

Teoría atómica y partículas subatómicas: Conceptos complementarios

JFGH



1 El átomo

El átomo es la parte más pequeña de la materia que podemos dividir mediante procesos convencionales. Los átomos determinan una serie de elementos químicos o sustancias puras sencillas, que se clasifican en una tabla denominada Tabla Periódica. En la actualidad, circa 2021 (comienzos del siglo XXI), la Tabla Periódica consta de 118 elementos, clasificados en 18 grupos o columnas, y 7 filas o períodos, pero se sospecha la existencia de más elementos químicos.

1.1 Estructura subatómica

Diversos experimentos, entre los siglos XIX y XX, dieron lugar a una familia de modelos atómicos cada vez más perfeccionados y consistentes con los datos experimentales. Desde el modelo de Dalton, el modelo Thomson, pasando por el modelo de Lewis y el de Nagaoka, hasta llegar a los modelos de Rutherford, Bohr, Bohr-Sommerfeld, y el actual modelo mecano-cuántico, del que su expresión última es el llamado Modelo Estándar de partículas elementales subatómicas. Los modelos anteriores al modelo cuántico del átomo se denominan modelos clásicos o semiclásicos del átomo, según el caso.

El átomo consta de dos partes diferenciadas:

- Corteza. Ahí orbitan los electrones.
- Núcleo. Ahí se encuentran los protones y neutrones. El tamaño de un núcleo es unas cien mil veces menor que el tamaño atómico. Entre la corteza y el núcleo hay esencialmente espacio “vacío”.

Las partículas subatómicas comunes del átomo son tres (protón, neutrón y electrón), y habitualmente se etiquetan con tres magnitudes numéricas llamadas masa, carga eléctrica y espín (una especie de giro interno), aunque tienen otras propiedades como el isoespín, y otra serie de cargas como el número bariónico. Las primeras 3 propiedades de estas 3 partículas :

- El protón: masa $m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{kg}$, carga eléctrica $q_p = +e = +1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, espín $s = \pm \frac{1}{2} \hbar$.
- El neutrón: masa $m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{kg}$, carga eléctrica nula $q_n = 0 \text{C}$, espín $s = \pm \frac{1}{2} \hbar$. El neutrón tiene casi la misma masa que el protón pero es ligeramente más masivo, lo que tiene consecuencias importantes físicas.
- El electrón: masa $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{kg}$, carga eléctrica $q_e = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, espín $s = \pm \frac{1}{2} \hbar$. El electrón es unas 1836 ($6\pi^5$) veces más ligero que el protón.

Además de estas partículas, existen otras partículas elementales en el Modelo Estándar de partículas elementales subatómicas. A nivel de materia, existen fermiones que pueden ser leptones o quarks. Hay 6 tipos o sabores de leptones y 6 tipos o sabores de quarks:

- Quark arriba o up (u), y quark abajo o down (d).
- Quark encanto o charm (c) y quark extraño o strange (s).
- Quark cima o top (algunas veces llamado quark verdad o truth) o (t) y quark fondo o bottom (algunas veces llamado quark belleza o beauty) o (b).
- Electrón y neutrino electrónico (e^-), y ν_e .
- Muón y neutrino muónico μ^- , y ν_μ . La masa del muón es 207 veces la masa del electrón, es una especie de electrón gordito o pesado.
- Tauón y neutrino tauónico τ^- , y ν_τ . La masa del tauón es una 3477 veces la masa del electrón, es un electrón supergordo o superpesado.

Estas partículas de materia se llaman fermiones, e interactúan de diversos modos, mediante interacciones de tipo electromagnético, gravitacional o mediante interacciones nucleares débiles y fuertes. Las interacciones se transmiten por partículas denominadas bosones o partículas mensajeras o intermediarias. Los bosones de 3 de las 4 interacciones se describen con unas teorías cuánticas llamadas de Yang-Mills, que forman el Modelo Estándar invariante bajo un grupo de simetría gauge $G = SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$. Las partículas o bosones del Modelo Estándar son las siguientes:

- El fotón γ . Explica las interacciones electromagnéticas entre partículas de carga eléctrica. No tiene masa ni carga eléctrica, pero tiene espín igual a 1 en unidades de \hbar . El electromagnetismo es una fuerza fundamental de largo y corto alcance.
- El gluón g . Explica las interacciones nucleares fuertes. No tiene masa o carga eléctrica, pero tiene espín 1 en unidades de \hbar . Hay 8 tipos de gluones, que portan una carga llamada “color” (que no tiene nada que ver con el color físico), que es de 3 tipos $R(\text{red})$, $B(\text{blue})$, $G(\text{green})$. Como los hadrones pueden ser compuestos de 2 ó 3 quarks (o incluso recientemente se han hallado partículas de más quarks o hasta se especula con la existencia de estados o partículas sin quarks, llamados “glueballs” o “gluonium”), los mesones (partículas de 2 ó número par de quarks) y los bariones (partículas de 3 ó número impar mayor de 1) son incoloros, por lo que no existen quarks aislados en la naturaleza, propiedad llamada **confinamiento**: todo quark nunca está aislado y está siempre combinado atrapado en objetos de 2 ó más quarks. Otra propiedad de la fuerza fuerte es la llamada *libertad asintótica*: la fuerza entre quarks disminuye al disminuir la distancia, y aumenta al separar a los quarks. La fuerza nuclear fuerte es una fuerza fundamental de corto alcance responsable de la existencia de los núcleos atómicos, y de la propia existencia de protones y neutrones. La interacción nuclear fuerte también es la responsable en gran medida de la masa de los protones y neutrones, al ser partículas compuestas de quarks y gluones.

- Los bosones W^+ , W^- , Z^0 , también llamados bosones vectoriales masivos, dado que tienen masa. También poseen espín igual a 1 en unidades de \hbar . Son responsables de la interacción nuclear débil, de corta distancia, causante de las desintegraciones de partículas. Los tres bosones tienen masa, y salvo el bosón Z, tienen carga eléctrica positiva o negativa los bosones W. Son los responsables del cambio de sabor de partículas, es decir, del cambio de tipo de partícula. Explican la existencia de desintegraciones y reacciones nucleares, y la estabilidad o inestabilidad de algunas partículas o núcleos.
- El bosón de Higgs, H^0 . Partícula con masa y sin carga asociada a un mecanismo (denominado de ruptura espontánea de simetría) que permite explicar la masa de partículas “elementales” del Modelo Estándar. Su espín es $s(H) = 0\hbar$.

El Modelo Estándar NO explica la fuerza más fundamentales del Universo: la gravitación. Hipotéticamente, debería existir una partícula asociada a la interacción gravitacional, que se llama gravitón G y que no tiene masa, pero debería tener espín igual a 2 en unidades de \hbar . El gravitón no forma parte de las partículas del Modelo Estándar pero la existencia de ondas gravitacionales (detectadas por primera vez en el año 2015) apunta a la existencia de estas partículas.

Los fermiones (leptones y quarks) tienen espín semientero en unidades de \hbar , y los bosones (partículas de fuerzas o interacciones fundamentales) tienen espín entero en unidades de \hbar . Las partículas subatómicas son excitaciones de campos que satisfacen unas determinadas ecuaciones de campo o de ondas.

Contando tipos de partículas, el Modelo Estándar posee 17 tipos de partículas diferentes: electrón y su neutrino asociado, el muón y su neutrino asociado, el tauón y su neutrino asociado, el quark up, el quark down, el quark charm, el quark strange, el quark top o truth y el quark bottomo beauty, el fotón, el gluón (realmente hay 8 distintos), el bosón W (con sus dos tipos de cargas eléctricas), el bosón Z y el bosón de Higgs. Total de partículas: 17. Si contamos los 8 gluones y los 2 tipos de W, sumaríamos un total de 25 partículas. Si contamos que cada quark también viene en 3 colores, tendríamos 24 partículas más, para sumar un total de 49. Sin embargo, si somos simples y reduccionistas, nos quedamos con 17 tipos o clase de partículas. Eso es una simplificación respecto a los 118 átomos de elementos conocidos en la actualidad.

2 Moléculas y cristales

Una molécula es la unión de dos o más átomos del mismo o diferente elemento con propiedades químicas y físicas características. Ejemplos: agua, cloruro de sodio, ozono,...

Un cristal es la repetición ordenada en el espacio, con cierto patrón o simetría, de átomos, moléculas o incluso iones. Se especula con la existencia de los llamados cristales de tiempo. Y, además, se sabe de la existencia de los policristales, y los llamados cuasicristales. También, en principio, podrían existir cristales de espacio-tiempo, o cuasicristales de espacio-tiempo, así como versiones policristalinas de los mismos. De hecho, el espacio-tiempo, en la actualidad, se modeliza como una especie de sustancia fluida descrita por un campo que resulta ser el campo gravitacional. La curvatura del espacio-tiempo es, pues, clásicamente, la justificación de la gravitación. Existen semejanzas entre la dislocación de cristales y la deformación o curvatura del espacio-tiempo que da lugar a la interacción gravitacional, fuerza fundamental de largo alcance y, a diferencia de cualquier otro tipo de fuerza fundamental, es la gravitación es una fuerza universal.

3 Números cuánticos

Los átomos y núcleos de los elementos químicos se caracterizan por una serie de números:

- Número atómico Z . Es el número de protones de un átomo o núcleo. Coincide con el número de electrones cuando el átomo es neutro.
- Número másico A . Es el número obtenido de sumar el número atómico Z , y el número de neutrones de un átomo, N . Así $A = Z + N$. Se llama número másico porque como la masa de un átomo es esencialmente la masa del núcleo, dado que los electrones son redondeando 2000 veces más livianos, este número tipifica la masa del átomo. Generalmente se usan las unidades de masa atómica (u), que hoy día equivalen a g/mol . $1u \approx 1.66 \cdot 10^{-27}kg$.
- Número de neutrones, N . Es el número de neutrones de un átomo. Generalmente, en los átomos y núcleos de los principales elementos químicos, hay un balance entre el número de protones y neutrones que los hace estables. Los átomos con muchos más neutrones que protones son generalmente inestables y radioactivos.
- Número de electrones N_e . Para los elementos o átomos neutros este número es igual a Z . Cuando un átomo pierde electrones, queda cargado positivamente, y si gana electrones queda cargado negativamente. Los átomos cargados eléctricamente se llaman iones. Los iones positivos se llaman cationes, los iones negativos se llaman aniones. En la Naturaleza se

busca un equilibrio entre cargas eléctricas de forma natural, por lo que los átomos en circunstancias normales son neutros eléctricamente.

Para simbolizar un átomo o núcleo de un elemento, se usa generalmente la simbología siguiente:



en donde X es el símbolo del átomo, elemento o núcleo, A es el número másico, Z es el número atómico y $n\pm$ es un número con signo que indica la carga eléctrica. El número de neutrones sería $N = A - Z$.

Como los átomos pueden tener diferentes números de protones y neutrones (o de electrones si son iones), hay átomos incluso del mismo elemento con diferentes propiedades. O recíprocamente, átomos de elementos diferentes con núcleos o propiedades similares. Podemos distinguir entonces:

- **Isótopos:** átomos del mismo elemento químico, con igual Z pero distinto A , es decir, con diferente número de neutrones. Ejemplos de isótopos: del hidrógeno, tenemos protio 1_1H o hidrógeno-1, deuterio 2_1H o hidrógeno-2, tritio 3_1H o hidrógeno-3, e hidrógeno-4, hidrógeno-5, hidrógeno-6 e hidrógeno-7, del helio tenemos el helio-3 3_2He y el helio-4 4_2He , del carbono hay unos 3 isótopos (carbono-12, carbono-13, carbono-14), y así con la mayoría de elementos químicos. Hay miles de isótopos en total entre toda la Tabla Periódica.
- **Isótonos:** átomos de diferente elemento químico, con igual número de neutrones pero distinto A y distinto Z .
- **Isóbaros:** átomos de diferente elemento químico, con igual número de nucleones o igual número másico A , pero distinto número de neutrones y distinto Z .
- **Isoelectrónicos:** átomos de diferentes elementos, con el mismo número de electrones.

4 Radioactividad

La **radioactividad** es el fenómeno que tiene lugar cuando los átomos, núcleos o incluso las partículas emiten otras en forma de materia o energía, cambiando su naturaleza. Hay varias formas de radiactividad básica. Las 3 formas elementales de radioactividad, por su relevancia histórica, son:

- **Radiación alfa.** Son núcleos de helio ionizados completamente.
- **Radiación beta.** Son esencialmente electrones de alta energía (aunque también pueden ser positrones con carga positiva).
- **Radiación gamma.** Son fotones de alta energía.

También existen las radiaciones delta y epsilon, formadas por electrones secundarios y terciarios en interacción con alta energía pero menor que la radiación beta, y radiación gravitacional o electromagnética no gamma. Podríamos también sugerir la existencia de radiación correspondiente a las interacciones débiles como radiación Wónica o Zónica, o la Higgsónica asociada a la masa de partículas elementales subatómicas. Además, también podríamos hablar de la radiación gluónica en la interacción nuclear fuerte. Pero, no es habitual en el lenguaje de la Física actualmente hablar de radiación Wónica, Zónica, Higgsónica o gluónica. También podrían existir radiaciones de haces de neutrones, o radiación neutrónica, o radiación de neutrinos (por ejemplo el sol, las estrellas o las supernovas emiten copiosas cantidades de neutrinos), que podríamos llamar radiación neutrónica.

5 Glosario resumen

- **Partícula subatómica:** partícula con un tamaño inferior al tamaño de un átomo.
- **Partícula subatómica elemental:** partícula que hasta la fecha no se ha demostrado tenga partes. El protón y neutrón NO son partículas subatómicas elementales, pero el electrón, el fotón, el neutrino, o el gluón sí.
- **Bosones:** partículas con espín entero que transmiten fuerzas.
- **Fermiones:** partículas con espín semientero que constituyen la materia.
- **Hadrones:** partículas que interactúan bajo la fuerza nuclear fuerte o fuerza de color. Hay dos tipos de hadrones, los bariones y los mesones.

- **Leptones:** partículas que no interactúan bajo la fuerza nuclear fuerte. Son los electrones, muones, y tauones, con sus neutrinos asociados.
- **Confinamiento:** propiedad de la interacción nuclear que hace que no sea posible encontrar en la Naturaleza quarks libres.
- **Libertad asintótica:** propiedad de la interacción nuclear fuerte, que hace que cargas de color interactúan más débilmente cuanto más cerca están, y más fuertemente cuanto más lejos están.
- **Modelo Estándar:** teoría actual (circa 2021) de las partículas elementales subatómicas en vigor. Explica 3 de las 4 fuerzas conocidas fundamentales. Es una teoría mecano-cuántica muy perfeccionada.
- **Color:** propiedad de los quarks y gluones, y más generalmente de toda partícula que interactúa bajo la fuerza nuclear fuerte.
- **Sabor (o flavor):** propiedad que indica el tipo o clase de partícula. Las partículas responsables del cambio de sabor son los bosones W y Z. Hay 6 sabores de leptones, y 6 sabores de quarks. El sabor y su cambio es la responsable de la existencia de desintegraciones radioactivas, y por tanto, de la interacción nuclear débil, de corto alcance.
- **Bosón de Higgs:** partícula que explica la existencia de masa de las partículas consideradas elementales. El mecanismo de ruptura espontánea de simetría o mecanismo de Higgs es un proceso que explica la generación de masa de las partículas elementales del Modelo Estándar mediante un campo dinámico dador de masa, el llamado campo escalar de Higgs, que permea todo el Universo, y un modelo de adquisición de energía o masa no nula del vacío determinado por unas ecuaciones algebraicas.
- **Electromagnetismo:** fuerza fundamental de largo alcance, mediada por los fotones.
- **Fotón:** partículas o cuantos de los que está hecha la luz y las ondas electromagnéticas.
- **Gluón:** partícula o cuanto que transmite la fuerza nuclear fuerte.
- **Campo:** substancia fluidica que forma el Universo. Existen campos asociados a cada partícula de materia y masa del Universo, y a cada fuerza fundamental (energía). Las excitaciones de los campos son discretas y constituyen lo que llamamos partículas. Las partículas se mueven mediante una serie de ecuaciones de campo, generalmente en forma de ecuaciones de campo de tipo ondas. Hay 4 campos de fuerza (bosones) de interacciones fundamentales (electromagnetismo, fuerza nuclear débil y fuerza nuclear fuerte, más la gravedad o gravitación universal). Hay 12 campos de materia asociados a leptones y quarks. También existe el campo dador de masa o campo de Higgs.
- **Gravitón:** hipotética partícula, no perteneciente al Modelo Estándar, que sería la transmisora de la interacción gravitacional, interacción fundamental de largo alcance. Su existencia es necesaria por coherencia y natural al haberse detectado ondas gravitacionales. La interacción gravitacional es univocal porque aplica no solamente a las partículas materiales, sino también a las partículas que tienen energía. Todo gravita.
- **Fuerzas nucleares:** fuerzas de corto alcance que solo operan en el ámbito de los núcleos atómicos. Hay de dos tipos: fuerzas nucleares fuertes (responsables de la estabilidad núcleos y de partículas como protones y neutrones) y fuerzas nucleares débiles (responsables de las desintegraciones radioactivas y el cambio de sabor).
- **Vacío:** según la física clásica el vacío es aquello que no contiene materia o energía. Sin embargo, la mecánica cuántica establece que el vacío es algo más complicado y que sufre fluctuaciones cuánticas o variaciones pequeñas de forma casi instantánea. En teorías cuánticas como el Modelo Estándar, el vacío es el estado de más baja energía, en general con ninguna partícula excitada del campo cuántico correspondiente. El vacío puede visualizarse como una especie de fluido o “mar” en continuo movimiento en el que aparecen y desaparecen partículas y antipartículas (partículas con cargas cambiadas de signo). Así, toda la teoría cuántica (o clásica) puede entenderse como el estudio del vacío de cierto tipo de campos.
- **Espín (en inglés spin):** magnitud que tipifica o etiqueta y caracteriza una partícula elemental subatómica. Es una especie de giro interno de la partícula, pese a que en general consideramos que las partículas elementales subatómicas son puntuales o carecen de dimensiones.
- **Isótopos:** átomos del mismo elemento con igual Z, pero distinto N y A.
- **Isótonos:** átomos con igual N, pero distinto A y Z.
- **Isóbaros:** átomos con igual A, pero diferente Z y N.

- Isoelectrónicos: átomos con igual número de electrones.
- Molécula: unión de dos o más átomos con ciertas propiedades típicas.
- Cristal: repetición ordenada, periódica o repetitiva en el espacio de átomos, moléculas o iones. Un cristal es la consecuencia de la rotura de la llamada simetría traslacional en el espacio de cierta sustancia formada por átomos.
- Cristal de tiempo: sustancia hipotética que estaría asociada a una repetición ordenada periódica en el tiempo de un patrón de partículas. Es un concepto de tipo cuántico complicado, ya que la rotura de simetría traslacional en el tiempo es más complicada que la del espacio.
- Policristal: unión de varios granos o cristales con patrones periódicos mixtos.
- Gravitación: fuerza de largo alcance fundamental de la naturaleza. Está mediada hipotéticamente por gravitones y se explica en la actualidad clásicamente como resultado de la curvatura del espacio-tiempo. No hay aún una teoría cuántica coherente de la gravitación, aunque hay candidatas para ello.
- Unidad de masa atómica (antigua u.m.a.): hoy día equivalente a g/mol, es la unidad habitual en que se miden las masas de los átomos. Tu definición precisa es como la doceava parte de la masa del isótopo de carbono-12. También se la llama dalton (Da). $1u = 1Da = 1g/mol$.
- Desintegración radioactiva: fenómeno que tiene lugar cuando una partícula se transforma o se transmuta en otras distintas, como consecuencia de su interacción con otras partículas.
- Radioactividad: fenómeno que tiene lugar cuando un átomo, núcleo o partícula emite cierta cantidad de energía o radiación en forma cuantificada. Hay varios tipos elementales de radioactividad: la radiación alfa, la radiación beta, la radiación gamma, la radiación delta y la radiación epsilon. También existe la radiación gravitacional, la gluónica y la de tipo Wónica o Zónica o Higgsónica (responsable de la masa que observamos de las partículas subatómicas).
- Transmutación radioactiva: fenómenos que tiene lugar cuando un átomo o núcleo se transforma en otro como consecuencia de la radioactividad o bien como resultado de la colisión Y fusión con otro átomo o núcleo, o su ruptura o fisión en otro/s.
- Radiación alfa: núcleos de helio ionizados completamente.
- Radiación beta: electrones o positrones de alta energía.
- Radiación gamma: radiación electromagnética (fotones) de alta energía.
- Radiación delta y epsilon: electrones secundarios o terciarios que aparecen en interacción de partículas con los átomos con altas energías.
- Radiación gravitacional: radiación formada por gravitones.
- Radiación electromagnética: radiación formada por fotones.
- Radiación gluónica: radiación formada por gluones.
- Radiación neutrónica: radiación formada por rayos de neutrones de alta energía.
- Radiación neutrínica: radiación formada por neutrinos de alta energía.
- Protio: isótopo del átomo de hidrógeno con número másico 1.
- Deuterio: isótopo del átomo de hidrógeno con número másico 2.
- Tritio: isótopo del átomo de hidrógeno con número másico 3.
- Neutronio: hipotético elemento cero de la Tabla Periódica o sustancia formado exclusivamente por neutrones. Se especula con que sea habitual en los púlsares y estrellas de neutrones.
- Simetría gauge: invariancia o simetría de teorías Yang-Mills como el Modelo Estándar. La simetría gauge es una idea que aparece en el electromagnetismo clásico gobernado por las llamadas ecuaciones de Maxwell, o en las interacciones nucleares débiles y fuertes. Es una simetría asociada a ecuaciones diferenciales o algebraicas de cierta clase concreta, que resulta de interés en Física de Altas Energías.

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARKS	<p>u up</p>	<p>c charm</p>	<p>t top</p>	<p>g gluon</p>	<p>H Higgs</p>
mass	4.18 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4.18 GeV/c ²	0	0
charge	-1/3	-1/3	-1/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
LEPTONS	<p>d down</p>	<p>s strange</p>	<p>b bottom</p>	<p>γ photon</p>	
mass	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	0	0
charge	-1	-1	-1	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
LEPTONS	<p>e electron</p>	<p>μ muon</p>	<p>τ tau</p>	<p>Z Z boson</p>	
mass	0	0	0	80.4 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
charge	0	0	0	0	±1
spin	0	0	0	1	1
LEPTONS	<p>ν_e electron neutrino</p>	<p>ν_μ muon neutrino</p>	<p>ν_τ tau neutrino</p>	<p>W W boson</p>	