

Física y Química 2ºESO (también 3º y 4º ESO, repaso)

El átomo y los modelos atómicos

J. F. G. H.¹

¹Space-time Foundation, Multiverse of Madness
Quantum TimeLord Virtual Academy

Earth planet
Milky Way Galaxy
Known Universe
Joki Multiverse

- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos
- 3 Configuración electrónica
- 4 La Tabla Periódica
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

¿Qué es la materia?

- La pregunta de qué es la materia implica que debemos entender qué es la masa y qué es el volumen (espacio).
- La teoría cinética dice que la materia está hecha de partículas.
- La pregunta es:

¿Qué es la materia?

- La pregunta de qué es la materia implica que debemos entender qué es la masa y qué es el volumen (espacio).
- La teoría cinética dice que la materia está hecha de partículas.
- La pregunta es: **¿cuál es/cuáles son las partículas más pequeñas que fabrican o hacen la materia?**
¿Puedo dividir la materia en pedazos cada vez más pequeños sin límite de pequeñez o tamaño?

¿Qué es la materia?

- La pregunta de qué es la materia implica que debemos entender qué es la masa y qué es el volumen (espacio).
- La teoría cinética dice que la materia está hecha de partículas.
- La pregunta es: **¿cuál es/cuáles son las partículas más pequeñas que fabrican o hacen la materia? ¿Puedo dividir la materia en pedazos cada vez más pequeños sin límite de pequeñez o tamaño?**
- La pregunta es vieja: se la han hecho griegos, chinos, hindúes y otras civilizaciones antiguas con pensamientos científicos.

Contenido

- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos**
- 3 Configuración electrónica
- 4 La Tabla Periódica
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

- En la antigua Grecia, varios filósofos pensaron en encontrar la última sustancia o principio del que estaba hecho todo. Los filósofos presocráticos lo llamaron arjé (en China, Taiji).

- En la antigua Grecia, varios filósofos pensaron en encontrar la última sustancia o principio del que estaba hecho todo. Los filósofos presocráticos lo llamaron arjé (en China, Taiji).
- Hesíodo propuso que origen de todo era el Caos primordial. Los babilónicos lo habían ya pensado en el Enuma Elish. En los textos védicos sánscritos el origen es un huevo cósmico surgido de la Oscuridad, el Hiranyagarbha Sukta.

- En la antigua Grecia, varios filósofos pensaron en encontrar la última sustancia o principio del que estaba hecho todo. Los filósofos presocráticos lo llamaron arjé (en China, Taiji).
- Hesíodo propuso que origen de todo era el Caos primordial. Los babilónicos lo habían ya pensado en el Enuma Elish. En los textos védicos sánscritos el origen es un huevo cósmico surgido de la Oscuridad, el Hiranyagarbha Sukta.
- Otras civilizaciones tienen ideas semejantes.

- La búsqueda de un elemento (o elementos) primordial monista o pluralista en la Mitología y la Religión fue constante.

- La búsqueda de un elemento (o elementos) primordial monista o pluralista en la Mitología y la Religión fue constante.
- En Grecia se propuso: al Aire(Anaxímenes), al Agua (Tales de Mileto), al Fuego(Heráclito), al Logos(Heráclito), al Apeiron(Anaximandro), los números (Pitágoras), antes de llegar a los modelos pluralistas (Empédocles: 4 elementos; Anaxágoras infinitos pero con un Nous) como principio o elemento primordial.

La idea de átomo: Leucipo y Demócrito

- Leucipo y Demócrito introducen la idea de que la materia está hecha de átomos ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\sigma$, “sin partes”) y espacio vacío, en continuo movimiento.

La idea de átomo: Leucipo y Demócrito

- Leucipo y Demócrito introducen la idea de que la materia está hecha de átomos ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\sigma$, “sin partes”) y espacio vacío, en continuo movimiento.
- Una idea similar se había ya conocido en la India, por Kanada (átomos de tiempo; doctrina vaishesika o del nyāya). La civilización china introdujo el concepto de Tao, en cierta forma similar a un átomo, en el taoísmo.

La idea de átomo: Leucipo y Demócrito

- Leucipo y Demócrito introducen la idea de que la materia está hecha de átomos ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\sigma$, “sin partes”) y espacio vacío, en continuo movimiento.
- Una idea similar se había ya conocido en la India, por Kanada (átomos de tiempo; doctrina vaishesika o del nyāya). La civilización china introdujo el concepto de Tao, en cierta forma similar a un átomo, en el taoísmo.
- La realidad de la materia es una combinación diversa de átomos en el vacío.

La idea de átomo: Leucipo y Demócrito

- Leucipo y Demócrito introducen la idea de que la materia está hecha de átomos ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\sigma$, “sin partes”) y espacio vacío, en continuo movimiento.
- Una idea similar se había ya conocido en la India, por Kanada (átomos de tiempo; doctrina vaishesika o del nyāya). La civilización china introdujo el concepto de Tao, en cierta forma similar a un átomo, en el taoísmo.
- La realidad de la materia es una combinación diversa de átomos en el vacío.
- Estas ideas se abandonaron durante la Edad Media hasta después del Renacimiento y la emergencia de la Química Moderna.

El retorno de los átomos(I): modelo de Dalton (s.XIX)

Dalton propuso un modelo atómico para explicar las reacciones químicas y sus leyes a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. Hipótesis:

- 1 Toda la materia está formada por átomos indivisibles e indestructibles.

El retorno de los átomos(I): modelo de Dalton (s.XIX)

Dalton propuso un modelo atómico para explicar las reacciones químicas y sus leyes a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. Hipótesis:

- 1 Toda la materia está formada por átomos indivisibles e indestructibles.
- 2 Los átomos son eléctricamente neutros.

El retorno de los átomos(I): modelo de Dalton (s.XIX)

Dalton propuso un modelo atómico para explicar las reacciones químicas y sus leyes a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. Hipótesis:

- 1 Toda la materia está formada por átomos indivisibles e indestructibles.
- 2 Los átomos son eléctricamente neutros.
- 3 Los átomos del mismo elemento químico tienen las mismas propiedades (masa, tamaño).

El retorno de los átomos(I): modelo de Dalton (s.XIX)

Dalton propuso un modelo atómico para explicar las reacciones químicas y sus leyes a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. Hipótesis:

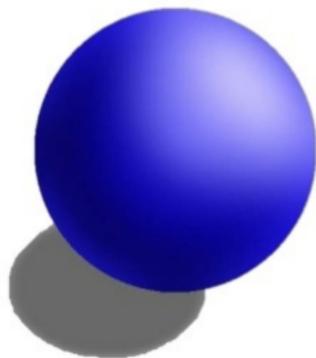
- 1 Toda la materia está formada por átomos indivisibles e indestructibles.
- 2 Los átomos son eléctricamente neutros.
- 3 Los átomos del mismo elemento químico tienen las mismas propiedades (masa, tamaño).
- 4 Los átomos de diferentes elementos tienen diferentes propiedades.

El retorno de los átomos(I): modelo de Dalton (s.XIX)

Dalton propuso un modelo atómico para explicar las reacciones químicas y sus leyes a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. Hipótesis:

- 1 Toda la materia está formada por átomos indivisibles e indestructibles.
- 2 Los átomos son eléctricamente neutros.
- 3 Los átomos del mismo elemento químico tienen las mismas propiedades (masa, tamaño).
- 4 Los átomos de diferentes elementos tienen diferentes propiedades.
- 5 Los átomos se combinan para formar compuestos en proporciones numéricas dadas por números enteros positivos sencillos.

Dalton's Model



- **Solid Sphere Model or Bowling Ball Model**
- **Proposed by John Dalton**

Figura 1: Modelo de las bolas de billar de Dalton.

Modelo de bolas de Dalton(II)

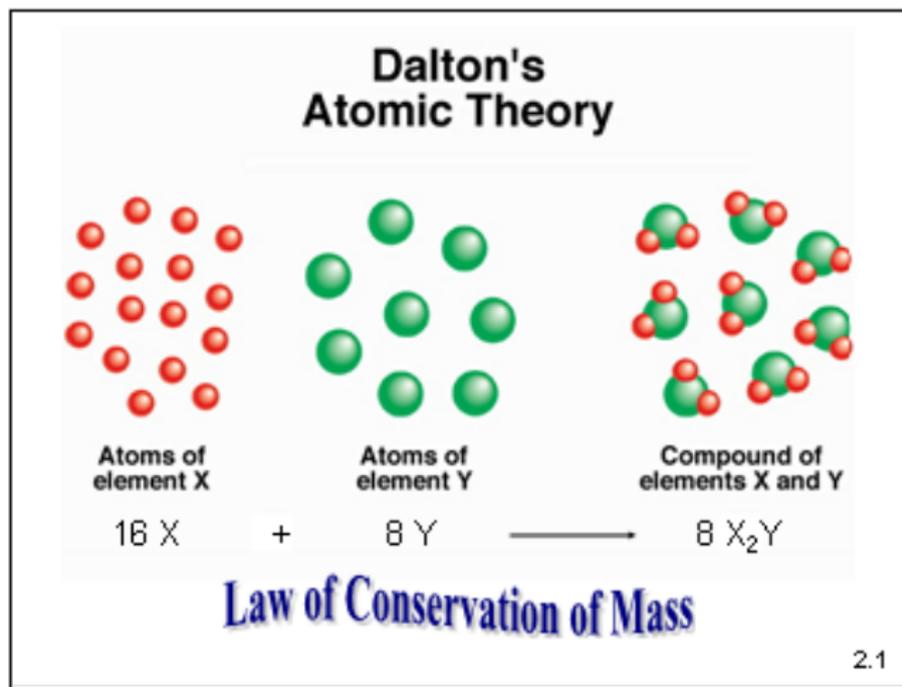


Figura 2: El modelo atómico de Dalton explicaba de forma sencilla la ley de conservación de la masa de Lavoisier de las reacciones químicas.

Sin embargo: **el modelo de Dalton tenía problemas**. Este modelo se mostró incapaz de explicar los nuevos descubrimientos y tuvo que modificarse.

- 1 Era incapaz de explicar los fenómenos de electrización de la materia y otros nuevos hallazgos de la Química y Física.

Sin embargo: **el modelo de Dalton tenía problemas**. Este modelo se mostró incapaz de explicar los nuevos descubrimientos y tuvo que modificarse.

- 1 Era incapaz de explicar los fenómenos de electrización de la materia y otros nuevos hallazgos de la Química y Física.
- 2 No explicaba la diversidad de átomos.

Sin embargo: **el modelo de Dalton tenía problemas**. Este modelo se mostró incapaz de explicar los nuevos descubrimientos y tuvo que modificarse.

- 1 Era incapaz de explicar los fenómenos de electrización de la materia y otros nuevos hallazgos de la Química y Física.
- 2 No explicaba la diversidad de átomos.
- 3 No explicaba ciertos procesos químicos.

Sin embargo: **el modelo de Dalton tenía problemas**. Este modelo se mostró incapaz de explicar los nuevos descubrimientos y tuvo que modificarse.

- 1 Era incapaz de explicar los fenómenos de electrización de la materia y otros nuevos hallazgos de la Química y Física.
- 2 No explicaba la diversidad de átomos.
- 3 No explicaba ciertos procesos químicos.
- 4 No explicaba los nuevos descubrimientos y hallazgos relacionados con los fenómenos electromagnéticos de la materia.

- En 1897, con el experimento de los rayos catódicos, J. J. Thomson descubre el electrón.

- En 1897, con el experimento de los rayos catódicos, J. J. Thomson descubre el electrón.
- El electrón es la primera partícula subatómica dentro de los átomos. Los átomos dejan de ser indivisibles.

- En 1897, con el experimento de los rayos catódicos, J. J. Thomson descubre el electrón.
- El electrón es la primera partícula subatómica dentro de los átomos. Los átomos dejan de ser indivisibles.
- Thomson propone el llamado “plum-cake model”, o modelo del pudin con pasas.

El modelo de Thomson(II)

La primera partícula subatómica hallada dentro de los átomos son los electrones. Un esquema del experimento de rayos catódicos:

The Discovery of Atomic Structure

J. J. Thomson's cathode rays experiment

- In 1897, J. J. Thomson did an experiment to **confirm the presence of the tiny negative particles – electrons.**
- Thomson experiment (1906 Nobel Prize in Physics)

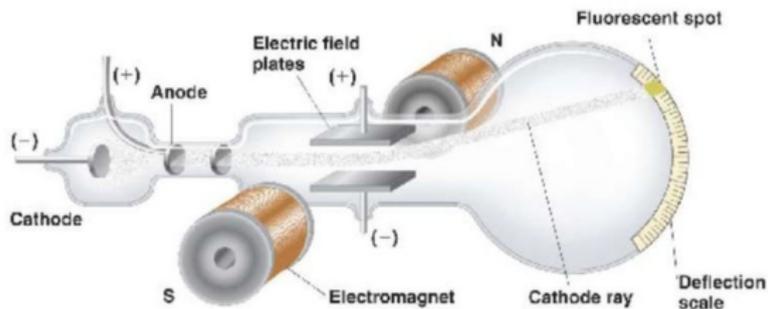


Figure 1: Schematic of J.J. Thomson's experiment.

El modelo de Thomson(III): los electrones

- Los electrones debían tener carga eléctrica negativa (se desviaban por campos magnéticos).
- Los electrones debían tener masa (movían unas aspas de molino).
- Los electrones debían ser muy pequeños y estaban incrustados en la masa positiva del átomo.
- Los átomos también tenían masa positiva y eran globalmente neutros. Se mantenían resto de hipótesis de los átomos de Dalton.

Eso le lleva a plantear un modelo atómico nuevo, llamado “plumcake model”, modelo del pudin con pasas:

- 1 Los átomos son una masa de de carga positiva donde están incrustados los electrones.
- 2 Los átomos son eléctricamente neutros, por lo que la carga total positiva compensa la de los electrones.
- 3 Los átomos del mismo elemento son iguales en propiedades.

El modelo de Thomson(V): detalles y problemas

- En el experimento de los rayos catódicos, se hacía pasar una corriente eléctrica en un gas a baja presión.
- Se producía la aparición de una radiación proveniente del cátodo, que se vino en llamar rayos catódicos.
- Los rayos catódicos, gracias a ingeniosos experimentos de Thomson, demostraron poseer propiedades de partículas cargadas negativas, con masa, que hoy llamamos electrones.
- De nuevo, los avances experimentales harían que este modelo tuviera una vigencia breve.

- Geiger y Marsden, a instancias de Rutherford, realizaron el experimento de la lámina de oro (Golden Foil experiment).
- Este experimento consistía en arrojar partículas alfa (más adelante identificadas como núcleos ionizados del átomo de helio) contra una fina lámina de oro y observar la desviación de dichas partículas en una pantalla.

El modelo de Rutherford(II): el experimento de Geiger-Marsden-Rutherford

Rutherford's Gold Foil Experiment

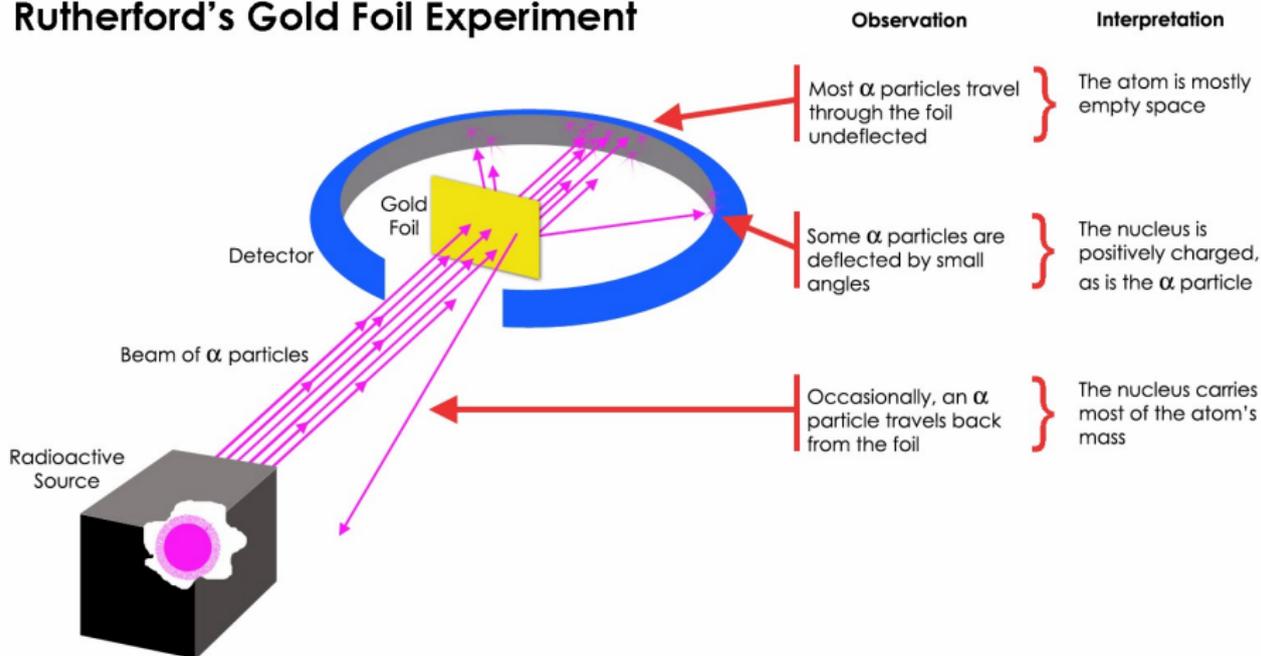


Figura 4: Esquema del experimento de Rutherford.

El modelo de Rutherford(III): conclusiones

- El modelo de Thomson no podía explicar el experimento de la lámina de oro, y sus observaciones.
- Las observaciones indicaban que las partículas alfa se desviaban en ocasiones poco o nada, otras un poco, otras una cantidad intermedia, y aproximadamente una vez de cada 10^5 se desviaban casi hacia atrás (perturbador).
- Los átomos debían tener una estructura interna más rica y compleja o complicada que lo que se había supuesto hasta entonces.

Resumen de observaciones de Geiger-Marsden-Rutherford

Las observaciones eran sorprendentes:

- La mayoría de las partículas alfa, pasaban apenas sin desviaciones.
- Un número importante de partículas alfa sufrían desviaciones moderadas entre 30 y 90 grados.
- Un número no pequeño de partículas alfa se desviaban bastante, con ángulos entre 90 y 170 grados.
- Una de cada 100000 (CIEN MIL), aproximadamente, rebotaba casi hacia atrás, en ángulo similar a 180 grados.

- Rutherford se percató de que los resultados del experimento eran incompatibles con la imagen del átomo de Thomson, y propuso una nueva imagen del átomo basada en la idea planetaria (y también en ideas previas del japonés Nagaoka, que había propuesto un modelo “saturniano” del átomo donde los electrones eran anillos sobre un núcleo). El modelo nuclear de Rutherford (1911) tenía las siguientes hipótesis:

Rutherford y su modelo nuclear(II)

- 1 El átomo está formado por dos zonas diferenciadas: núcleo y corteza.

Rutherford y su modelo nuclear(II)

- 2 En la corteza se encuentran los electrones, y en el núcleo se hallan los protones y neutrones (el protón se propuso como explicación a un experimento denominado experimento de los rayos canales; el neutrón, descubierto por Chadwick en 1931, era necesario para explicar la masa del átomo).

- ③ El tamaño del núcleo es 100000 veces menor que el tamaño del átomo y muy denso, comportándose como esferas duras de carga positiva y masa casi la del átomo. El tamaño del átomo es del orden de 10^{-10}m y el del núcleo de 10^{-15}m .

- 4 La mayor parte del átomo es espacio vacío.

- 5 Los electrones orbitan el núcleo como planetas el sol, en órbitas circulares, debido a la fuerza eléctrica del núcleo (de carga positiva). esta fuerza eléctrica venía deducida a partir de la ley de Coulomb entre dos cargas Q , q , separadas una distancia r :

$$F_C = K_C \frac{Qq}{r^2}$$

Consecuencias:

- Los átomos del mismo elemento ya no son necesariamente idénticos en propiedades, pueden tener propiedades distintas (dependiendo de la masa y las partículas).
- Toda la carga positiva y casi toda la masa se concentra en el núcleo, mientras que la carga negativa y algo de masa están en la corteza (los electrones tienen masa).
- Hay más partículas subatómicas además de los electrones (protones y neutrones).

Este modelo, sin embargo, poseía dos problemas que ya arrastraban los modelos anteriores del siglo XIX:

- **No explicaban los espectros atómicos.** Los espectros atómicos eran la luz emitida de los átomos al calentarse (o enfriarse). Un espectro de emisión consistía, para cada elemento, en una serie de líneas de colores sobre fondo negro, y un espectro de absorción unas líneas oscuras en fondo de colores. Ni el modelo de Rutherford ofrecía una explicación a la estructura de esta radiación electromagnética y térmica de los átomos.

Modelo de Rutherford: problemas(II)

- La teoría electromagnética de la luz del s.XIX, definida por las ecuaciones de Maxwell, indicaba que partículas cargadas (como los electrones en el átomo), sometidas a una aceleración (en el átomo ocurre debido al movimiento circular), implicaba que el átomo debía ser inestable y eso no era observado (afortunadamente para todos). El tiempo que tardaba un electrón, por ejemplo en el átomo de hidrógeno, en perder energía por radiación electromagnética, inicialmente a una distancia del núcleo de r_0 es igual a la fórmula:

$$t_c = \frac{4\pi^2 \varepsilon_0^2 m^2 c^3 r_0^3}{e^4}$$

donde m es la masa del electrón, c es la velocidad de la luz, e es la carga elemental del electrón, ε_0 es la permitividad eléctrica del vacío y π es el número pi. Puede calcularse que $t_c \approx 10^{-11} \text{ s} = 10 \text{ ps}$.

- En 1913, Niels Bohr, usando las ideas cuánticas de Planck (1900), fue el primero que determinó una primera explicación de átomo y su espectro (aunque no en forma completa).
- Su modelo era válido para átomos como el del hidrógeno, o a lo más, átomos con un solo electrón.

Espectros(I)

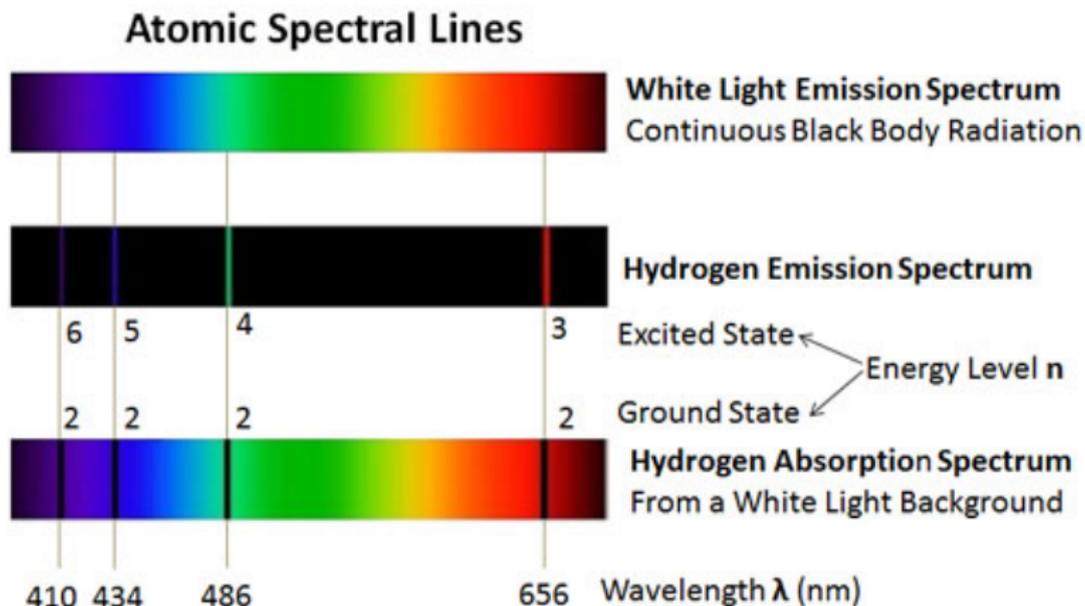


Figura 5: Líneas espectrales atómica elementales del hidrógeno, sin perturbaciones magnéticas o eléctricas. Hay diferencia entre el espectro de absorción, el espectro de emisión, y el espectro puramente de radiación, denominado de cuerpo negro (no confundir cuerpo negro con agujero negro).

Black Body and Line Spectra

Black Body

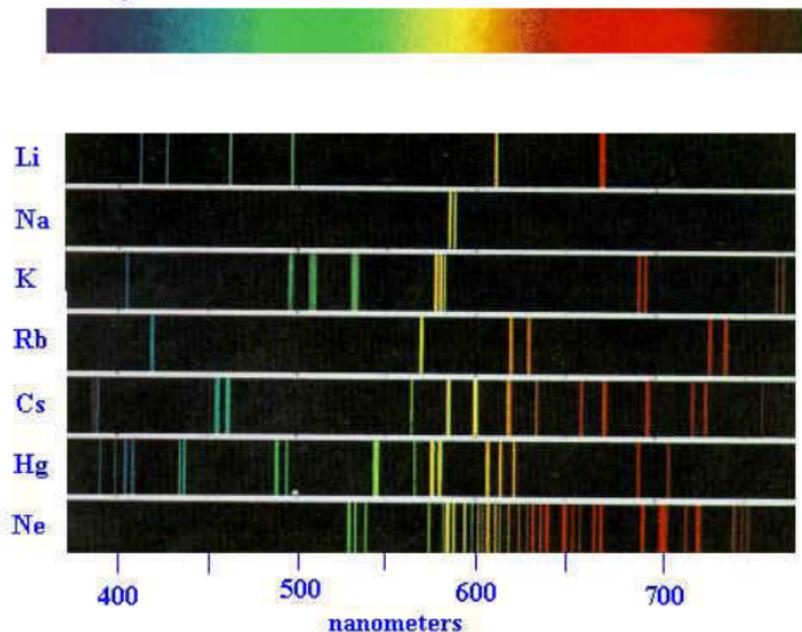


Figura 6: Espectros atómicos de diferentes elementos químicos.

Espectros(III)

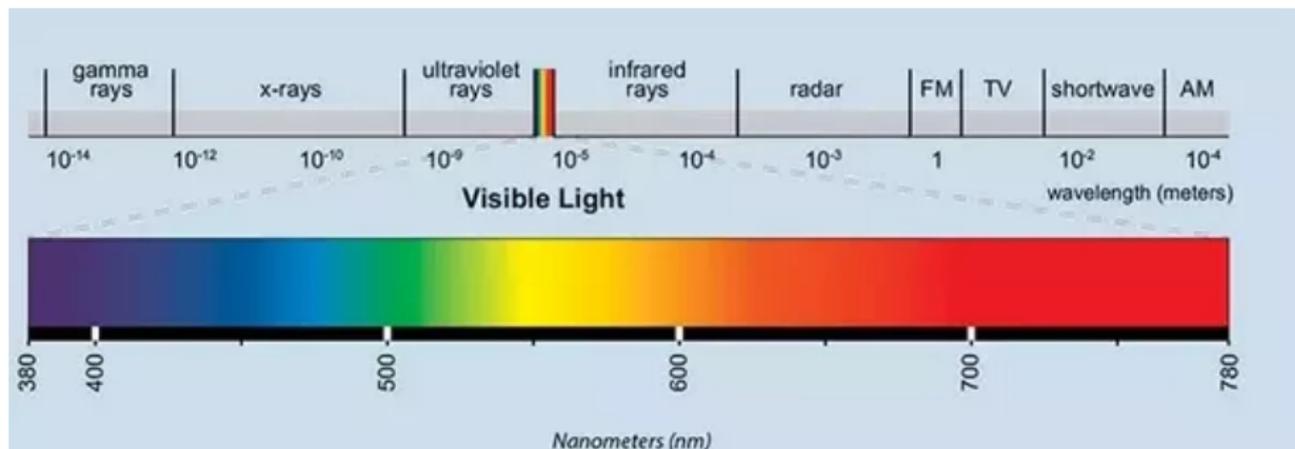


Figura 7: El espectro electromagnético de la luz. La luz visible es solamente una pequeña parte del espectro electromagnético completo, entre 380 y 780 nanómetros de longitud de onda.

Espectros(IV): el modelo orbital de capas de Bohr



Figura 8: Imagen del modelo de órbitas circulares estacionarias de Bohr.

Modelo de Bohr: hipótesis

La hipótesis cuántica de Planck era el análogo para la energía de la idea atómica para la materia. Bohr usó los siguientes postulados para el átomo de hidrógeno:

- Los electrones, mientras se encuentran en órbitas circulares, no radian (ni emiten ni absorben) energía.
- Las transiciones de los electrones tienen lugar cuando absorben o emiten cuantos de luz (fotones), mediante la fórmula de Planck: $E = hf = \hbar\omega$. Aquí, E es la energía, f es la frecuencia de la luz y h es la constante de Planck, cuyo valor es $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. $\hbar = h/2\pi$ se denomina constante de Planck racionalizada y ω es frecuencia angular.
- El momento angular de los electrones del átomo tampoco puede tomar cualquier valor, sino que están cuantificados $L = mvr = nh$, con n entero positivo, i.e., $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$. El momento angular, variable asociada al giro circular de los electrones, es el producto de la masa por la velocidad por la distancia al núcleo.

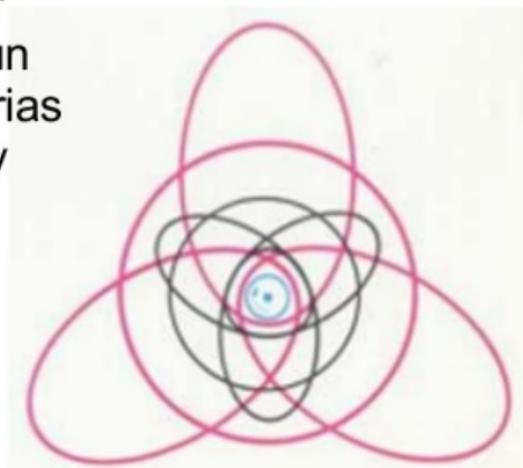
Sin embargo, el modelo de Bohr también era insuficiente.

- No explicaba los detalles del espectro del átomo de hidrógeno cuando estaba sometido a campos eléctricos o magnéticos (conocidos como efectos Stark y Zeeman).
- Se intentó su modificación para incluir el efecto del tamaño del núcleo, y las llamadas correcciones relativistas indicadas por la teoría de la relatividad especial de Einstein. Eso implicaba la introducción de nuevos números cuánticos asociados a nuevas cantidades, diferentes al momento angular.

- Las órbitas con las correcciones de Bohr-Sommerfeld eran elípticas y no circulares, pero eran aún insuficientes para explicar la estructura de los espectros de forma detallada, y en especial, de los átomos más complicados como el helio o el resto de la Tabla Periódica.
- Esto llevó al desarrollo de la Mecánica Cuántica y la Teoría Cuántica de Campos, que es el modelo actual vigente.

MODELO ATÓMICO DE SOMMERFELD

Sommerfeld propuso que **las órbitas podían ser elípticas** y, dentro de un mismo nivel, habría varias con diferentes formas y distintas inclinaciones.



Modelo de Sommerfeld (1916)

- Los electrones se mueven alrededor del núcleo, en **órbitas circulares o elípticas**.
- Se introduce un segundo número cuántico **L, (azimutal)** que determina la excentricidad de la órbita (que sea más o menos elíptica).
- A partir del segundo nivel energético existen dos o más **subniveles** en el mismo nivel

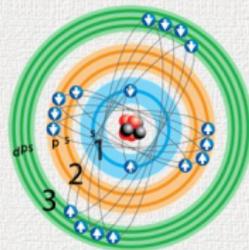
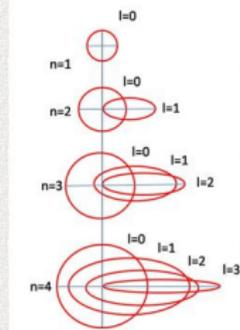


Figura 10: Además del número cuántico de energía, el modelo de Bohr-Sommerfeld introduce otros números cuánticos. Eso explica los subniveles o subcapas de algunos espectros, pero no totalmente.

EL MODELO ATÓMICO DE BOHR-SOMMERFELD

Sommerfeld introdujo dos modificaciones:

- Posibilidad de órbitas elípticas. Hace falta un 2º número cuántico, **secundario** o **azimutal**, (l), que puede variar entre 0 y $n-1$.
- Posibilidad de diferentes orientaciones de la órbita en un campo magnético, introduciendo un tercer número cuántico, llamado **magnético** (m) y que varía entre $-l$ y $+l$ incluido el 0.

Figura 11: El modelo de Sommerfeld, en una descripción más detallada de los números cuánticos azimutal (l), y el número cuántico magnético m .

Una serie de hipótesis adicionales se fueron introduciendo para explicar la estructura detallada de los átomos:

- Dualidad onda-partícula (Louis de Broglie). Las partículas subatómicas tienen propiedades de onda, no es solo que las ondas se comporten como partículas como se había visto en el caso de la luz. Esta idea fue demostrada con la interferencia de neutrones en un cristal (experimento Davidson-Germer).

Modelo mecanocuántico del átomo(II)

- Principio de indeterminación de Heisenberg. Al llegar a sondear la estructura del átomo, hay que localizar una partícula perturbándola. De acuerdo a las ideas de Heisenberg, que trataba de explicar las transiciones atómicas mediante la teoría matemática de matrices, es imposible conocer simultáneamente y con precisión dos magnitudes que tengan las mismas unidades que la constante de Planck. Esto ocurre con la posición y el momento lineal (producto de masa y velocidad), o con la energía y el tiempo de producción de un proceso subatómico, aunque es mucho más general:

$$\Delta A \Delta B \geq \hbar/2$$

$$\Delta x \Delta(mv) \geq \hbar/2$$

$$\Delta E \Delta \tau \geq \hbar/2$$

Modelo mecuanocuántico del átomo(III)

- La ecuación de Schrödinger: $H|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle$, describe el movimiento del electrón en situaciones no relativistas. En situaciones relativistas, se requiere la ecuación de Dirac: $(i\hbar\gamma \cdot \partial - e\gamma \cdot A - mc)\Psi = 0$.

De acuerdo con Heisenberg, hay una cierta borrosidad o fluctuación incontrolable en toda partícula fundamental. Esta idea y las anteriores, llevaban a la conclusión de que para describir una partícula subatómica había que recurrir a una función de onda $\Psi(x, y, z, t)$. Esta función de onda, resuelta para estados estacionarios, producía los niveles de energía del átomo y de otras estructuras subatómicas (núcleos o partículas). La función de onda tiene una interpretación puramente estadística, dada por Max Born (no confundir con Bohr), que indica que $|\Psi|^2$ es la probabilidad de encontrar al electrón (en el caso del átomo), y es un número real comprendido entre 0 y 1. La función de onda no tiene significado físico sencillo porque es un número complejo $\Psi \in \mathbb{C}$. Es decir, $\Psi = A + Bi$, con $i = \sqrt{-1}$.

Modelo mecanocuántico(IV)

- El concepto de trayectoria se difumina y se introduce el concepto de orbital como zona donde es más probable encontrar el electrón. Cada orbital tiene una forma y puede albergar dos electrones en forma de nube con espines opuestos.
- El principio de exclusión prohíbe que un fermión como el electrón posea los 4 números cuánticos iguales en un átomo (n,l,m,s). La función de onda es una amplitud de probabilidad, y en general, es un número complejo ($\Psi = S + iT$, con $i^2 = -1$).
- Así, en Mecánica Cuántica, la pregunta no es, generalmente (salvo en detectores concretos), dónde se encuentra el electrón sino dónde está probablemente.

Modelo mecanocuántico del átomo(V)

- El desarrollo de las teorías cuánticas tuvo lugar en varias etapas. En una primera parte, la parte matemática y axiomática, estuvo esencialmente acabada hacia 1933. La aplicación a las teorías electromagnéticas en la Electrodinámica Cuántica (QED, Quantum Electrodynamics), llevó 16 años más, hasta 1949.
- Posteriormente, se desarrollaron las teorías cuánticas para las interacciones débiles y nucleares fuertes. La teoría cuántica de la interacción débil empezó con la teoría de Fermi y acabó con el modelo de la teoría electrodébil de Glashow-Weinberg-Salam, complementado con el trabajo posterior de Peter Higgs y otros para la explicación de la masa de los fotones vectoriales masivos W,Z.
- La teoría de la interacción nuclear fuerte llevó primero a desarrollar la teoría de la matriz de scattering (o matriz S), y finalmente al modelo de la Cromodinámica Cuántica (QCD, Quantum Chromodynamics), basada en gluones y quarks.

- Finalmente, el descubrimiento de los bosones W y Z en los 80, y del último quark en 1995, llevó a la propuesta y construcción del LHC para encontrar al campo o partícula de Higgs (encontrado en 2012).
- La combinación de la teoría electrodébil y la QCD se denomina Modelo Estándar y explica que toda la materia está hecha de leptones y quarks, mientras que interactúa con bosones como fotones, partículas W,Z, gluones y bosones de Higgs.
- No explica la gravedad ni la materia o energía oscura que parece deducirse de los datos astronómicos, astrofísicos y cosmológicos.

¿Qué porcentaje de un átomo está vacío? Considera el átomo más simple, el átomo de hidrógeno. Su radio mínimo es de $10^{-10}m$. El protón tiene un tamaño máximo de 1 fm, $10^{-15}m$. El volumen ocupado por el electrón es pues $10^{-30}m^3$ y el del núcleo es $10^{-45}m^3$.

Dividiendo:

$x = V(\text{núcleo})/V(\text{átomo}) = 10^{-15}$, luego el átomo tiene un espacio vacío igual a $Y = 1 - x = 1 - 10^{-15} = 0,9999999999999999 = 99,99999999999999\%$. El átomo es vacío esencialmente.

Números cuánticos del núcleo y del átomo: A , Z y N (N_e)

- **Número atómico Z .** Es el número de protones del átomo, coincide con el número de electrones si el átomo es neutro.
- **Número de neutrones N .** Es el número de neutrones de un átomo.
- **Número másico A .** Es el número de protones más el de neutrones de un átomo $A = Z + N$.
- **Número de electrones N_e .** En su estado fundamental y neutro, un átomo tiene el mismo número de protones que de electrones. En caso de un desbalance de electrones respecto al número de protones, obtenemos un átomo cargado eléctricamente (no neutro), también llamado *ion*.

Conceptos de física atómica y nuclear(I)

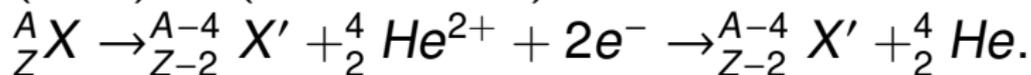
- **Iones.** Átomos o grupos de átomos que han perdido o ganado electrones. Si ganan electrones, los iones son de carga negativa y se llaman aniones. Si pierden electrones, los iones son de carga positiva o cationes.
- **Isótopos.** Átomos del mismo elemento, por tanto mismo Z , mismo número de protones, pero diferente número másico y por tanto diferente número de neutrones.
- **Isótonos.** Átomos de diferentes elementos con el mismo número de neutrones.
- **Isóbaros.** Átomos de diferentes elementos con el mismo número másico.
- **Isómeros.** Átomos del mismo núcleo, que solamente difieren en energía. Es decir, son estados excitados del mismo átomo o núcleo.

- Los átomos se suelen simbolizar mediante el esquema ${}^A_ZX^{n\pm}$, donde A es el número másico, Z el número atómico y n es la carga eléctrica del mismo (no se pone si es neutro). Además de en estado neutro, la estabilidad de un átomo se logra con la estabilidad del propio núcleo.
- Generalmente, salvo en los elementos más pesados, los átomos estables tienen un número de protones similar al número de neutrones.
- Cuando hay un desbalance o desequilibrio entre el número de protones y el de neutrones, el núcleo y el átomo suelen ser inestables, presentando el fenómeno de la *radioactividad*.

Radioactividad

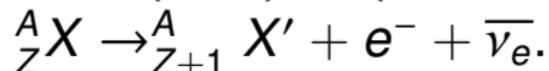
La radioactividad es el fenómeno que tiene lugar en algunos átomos cuyos núcleos están muy desbalanceados en su número Z y N . Hay átomos radiactivos de casi todos los elementos químicos. La radioactividad es un fenómeno que consiste en la emisión de partículas (fotones, neutrones y neutrinos, protones o incluso otros núcleos como partículas alfa) de un átomo, transmutándose (transformándose) en otro para lograr la estabilidad (menor energía, y un mejor balanceo de protones y neutrones). Existen 3 tipos básicos de radioactividad: alfa, beta y gamma. Luego hay dos formas menos conocidas de “radiación”, denominadas radiación delta y epsilon.

- **Radiación alfa** α , emisión de un núcleo o átomo de helio:

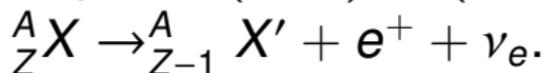


- **Radiación beta** β . Hay dos tipos. Beta negativa o beta menos β^- , y beta positiva o beta más β^+ . Así,

$\beta^- : (A, Z) \rightarrow (A, Z + 1)$, o bien

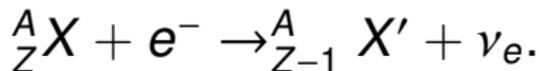


La β^+ es $(A, Z) \rightarrow (A, Z - 1)$, o bien

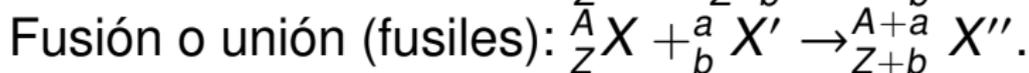
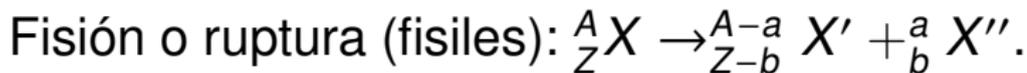


e^- es el electrón, e^+ es el positrón (antipartícula del electrón), ν_e es el neutrino del electrón, y $\bar{\nu}_e$ el antineutrino del electrón.

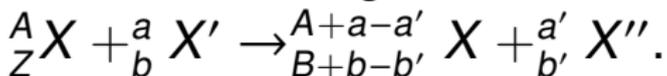
- **Reacción o radiación de captura electrónica (CE, K-capture).** Consiste en la captura de un electrón y la transmutación del átomo y núcleo asociado.



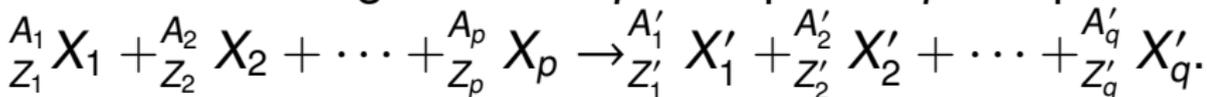
- **Reacción de fisión/fusión tipo cluster (o cúmulo).**



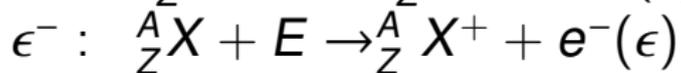
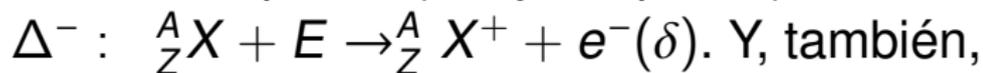
Transmutación general a 2 cuerpos:



Transmutación general de p -cuerpos a q -cuerpos:



- **Radiación gamma** (emisión de fotones electromagnéticos de alta energía de núcleos o átomos excitados). ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$.
- **Rayos (o radiación) delta δ** (Δ^- , *Delta – rays*). Se trata de electrones muy energéticos arrancados de los átomos por otro tipo de radiación (ionizante). También se la llama radiación secundaria o electrones secundarios. Los electrones menos energéticos, o terciarios, constituyen la llamada radiación epsilon (o rayos epsilon).



Tipos de radioactividad(V)

- Se especula con la posibilidad de las llamadas desintegraciones beta doble, solamente posibles si el neutrino es lo que se llama una partícula de Majorana (su propia antipartícula, descrita por una ecuación de Dirac modificada llamada ecuación de Majorana). En tal caso, sería posible el proceso

$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$ ($\beta\beta^{2-}0\nu_e$), y $(A, Z - 2) \rightarrow (A, Z) + 2e^+$ ($\beta\beta^{2+}0\nu_e$), es decir, sería posible una desintegración beta doble sin neutrinos si el neutrino es su propia antipartícula. Este hecho se desconoce en la actualidad (así como el valor exacto de la masa de los neutrinos). Más concretamente:

$$\beta^{--} : \quad {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+2} X' + 2e^-,$$

para una reacción doble beta menos sin neutrino, y,

$$\beta^{++} : \quad {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-2} X' + 2e^+,$$

para una reacción de desintegración doble beta más sin neutrino.

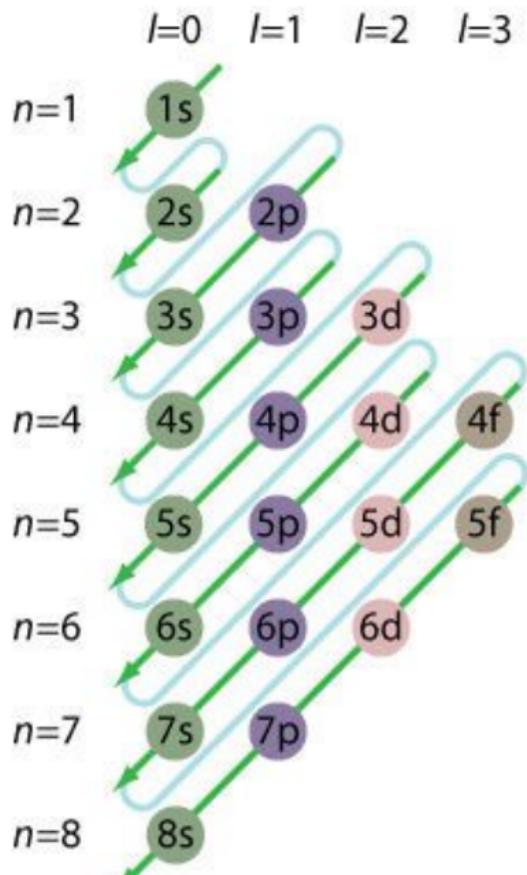
- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos
- 3 Configuración electrónica**
- 4 La Tabla Periódica
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

Configuraciones de electrones en los átomos

- El modelo de Bohr ya postulaba la existencia de capas de energía, con $n = 1, 2, 3, \dots$, que también se representan por K, L, M, N, \dots .
- La mecánica cuántica establece que los electrones en los átomos poseen subcapas asociadas a los orbitales donde se distribuyen los electrones. Los orbitales son la zona de máxima probabilidad de encontrar al electrón en el átomo, y se denominan generalmente $s, p, d, f, (g, h, i, \dots)$.
- En un nivel de energía n caben $2n^2$ electrones, en un subnivel o subcapa (orbital), caben $2(2l + 1)$ electrones (para $l=0, 1, 2, \dots$). Un orbital queda especificado por 3 números cuánticos (n, l, m) .

- Un electrón se caracteriza por 4 números cuánticos (n, l, m, s). El número cuántico magnético toma valores enteros entre $-l$ y $+l$. La distribución de electrones se hace usando las reglas de Hund (preferencia por el máximo momento angular total del electrón en el átomo) y el principio de exclusión de Pauli (no pueden existir en un átomo -o sistema fermiónico- dos o más electrones con los mismos cuatro números cuánticos iguales), pero para propósitos prácticos usa el diagrama de Möller o principio de Aufbau:

Principio de Aufbau



- Los orbitales mecanocuánticos se especifican con 3 números cuánticos: (n,l,m) . Un electrón en un átomo se especifica con 4 números cuánticos, (n,l,m,s) . n indica la energía del orbital, l su forma, m su orientación espacial. s indica el estado de espín del electrón. n se llama número cuántico principal, l número cuántico secundario, m número cuántico magnético y s número cuántico de espín.

Configuraciones electrónicas(IV): la Tabla Periódica

- La existencia del espín era imprescindible para explicar los resultados del experimento Stern-Gerlach (1922), el experimento de Uhlenberg y Goudsmit (1925), y era predicha por la ecuación de Dirac. También se necesitaba el espín para explicar, por ejemplo, el efecto Zeeman anómalo.
- La estructura electrónica de los elementos químicos, explica la Tabla Periódica.
- Se conocen, circa 2020, 118 elementos químicos diferentes (En 2020, se conocen 339 nucleidos o núcleos naturales, de los cuales 87 son radioactivos y se encuentran en la Tierra, y 252 no se ha observado que se desintegren nunca, por lo que se consideran estables; en total, contando los sintéticos y encontrados fuera de la Tierra, hay más de 3300 nucleidos, mucho más pues que elementos diferentes en la Tabla Periódica Moderna).

- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos
- 3 Configuración electrónica
- 4 La Tabla Periódica**
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

Atomic Periodic Table of the Elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																														
1	H 1	Orbitals																He 2																														
2	Li 3	Be 4	s p d f								B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10																																
3	Na 11	Mg 12										Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18																															
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36																														
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54																														
6	Cs 55	Ba 56	57 -71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86																														
7	Fr 87	Ra 88	89- 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118																														
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>La 57</td><td>Ce 58</td><td>Pr 59</td><td>Nd 60</td><td>Pm 61</td><td>Sm 62</td><td>Eu 63</td><td>Gd 64</td><td>Tb 65</td><td>Dy 66</td><td>Ho 67</td><td>Er 68</td><td>Tm 69</td><td>Yb 70</td><td>Lu 71</td> </tr> <tr> <td>Ac 89</td><td>Th 90</td><td>Pa 91</td><td>U 92</td><td>Np 93</td><td>Pu 94</td><td>Am 95</td><td>Cm 96</td><td>Bk 97</td><td>Cf 98</td><td>Es 99</td><td>Fm 100</td><td>Md 101</td><td>No 102</td><td>Lr 103</td> </tr> </table>																La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71																																		
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103																																		

Rare gases

1s
2s + 2p
3s + 3p
4s + 3d + 4p
5s + 4d + 5p
6s + 4f + 5d + 6p
7s + 5f + 6d + 7p

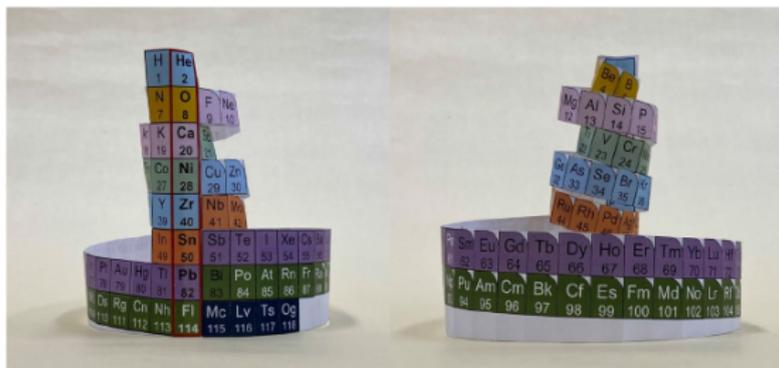
4f
5f

Figura 13: Números mágicos atômicos: 2, 10, 18, 36, 54, 86, 118, 158, 208, 280, ...

Period	1																18 Orbitals									
1	1 H	2														13	14	15	16	17	2 He	1s				
2	3 Li	4 Be														5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2s2p				
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	3s3p							
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	4s3d4p							
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	5s4d5p							
6	55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	6s5d6p							
7	87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113	114	115	116	117	118	7s6d7p							
8	119	120	121-	156	157	158	159	160	161	162	163	164	139	140	169	170	171	172	8s7d8p							
9	165	166														167	168	9s9p								
6	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	4f										
7	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	5f										
8	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	6f										
8	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	5g							

Figura 15: Tabla periódica extendida: modelo de Pekka Pykko. ▶

Modelos de tablas 3d



(a)

(b)



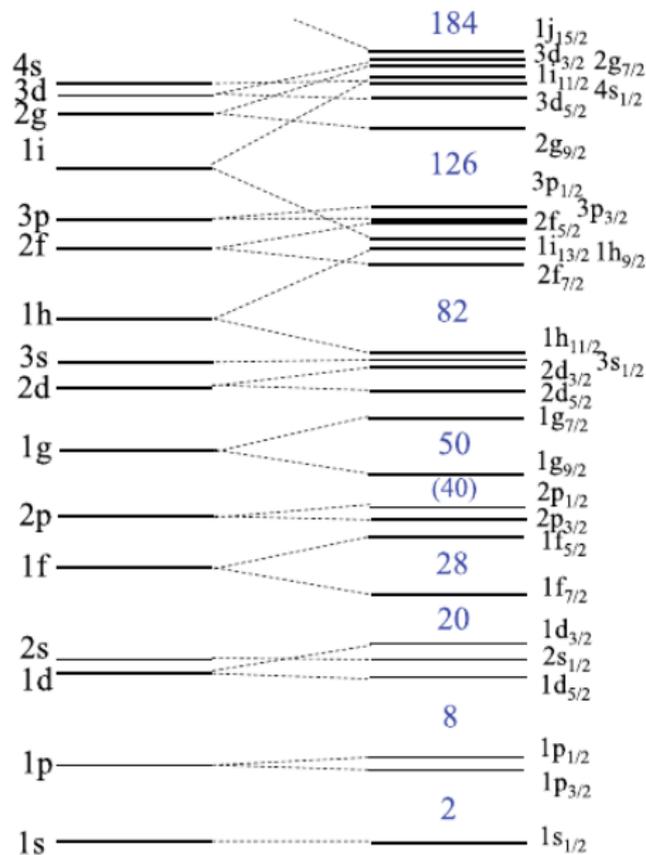
(c)

(d)

(e)

Figura 16: Tabla periódica extendida: modelo nuclear 3d.

Niveles o capas nucleares



Niveles o capas nucleares(II)

Nuclear Periodic Table

Shape and stability

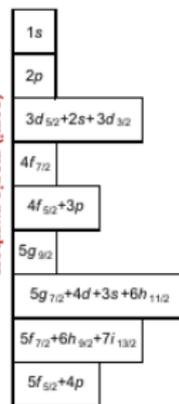
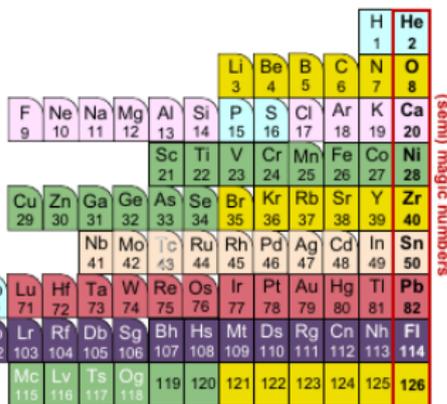
	Stable	Unstable
Spherical	Nb 41	Nh 113
Deformed	Mo 42	Tc 43

Orbitals: $n_p \ell_j$

s	p	d	f	g	h	i
---	---	---	---	---	---	---

$$5g_{9/2}: n_p = n + \ell = 5, n = 1, \ell = 4, j = \ell + s = 9/2$$

Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	Cs 55	Ba 56	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Pb 82	
Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114



- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos
- 3 Configuración electrónica
- 4 La Tabla Periódica
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico**
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

Enlace químico

Se llama enlace químico a la unión de dos o más átomos del mismo o distinto elemento, que forman un compuesto químico con fórmula química fija, y que posee ciertas propiedades características. Existen esencialmente 3 tipos de enlace químico: *enlace iónico*, *enlace covalente* y *enlace metálico*. Se especula con la existencia de un cuarto tipo de enlace llamado enlace vibracional.

Enlace iónico(I)

Enlace iónico

El enlace iónico se produce entre elementos del grupo G1(alcalinos) ó G2(alcalino-térreos), y elementos del grupo G16 (anfígenos o calcógenos) y grupo G17(halógenos). En este tipo de enlace, un elemento cede electrones y el otro acepta electrones, por lo que se considera se produce entre iones y eso justifica su nombre, **enlace iónico**.

Ejemplos: NaCl , KI , Na_2S , Li_2Se , BeCl_2 , MgS , CaTe ,...

Las propiedades de los compuestos con enlace iónico son las siguientes:

Enlace iónico(II)

- Son sólidos a temperatura ambiente, y tienen elevadas temperaturas de fusión y ebullición.
- Son duros pero frágiles.
- Son solubles en disolventes como el agua, y otros disolventes denominados disolventes polares que permiten desplazamiento de carga eléctrica.
- Son malos conductores de la electricidad y el calor en estado sólido, pero conducen bien la electricidad disueltos o fundidos (también el calor).
- Forman cristales con alto número de coordinación. El número de coordinación es el número de iones o átomos que tiene a su alrededor otro ión de diferente tipo.

Enlace covalente

El enlace covalente se produce entre un no metal y un metal no demasiado iónicos, y se considera que se produce por compartición de electrones en la última capa, denominada capa de valencia de un átomo. Hay dos tipos fundamentales de compuestos covalentes, llamados enlace covalente molecular y enlace covalente cristalino.

Enlace covalente(II): enlace covalente molecular

Son sustancias con las siguientes propiedades:

- No son sustancias cristalinas.
- Son sustancias generalmente gaseosas o líquidas, aunque hay algunas sólidas, a temperatura ambiente.
- Son blandas y tienen bajas temperaturas de fusión y ebullición.
- Son sustancias que son malas conductoras de la electricidad y el calor.
- Son sustancias generalmente insolubles en agua (aunque hay sustancias que pueden disolverse en agua).
- Pueden tener propiedades muy diferentes a otras sustancias covalentes del mismo tipo y entre sí.
- En general, no tienden a formar iones.

Ejemplos: Cl_2 , O_2 , O_3 , Br_2 , I_2 , O_7Cl_2 , SO_3 , CO_2 , CO , ...

Enlace covalente(III): enlace covalente cristalino

Son sustancias con las siguientes propiedades:

- Son sustancias cristalinas.
- Son sustancias generalmente duras o muy duras a temperatura ambiente.
- Tienen altas o muy altas temperaturas de fusión y ebullición.
- Son sustancias que son malas conductoras de la electricidad y el calor.
- Son sustancias muy insolubles en agua siempre.
- Pueden tener números de coordinación altos o bajos.
- En general no tienden a formar iones.

Ejemplos: C (*diamante*), SiO_2 (*cuarzo*), $UO_2(U_3O_8)$, ...

Enlace metálico

Es el enlace que se da entre especies o sustancias puramente metálicas y en las aleaciones. Tiene propiedades singulares debido a que su existencia se debe al solapamiento de un gran número de orbitales atómicos (los orbitales son zonas de máxima probabilidad para encontrar al electrón en un átomo o molécula).

Sus propiedades son:

Enlace metálico(II)

- Tienen altas temperaturas de ebullición y fusión, salvo algunos como el mercurio (Hg), el francio (Fr), el cesio (Cs) y el galio (Ga), o también el rubidio (Rb), el sodio (Na) o el potasio (K).
- Son dúctiles (pueden hacerse hilos con ellos) y maleables (pueden hacerse láminas con ellos).
- Son duros y deformables (a alta presión).
- Son buenos conductores de la electricidad y el calor.
- Presentan efecto termoeléctrico, termoiónico y fotoeléctrico.
- Algunos presentan propiedades denominadas piroelectricidad, piezoelectricidad y ferroelectricidad (pero no todos las poseen o exhiben, y no todos en la misma proporción).
- Forman aleaciones.
- No son solubles en agua.
- Tienden a formar cationes, pero pueden formar aniones.

Ejemplos: Li, Na, K, Rb, Be, Mg, Fe, Hg, Ga, In, Cs, Fr,

Contenido

- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos
- 3 Configuración electrónica
- 4 La Tabla Periódica
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales**
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

- Una molécula es una sustancia pura formada por la combinación de 2 o más átomos (iguales o distintos). Una molécula tiene en general una fórmula química, y unas propiedades y estructuras geométricas características.
- Estructuras ordenadas de átomos, moléculas e iones dan lugar a diversas sustancias.

- Muchos sólidos forman lo que se denominan cristales.
- Un **cristal** es un compuesto que tiene una estructura ordenada de átomos o iones formando un patrón geométrico o secuencia que es repetitivo en el espacio. Un compuesto no cristalino se llama *amorfo* (antiguamente llamados vidrios).
- Existen sustancias que presentan no una, sino varias estructuras cristalinas de forma simultánea. Son los llamados *policristales*, cuyos granos o “cristalitos” forman las unidades básicas del policristal.

Cristales(II): Cuasicristales

También existen patrones ordenados pero no periódicos. Las estructuras que son ordenadas pero no periódicas se llaman cristales cuasiperiódicos o *cuasicristales*. Otro tipo de estructura ordenada son los *paracristales*: estructuras que a pequeñas o medias distancias interatómicas son cristalinos, pero a grandes distancias pierden la cristalinidad y son amorfos en al menos una dirección del espacio. En Geología, hoy día se distingue entre varias clases de cristalinidad, existiendo fases o estados denominados:

- *Holocristalino*. Estado hecho totalmente de cristales.
- *Hipocristalino o hemicristalino*. Estado que consiste en cristales incrustados en materia amorfa.
- *Hipohialino*. Materia o estado parcialmente amorfo, pero sin cristales.
- *Holohialino*. Materia o estado totalmente vidrioso. El material amorfo se forma generalmente por fusión y un enfriamiento rápido que produce la solidificación o condensación sin la creación de fases cristalinas u ordenadas.

- Finalmente, a principios del siglo XXI, se especula, teoriza y se intentan producir los llamados *cristales de tiempo*. Los cristales de tiempo son, al menos en teoría, sistemas materiales que presentan una estructura repetitiva en el tiempo, no solamente en el espacio. Generalmente llamamos cristal a algo que se repite y tiene una estructura ordenada en el espacio, pero permanece inalterado cuando el tiempo pasa. Los cristales de tiempo cambian de forma periódica cuando el tiempo transcurre.

Cristales de tiempo(II)

Un cristal de tiempo, además:

- No viola o incumple las leyes básicas de la Termodinámica.
- Puede cambiar de forma eterna periódicamente en el tiempo si el sistema es sostenido de alguna forma.
- No puede existir en equilibrio termodinámico, por lo que no tiene una temperatura fija, posee movimiento sin energía y no tiene una expresión de energía cinética convencional (la teoría cinética estándar de Boltzmann no aplica a los cristales de tiempo).
- Es resultado de las fluctuaciones cuánticas en no equilibrio como consecuencia de las interacciones entre varios cuerpos.
- Pueden entenderse como resultado de la ruptura de la simetría de traslación en el tiempo.

Imágenes de cristales y cuasicristales(I)

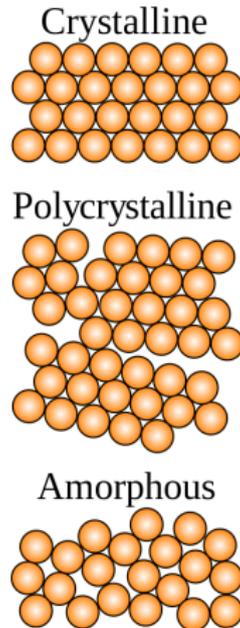


Figura 17: Materiales amorfos, policristalinos y cristalinos.

Imágenes de cristales y cuasicristales(II)

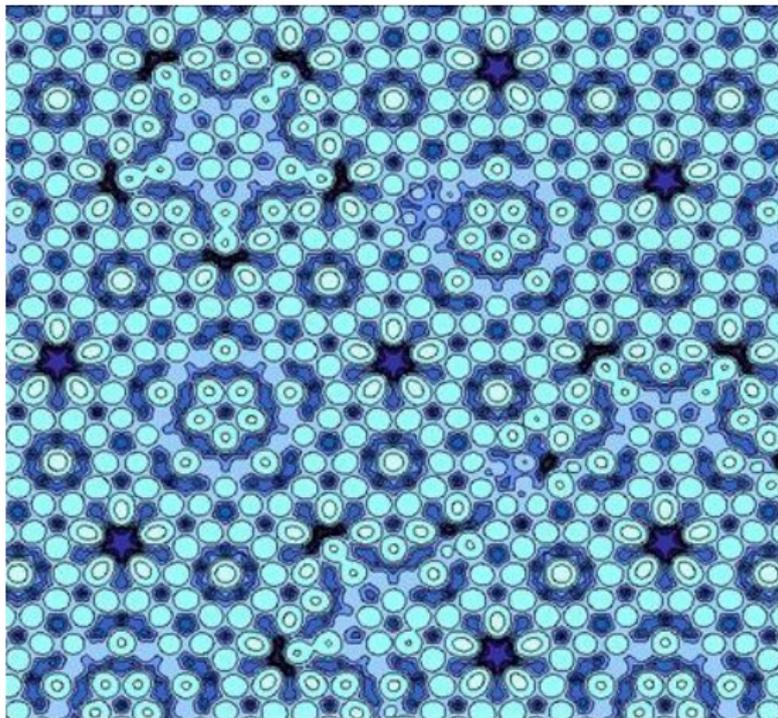


Figura 18: Cuasicristal, ejemplo.

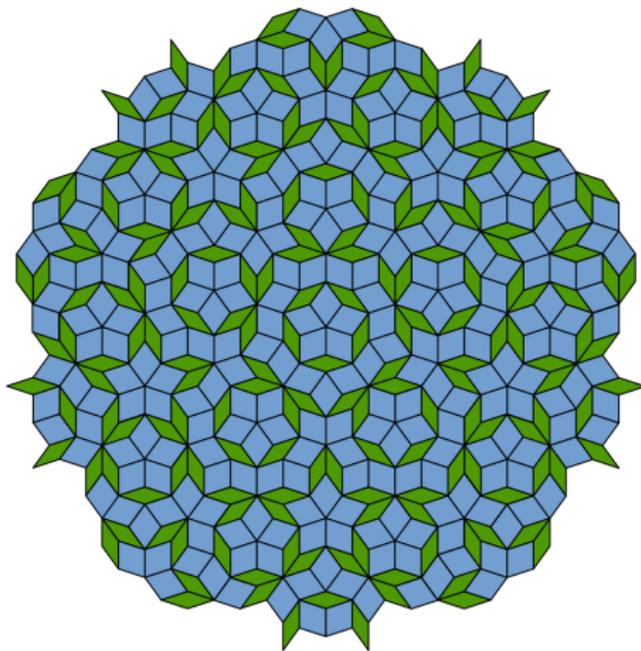


Figura 19: Teselación de Penrose, ejemplo de cuasicristal.

Las partículas del átomo clásico tienen unas propiedades como fermiones (partículas de espín semientero):

- Electrón: Masa= $M = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$,
carga eléctrica= $Q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,
espín= $S = \pm 1/2$.
- Protón: Masa= $M = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$,
carga eléctrica= $Q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,
espín= $S = \pm 1/2$.
- Neutrón: $M = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $Q = +0 \text{ C}$,
espín= $S = \pm 1/2$.

- La masa del protón es 1836 veces ($6\pi^5$) la masa del electrón.
- El muón es unas 200 veces la masa del electrón y el tauón más de 3000 (unas 3477) veces la masa del electrón.
- No se entiende por qué existen dichas partículas. Otras partículas subatómicas, además de por la carga eléctrica, la masa y el espín, se tipifican con otros números cuánticos como el número bariónico, el número leptónico, la extrañeza, la paridad o la conjugación de carga.

- El estado del arte en la teoría cuántica propone que las entidades fundamentales no son las partículas o las ondas, sino objetos de tipo fluídico que impregnan el espacio-tiempo llamados campos cuánticos.
- Existe un campo fundamental para cada tipo de partícula conocidas, aunque se sospecha que puedan en realidad ser aspectos de un único campo o fuerza. Las excitaciones de los campos son las partículas subatómicas que observamos hoy día, y que se propagan mediante ondas en el vacío en el espacio-tiempo o en medio lleno de estos campos cuánticos.

El Modelo Estándar(IV)

- Se sospecha también que el espacio-tiempo debe tener una subestructura cuántica en sí misma, pero no ha podido determinarse todavía esa discretitud más allá del análisis de algunas teorías y extrapolaciones dimensionales.
- En concreto, diferentes tipos de argumentos sugieren la existencia de una distancia fundamental que trataría el espacio-tiempo a nivel cuántico, llamada longitud de Planck. Matemáticamente:
$$L_p = \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-35}m.$$
- A esas distancias, no podría estudiarse ni la gravedad ni los campos cuánticos sin tener en cuenta las fluctuaciones cuánticas del propio espacio-tiempo o lo que quiera que lo sustituya a esa escala. No se sabe si cabe concebir una teoría por debajo de esa distancia. El vacío de la teoría cuántica de campos es altamente no trivial y produce efectos sorprendentes.

El Modelo Estándar(V)

Número de electrones por capa: $2n^2$, $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$
entero positivo.

Número de electrones por subcapa: $2(2l + 1)$,
 $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$.

Número cuántico magnético:

$$m_l = -l, -l + 1, \dots, 0, \dots, l - 1, l.$$

Número cuántico de espín (para electrones):

$$s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}.$$

Las partículas subatómicas se caracterizan por su masa M , la carga eléctrica Q , el momento angular de espín S , el momento angular total $J = L + S$ y, excepcionalmente, otros números cuánticos.

- De hecho, los números cuánticos correctos en un átomo se pueden tomar como (n, l, m_l, s) , siendo s el número cuántico de espín (total) determina la energía el momento angular L orbital via $L^2 = \hbar^2 l(l + 1)$, la proyección del momento angular sobre una dirección del espacio, por ejemplo el eje Z , via $L_z = m_l \hbar$, y la proyección del momento angular de espín en dicha dirección, via $S_z = m_s \hbar$.

- También se introduce a veces la paridad de un estado, como el número $P = (-1)^l$, y también el momento angular total $J = L + S$, que determina valores $j = |l \pm s|$, un momento angular $J^2 = \hbar^2 j(j + 1)$, y una proyección $J_z = m_j \hbar$, siendo $m_j \in [-j, +j]$, con $m_j = m_l + m_s$ si $|m_l + m_s| \leq j$.

El Modelo Estándar(VIII): la Tabla Periódica(III)

- Cuando L y S no conmutan con el hamiltoniano en un átomo, se debe usar como buenos números cuánticos otros. Una posible elección es J, m_j, P , lo que da lugar a estados via J^P , momento angular total, su proyección en un eje y la paridad.
- Esto ocurre normalmente cuando el acoplamiento denominado espín-órbita no puede ser ignorado o despreciado, al evolucionar en el tiempo L, S y H .
- Sin embargo la energía o masa invariante, la carga eléctrica, la paridad y el momento angular total (y su proyección) son un conjunto de números cuánticos para especificar un estado cuántico de un átomo, núcleo o partícula elemental en tal caso.

Otras partículas hipotéticas

Listado de partículas hipotéticas de algunas teorías no estándares.

Preones, subquarks, rishones, subsuquarks, techniquarks, leptoquarks (X,Y), W primas (W'), Z primas (Z'), axiones, monopolos magnéticos, diones, p-branas, Dp-branas, instantones, esfalerones, sleptones y squarks (selectron, smuon, stau, squarks, sup, sdown, scharm, sstrange, stop, sbottom, sneutrinos), gauginos (Wino, Zino, gluino, fotino, neutralino, gravitino), taquiones, elvisebriones, superbradiones, hiperfotones, hiperbosones, campos de alto espín, carguino, branón, axino, dilatón, dilatino, gravifotón, graviescalar, gravitón dual, inflatón, majoron, saxión, partículas espejo, resonancias Kaluza-Klein, multiquarks e híbridos, glueballs, acelerones, plektones, WIMPs, GIMPs, SIMPs, pomeron, skyrmion, geones, genones, cronones, bosones de Goldstone, Goldstinos, espuriones, microagujeros negros, agujeros negros extremos microscópicos y ultramicroscópicos, planckiones, campos fantasma (ghost fields), holeum, kugelblitz, cuantos de espacio-tiempo, supercuerdas, super p-branas, cuerdas cósmicas, agujeros de gusano, . . .

Otros números cuánticos

Número bariónico, B. Está asociado a los bariones, o partículas hechas de 3 quarks. Son hadrones (partículas que interactúan fuerte). Además de los bariones, existen los mesones (partículas hechas de 2 quarks: un quark y un antiquark). El número bariónico se define como:

$$B = \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{3}$$

El número bariónico es 1 para los bariones usuales, -1 para los antibariones usuales, una fracción de 1/3 positiva o negativa para resonancias o bariones exóticos, y 0 para el resto de partículas.

Isospín, I_z . Mide el cambio de sabor o de sabor bariónico, en procesos de interacción nuclear fuerte o débil. Toma valores $\pm 1/2$, o bien:

$$I_z = \frac{n_u - n_d}{2}$$

como definición más general de isoespín (isospín).

Número leptónico, L. Es igual a +1 para leptones, -1 para antileptones y cero para partículas no leptónicas (bosones o hadrones).

El experimento de la doble rendija

- El experimento esencial de la Física Cuántica es el experimento denominado de la doble rendija.
- Átomos, moléculas o partículas pasan a través de un dispositivo con dos cajas y dos aperturas. En primer caso, con orificios cerrados, metemos detector para ver dónde está el átomo, que está en una caja o en otra. En un segundo experimento, abrimos ambas cajas por un solo agujero y vemos en una pantalla los impactos.

El experimento de la doble rendija(II)

- Abriendo los dos orificios, se forma un patrón interferencial, como si el átomo, molécula o partícula estuviera pasando por ambos sitios a la vez.
- Si ponemos un detector en uno de los orificios, volvemos al resultado del primer experimento. Lo chocante es que mientras NO observamos, el átomo, molécula o partícula está realmente en las dos cajas, no se ha dividido en dos, o bien estaba ya presente en las dos cajas, o bien está en dos sitios a la vez.

Conclusión: Estos hechos son resultado del carácter dual de la materia-energía, y también consecuencia del postulado de la medida, el observador afecta al resultado de las medidas al influir sobre los estados, de naturaleza probabilística **no determinista**.

El experimento de la doble rendija(III)

WAVE - PARTICLE WEIRDNESS

When quantum objects such as electrons are fired one by one through a pair of closely spaced slits, they behave like particles: each one hits a screen placed on the far side at exactly one point. But they also behave like waves: successive hits build up a banded interference pattern exactly like that generated by a wave passing through the slits (right). This wave-particle duality is described by a mathematical tool known as the wavefunction.

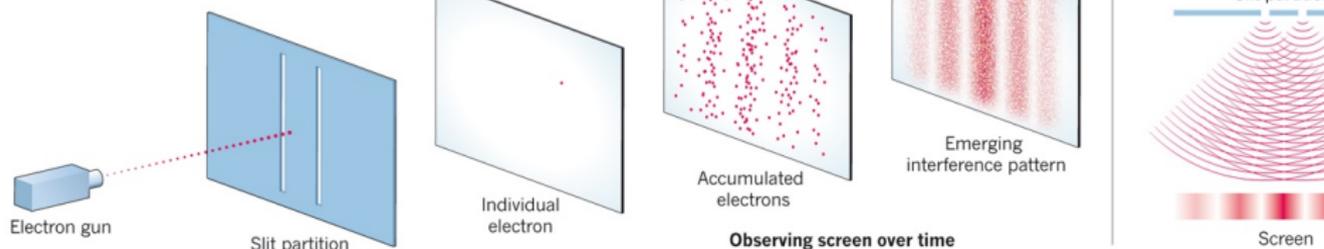


Figura 20: Experimento de la doble rendija, la madre de todas las “paradojas” cuánticas.

El experimento de la doble rendija(IV)

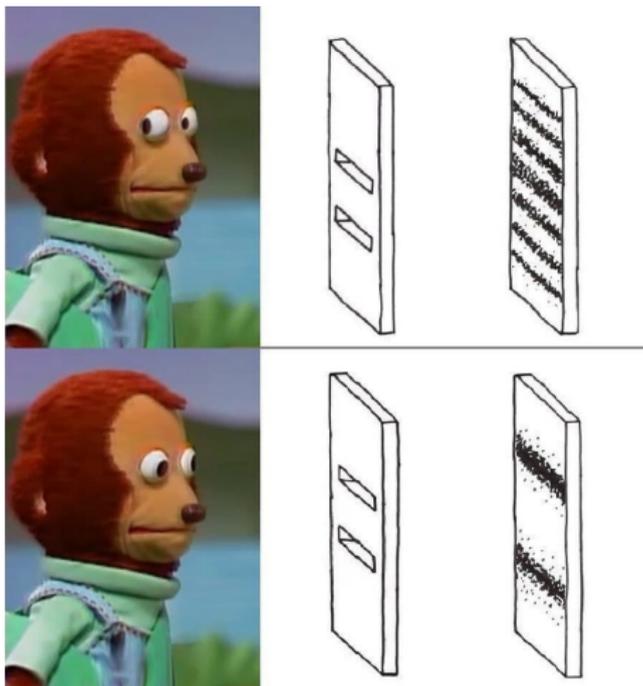


Figura 21: Experimento de la doble rendija, la madre de todas las “paradojas” cuánticas(II).

Otras evidencias de la Mecánica Cuántica que no pueden ser explicadas por la Física Clásica:

- Efecto Zeeman (normal y anómalo) y Stark.
- Entrelazamiento cuántico.
- Estados exóticos de la materia como la superconductividad, la superfluidez o el condensado de Bose-Einstein. Y otros más.
- El efecto túnel.
- Polarización del vacío.
- Efecto fotoeléctrico y termoeléctrico.
- ...

Contenido

- 1 El átomo
- 2 Modelos atómicos
- 3 Configuración electrónica
- 4 La Tabla Periódica
- 5 Enlace químico: enlace iónico, covalente y metálico
- 6 Moléculas. Cristales, cuasicristales, policristales
- 7 Radioactividad y sus usos: medicina, tecnología y energía nuclear

La radioactividad tiene diversos usos:

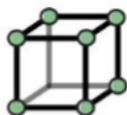
- Medicina (rayos X, la radioterapia, la quimioterapia, PET, TAC, RMN, terapia de protones,.. .).
- Esterilización de materiales.
- Producción de energía (energía nuclear de fusión y fisión).
- Activación/inhibición de procesos biológicos.
- Estudios de la tabla periódica (elementos superpesados, con $Z > 103$),...

En la Naturaleza y el cosmos, la radiación es vital para explicar el Universo y el Universo observable.

Figuras finales(I)



1803
Modelo
de Dalton



1902 -1916
Modelo
cúbico



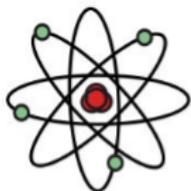
1903
Modelo
saturnino



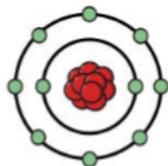
1904
Modelo pudin
de pasas



1907
Modelo
planetario



1911
Modelo
de Rutherford



1913
Modelo
de Bohr



1916
Modelo de
Sommerfeld

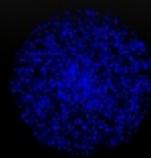
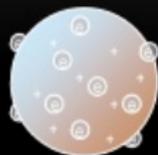


1926
Modelo
cuántico
ondulatorio



Actual
Modelo
mecánico
cuántico

SUMMARY OF ATOMIC MODELS



1803 John Dalton pictures atoms as tiny, indestructible particles, with no internal structure.

1897 J.J. Thomson discovers the electron. He pictures electrons embedded in a sphere of positive electric charge.

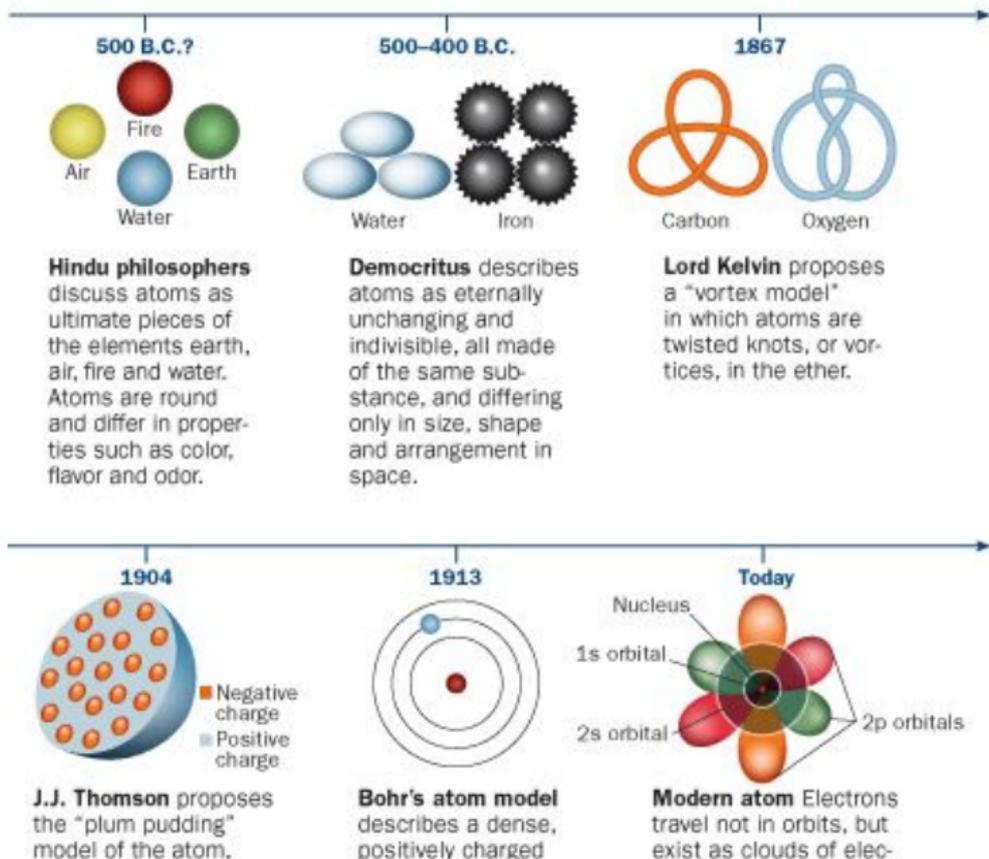
1911 Ernest Rutherford states that an atom has a dense, positively charged nucleus. Electrons move randomly in the space around the nucleus.

1913 In Niels Bohr's model, the electrons move in spherical orbits at fixed distances from the nucleus.

1926 Schrödinger develops mathematical equations to describe the motion of electrons in atoms. His work leads to the electron cloud model.

1800 1805 1895 1900 1905 1910 1915 1920 1925 1930 1935 1940 1945

Figuras finales(III)



Figuras finales(IV)

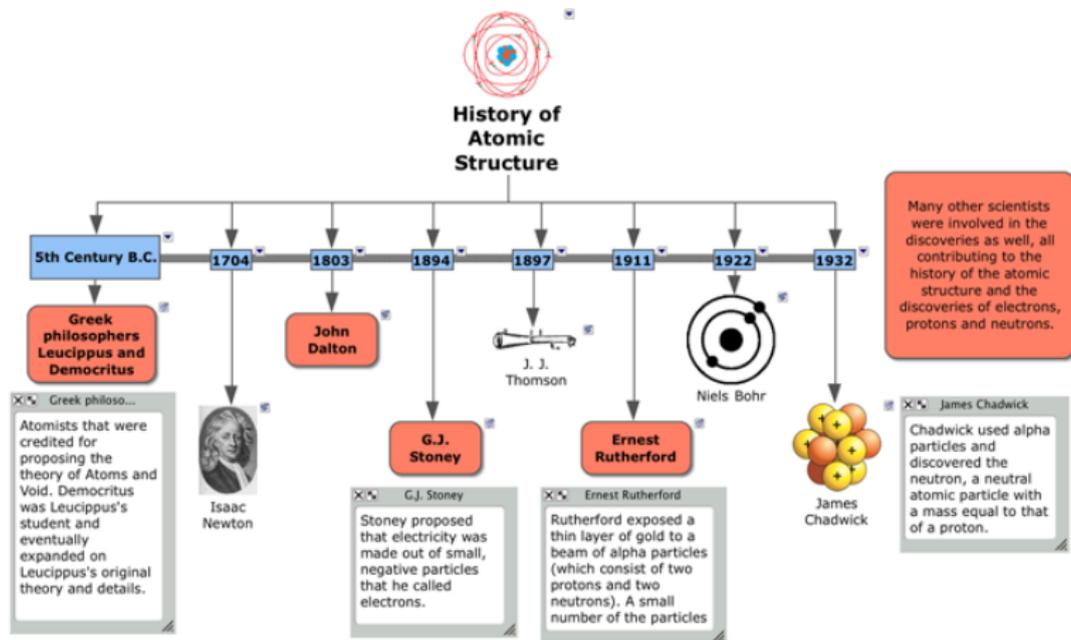
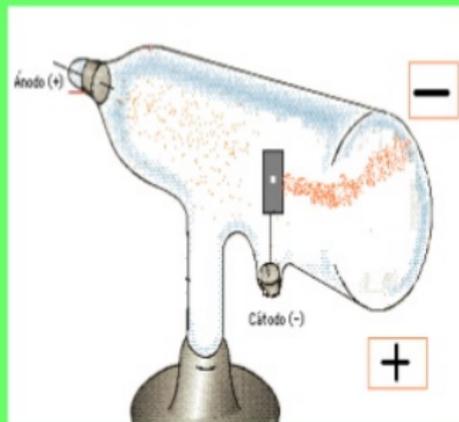


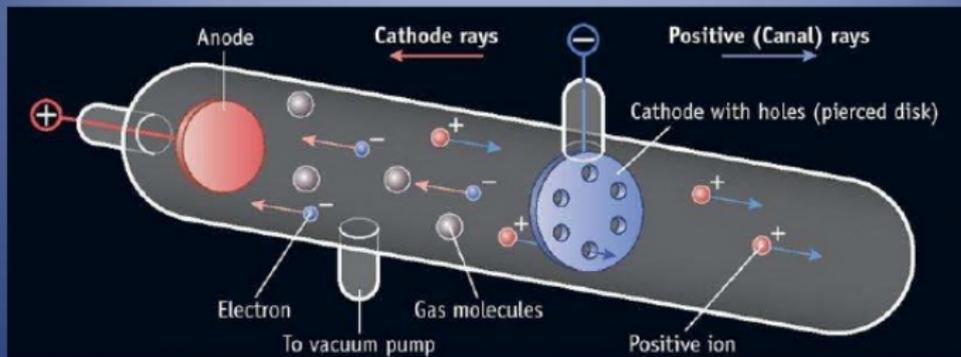
Figura 25: Historia atómica hasta el descubrimiento de Chadwick del neutrón. Stoney fue el autor de la idea del electrón, encontrado por J.J.Thomson en su experimento de rayos catódicos.

Tubo de rayos Canales

- En 1886 Eugen Goldstein, utilizo un tubo de rayos catódicos con cátodo perforado y observo otro tipo e rayos que procedían del ánodo, tenían la propiedad de desviar se por campos magnéticos y su carga era positiva los llamo protones



EXPERIMENTO CON TUBO DE RAYOS CATÓDICOS: THOMSON



Observación	Hipótesis
Propiedades del rayo no dependen del material del cátodo	Lo que contienen los rayos está en todos los materiales
Los rayos se desvían hacia un plato cargado positivamente.	Son partículas con carga negativa.

Figuras finales(VII)

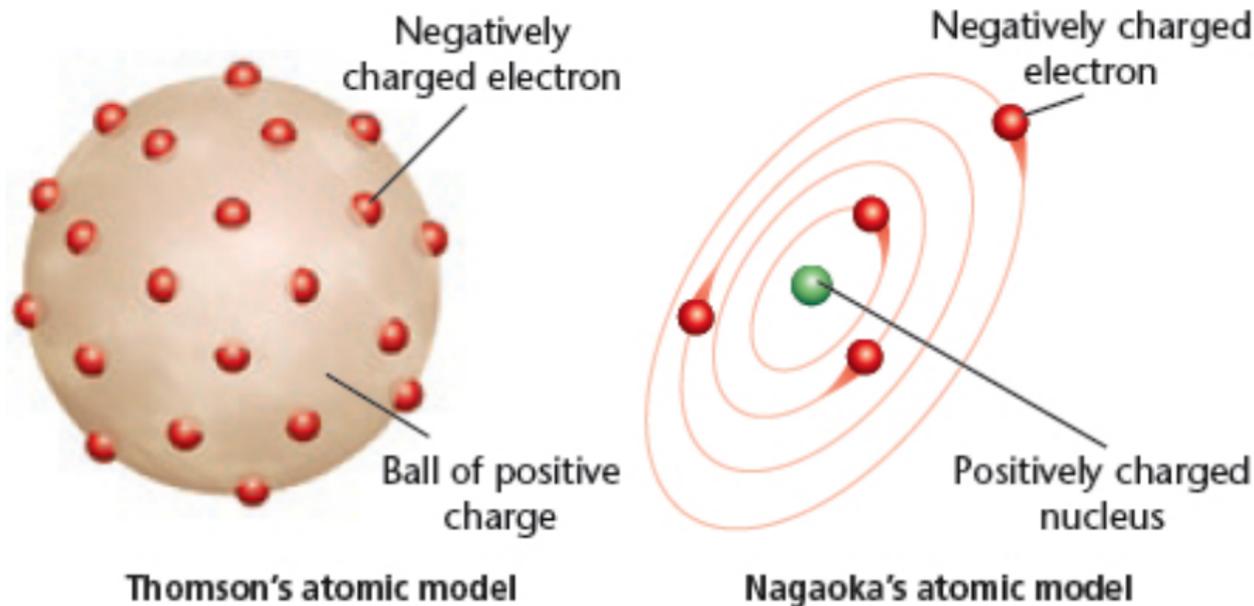


Figura 28: La imagen del modelo de Thomson frente a la del físico japonés Hantaro Nagaoka, posteriormente llamado modelo saturniano del átomo, en el que se inspiró Rutherford para su modelo atómico.

Figuras finales(VIII)

Planck length and time values based on Planck constant h

$$L_P \equiv \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 4.05096 \times 10^{-35} \text{ m} \quad t_P \equiv \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 1.35125 \times 10^{-43} \text{ s}$$



Planck length and time values based on Dirac's constant \hbar

$$L_P \equiv \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1.6161 \times 10^{-35} \text{ m} \quad t_P \equiv \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 5.39072 \times 10^{-44} \text{ s}$$



Figura 29: Límites extremos de longitud y tiempo, según Planck. La distancia y tiempo más pequeños concebibles desde el mundo de la Física Cuántica, con sus expresiones y valores estándares usando h y racionalizados, usando \hbar . La escala de distancia de Planck opera a $10^{-35}m$, mientras que el tiempo de Planck es algo tan pequeño como $10^{-43}s$. No hace falta decir, que circa 2020, no hay medidas de espacio o tiempo que sean tan precisas. De hecho, se requeriría una energía enorme, del orden de $10^{16}TeV = 10^{19}GeV$ explorar energías y tiempos de ese orden de magnitud.

Figuras finales(VIII)b: CORE theory

The Core Theory

$$W = \int_{k < \Lambda} [Dg][DA][D\psi][D\Phi] \exp \left\{ i \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{m_p^2}{2} R \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i \bar{\psi}^i \gamma^\mu D_\mu \psi^i + \left(\bar{\psi}_L^i V_{ij} \Phi \psi_R^j + \text{h.c.} \right) - |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi) \right] \right\}$$

quantum mechanics spacetime gravity

other forces matter Higgs

No purposes, causes, meanings, judgments.

Figura 30: La ecuación fundamental del Modelo Estándar.

Figuras finales(IX)b

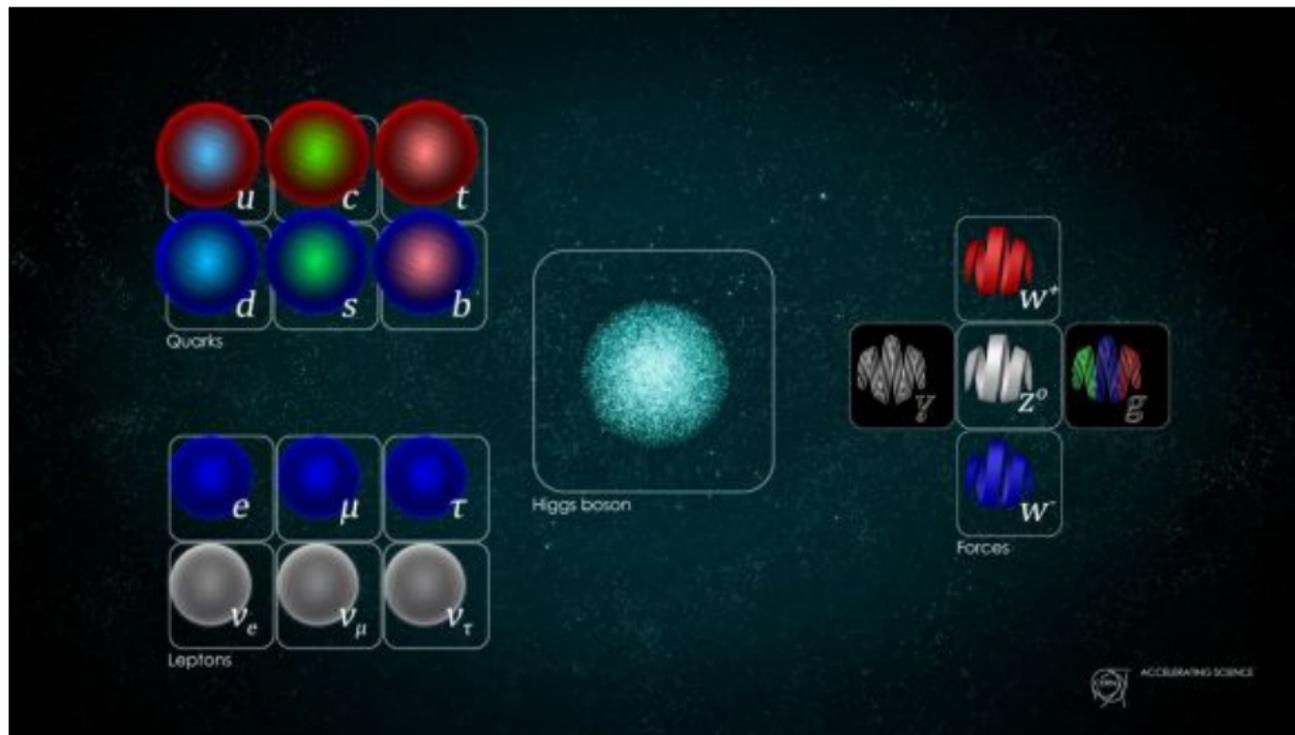


Figura 32: El Modelo Estándar y sus partículas(II).

Figuras finales(X)c

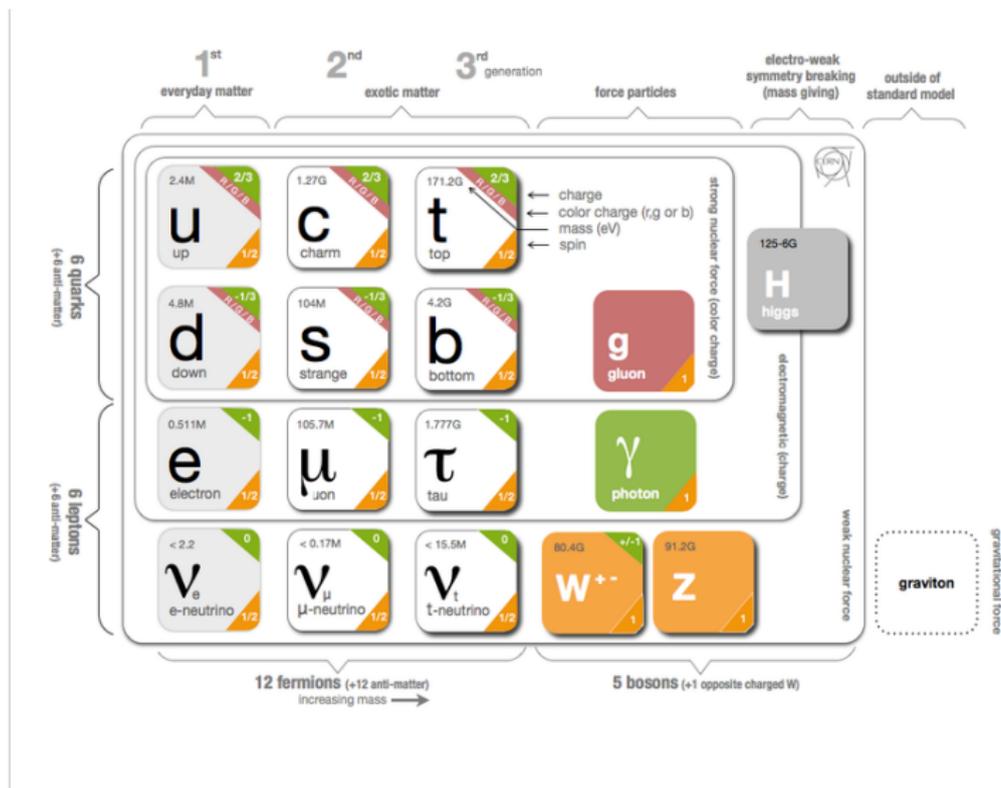


Figura 33: El Modelo Estándar y el gravitón como outsider.

Figuras finales(X)

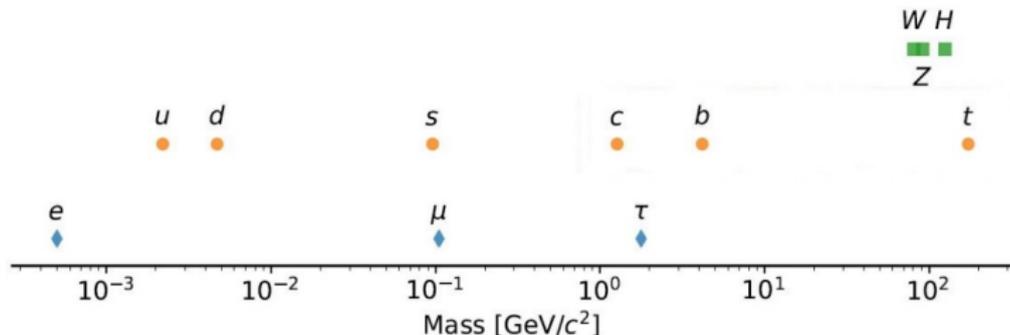


Figura 34: Escala de masas en el Modelo Estándar y sus partículas conocidas, salvo los neutrinos.

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H Hydrogen 1.008	Atomic # Symbol Name Weight																He Helium 4.0026
2	Li Lithium 6.94	Be Beryllium 9.0122											B Boron 10.81	C Carbon 12.011	N Nitrogen 14.007	O Oxygen 15.999	F Fluorine 18.998	Ne Neon 20.180
3	Na Sodium 22.990	Mg Magnesium 24.305											Al Aluminum 26.982	Si Silicon 28.085	P Phosphorus 30.974	S Sulfur 32.06	Cl Chlorine 35.45	Ar Argon 39.948
4	K Potassium 39.098	Ca Calcium 40.078	Sc Scandium 44.956	Ti Titanium 47.867	V Vanadium 50.942	Cr Chromium 51.996	Mn Manganese 54.938	Fe Iron 55.845	Co Cobalt 58.933	Ni Nickel 58.693	Cu Copper 63.546	Zn Zinc 65.38	Ga Gallium 69.723	Ge Germanium 72.630	As Arsenic 74.922	Se Selenium 78.971	Br Bromine 79.904	Kr Krypton 83.798
5	Rb Rubidium 85.468	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.906	Zr Zirconium 91.224	Nb Niobium 92.906	Mo Molybdenum 95.95	Tc Technetium (98)	Ru Ruthenium 101.07	Rh Rhodium 102.91	Pd Palladium 106.42	Ag Silver 107.87	Cd Cadmium 112.41	In Indium 114.82	Sn Tin 118.71	Sb Antimony 121.76	Te Tellurium 127.60	I Iodine 126.90	Xe Xenon 131.29
6	Cs Caesium 132.91	Ba Barium 137.33	57-71	Hf Hafnium 178.49	Ta Tantalum 180.95	W Tungsten 183.84	Re Rhenium 186.21	Os Osmium 190.23	Ir Iridium 192.22	Pt Platinum 195.08	Au Gold 196.97	Hg Mercury 200.59	Tl Thallium 204.38	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.98	Po Polonium (209)	At Astatine (210)	Rn Radon (222)
7	Fr Francium (223)	Ra Radium (226)	89-103	Rf Rutherfordium (261)	Db Dubnium (268)	Sg Seaborgium (269)	Bh Bohrium (270)	Hs Hassium (277)	Mt Meitnerium (278)	Ds Darmstadtium (281)	Rg Roentgenium (282)	Cn Copernicium (285)	Nh Nihonium (286)	Fl Flerovium (289)	Mc Moscovium (290)	Lv Livermorium (293)	Ts Tennessine (294)	Og Oganesson (294)

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.



Del. g. Copyright © 2017 Michael Dopsh (michael@dopsh.com). For a fully interactive version with orbitals, isotopes, compounds, and free printouts, visit <http://www.ptable.com>

The new periodic table

electron 1	electron neutrino 10^{-6}	up quark 8	down quark 4
muon 200	muon neutrino 10^{-6}	strange quark 200	charm quark 2000
tau 3000	tau neutrino 10^{-6}	bottom quark 8000	top quark 340,000

Figura 36: La nueva Tabla Periódica.

The multiple components that compose our universe

Current composition (as the fractions evolve with time)

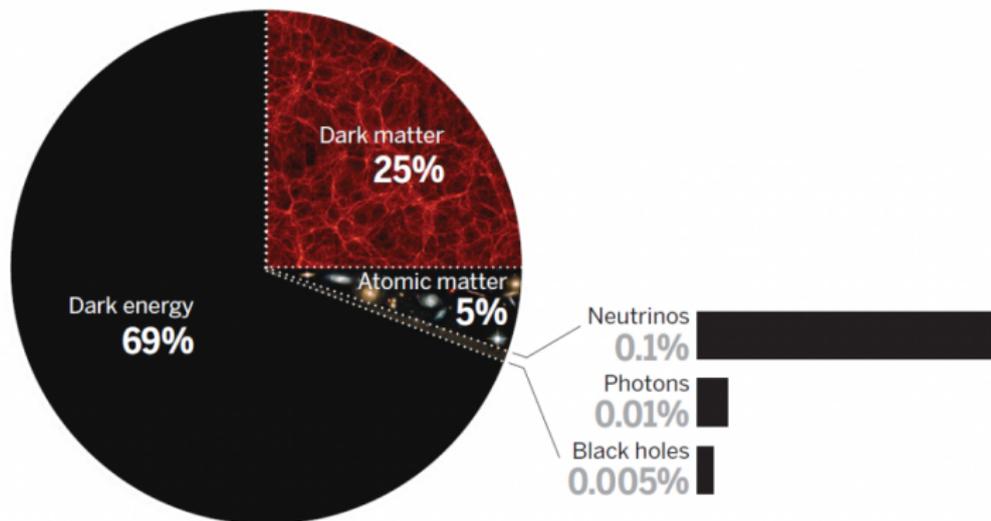


Figura 37: En Cosmología y Astrofísica, sin embargo, el Modelo Estándar es insuficiente para explicar, aparentemente, el universo a grandes escalas. En especial, el movimiento de las galaxias o la expansión acelerada requieren las componentes oscuras del Universo, denominadas materia y energía oscuras. La materia y energía oscuras no son partículas del Modelo Estándar conocidas.

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Figura 38: Descripción matemática del Modelo Estándar, versión simplificada.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_\nu^a \partial_\mu g_\nu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\nu^b g_\nu^c - \frac{1}{2}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^d - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
& - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{cw} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)) + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) \\
& - ig_{sw} (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)) + A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- \\
& - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- \\
& - Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\nu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\nu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\nu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\nu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\nu \phi^0 - \\
& \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g^2} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
& g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
& gM W_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \\
& \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
& \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
M & (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\nu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\nu \phi^- + W_\mu^- \partial_\nu \phi^+) - ig \frac{g_s}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
& W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
& \frac{1}{4}g^2 Z_\mu^0 W_\nu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{2}g^2 \frac{g_s}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{g_s}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{2s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\nu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_3^a (g_1^2 \gamma^\mu \gamma^\nu) g_\mu^a (-e^\lambda (\gamma \theta + m_2^2) e^\lambda - \nu^\lambda (\gamma \theta + m_2^2) \nu^\lambda - \bar{u}_3^2 (\gamma \theta + \\
& m_2^2) u_3^2 - \bar{d}_3^2 (\gamma \theta + m_2^2) d_3^2 + ig_{sw} A_\mu (-e^\lambda (\gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_3^2 \gamma^\mu u_3^2) - \frac{1}{3}(\bar{d}_3^2 \gamma^\mu d_3^2)) + \\
& \frac{ig_s}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_3^2 \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_3^2) + \\
& (\bar{u}_3^2 \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_3^2) \} + \frac{ig_s}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\nu} e^\nu) + (\bar{u}_3^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\nu} d_3^2) \} + \\
& \frac{ig_s}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \{ (\bar{e}^\nu U^{lep}{}_{\nu\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_3^2 C_{\lambda\nu}^t \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_3^2) \} + \\
& \frac{ig_s}{2M\sqrt{2}} \phi^- (-m_\nu^2 (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\nu} (1 - \gamma^5) \nu^\nu) + m_\nu^2 (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\nu} (1 + \gamma^5) \nu^\nu) + \\
& \frac{ig_s}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (m_\nu^2 (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\nu} (1 + \gamma^5) \nu^\nu) - m_\nu^2 (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\nu} (1 - \gamma^5) \nu^\nu) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig_s}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig_s}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_\nu^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\nu - \\
& \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_\nu^L (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\nu + \frac{ig_s}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_\nu^2 (\bar{u}_3^2 C_{\lambda\nu} (1 - \gamma^5) d_3^2) + m_\nu^2 (\bar{u}_3^2 C_{\lambda\nu} (1 + \gamma^5) d_3^2) + \\
& \frac{ig_s}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_\nu^2 (\bar{d}_3^2 C_{\lambda\nu}^t (1 + \gamma^5) u_3^2) - m_\nu^2 (\bar{d}_3^2 C_{\lambda\nu}^t (1 - \gamma^5) u_3^2) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{u}_3^2 u_3^2) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{d}_3^2 d_3^2) + \frac{ig_s}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_3^2 \gamma^5 u_3^2) - \frac{ig_s}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_3^2 \gamma^5 d_3^2) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
X^\dagger & (\partial^2 - M^2) X^\dagger + \bar{X}^\dagger (\partial^2 - M^2) X^\dagger + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
& \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
\partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
& \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
& \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
\end{aligned}$$

Figura 39: Versión detallada de la descripción del Modelo Estándar. 



Figura 40: Baby Yoda/Bebé Yoda, una vez que has leído los apuntes y aprendido todas las cosas que entendemos y no entendemos todavía en el siglo XXI.

Gracias por vuestra atención



Figura 41: Loki is pleased!



Figura 42: Sylvie is pleased!