

DEL ÁTOMO

DE DEMÓCRITO AL MODELO ESTÁNDAR

FROM DEMOCRITUS' ATOM TO THE STANDARD MODEL

YURI POSADAS VELÁZQUEZ

Recibido: 20 de septiembre de 2021

Aprobado: 16 de noviembre de 2021

Resumen

En este artículo se presenta una breve historia de la evolución de los conceptos de átomo y de partícula, desde Demócrito hasta el Modelo Estándar de Partículas (ME). Se revisan diferentes modelos atómicos: Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr y Sommerfeld, además del descubrimiento de nuevas partículas (y antipartículas), que fueron ampliando los componentes elementales de la materia (y la antimateria). Finalmente, se revisa la esencia del ME y los cambios que han introducido en este a raíz del descubrimiento del quark top, el neutrino tau y el bosón de Higgs, así como algunos de los retos pendientes de este Modelo como la incorporación de la interacción gravitacional.

Palabras clave: Modelo Estándar, átomo, materia, antimateria, modelos atómicos, partículas, antipartículas, bosón de Higgs.

Abstract

Different atomic models are reviewed: Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr and Sommerfeld, in addition to the discovery of new particles (and antiparticles) that were expanding the elementary components of matter (and antimatter). Finally, the essence of the ME and the changes that have been introduced in it as a result of the discovery of the top quark, the tau neutrino and the Higgs boson are reviewed; as well as some of the pending challenges of this model such as the incorporation of gravitational interaction.

Keywords: Standard Model, atom, matter, antimatter, atomic models, particles, antiparticles, Higgs boson.

“Todo lo que llamamos real está hecho de cosas que no pueden considerarse reales”.

Niels Bohr

ORIGEN DEL CONCEPTO ÁTOMO

Desde la Antigüedad, al ser humano le ha causado curiosidad saber sobre el origen del mundo que le rodea y de qué se compone éste. En Occidente, se atribuye a los pensadores Demócrito y Leucipo la propuesta de que la materia está formada por *átomos*. El término átomo proviene del latín *atōmus* que significa “sin” (*a*) “división” (*tōmus*), o bien, “indivisible”. La doctrina de Demócrito se reduce en cuatro postulados: 1) la pluralidad de los elementos que conforman el universo; 2) la infinitud del espacio y de los mundos; 3) la indestructibilidad de los átomos, y 4) la infinita existencia y variedad de estos.

En el primer libro de su poema *De Rerum Natura*, Tito Lucrecio Caro expone la concepción atómica de Demócrito retomada por Epicuro¹. Aunque en la actualidad se define al átomo de manera simplificada como una “Partícula indivisible por métodos químicos, formada por un núcleo rodeado de electrones” (RAE), en realidad su concepción ha sufrido cambios radicales a lo largo de los siglos XX y XXI.

A continuación, se mostrarán brevemente las modificaciones que ha experimentado este concepto debido a los nuevos paradigmas científicos y a los descubrimientos revolucionarios de la física.

LA TEORÍA ATÓMICA DE LA MATERIA Y EL MODELO DE DALTON

Durante el Renacimiento, la teoría atómica se combinó con la mecánica de Newton para

¹ “La extremidad de un átomo es un punto / Tan pequeño, que escapa a los sentidos; / Debe sin duda carecer de partes: / Él es el más pequeño de los cuerpos, / Ni estuvo ni estará jamás aislado; / Es una parte extrema, que juntada / Con otras y otras partes semejantes, / Forman así del átomo la esencia / Si del átomo, pues, los elementos / De existencia carecen separados”. (Caro, 1999).

explicar el comportamiento y la composición de la materia. Por ejemplo, para mostrar la ley de Boyle, “Newton supuso que los gases están formados por átomos casi estacionarios que se repelían con una fuerza que variaba inversamente con la distancia” (Mason, 2001, p.80). En 1808, John Dalton da un paso importante para explicar el diferente comportamiento de los gases debido a su composición: la existencia de átomos de diferente especie, no idénticos. Así, un mismo tipo de átomos formaban un *elemento*, siendo susceptible de combinarse con otro de átomos distintos para formar un compuesto. Dalton identificó doce *elementos*, e interpretó correctamente que el agua está constituida por átomos de hidrógeno y de oxígeno.

A pesar de la importancia de este paradigma atómico para explicar algunos de los fenómenos observados en la química, aún no se sabía nada sobre la composición intrínseca del átomo. Los primeros intentos para escudriñar la naturaleza de éste se dieron a finales del siglo XIX y durante todo el siglo XX.

EVOLUCIÓN DEL MODELO ATÓMICO: DE THOMSON A SCHRÖDINGER

El estudio de los fenómenos eléctricos, en particular la electrólisis en soluciones salinas, contribuyó a dilucidar la estructura del átomo, de manera que “Helmholtz [sugirió] en 1881 que la electricidad existía en forma de partículas que Johnstone Stoney denominó ‘electrones’ en 1891” (Mason, 1996, p. 36). El término electrón se deriva del término griego *ἤλεκτρον* [ēlektron], que significa ámbar.

En 1897, al estudiar los rayos catódicos en un tubo de descarga, J. J. Thomson demostró que el haz de partículas generado en el dispositivo se desviaba en presencia de un campo magnético por lo que, al analizar la trayectoria del haz, dedujo que estaba formado por partículas de carga negativa. Así, Thomson descubrió una de las partículas que componen el átomo: el electrón. No fue su único descubrimiento.

Con nuevos experimentos de electrólisis de soluciones ácidas, Thomson encontró que

La teoría atómica se combinó con la mecánica de Newton para explicar el comportamiento y la composición de la materia.

la masa de un ion de hidrógeno era cerca de dos mil veces mayor que las partículas (electrones) procedentes de los rayos catódicos y, además, de carga opuesta (positiva). En 1904, Thomson interpretó los hechos anteriores de la siguiente manera: los átomos están formados por electrones adheridos a una gran masa de carga positiva.

En 1920, Ernest Rutherford denominó *protón* (del griego *πρῶτον*, que significa primero) a esta masa. Este fue el primer modelo atómico (“pudín de pasas”) de la era contemporánea. Así, el átomo de Demócrito no era simple, sino compuesto por otras partículas.

¿Qué había en el interior del núcleo? Ya en 1901, Rutherford y Frederick Soddy observaron que el cesio se transformaba en bario emitiendo partículas beta (electrones). Esto los llevó a suponer —erróneamente, como ahora sabemos— que estas partículas procedían del núcleo atómico.

Posteriormente, Rutherford y Hans Geiger desarrollaron pantallas de sulfuro de cinc en las que era fácil observar la incidencia de partículas alfa (núcleos de Helio) empleadas como proyectiles para escudriñar la naturaleza del átomo. Geiger y Marsden (colaboradores de Rutherford) planearon un experimento de *scattering* (dispersión): hacer incidir un haz de partículas alfa sobre una lámina delgada de oro y medir su desviación al rebotar contra ésta. Si el modelo de Thomson era correcto, al estar concentrada la carga eléctrica en una pequeña zona, las partículas alfa sólo experimentarían una ligera desviación. En el experimento, en efecto, la mayoría de las partículas alfa se desviaron muy poco y fueron detectadas en las pantallas colocadas detrás de la lámina, pero unas cuantas aparecieron por detrás de la fuente emisora de partículas. La interpretación de Rutherford fue la siguiente: “La carga positiva y casi toda la masa debían estar

concentradas en una región [...] muy reducida del átomo, un núcleo masivo y cargado positivamente en torno al cual orbitaban los electrones” (Rodríguez-Quintero, 2016, p. 31).

Rutherford continuó experimentando y en 1919 bombardeó nitrógeno con núcleos de helio. El resultado fue sorprendente y se considera la primera reacción nuclear inducida: obtuvo $^{17}_8\text{O}$ (un isótopo del oxígeno) y un protón. Realizando el análisis de las masas atómicas, Rutherford interpretó que en el núcleo debía existir una partícula de masa similar al protón, pero sin carga eléctrica; la bautizó como *neutrón*. En 1932, James Chadwick la descubrió al bombardear berilio con partículas alfa; el resultado de la reacción fue un átomo de carbono y una partícula sin carga eléctrica (el neutrón).

De esta manera, el átomo quedó configurado por un núcleo con protones y neutrones con una nube de electrones alrededor de éste. El anterior es el modelo atómico que la mayoría de las personas tiene en su mente. Sin embargo, el modelo continuó evolucionando.

Un paso previo para entender el comportamiento de los electrones lo dio el danés Niels Bohr. Los electrones en el modelo de Rutherford tenían el siguiente problema: al ser cuerpos cargados en movimiento, según la teoría electromagnética, perderían energía por radiación y terminarían cayendo al núcleo. Bohr comenzó estudiando el átomo de hidrógeno y sus series espectrales, las cuales habían sido investigadas previamente y contaban con modelos matemáticos empíricos para su descripción. Para explicar la estabilidad del electrón en su órbita, Bohr recurrió a la teoría cuántica desarrollada en 1900 por el alemán Max Planck y lo explicó así:

Que el equilibrio dinámico de los sistemas en estados estacionarios puede ser analizado con la ayuda de la mecánica ordinaria. Mientras que el paso del sistema entre estados estacio-

El estudio de los fenómenos eléctricos, en particular **la electrólisis** en soluciones salinas, contribuyó a dilucidar la estructura del átomo.

narios [...] es seguido por la emisión de una radiación, [...] para la cual la relación entre la cantidad de energía emitida es la que proporciona la teoría de Planck (es decir, $E_1 - E_2 = h\nu$)². (Segrè, 1983, p. 138).

En síntesis, Bohr predijo que los electrones sólo pueden ocupar ciertas órbitas bien definidas (*cuantizadas*) y que, al saltar de una a otra, emite (o absorbe) energía. Así, en el modelo de Bohr los electrones se encuentran girando alrededor del núcleo, pero no a la manera de un sistema planetario, pues las partículas no pueden ocupar cualquier órbita.

La interpretación de Bohr fue correcta para explicar las líneas espectrales del átomo de hidrógeno y porqué los gases nobles no adquieren o ceden electrones cuando reaccionan con otros elementos, pero falló para átomos más complejos, para determinar la forma de los orbitales de las capas más externas y otros fenómenos como los dobletes de las líneas espectrales y las interacciones atómicas. El átomo no era tan simple como se pensaba.

Más adelante, Arnold Sommerfeld generalizó el modelo de Bohr incorporando los resultados de la teoría de la relatividad y otras propiedades como la existencia de subniveles de energía dentro del átomo y la diferente forma de los orbitales dentro del que se mueven los electrones dependiendo del llamado número cuántico azimutal. Pero los electrones revelaron nuevas sorpresas a los investigadores.

En 1922, Otto Stern y Walther Gerlach, dispersando un haz de átomos de plata a través de un campo magnético, observaron que los electrones tienen propiedades magnéticas y parecen comportarse como pequeños imanes en presencia de dicho campo. En 1925,

² $E_1 - E_2$ es la diferencia de energía, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s es la constante de Planck y ν es la frecuencia.

Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck propusieron que el electrón posee un momento angular intrínseco que denominaron *espín*.

De esta manera, el electrón revelaba un comportamiento más complejo de lo esperado. Además, su carácter de diminuto corpúsculo sólido también estaba tambaleante.

En 1924, el físico francés Louis de Broglie propuso que toda la materia tiene asociada una longitud de onda dependiente de la masa y la velocidad del cuerpo o partícula. De este modo, tanto el electrón como otras partículas, supuso Broglie, tendrían un comportamiento ondulatorio en determinadas condiciones; así fue. Unos años más tarde, George Paget Thomson, haciendo pasar electrones por una delgada capa de metal, y Davisson y Germer, empleando una rejilla cristalina, demostraron de manera independiente la difracción de estas partículas. Por lo tanto, se demostró que el electrón también se comporta como una onda, por lo que su imagen como un corpúsculo sólido y diminuto tuvo que ser corregida.

Erwin Schrödinger consiguió explicar la energía de los electrones en 1926, suponiendo que estos se comportan no como partículas sino como ondas tridimensionales. Lo novedoso de la ecuación de onda propuesta por Schrödinger, es que sólo indica la probabilidad de encontrar al electrón en una determinada zona, a diferencia de la mecánica clásica, en donde la posición y la velocidad de una partícula se puede dar con precisión (a esto se le denomina *determinismo*). O sea, a diferencia de un planeta girando alrededor del Sol que tiene una posición determinada en el espacio, del electrón solamente podemos decir la probabilidad de hallarlo en una órbita.

Ese mismo año, Werner Heisenberg le dio la puntilla al determinismo de la mecánica clásica: demostró matemáticamente la imposibilidad de medir de manera simultá-

El neutrino fue descubierto experimentalmente hasta 1956 por Clyde Cowan y Frederick Reines.

nea la posición y la velocidad de una partícula, pues medir una propiedad de ésta altera la otra. Así, los físicos revelaron la complejidad del mundo submicroscópico. Además, las nuevas investigaciones revelaron la existencia de partículas diferentes al electrón, al protón y al neutrón.

EL DESCUBRIMIENTO DE NUEVAS PARTÍCULAS (Y ANTIPARTÍCULAS) ELEMENTALES

Desde 1902, Rutherford y Soddy habían estudiado dos tipos de desintegración radiactiva: la alfa y la beta. *Grosso modo*, en la primera un elemento se convierte en otro y se emite una partícula alfa (un núcleo de helio). Unos años más tarde, Soddy sugirió que la desintegración beta: “transforma el átomo de la especie original en otro de un elemento vecino (...) [siendo] el resultado de la conversión (...) de un neutrón en un protón o viceversa” (Rodríguez-Quintero, 2016, p. 55). Actualmente a la primera se le denomina *desintegración beta negativa* y a la segunda *desintegración beta positiva*³.

Wolfgang Pauli había observado una aparente violación al principio de conservación de la energía, pues los electrones emitidos tenían una energía inferior a la diferencia de energías de los núcleos inicial y final. Por lo tanto, sugirió la existencia de una partícula eléctricamente neutra y de masa insignificante que explicaba dicha diferencia. En 1934, Fermi bautizó esta partícula como neutrino (“neutrón pequeño”, en italiano).

El neutrino fue descubierto experimentalmente hasta 1956 por Clyde Cowan y Frederick Reines, quienes bombardearon agua pura con un poderoso haz de neutrones. De

esta forma, el neutrino comenzó a engrosar la colección de las nuevas partículas que los físicos habían descubierto. Posteriormente, se descubrió que hay diferentes tipos de neutrinos: electrónico (ν_e), muónico (ν_μ) y tauónico (ν_τ), dependiendo de las partículas que interaccionen.

En 1928, el físico francés Maurice Dirac corrigió la ecuación de Schrödinger introduciendo los efectos de la teoría de la relatividad para predecir la energía de los electrones. Lo curioso es que su ecuación arrojaba soluciones tanto positivas como negativas para dicha energía. Lejos de considerar la solución negativa como una incongruencia matemática, Dirac contempló la posibilidad de que existieran partículas con la misma masa del electrón, pero con carga eléctrica positiva. Dirac llamó “antimateria” a estas “partículas complementarias” de la materia. En 1932, al analizar las trazas generadas por los rayos cósmicos en la atmósfera alta, Carl Andersen detectó una partícula con la masa del electrón y con carga positiva. Más tarde a esta partícula se le denominó *positrón* y fue la primera (pero no la única) antipartícula descubierta.

Debido a la relativa facilidad para obtenerlas, hasta entonces los físicos habían empleado partículas alfa (núcleos de helio) para usarlos como proyectiles e investigar la estructura del átomo. En 1931, John Cockcroft y Ernest Walton dirigieron un “haz de protones contra un blanco de litio (...) [y obtuvieron] dos partículas alfa (...) Sustituyendo el litio por el boro, observaron que (...) cuando el núcleo de boro es alcanzado por un protón se rompe en tres fragmentos iguales [de helio]” (Gamow, 2001, pp. 379-380). Así, los protones se convirtieron en proyectiles útiles para la investigación nuclear. A partir de ello se desarrollaron a gran escala los aceleradores de partículas.

³ En la desintegración beta negativa un neutrón se convierte en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico; mientras que en la desintegración beta positiva un protón se convierte en un neutrón, un positrón y un neutrino electrónico.

Emilio Segrè descubrió el antiprotón en 1955, gracias a que experimentó con un haz de protones de alta velocidad contra un núcleo fijo. Poco después el antineutrón fue detectado experimentalmente. Desde entonces se han descubierto más antipartículas vía haciendo chocar partículas entre sí a grandes velocidades. Más tarde, los físicos también descubrieron antineutrinos en diferentes experimentos.

Ahora bien, si el átomo está formado por un núcleo donde coexisten protones y neutrones, con una nube de electrones alrededor, ¿sería posible crear un *antiátomo* con sus respectivas antipartículas? Sí. En 1965 se creó el primer antinúcleo de deuterio que contenía un antiprotón y un antineutrón. Treinta años después, en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN, por sus siglas en francés) se creó un átomo de antihidrógeno. De este modo, no sólo hay átomos, como imaginaba Demócrito, sino también es factible la existencia de *antiátomos*.

No obstante, ¿las partículas constituyentes del núcleo atómico (protones y neutrones) son elementales en el sentido de ser los *ladrillos* que forman, al menos, la mayor parte de la materia que conocemos? No. Nuevamente la investigación demostró que estas partículas (y sus antipartículas) están formadas por otras: los *quarks* (*antiquarks*).

Como resultado del descubrimiento de varias partículas, los físicos se dieron a la tarea de intentar hacer una clasificación de estas. Uno de ellos fue Murray Gell-Mann, quien tomó como criterio las propiedades cuánticas de las partículas (carga eléctrica, espín, etcétera).

Hasta ese momento se sabía que la materia se compone de fermiones (partículas que cumplen el principio de exclusión de Pauli⁴), divididos en leptones (electrones, muones y neutrinos) y en bariones (como los protones y los neutrones). Se conocían además los bosones (partículas que no cumplen dicho principio) y algunos mesones (piones y kaones).

⁴ El principio de exclusión de Pauli postula que dos partículas diferentes no pueden tener sus cuatro números cuánticos iguales.

En 1961, Gell-Mann propone una clasificación que podía explicar dos grupos de ocho partículas: los bariones con espín $\frac{1}{2}$ y los mesones con espín 0. A su propuesta la denominó “El camino óctuple” y así es conocida hasta nuestros días. Uno de los aciertos de su modelo fue que predijo la existencia de un nuevo mesón.

Por otra parte, en su modelo detectó un patrón: sugería que los nucleones parecían estar formados por una tríada de partículas. Si esto era correcto, el protón y el neutrón también tendrían tres partículas en su interior. ¿Era una teoría correcta o una simple especulación?

James Bjorken, por 1968, sugirió colisionar, dentro de un acelerador de partículas, electrones a gran velocidad contra protones estáticos. Si el protón era de constitución uniforme, los electrones serían ligeramente desviados de su trayectoria original; si no era así, éstos rebotarían en ángulos grandes. Al realizar el experimento, Bjorken y su equipo detectaron picos en la energía de los electrones dispersados, lo que les sugirió la existencia de componentes internos dentro del protón.

Posteriormente se efectuaron nuevos experimentos con protones, neutrones y algunos bariones, encontrando que tienen tres centros de dispersión, lo que sugirió a los físicos que están formados por tres quarks. Pero los quarks no vinieron solos, pronto hubo evidencia experimental de la existencia de los *antiquarks*.

El estudio de los quarks reveló propiedades diferentes con respecto a las partículas hasta entonces conocidas: tienen carga eléctrica fraccionaria ($\pm 1/3$, $\pm 2/3$), y pueden combinarse en grupos de tres para formar partículas (mesones) o en pares quark-antiquark y constituir otras (bariones). Hasta la fecha se conocen seis tipos de quarks: u (*up*), c (*charm*), t (*top*), d (*down*), s (*strange*) y b (*bottom*).

Se demostró que los quarks son fermiones, es decir, cumplen con el principio de exclusión de Pauli, pero no existen por separado. El problema es que, en el modelo inicial de Gell-Mann, partículas como el protón y el neutrón tienen dos quarks iguales en su interior, por lo que en principio —al no existir separadamente— tendrían los mismos

Los quarks no vinieron solos, pronto hubo evidencia experimental de la existencia de los antiquarks.



números cuánticos iguales y violarían dicho principio de exclusión. La solución propuesta por él, en 1970, fue introducir una nueva propiedad de los quarks: la *carga de color*. Supuso que los quarks tienen tres *colores*: rojo, verde y azul. De manera análoga, las antipartículas tienen sus respectivos *anticolores*.

Además de esta propiedad, los quarks tienen carga eléctrica, masa y espín, *aroma*, *sabor*, entre otras. En 1973, los esfuerzos de David Politzer, Frank Wilczek y David Gross dio nacimiento a la teoría de la cromodinámica cuántica (QCD, por sus siglas en inglés) para describir la interacción de los quarks y las partículas portadoras de la interacción nuclear fuerte⁵ (el gluón).

⁵ En la actualidad los físicos reconocen tres tipos de interacciones fundamentales en la naturaleza: la gravitacional, la electrodébil (unificación de la electromagnética y la fuerza nuclear débil) y la nuclear fuerte. Bajo el modelo estándar, cada interacción tiene una partícula (bosón) responsable de “transmitirla”. Por ejemplo, de la electromagnética es el fotón, de la nuclear débil los bosones W_{\pm} y Z , y de la nuclear fuerte el gluón. Se conocen ocho tipos de gluones.

Así, bajo el modelo de la cromodinámica cuántica, un protón está constituido por un quark u azul de carga $+2/3$, un quark u rojo de carga $+2/3$ y un quark d verde de carga $-1/3$. Sumando, la carga total del protón es de $+1$. Mientras que un neutrón se compone de un quark u azul de carga $+2/3$, un quark d rojo de carga $-1/3$ y un quark d verde de carga $-1/3$. La suma total de la carga eléctrica del neutrón es 0 .

EL MODELO ESTÁNDAR DE PARTÍCULAS Y EL BOSÓN DE HIGGS

Entre 1980 y finales del siglo xx se realizaron esfuerzos para realizar un modelo de clasificación para más de 60 partículas descubiertas y 20 parámetros cuánticos. A esta clasificación se le conoce como el Modelo Estándar (ME) y se ha construido a lo largo de más de cuarenta años. Con el descubrimiento del quark *top* (1995), el neutrino tau (2000) y el bosón de Higgs (2012), el ME se actualizó (en la figura 1 se presenta una ilustración del ME).

El Modelo Estándar describe las interacciones de tres generaciones de partículas a través de tres fuerzas fundamentales, cada una de ellas mediada por sus propios portadores de fuerzas. Las partículas son de tres tipos básicos: hadrones, como los protones y los neutrones, que están constituidos por quarks; leptones, que incluyen los electrones; y bosones, como los fotones, asociados a la transmisión de fuerzas. Cada hadrón y leptón tienen asimismo una antipartícula correspondiente. (Baker, 2014, p. 125).

Ahora bien, ¿qué características tienen las partículas que forman el ME? Según Gómez son los:

masa →	2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
carga →	2/3	2/3	2/3	0	0
espín →	1/2	1/2	1/2	1	0
	U up	C charm	T top	g gluon	H Bosón de Higgs
QUARKS	≈4.8 MeV/c ² -1/3 1/2	≈9.5 MeV/c ² -1/3 1/2	≈4.18 GeV/c ² -1/3 1/2	0 0 1	γ fotón
	d down	s strange	b bottom		
LEPTONESS	0.511 MeV/c ² -1 1/2	105.7 MeV/c ² -1 1/2	1.777 GeV/c ² -1 1/2	91.2 GeV/c ² 0 1	Z bosón z
	e electrón	μ muón	τ tau		
	<2.2 eV/c ² 0 1/2	< 0.17 eV/c ² 0 1/2	< 15.5 MeV/c ² 0 1/2	80.4.2 GeV/c ² ±1 1	W
	ν_e	ν_μ	ν_τ		BOSONES GAUGE

Figura 1. El Modelo Estándar (ME). La masa de las partículas se da en MeV/c²; 1 MeV/c² equivale a 0.177 x 10⁻²⁹ kg. Diagrama elaborado por el autor con información de: <https://www.quantumdiaries.org/2014/03/14/the-standard-model-a-beautiful-but-flawed-theory/>

Hadrones [...] partículas que experimentan la interacción fuerte. Según su masa y espín se pueden dividir en: a) Bosones [...] partículas de espín semientero o fermiones. Los bariones [...] integran los *nucleones* [...] y los *hiperones*, que no están en el núcleo y son más pesadas que los nucleones; b) Mesones [...] son bosones o partículas de espín entero, con masas intermedias entre los bariones y los leptones [...] (Finalmente,) los leptones: partículas que no experimentan la interacción fuerte. Son los fermiones de espín ½ y pueden estar cargados,

como el electrón, o ser neutros, como el neutrino. (2016, pp. 102-103).

No obstante, un problema tanto del ME como de las primeras propuestas de clasificación de partículas, es el hecho de que unas partículas tienen mayor masa que otras (y el fotón tiene masa nula en reposo). Para explicar esta diferencia, en 1964 el físico Peter Higgs propuso la existencia de un bosón responsable de la masa de las partículas. Él supuso que los portadores de la interacción débil (bosones W



Entre 1980 y finales del siglo XX se realizaron esfuerzos para realizar un modelo de clasificación para más de 60 partículas descubiertas y 20 parámetros cuánticos”.

y Z) disminuían su velocidad al interactuar con un campo de fondo (llamado *campo de Higgs*). De esta manera:

el mecanismo de Higgs [...] es responsable de la masa de las partículas elementales, de los electrones, los quarks y los bosones W y Z [...]. Si cesara la actividad del campo de Higgs y los quarks perdieran la masa que les proporciona [...] se aniquilarían los átomos, y con ellos, la materia tal como la conocemos, porque los electrones se darían súbitamente a la fuga. (Blanco, 2015, pp. 118-119).

¿Lo anterior podría explicar la razón de que existan partículas con masas nulas (fotón, gluon [Zyla *et al.*, 2020]), minúsculas (neutrinos [Keshelava, 2019]), intermedias (muones, quark *strange*) y grandes (bosones W y Z, quark *top*)? No del todo. Lederman y Teresi lo expresan así:

Hasta ahora no tenemos ni idea de qué reglas controlan los incrementos de masa generados por el [bosón de] Higgs. Pero el problema es irritante: ¿por qué sólo esas masas –las masas de los W^+ , W^- y Z^0 , y el *up*, *down*, el *charm*, el *strange*, el *top* y el *bottom*, así como los leptones– que no forman un patrón obvio. (Lederman y Teresi, 2013, p. 520).

Es decir, el campo de Higgs no se aplica a todas las partículas conocidas.

El 4 de julio de 2012 el CERN reportó un experimento realizado en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) en el que “presentaron los resultados (...) en favor de una nueva partícula: el largamente buscado bosón de Higgs. El grado de certidumbre (...) resulta abrumador: 99.9999 por ciento, el nivel de fiabilidad que los físicos de partículas exigen” (Casas, 2012, p. 13).

Sin duda, en el futuro cercano, los experimentos con altas energías en el LHC y dispositivos similares revelarán la existencia de nuevas partículas que confirmarán, corregirán o cambiarán el ME.

CONCLUSIONES

La historia de los modelos atómicos y de la estructura de la materia, al igual que la ciencia en general, nos muestran que el conocimiento es dinámico y se encuentra en continua evolución, apuntalado por los nuevos descubrimientos y el cambio en los paradigmas científicos. Como apuntaba Thomas Kunh, el paradigma científico tiene dos vertientes:

Por una parte, significa toda la constelación de creencias, valores, técnicas, etc., que comparten los miembros de una comunidad dada. Por otra parte, denota una especie de elemento de tal constelación, las concretas soluciones de problemas que, empleadas como ejemplos o modelos, pueden remplazar reglas explícitas como base de la solución de los restantes problemas de la ciencia normal. (Kunh, 2004, p. 269).

Lo anterior puede constarse con las diferentes propuestas sobre la constitución de los átomos: se interpretan los descubrimientos en función de los modelos vigentes; si estos fallan, entonces se recurre a nuevos paradigmas que solucionen el problema. Por ejemplo, el átomo de Thomson tuvo que ser reemplazado, a la luz de los experimentos, por el modelo de Rutherford. Cuando se creía que protones y neutrones eran partículas elementales, la evidencia experimental obligó a formular nuevos paradigmas que dio como resultado la teoría de los quarks y la cromodinámica cuántica.

De manera análoga, el descubrimiento de nuevas partículas elementales llevó a los físicos a plantearse un completo sistema de clasificación que culminó en el ME. Sin embargo, este tiene que resolver algunos problemas pendientes como la incorporación de la interacción gravitacional y su supuesta partícula portadora (el gravitón).

Por otra parte, no todos los cambios de paradigma son exclusivamente debidos al pensamiento teórico; en particular, la física de partículas ha requerido de dispositivos experimentales cada vez más complejos como aceleradores de partículas, reactores nucleares, etc.

Los paradigmas atómicos se han modificado a lo largo del tiempo: los átomos son pequeños e indestructibles (Demócrito); pueden concebirse como un sistema planetario (Rutherford); las órbitas tienen restricciones cuánticas (Bohr); las partículas tienen asociadas una longitud de onda (Broglie) y pueden describirse como ondas (Schrödinger); los nucleones están formados por partículas más elementales (los quarks); hasta suponer que las partículas elementales son como armónicos que ondulan en una cuerda vibrante (teoría de cuerdas).

¿Qué nuevos descubrimientos y aportaciones teóricas se presentarán en el futuro que provoquen un cambio en los paradigmas científicos establecidos sobre el átomo y las partículas elementales?

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baker, J. (2019). *50 cosas que hay que saber sobre física cuántica*. Ciudad de México: Booket.

Blanco, D. (2015). *El bosón de Higgs. Los secretos de la partícula divina*. España: RBA-National Geographic.

Caro, T. L. (1999). *De la naturaleza de las cosas: poema en seis cantos*. Consultado el 16 de agosto de 2021. Recuperado de: <http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/de-la-naturaleza-de-las-cosas-poema-en-seis-cantos--o/html/>

Casas, A. (2012). “El descubrimiento del bosón de Higgs”. Consultado el 7 de septiembre de 2021. Recuperado de: <https://www.investigacionyciencia.es/files/7635.pdf>



En un futuro cercano, los experimentos con altas energías en el LHC y dispositivos similares revelarán la existencia de nuevas partículas”.

Gamow, G. (2001). *Biografía de la física*. España: Alianza Editorial.

Gómez, M. (2016). *El modelo estándar de partículas. Los pilares de la materia*. México: RBA-National Geographic.

Lederman, L. y Teresi, D. (2013). *La partícula divina. Si el Universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?* Ciudad de México: Booket.

Keshelava, T. (2019). “Los físicos han aclarado la estimación de la suma de las masas de neutrinos”. Consultado el 9 de septiembre de 2021. Recuperado de: <https://nplus1.ru/news/2019/08/23/neutrino-mass>

Kuhn, T. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. Argentina: FCE.

Mason, S. (2001). *Historia de las ciencias. 4. La ciencia del Siglo XIX*. España: Alianza Editorial.

————— (1996). *Historia de las ciencias. 5. La ciencia del Siglo XX*. España: Alianza Editorial.

Rodríguez-Quintero, J. (2016). *Quarks y gluones. Las entrañas de las partículas elementales*. España: RBA.

Segrè, E. (1983). *De los rayos x a los quarks*. México: Folios Ediciones.

Zyla, P. A. et al. (2020). *Listados de partículas*. Recuperado el 8 de septiembre de 2021. Recuperado de: https://pdg.lbl.gov/2021/listings/contents_listings.html