).

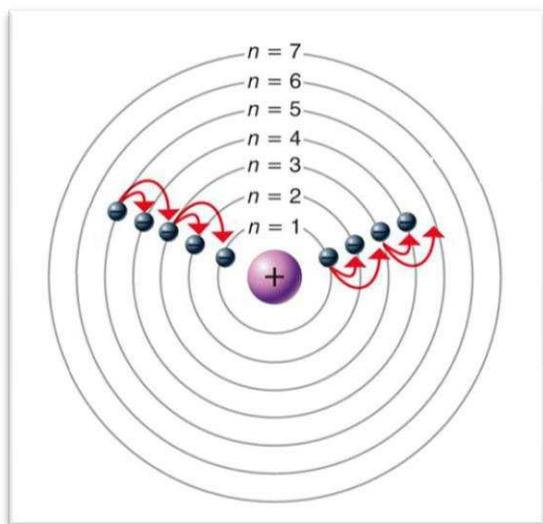


Modello atomico di Rutherford

¹⁶ E. Rutherford

La nascita dei quanti

Nel 1913 **Niels** Henrik David **Bohr** (1865 - 1962) adattò il modello di Rutherford agli studi compiuti in quegli anni da Maxwell e Hertz sulle onde elettromagnetiche, da Planck sulla quantizzazione dell'energia e da Einstein sui quanti di luce, che danno vita al **dualismo onda-corpuscolo**. Bohr, infatti, osservò che i singoli elementi possono **assorbire o emettere solo alcune frequenze di onde elettromagnetiche**. Ipotizzò quindi che queste frequenze corrispondessero all'**energia degli elettroni**. Il modello atomico di Bohr si basa su due **postulati**:



Modello atomico di Bohr

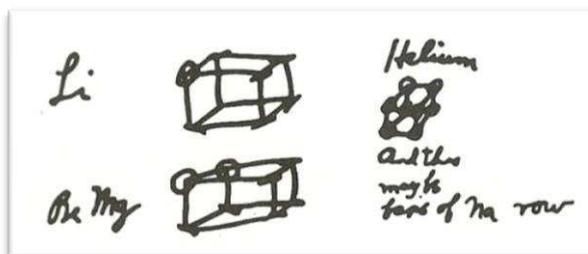
- l'elettrone può percorrere solo alcune orbite sulle quali non perde energia, dette **orbite stazionarie**. I raggi delle orbite sono dati dalla formula $r = \frac{n \cdot h}{2\pi \cdot m \cdot v}$ (con h = costante di Planck, m = massa dell'elettrone e v = velocità dell'elettrone). Il fattore n fu chiamato **numero quantico principale**.

L'energia degli atomi su ciascun'orbita è $E = -\frac{1}{n^2}K$ (con K costante).

- l'elettrone può assorbire energia, passando dall'orbita fondamentale a una di energia maggiore (**salto quantico**). Questo stato è detto **eccitato** e dura un tempo brevissimo (10^{-9} s), dopodiché torna nell'orbita fondamentale emettendo un fotone.

Esistono infiniti livelli energetici, ma dopo il settimo sono talmente ravvicinati da essere difficilmente distinguibili, per questo i numeri quantici primari vanno da 1 a 7.

Questo modello soddisfece anche **Gilbert Newton Lewis** (1875 - 1946) che aveva studiato anni prima i **legami chimici** tra atomi. Già nel 1902 infatti aveva proposto un modello atomico in cui gli elettroni si disponevano ai **vertici di cubi concentrici**; questa soluzione gli permetteva di spiegare la **condivisione degli elettroni nei legami covalenti**.



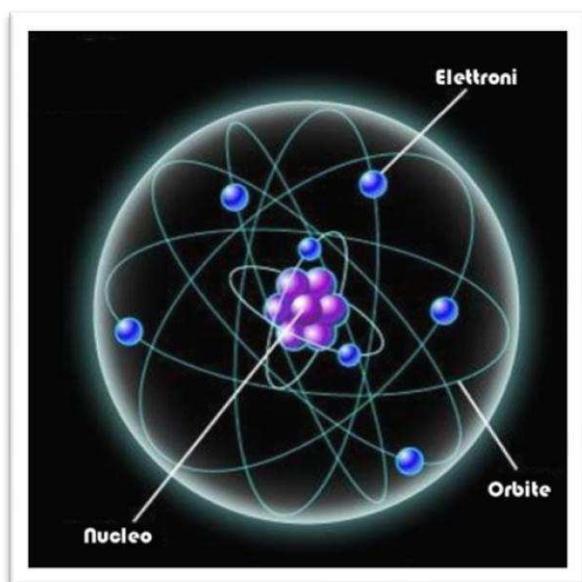
Modello atomico di Lewis

«In the year 1902 (while I was attempting to explain to an elementary class in chemistry some of the ideas involved in the periodic law) becoming interested in the new theory of the electron, and combining this idea with those which are implied in the periodic classification, I formed an idea of the inner structure of the atom which, although it contained certain crudities, I have ever since regarded as representing essentially the arrangement of electrons in the atom»¹⁷

¹⁷ G. N. Lewis, Valence and the Structure of Atoms and Molecules (1923), 29-30

Nel 1902 (mentre ero impegnato a spiegare ad una classe elementare alcune delle teorie legate alle periodicità) concentrando il mio interesse sulle nuove teorie dell'elettrone, e combinando queste teorie con tutto quello che riguarda la classificazione periodica, mi sono fatto un'idea della struttura dell'atomo che, sebbene presenti qualche incertezza, dovrebbe riguardare essenzialmente la disposizione degli elettroni nell'atomo.

Nel **1919** anche **Irving Langmuir** (1881 - 1957) propose il suo modello atomico sulla base delle proprietà chimiche: le orbite degli elettroni dovevano essere **gusci concentrici divisi in due celle**, ciascuno contenente un elettrone. Questa ipotesi era in grado di giustificare la **ciclicità degli elementi nella tavola periodica**.



Modello atomico di Sommerfeld

Nel **1926 Arnold** Johannes Wilhelm **Sommerfeld** (1868 - 1951) perfezionò il modello di Bohr, che prevedeva numerose semplificazioni, come la massa dell'elettrone trascurabile rispetto al nucleo e la sua **velocità** inferiore di quella **della luce** (per evitare complicazioni relativistiche), tanto da funzionare solo per l'atomo d'idrogeno. La correzione di Sommerfeld viene chiamata **struttura fine**.

Il **modello atomico di Bohr-Sommerfeld** prevede l'introduzione di altri due numeri quantici che caratterizzano l'elettrone: il **numero quantico secondario** (indicato con l , può assumere valori da 1 a $n-1$) descrive la **forma dell'orbita**, che può non essere più circolare, ma anche ellittica con il nucleo in uno dei fuochi, e il **numero quantico magnetico** (indicato con m_l , può assumere valori da $-l$ a $+l$) relativo all'**orientazione spaziale dell'orbita**.

Dualismo onda-corpuscolo

Nel **1924 Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie** (1892 - 1987) intuì che, come la luce possiede anche una natura corpuscolare, sulla base degli studi di Einstein, **anche i corpuscoli abbiano una natura ondulatoria**.

«After long reflection in solitude and meditation, I suddenly had the idea, during the year 1923, that the discovery made by Einstein in 1905 should be generalized by extending it to all material particles and notably to electrons.»¹⁸

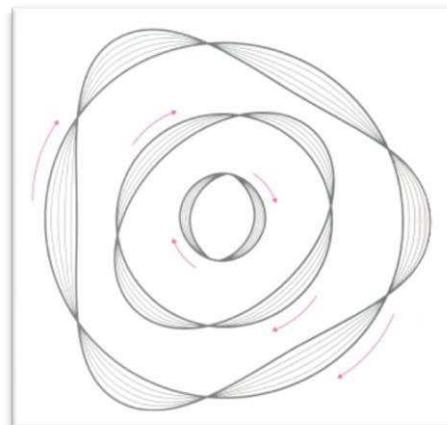
¹⁸ L. de Broglie, Recherches sur la théorie des quanta (1963), 4

Dopo una lunga riflessione e meditazione, improvvisamente ho avuto l'idea, nel corso del 1923, che la scoperta di Einstein del 1905 dovesse essere generalizzata estendendola a tutte le particelle materiali e in particolare agli elettroni.

Un corpuscolo quindi si diffonde sotto forma di **vibrazione**, interagendo con corpi di dimensione confrontabile con la propria lunghezza d'onda $\lambda = \frac{h}{mv}$ (con h = costante di Planck, m = massa dell'elettrone e v = velocità dell'elettrone).

Ponendo la formula della lunghezza d'onda in relazione con quella del raggio nel primo postulato di Bohr, si ottiene $2\pi r = n\lambda$: la lunghezza dell'orbita può assumere solo valori multipli della lunghezza d'onda dell'elettrone (che è sempre la stessa). **Il postulato viene così dimostrato:** le orbite non possono essere casuali, ma esistono orbite stazionarie.

La teoria onda-corpuscolo fu poi dimostrata da George Thomson, figlio di Joseph John.



Modello atomico di Lewis

Nello stesso anno **Wolfgang Ernst Pauli** (1900 - 1958) dimostra che gli elettroni sono definiti da un *quarto numero quantico*, che non identificò, ma che per il *principio di esclusione di Pauli* può assumere soltanto due valori. Inoltre concluse che due elettroni non possono avere tutti e quattro i numeri quantici uguali. Il nuovo numero quantico si è scoperto poi essere il momento angolare intrinseco o **spin** (indicato con m_s , può assumere valori $\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$).

«[...] il mio percorso verso il principio di esclusione dovette fare i conti proprio con l'arduo passaggio dal 3 al 4, ossia la necessità di attribuire all'elettrone un quarto grado di libertà oltre alle tre traslazioni.»¹⁹

Qualche anno dopo, nel **1932**, **James Chadwick** (1891 - 1974) scoprì dell'esistenza del *neutrone*, che minimizza la repulsione tra protoni.

Nel **1927** **Werner Heisenberg** (1901 - 1976) formulò il **principio di indeterminazione**, secondo il quale non è possibile determinare con precisione la posizione e la quantità di moto dell'elettrone, perché **la traiettoria della particella non è una curva continua** a causa dei salti quantici; in particolare le incertezze relative alle due grandezze sono **inversamente proporzionali** secondo la formula

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

«Ammettendo che le discontinuità siano in qualche modo tipiche dei processi che si verificano in piccole regioni e in piccoli intervalli di tempo, allora è molto plausibile una contraddizione tra i concetti di "posizione" e "velocità". L'immagine classica della traiettoria di una particella come una curva continua

¹⁹ W. Pauli

deve essere sostituita da una serie discreta di punti nello spazio e nel tempo. Questo fa sì che le idee classiche falliscano quando si tratta di misurarne simultaneamente la posizione e il momento.»²⁰

Erwin Schrödinger (1887 - 1961) non era convinto della validità del modello di Bohr-Sommerfeld:

«[...] Mentre descrivevo ogni dettaglio dei cosiddetti stati stazionari, nei quali solitamente si trova l'atomo, [...] la teoria non si pronunciava sui periodi di transizione o, come cominciarono a essere denominati allora, "salti quantici".»²¹

Il fisico dunque, nel **1926**, ispirato dalle teorie di de Broglie, elaborò un'equazione, nota come **equazione di Schrödinger**, che descrive l'elettrone come **onda stazionaria** che ne **distribuisce la massa e la carica intorno al nucleo**.

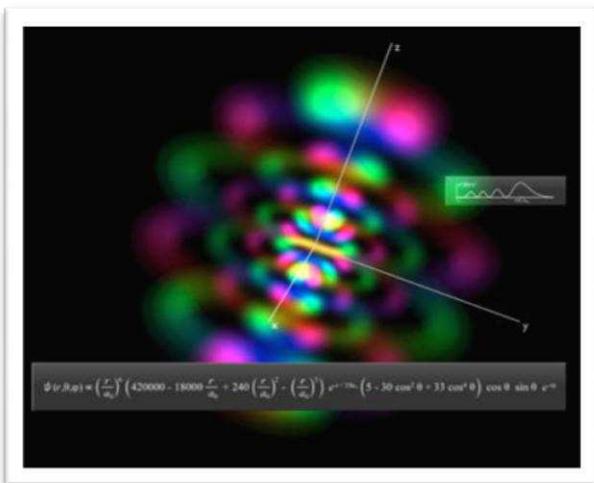
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + V(x, y, z) \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Le soluzioni, note come *funzioni d'onda* Ψ , permettono di calcolare le **energie quantizzate**, ma non le orbite; più tardi si scoprì che Ψ^2 consente di determinare la **probabilità** che l'elettrone si trovi nell'orbita stessa.

«Occorre appena sottolineare quanto più attraente del concetto di elettroni che saltano sia il concetto che nelle transizioni quantistiche l'energia si trasmette da una modalità vibrazionale a un'altra.»²¹

Inizialmente i lavori di Heisenberg e Schrödinger parvero **incompatibili** perché il primo considerava l'elettrone come **corpuscolo**, mentre il secondo come **onda**.

«La mia teoria è stata ispirata da L. de Broglie. [...] Che io sappia, non ha alcuna parentela con [il lavoro] di Heisenberg. Naturalmente ero a conoscenza della sua teoria, ma mi sentivo scoraggiato, per non dire respinto [...]»²¹



Dagli studi compiuti da questi fisici nasce il modello atomico oggi accettato, talvolta chiamato **modello atomico di Heisenberg-Schrödinger**, che non descrive più la traiettoria degli atomi intorno al nucleo lungo un'orbita definita, ma descrive degli **orbitali**, regioni dello spazio dove la probabilità di trovarvi un elettrone è maggiore del 95%.

Ricostruzione 3D del modello atomico a orbitali

²⁰ W. Heisenberg

²¹ E. Schrödinger

Modello Standard

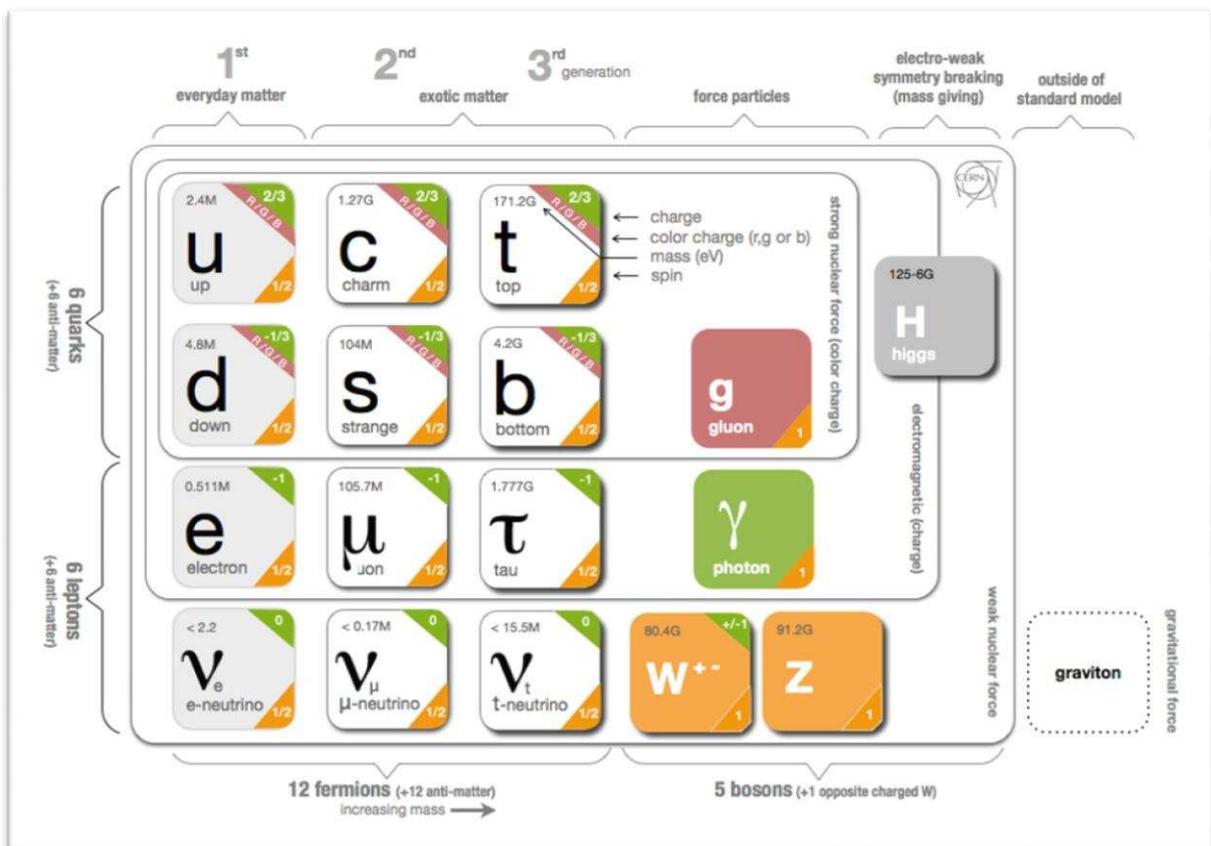
Nel 1930 Paul Adrien Maurice Dirac (1902 - 1984), conducendo degli studi su quella che verrà poi chiamata **meccanica quantistica**, in particolare portando avanti gli studi di Pauli, ipotizzò l'esistenza del *positrone*, particella con la stessa massa dell'elettrone, ma di carica opposta. L'esistenza di questa particella fu dimostrata qualche anno dopo.

La scoperta del positrone, aprì la porta dell'**antimateria**. Nel ventennio successivo si sono intensificati anche gli studi sulle **particelle elementari**. A protoni, neutroni, elettroni e fotoni si aggiunsero i **mesoni μ e π** e i **neutrini**. A partire dagli anni '50 gli studi poterono essere effettuati non più solo grazie ai raggi cosmici, ma anche con l'ausilio degli acceleratori di particelle.

Oggi il **Modello Standard** è una teoria molto diffusa, che prevede l'esistenza di un considerevole numero di particelle elementari, di cui non fanno parte neutroni e protoni poiché formati da *quark*, e le **interazioni forte ed elettrodebole**. Ogni particella inoltre ha la sua **antiparticella**, tranne in alcuni casi in cui l'antiparticella è la particella stessa.

Questo modello è **incompleto**, principalmente perché non è stato ancora possibile inserirvi la **forza gravitazionale**, l'altra a cui sono soggette le particelle. In ogni caso è piuttosto **soddisfacente** nel definire la struttura della materia a livello subatomico e, inoltre, apparentemente **non esistono contraddizioni sperimentali**.

Una critica spesso mossa al Modello Standard è il fatto che non comprenda la **materia oscura**, la cui esistenza è stata **osservata sperimentalmente**. Tuttavia la teoria della **supersimmetria**, secondo cui ad ogni particella del Modello ne corrisponde un'altra supersimmetrica, talvolta viene indicata come soluzione a questa mancanza.



Bibliografia:

- L. Giancola, *Epistème ed Éthos in Epicuro*, Armando Editore
- S. Givone, S. P. Firrao, *Filosofia. Dalle origini al Medioevo*, Editore Bulgarini
- M. Bettini, *La cultura latina*, La Nuova Italia
- Perutelli, Paduano, Rossi, *Storia e testi della letteratura latina*, Zanichelli
- S. Barbone, L. Altavilla, *La chimica facile*, Zanichelli
- R. Zingales, *La composizione della materia*
- F. Tottola, A. Allegrezza, M. Righetti, *Chimica per noi*, A. Mondadori Scuola
- C. Romeni, *Fisica e realtà - induzione e onde elettromagnetiche, relatività e quanti*, Zanichelli
- Z. Capri, *Quips, Quotes, and Quanta: An Anecdotal History of Physics*, World Scientific Publish Company
- E. J. Álvarez, *Quanto pesano gli atomi? Dalton: la teoria atomica*, RBA
- R. C. Orrit, *Anche gli atomi hanno un cuore, Rutherford: il nucleo atomico*, RBA
- J. Navarro, *Passaporto quantistico verso un altro stato, Bohr: l'atomo quantistico*, RBA
- J. N. Faus, *Il mondo esiste se non lo si guarda? Heisenberg: il principio di indeterminazione*, RBA
- D. B. Laserna, *L'universo è sulla cresta dell'onda, Schrödinger: i paradossi quantistici*, RBA
- A. I. Miller, *L'equazione dell'anima. L'ossessione per un numero nella vita di due geni*, Rizzoli
- Enciclopedia *l'Universale*
- Enciclopedia *L'enciclopedia universale*

Sitografia:

- historyoftheatomictheory.weebly.com
- todayinsci.com
- marco.coisson.name (Articoli: l'atomo divisibile)
- fisicaparticelle.altervista.org
- wikipedia.org