

Modelos atómicos : SÍNTESIS DEL TEMA

The Strange Doctor

Resumen

Se resumen los contenidos y conceptos del tema.



Índice

1. Introducción	3
2. Modelo de Dalton	3
3. Modelo de Thomson	4
4. Modelo de Rutherford	4
5. Modelo de Bohr	7
6. Modelo mecanocuántico	9
7. Cálculo del espacio vacío en un átomo	11
8. Números cuánticos de los átomos. Radioactividad	11
9. Configuración electrónica	14
10. Enlace químico	15
10.1. Enlace iónico	16
10.2. Enlace covalente	17
10.2.1. Enlace covalente molecular	17
10.2.2. Enlace covalente cristalino	17
10.3. Enlace metálico	18
11. Modelo Estándar: partículas subatómicas	19
12. FORMULARIO	22
13. Epílogo	22
A. Otros números cuánticos exóticos	23
B. El experimento de la doble rendija	23
C. Usos de la radioactividad	24
D. Sobre los modelos atómicos	24

1. Introducción

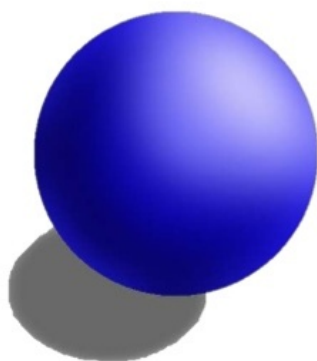
¿De qué está hecha la materia? ¿Se puede dividir en partes cada vez más pequeñas? Con los descubrimientos de la Química en los siglos XVIII y XIX, junto a los descubrimientos de las ecuaciones del electromagnetismo en el siglo XIX y las leyes Termodinámicas, se hizo clara la necesidad de estudiar la estructura microscópica de la materia. La hipótesis molecular o atómica, de la teoría cinética, reintrodujo la idea de los átomos en la Física después de casi 2000 años de ausencia.

2. Modelo de Dalton

Dalton propuso un modelo atómico para explicar las reacciones químicas y sus leyes a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. En particular, su modelo tenía las siguientes hipótesis:

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

Este modelo se mostró incapaz de explicar los nuevos descubrimientos y tuvo que modificarse. En particular, era incapaz de explicar los fenómenos de electrización de la materia y otros nuevos hallazgos de la Química y Física.

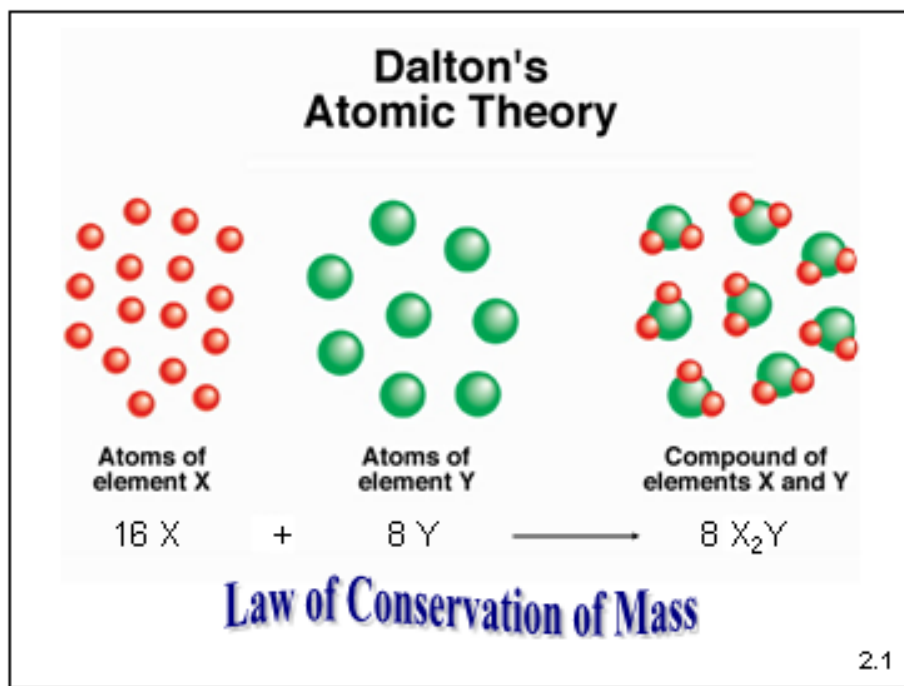


Figura 2: El modelo atómico de Dalton explicaba de forma sencilla la ley de conservación de la masa de Lavoisier de las reacciones químicas.

3. Modelo de Thomson

En 1897, con el experimento de los rayos catódicos, J. J. Thomson descubre el electrón. La primera partícula subatómica hallada dentro de los átomos. Un esquema del experimento de rayos catódicos:

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.

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.

4. Modelo de Rutherford

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.

Las observaciones eran sorprendentes:

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)

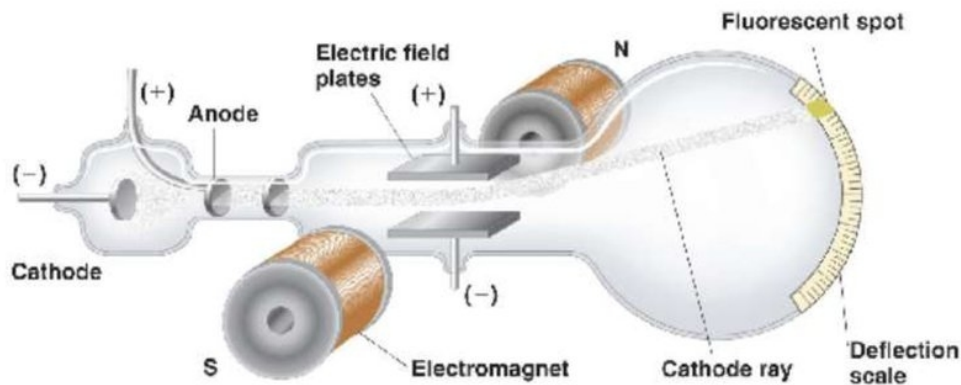


Figure 1: Schematic of J.J. Thomson's experiment.

Figura 3: Experimento de rayos catódicos de J.J.Thomson.

- 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:

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

Rutherford's Gold Foil Experiment

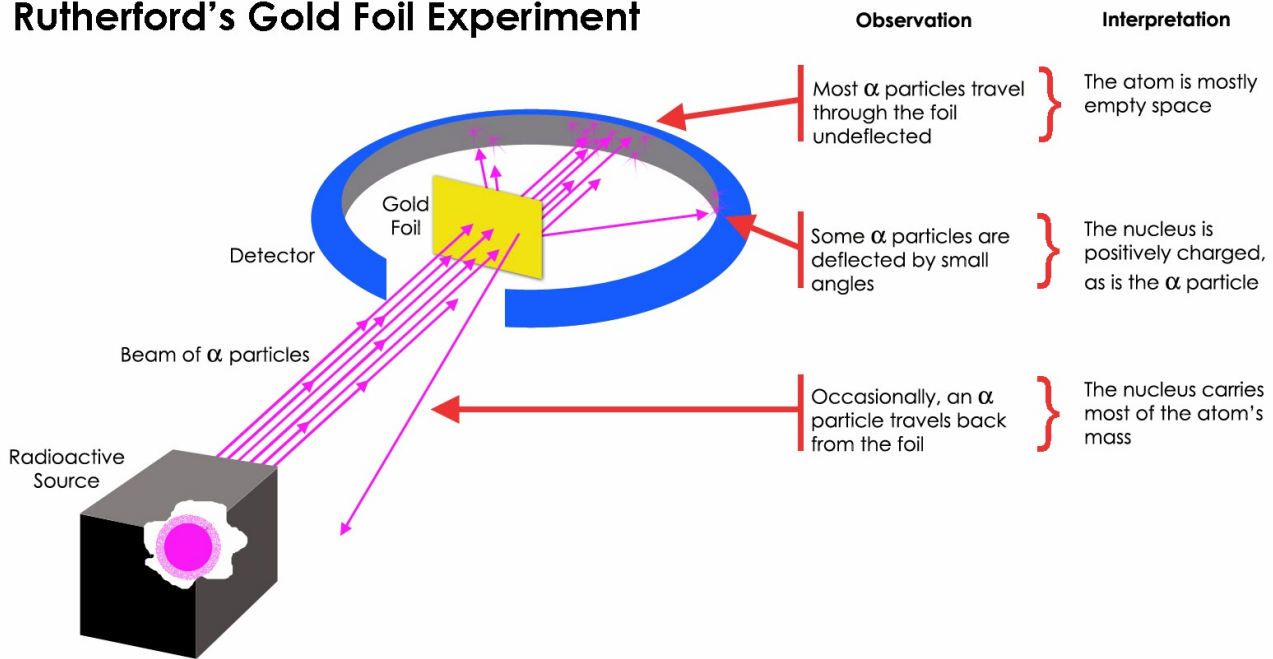


Figura 4: Esquema del experimento de Rutherford.

- 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 .
- La mayor parte del átomo es espacio vacío.
- 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 :

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

- 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).

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 emitada 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.
- 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:

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

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 $t_c \approx 10^{-11} s = 10ps$.

5. Modelo de Bohr

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.

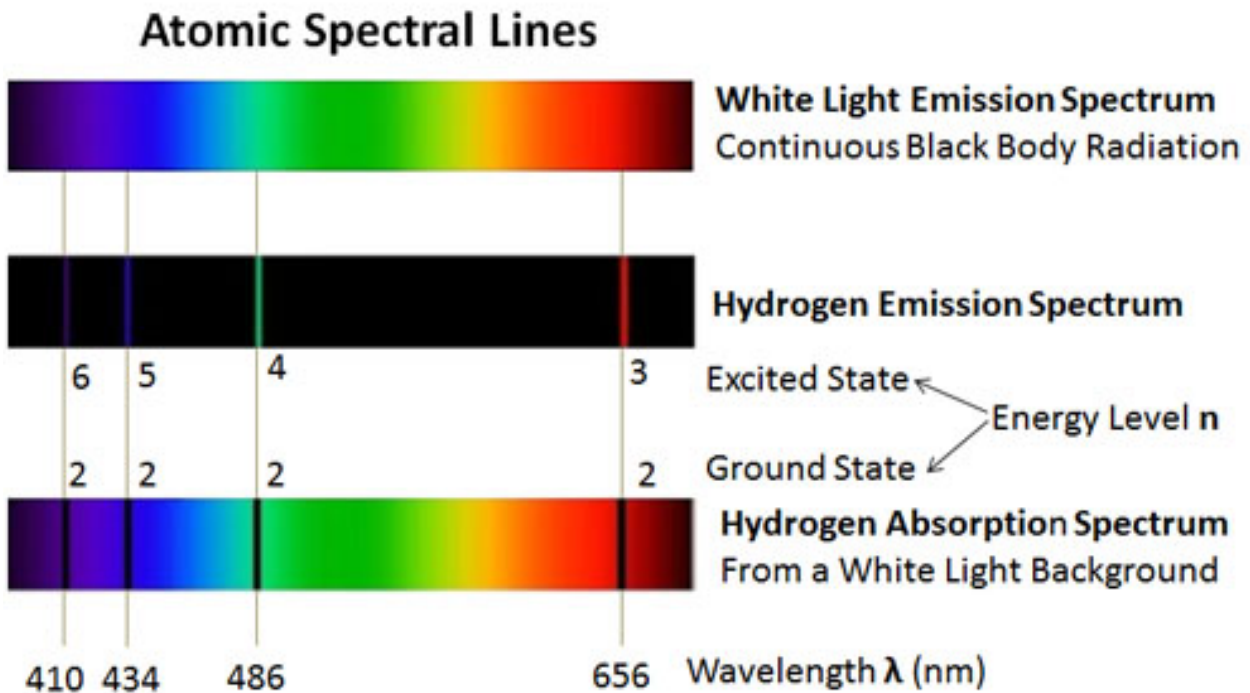


Figura 5: Líneas espectrales atómica elementales del hidrógeno, sin perturbaciones magnéticas o eléctricas. Hay diferencia entre el espectro de absorción, el espectro de emisión, y el espectro puramente de radiación, denominado de cuerpo negro (no confundir cuerpo negro con agujero negro).

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 $6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$. $\hbar = h/2\pi$ se denomina constante de Planck racionalizada y ω es frecuencia angular.

Black Body and Line Spectra

Black Body

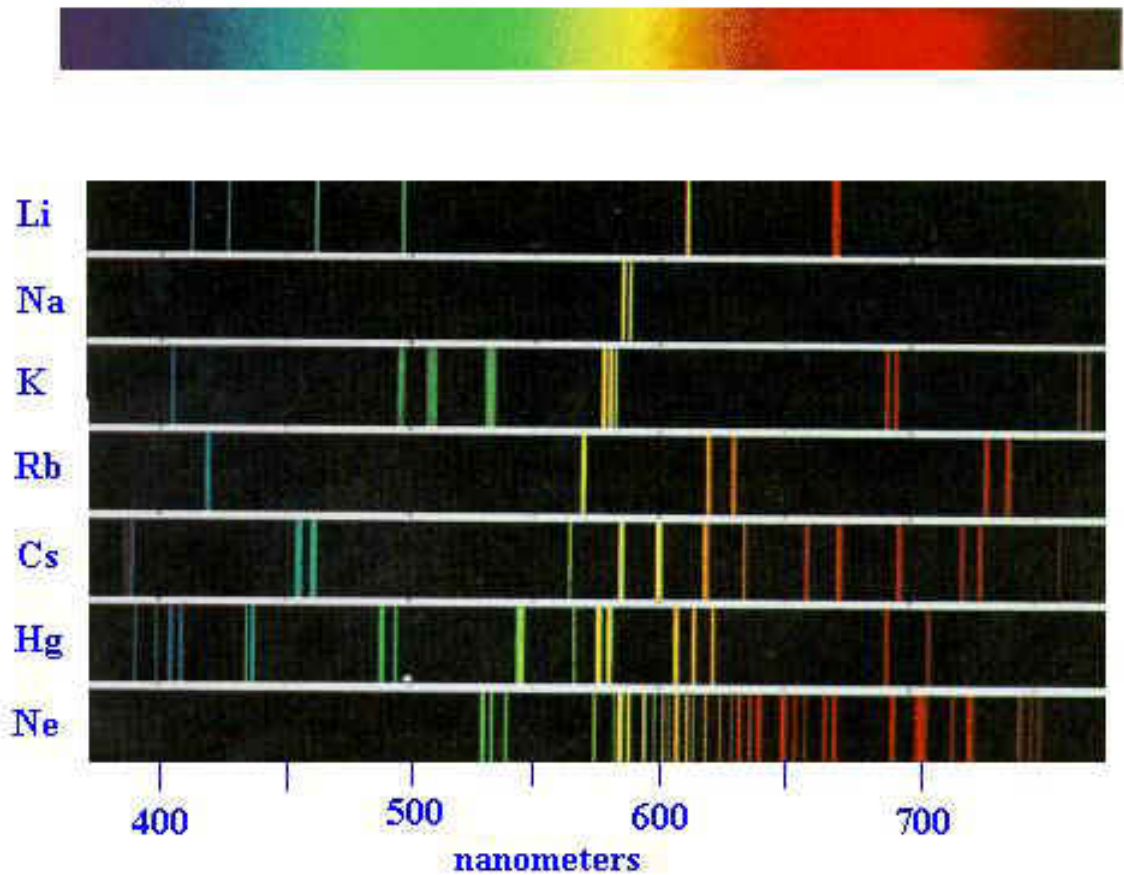


Figura 6: Espectros atómicos de diferentes elementos químicos.

- 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., $n = 1, 2, 3, \dots$. 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.

Usando estas 3 hipótesis, Bohr fue capaz de encontrar una derivación de la fórmula de Balmer que daba las series principales de transiciones y las energías de las líneas de los átomos no perturbados electromagnéticamente. A saber, la fórmula de Balmer es:

$$E(n_1, n_2) = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

y donde $n_1 < n_2$ con números enteros positivos (1,2,3,...). R es la denominada constante de Rydberg, aproximadamente $13,6eV = 2,18 \cdot 10^{-18}J$. Además, Bohr fue capaz de encontrar una derivación de la constante de Rydberg en términos de constantes más fundamentales.

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

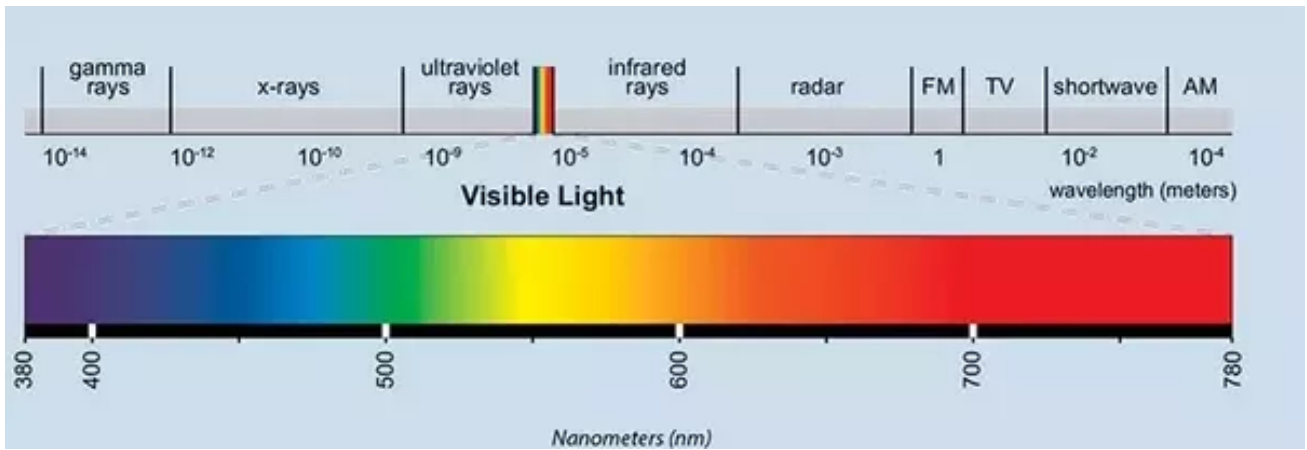


Figura 7: El espectro electromagnético de la luz. La luz visible es solamente una pequeña parte del espectro completo, entre 380 y 780 nanómetros de longitud de onda.

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.

6. Modelo mecanocuántico

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).
- 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:

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

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

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

- 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

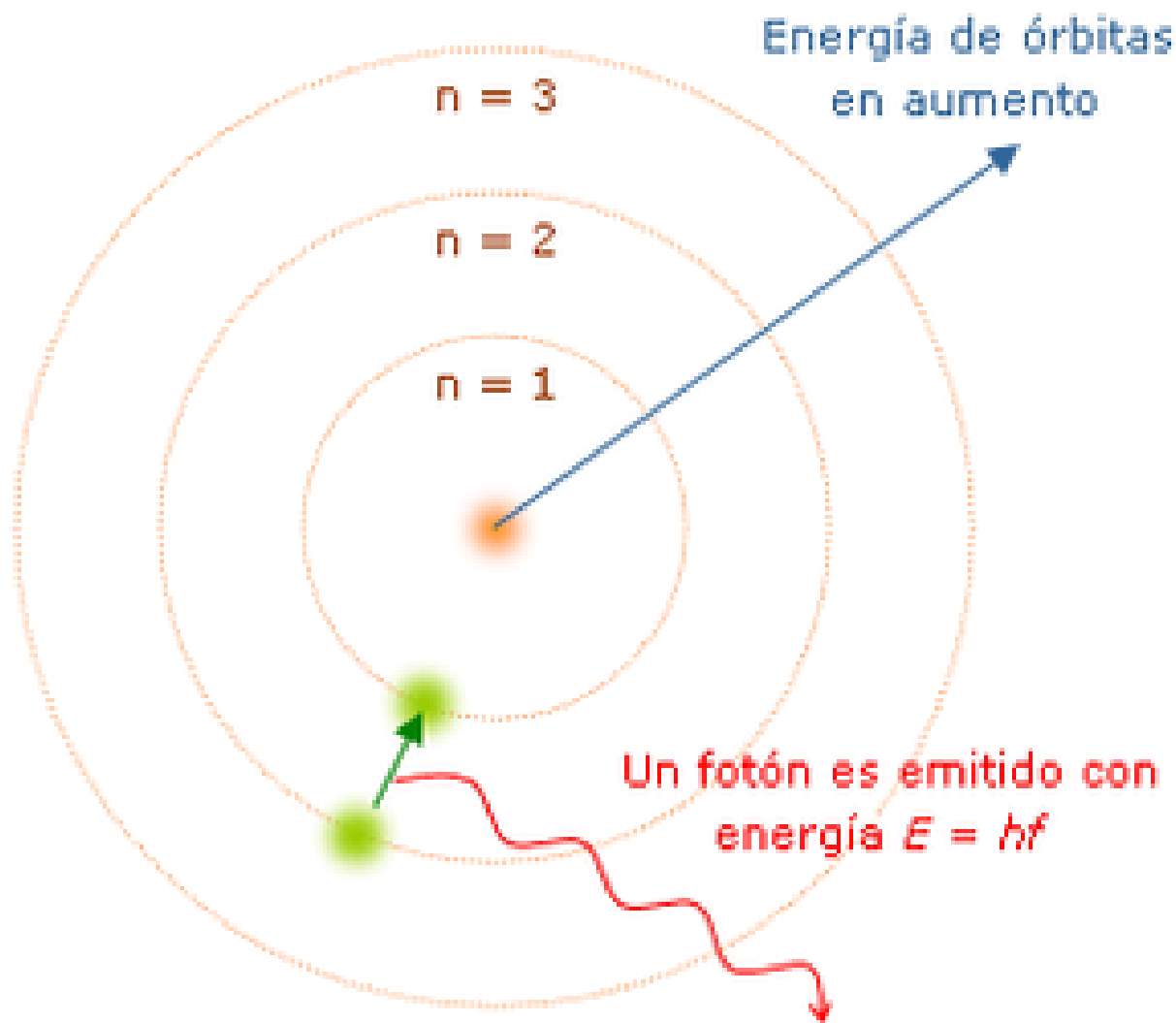


Figura 8: Imagen del modelo de órbitas circulares estacionarias de Bohr.

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. 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. 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

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.

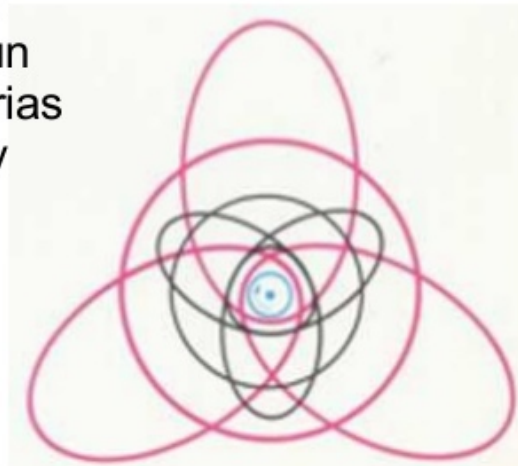


Figura 9: Modelo de Sommerfeld o corrección relativista al modelo de Bohr, también denominado modelo Bohr-Sommerfeld o de las variables de acción.

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.

7. Cálculo del espacio vacío en un átomo

¿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 $Y = 1 - x = 1 - 10^{-15} = 0,999999999999999 = 99,9999999999999\%$. El átomo es vacío esencialmente.

8. Números cuánticos de los átomos. Radioactividad

Un núcleo o átomo queda esencialmente cuantificado con tres números (cuatro si incluyes los electrones):

- **Número atómico Z.** Es el número de protones del átomo, coincide con el número de electrones si el átomo es neutro.

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

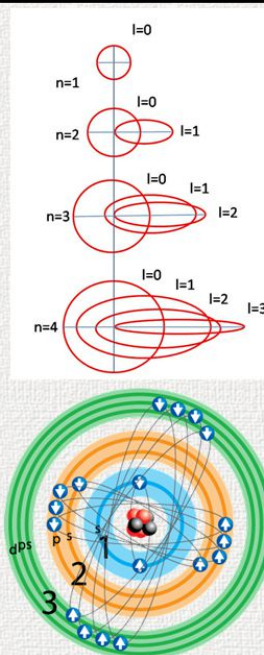


Figura 10: Además del número cuántico de energía, el modelo de Bohr-Sommerfeld introduce otros números cuánticos. Eso explica los subniveles o subcapas de algunos espectros, pero no totalmente.

- **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 .** Es el número de electrones del átomo. 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*.

Ahora unas definiciones relacionadas:

- **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 ${}^A_ZX^{\pm n}$, 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

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 .

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*.

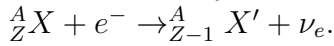
La radioactividad es el fenómeno que tiene lugar en algunos átomos cuyos núcleos están muy desbalanceados en su número Z y N . Hay átomos radiactivos de casi todos los elementos químicos. La radioactividad es un fenómeno que consiste en la emisión de partículas (fotones, neutrones y neutrinos, protones 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 radiactividad: 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:
 $(A, Z) \rightarrow (A - 4, Z - 2)$, ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} X' + {}^4_2 He^{2+} + 2e^- \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} X' + {}^4_2 He$.
- **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 ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} X' + e^- + \bar{\nu}_e$.
 La β^+ es $(A, Z) \rightarrow (A, Z - 1)$, o bien ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} X' + e^+ + \nu_e$.
 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. 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:
 $\beta^{--} : {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+2} X' + 2e^-$,
 para una reacción doble beta menos sin neutrino, y,

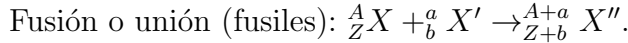
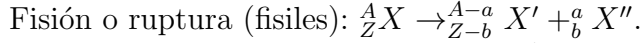
$$\beta^{++} : \quad {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-2} X' + 2e^+,$$

para una reacción de desintegración doble beta más sin neutrino.

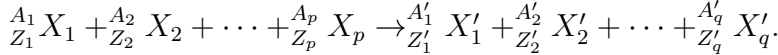
- **Reacción o radiación de captura electrónica (CE, K-capture).** Consiste en la captura de un electrón y la transmutación del átomo y núcleo asociado.



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



Transmutación general 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). $\Delta^- : {}^A_Z X + E \rightarrow {}^A_Z X^+ + e^-(\delta)$. Y, también, $\epsilon^- : {}^A_Z X + E \rightarrow {}^A_Z X^+ + e^-(\epsilon)$.

9. Configuración electrónica

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:

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. 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).

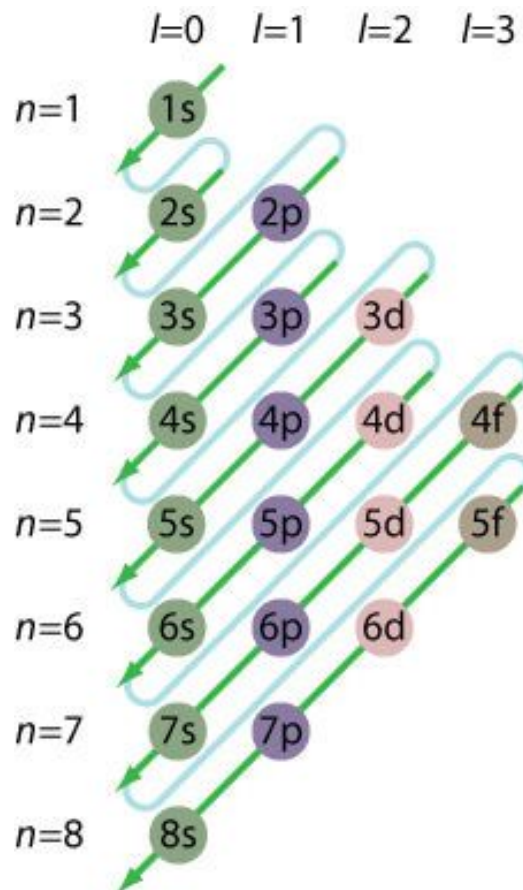


Figura 12: Principio de Aufbau, regla de Moller.

10. 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.

Muchos sólidos forman lo que se denominan cristales. Un **crystal** 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. 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. 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.

Algunos tipos concretos de cristales de tiempo se han fabricado ya en el laboratorio. Los llamados *cristales de tiempo de Floquet*, cristales de tiempo discretos, presentan también otras propiedades exóticas, como el criptoequilibrio (sus oscilaciones no generan entropía) o bien orden a grandes escalas (las oscilaciones de las fases cuánticas están sincronizadas a distancias grandes de espacio y tiempo).

10.1. 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:

- 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.
- Tienden a formar iones, uno de los elementos o iones que forman el compuesto será catión y otro anión.

10.2. 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.

10.2.1. 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 , ...

10.2.2. 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), ...

10.3. 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:

- 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, . . .

Imágenes de cristales y cuasicristales en las siguientes páginas, así como conceptos relacionados.

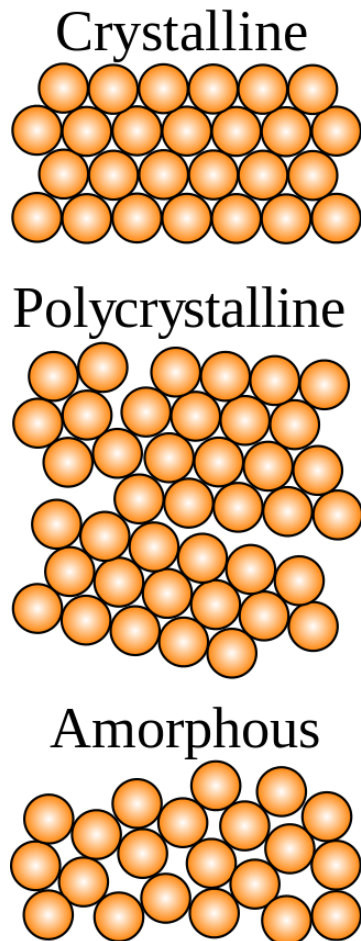


Figura 13: Materiales amorfos, policristalinos y cristalinos.

11. Modelo Estándar: partículas subatómicas

La materia está hecha de leptones, que no sufren la interacción nuclear fuerte, y los quarks, que sienten la fuerza fuerte. La fuerza fuerte tiene una carga llamada color (nada que ver con el color físicos). La fuerza nuclear débil cambia el sabor o tipo de las partículas. Las partículas subatómicas fundamentales obtienen su masa a partir del campo de Higgs y las interacciones de Yukawa. Las partículas compuestas como el protón obtienen su masa mediante las interacciones de sus partículas internas. La masa del protón se debe a un fenómeno de la teoría de Yang-Mills complicado llamado transmutación dimensional y el confinamiento de los quarks, que los hace entidades muy relativistas. La masa del protón o de los nucleones en general se debe poco a la interacción con el bosón de Higgs h_0 .

La naturaleza esencialmente de las partículas que nos rodean está formada por electrones, los neutrinos del electrón y quarks de tipo up y down. La Naturaleza a replicado esta primera familia, y a energías altas suficientes, hay muones, neutrinos del muón y quarks de tipo charm y strange, que es la segunda familia, y tauones, neutrinos del tauón y quarks de tipo top y bottom. Para las interacciones, las partículas se llaman bosones, y además del fotón, tenemos los bosones W^+ , W^- , Z y 8 tipos de gluones, junto al bosón de Higgs (o dador de masa h_0). Hipotéticamente hablando, la gravedad tiene una partícula llamada gravitón de espín dos sin masa que sería su mensajera o portadora. Pero los gravitones no forman parte del modelo estándar. No se saben los detalles de cómo crear una teoría cuántica de todas las interacciones más allá de algunos modelos denominados de supercuerdas (o supermembranas), la teoría de gravitación cuántica de lazos (Loop Quantum Gravity) y otras variantes exóticas. La teoría que describe la gravedad actualmente se denomina Relatividad General (no debe confundirse con

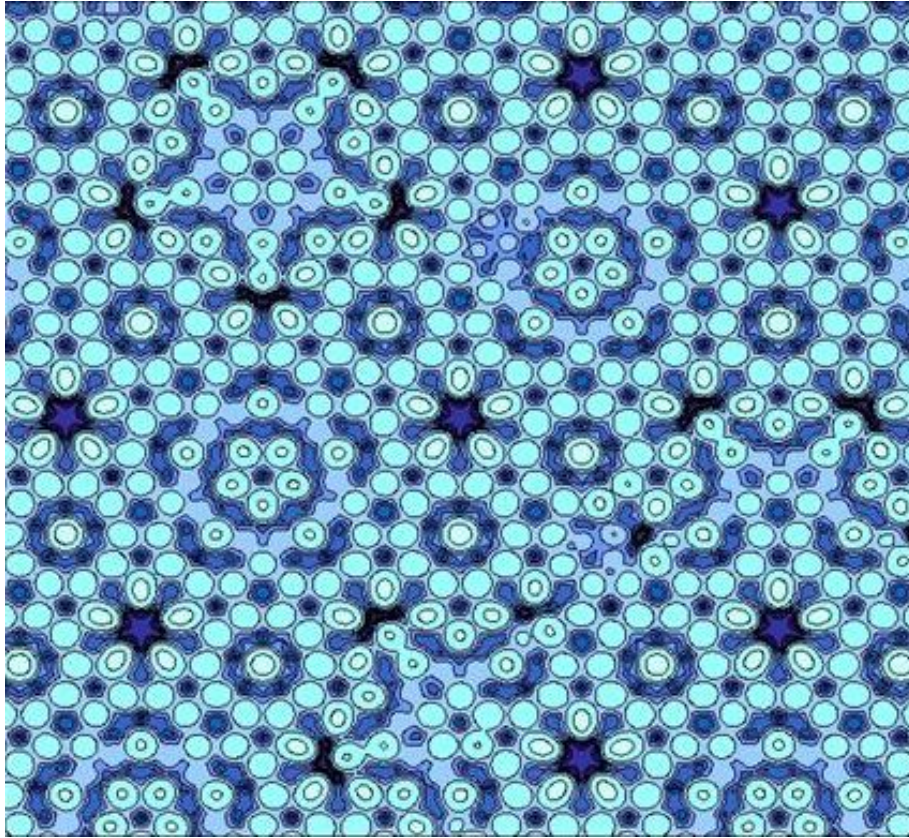


Figura 14: Cuasicristal, ejemplo.

la Relatividad Especial), y describe el Universo a gran escala como un espacio curvado bajo la energía-materia y sus campos cuánticos. Esta teoría de Einstein no es cuántica como sí lo es la teoría de supercuerdas (o la teoría M) y la LQG.

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

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

La masa del electrón es 1836 veces ($6\pi^5$) la masa del protón. 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 fluido 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. Se sospecha también que el espacio-tiempo debe tener una subestructura cuántica en sí misma, pero no ha

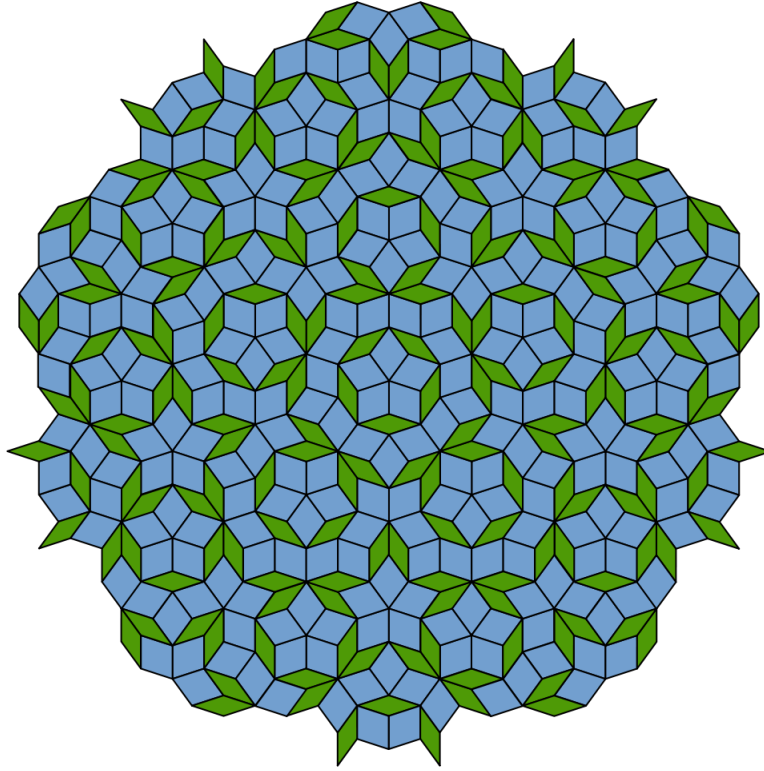


Figura 15: Teselación de Penrose, ejemplo de cuasicristal.

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.

12. FORMULARIO

$$A = Z + N$$

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 $|m_l + m_s| \leq j$. 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 una especificación de 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.

13. Epílogo

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, esferones, 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, ...

A. Otros números cuánticos exóticos

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).

$$L = n_l - n_{\bar{l}}$$

B. 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. 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. 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.

C. Usos de la radioactividad

La radioactividad tiene diversos usos: Medicina (rayos X, la radioterapia, la quimioterapia, PET, TAC, RMN, terapia de protones,...), esterilización de materiales, producción 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.

D. Sobre los modelos atómicos

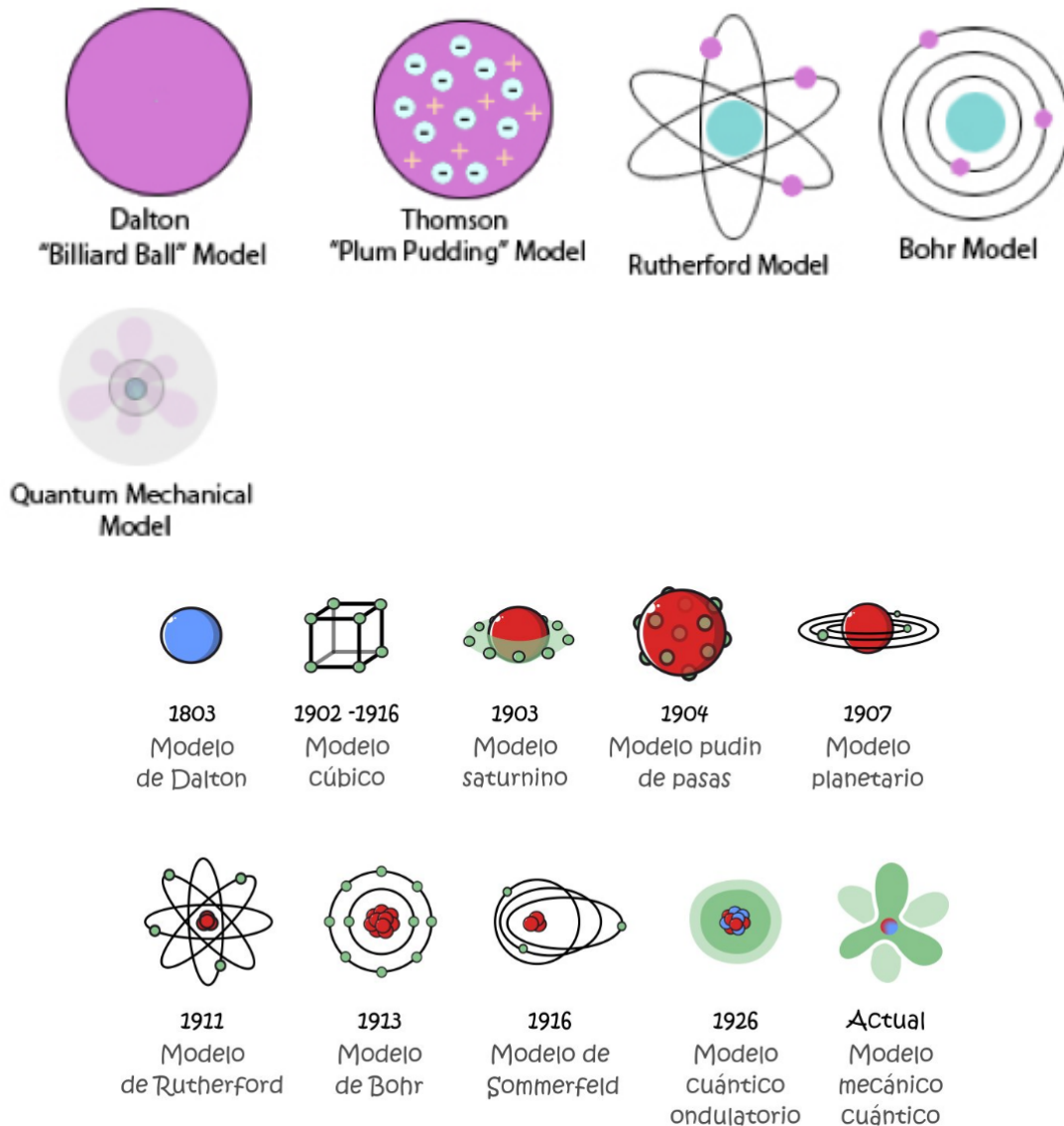


Figura 16: Comparación entre modelos atómicos. Puedes observar la evolución desde el modelo de la bola de billar de Dalton, al pudin con pasas de Thomson, el modelo nuclear de Rutherford heredero del modelo de Nagaoka, el modelo de capas de Bohr y el modelo borroso o probabilístico actual mecanocuántico. Entre el modelo de Bohr y el mecanocuántico hay un modelo intermedio, con órbitas elípticas, debidas a Bohr-Sommerfeld.

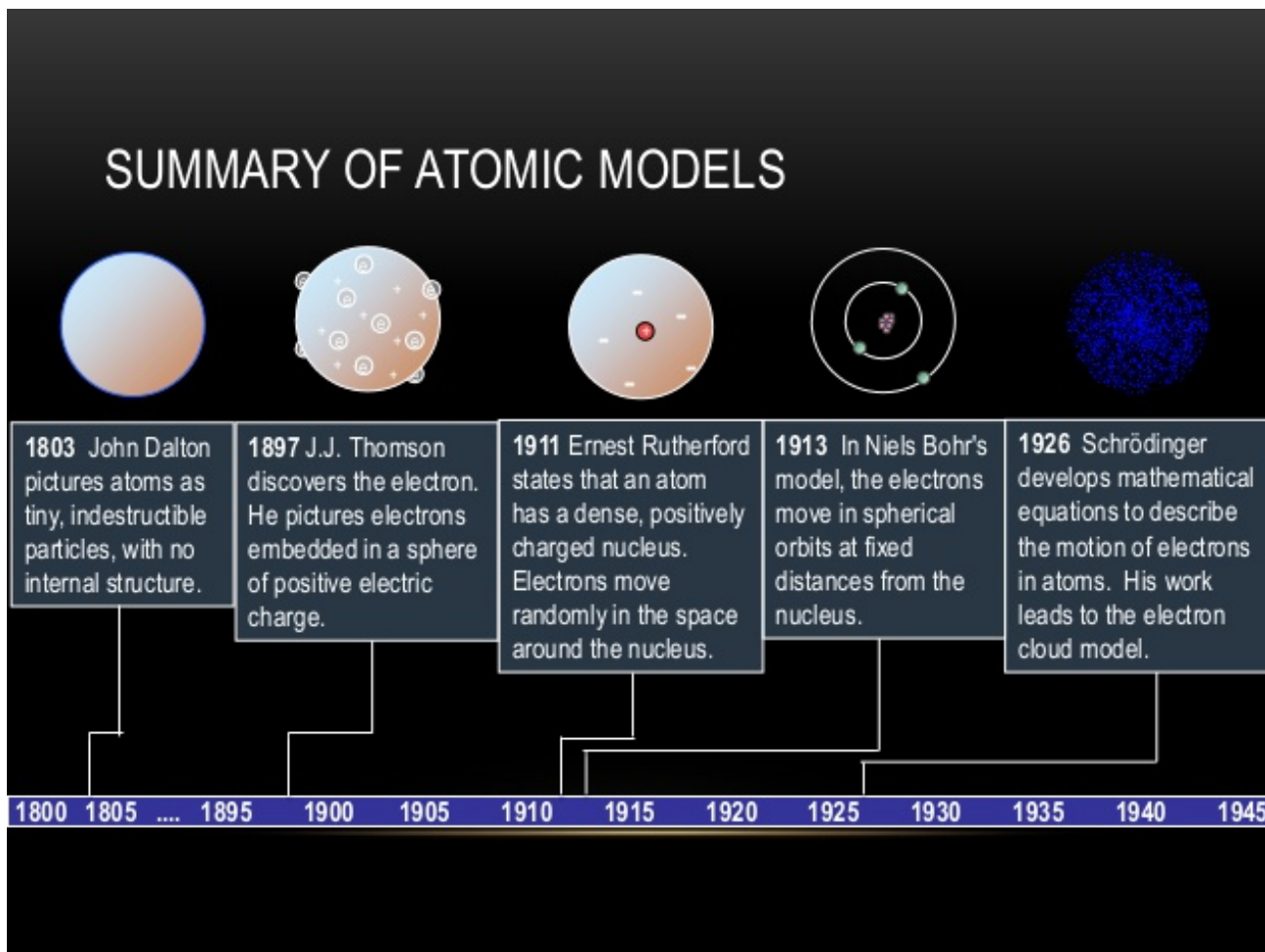


Figura 17: Modelos atómicos, resumidos. El modelo de Schrödinger necesita la ecuación $\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(x, y, z, t)\right)\Psi = i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}$ que también puede escribirse sencillamente como $H\Psi = E\Psi$. Un refinamiento del Modelo de Schrödinger es la Teoría Cuántica de Campos (Quantum Field Theory, QFT, en inglés), que describe todas las partículas del universo en función de objetos fluidicos en el espacio-tiempo llamados campos cuánticos. Así, los electrones y los fermiones vienen en realidad descritos por la ecuación de Dirac $(i\hbar\gamma \cdot \partial - e\gamma \cdot A - mc)\Psi = 0$. Además de la ecuación de Dirac o la ecuación de Schrödinger, existen otras ecuaciones de campos cuánticos como la ecuación de Klein-Gordon, la ecuación de Majorana, la ecuación de Rarita-Schwinger, la ecuación de Maxwell-Proca y otras varias. Existen variantes de estas ecuaciones, mucho más sofisticadas. ¿Podría el Universo resumirse a un simple conjunto de ecuaciones o incluso a una simple ecuación, como postulan algunos filósofos y científicos de la llamada escuela reduccionista?

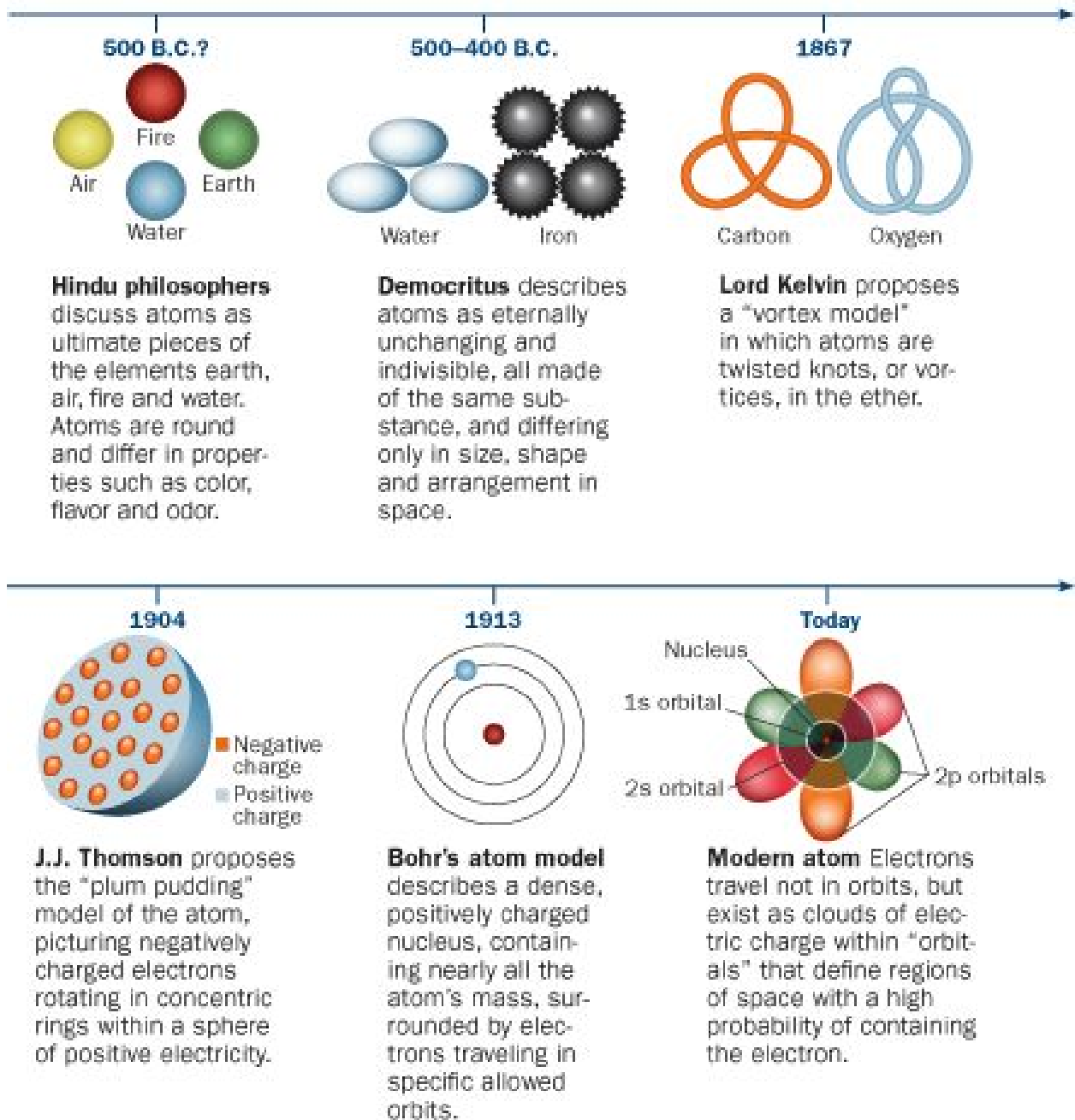


Figura 18: Modelos atómicos a través del tiempo. Desde la Filosofía hindú y griega, hemos recorrido un largo camino. Lord Kelvin también propuso un modelo atómico basado en vórtices en el que los átomos eran nudos con lazos y deformados.

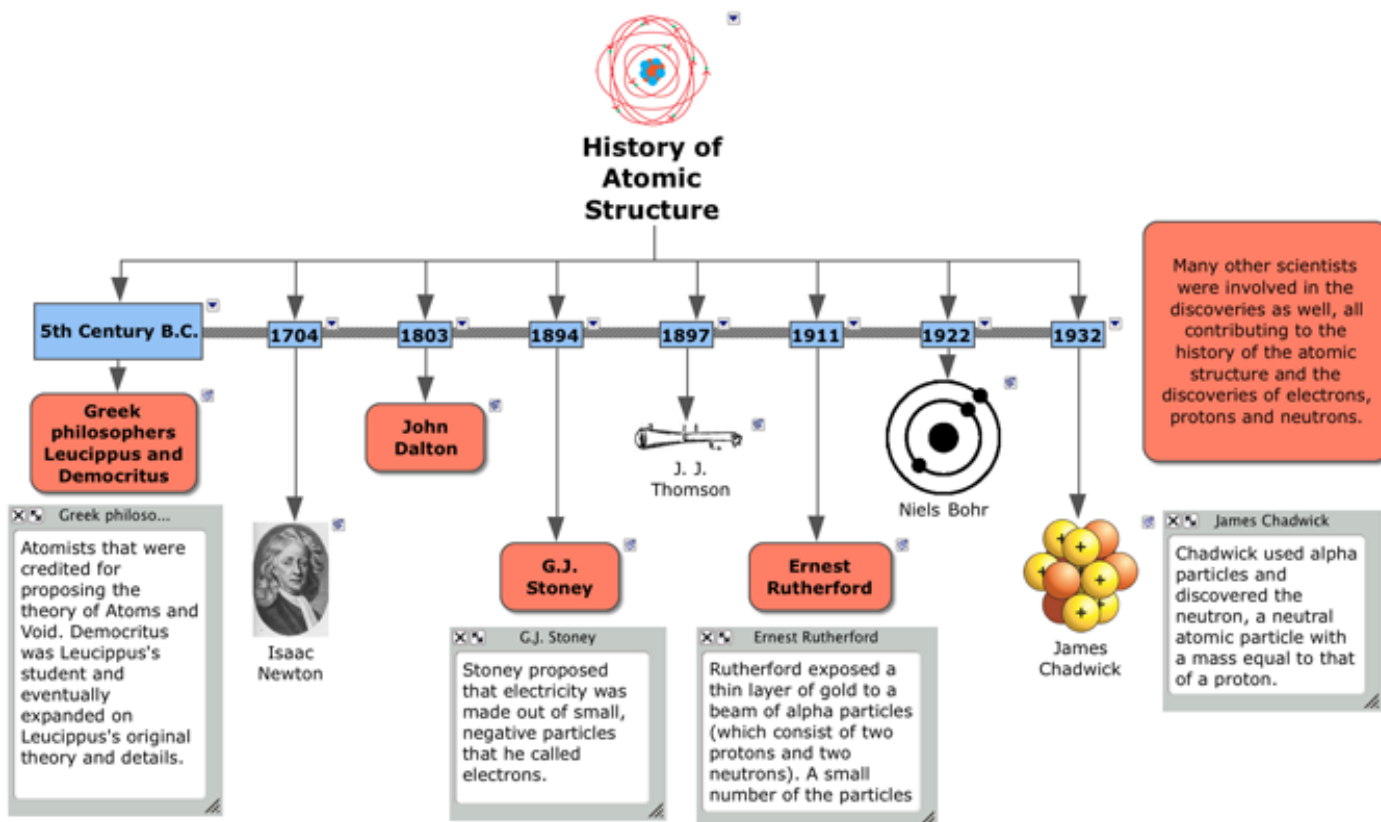


Figura 19: Historia atómica hasta el descubrimiento de Chadwick del neutrón. Stoney fue el autor de la idea del electrón, encontrado por J.J.Thomson en su experimento de rayos catódicos.

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

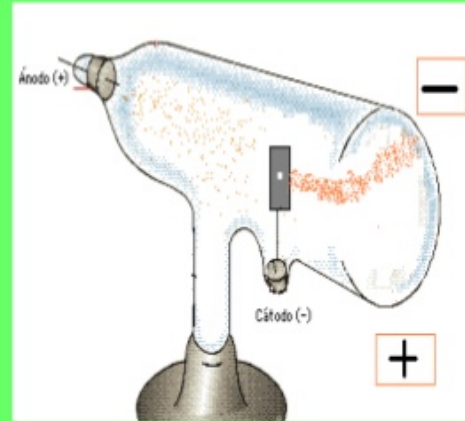
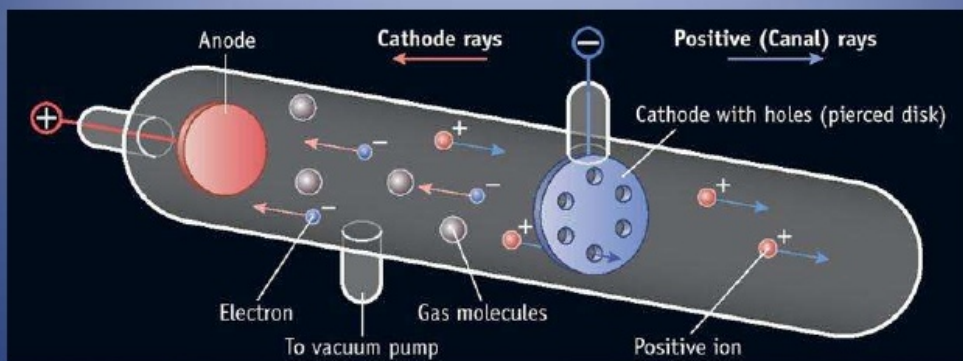


Figura 20: Rayos canales o anódicos. Básicos para el posterior descubrimiento del protón.

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.

Figura 21: Interpretación del experimento de J. J. Thomson.

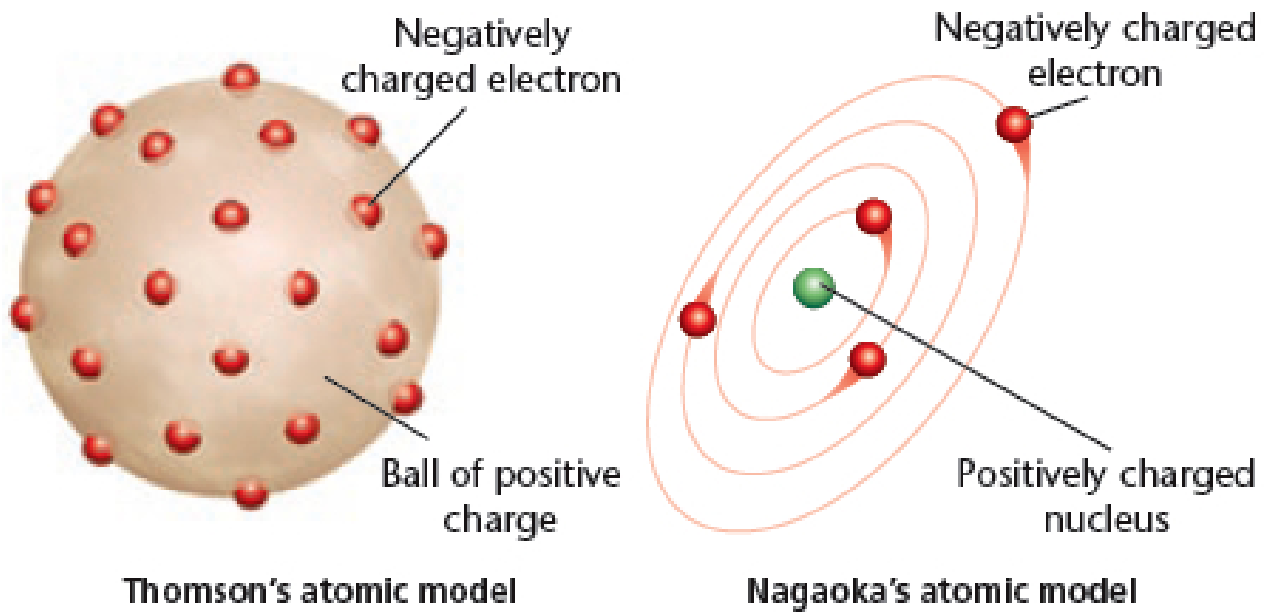


Figura 22: La imagen del modelo de Thomson frente a la del físico japonés Hantaro Nagaoka, posteriormente llamado modelo saturniano del átomo, en el que se inspiró Rutherford para su modelo atómico.

Planck length and time values based on Planck constant h

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

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

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

Figura 23: 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. No parece posible hacerlo a corto plazo. La escala de Planck es, comparada al tamaño del átomo, una distancia similar al tamaño del átomo comparado al tamaño del sistema solar. Es muy diminuta. Se piensa que a esas escalas, el propio espacio-tiempo se funde, a una temperatura del orden de $10^{32}K$, y será necesaria una nueva descripción del espacio-tiempo en el que éste se derive de algún otro tipo de estructura u objetos. Ejemplos de estas teorías son las supercuerdas, la teoría M, la teoría de la gravedad cuántica de lazos o los modelos de espacio-tiempo no conmutativos y la imagen de la espuma espacio-temporal de Wheeler.

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 24: La ecuación fundamental del Modelo Estándar con la parte de la teoría gravitacional incluida, pese a que no admite teoría cuántica todavía. Estado actual de la comprensión de la materia y el espacio-tiempo.

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force
				Bosons (Forces)

Figura 25: El Modelo Estándar y sus partículas.

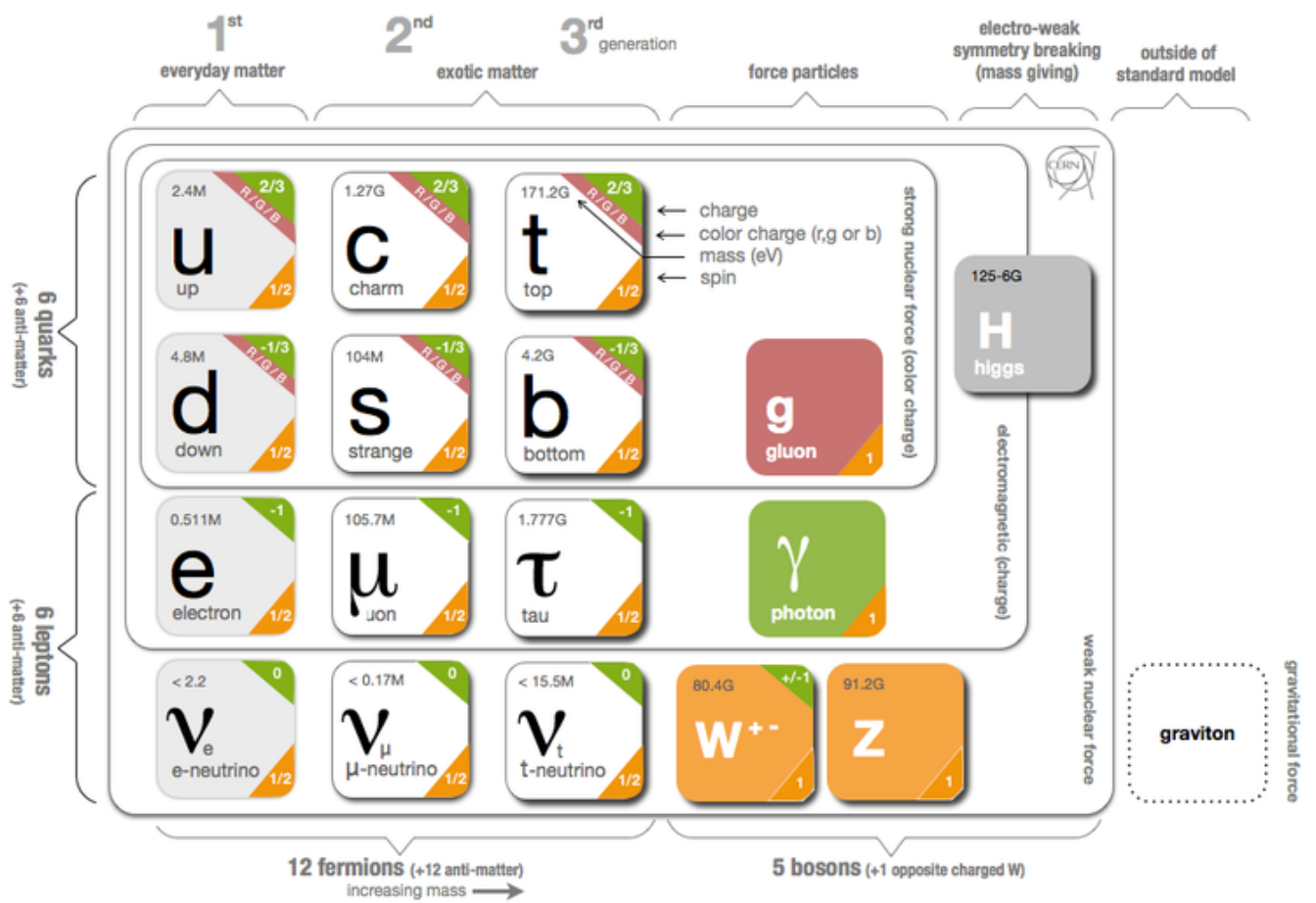


Figura 26: El Modelo Estándar y el gravitón como outsider.

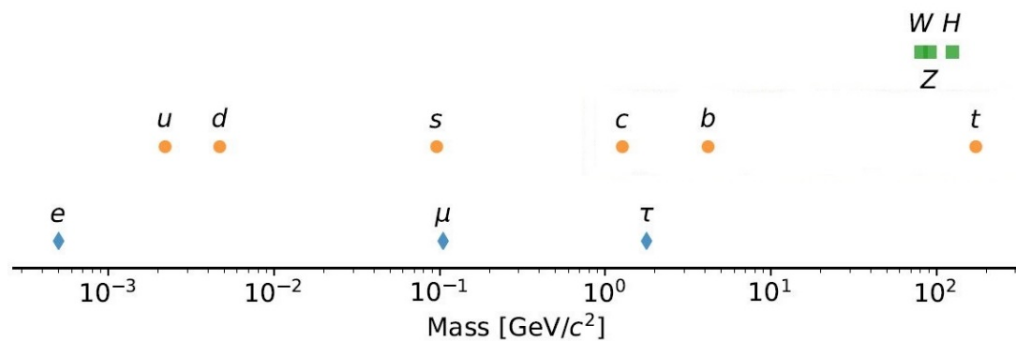


Figura 27: Escala de masas en el Modelo Estándar y sus partículas conocidas, salvo los neutrinos.

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																			2	He Helium 4.0026	
2	Li Lithium 6.94	Be Beryllium 9.0122																			10	Ne Neon 20.180
3	Na Sodium 22.990	Mg Magnesium 24.305																			18	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	36	Xe Xenon 131.29		
5	Rb Rubidium 85.468	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.906	Zr Zirconium 91.224	Nb Niobium 92.906	Mo Molybdenum 95.94	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	54	Rn Radon 222		
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	86	Og Oganesson (294)		
7	Fr Francium (223)	Ra Radium (226)	89-103	Rf Rutherfordium (261)	Db Dubnium (268)	Sg Seaborgium (269)	Bh Bohrium (270)	Hs Hassium (271)	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)	118	Og Oganesson (294)		
For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.																						
6	La Lanthanum 138.91	Ce Cerium 140.12	Pr Praseodymium 140.91	Nd Neodymium 144.24	Pm Promethium (145)	Sm Samarium 150.36	Eu Europium 151.96	Gd Gadolinium 157.25	Tb Terbium 158.93	Dy Dysprosium 162.50	Ho Holmium 164.93	Er Erbium 167.26	Tm Thulium 168.93	Yb Ytterbium 173.05	Lu Lutetium 174.97							
7	Ac Actinium (227)	Th Thorium 232.04	Pa Protactinium 231.04	U Uranium 238.03	Np Neptunium (237)	Pu Plutonium (244)	Am Americium (243)	Cm Curium (247)	Bk Berkelium (247)	Cf Californium (251)	Es Einsteinium (252)	Fm Fermium (257)	Md Mendelevium (258)	No Nobelium (259)	Lr Lawrencium (260)							

Figura 28: La Tabla Periódica de los químicos ya no es la tabla de partículas más pequeñas.

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 29: La nueva Tabla Periódica.

The multiple components that compose our universe

Current composition (as the fractions evolve with time)

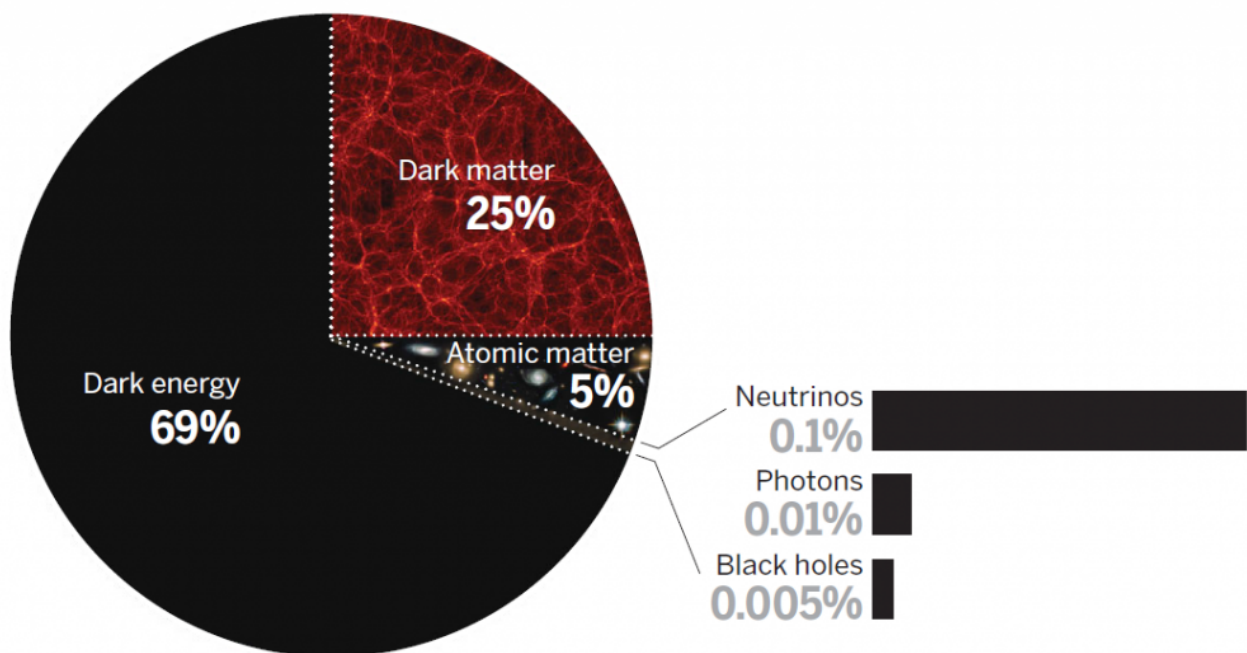


Figura 30: En Cosmología y Astrofísica, sin embargo, el Modelo Estándar es insuficiente para explicar, aparentemente, el universo a grandes escalas. En especial, el movimiento de las galaxias o la expansión acelerada requieren las componentes oscuras del Universo, denominadas materia y energía oscuras. La materia y energía oscuras no son partículas del Modelo Estándar conocidas. Así, además de no explicar la gravedad, el Modelo Estándar no explica el Universo oscuro y necesitaremos una teoría mejor y superior. No obstante, el Modelo Estándar explica el 5 % del Universo conocido que observamos.

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

Figura 31: Descripción matemática del Modelo Estándar, versión simplificada.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \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 - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
& igs_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \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_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
& \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} 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_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^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_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w 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^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
& \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{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{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}igs_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
& m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
& \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
& \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \\
& \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
& \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
& \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w 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^2} \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^-) + igMs_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 32: Versión detallada de la descripción del Modelo Estándar. Es una descripción complicada.

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.

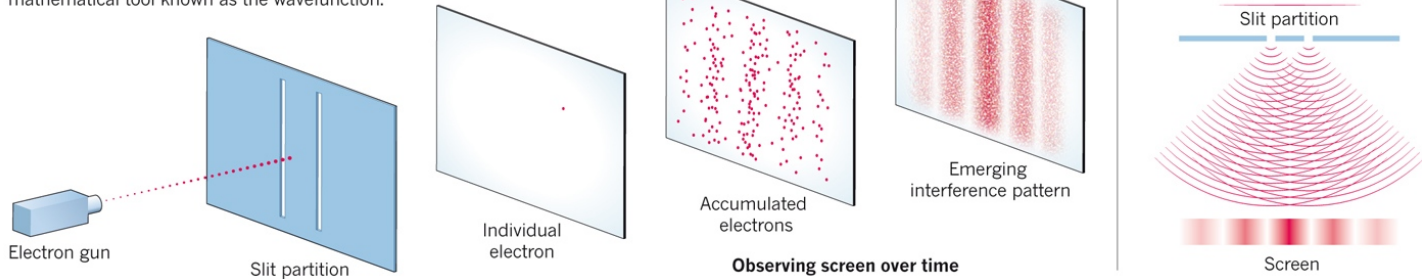


Figura 33: Experimento de la doble rendija, la madre de todas las “paradojas” cuánticas.



Figura 34: 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.