

En la piscina de bolas: átomos, partículas y «bazinga»

Sé que puedo parecer perturbado, pero de hecho soy un físico de renombre mundial. Pregúnteme la diferencia entre un bosón y un fermión. ¡Adelante, pregunte! ¡Los bosones tienen un espín entero, los fermiones tienen un espín semientero!

(Temporada 8, episodio 1)

Una de las escenas más divertidas e icónicas de *The Big Bang Theory* tiene que ver con una piscina de bolas en la que Sheldon se mete y luego se niega a salir, para desesperación de Leonard, a quien no le queda más remedio que entrar para sacarlo de allí. La escena del segundo persiguiendo al primero mientras este se zambulle entre las bolas y sale por el lado opuesto es garantía de risas. El episodio suele recordarse porque es una de las primeras veces que Sheldon utilizó su famosa expresión «bazinga», que utiliza para señalar cuándo ha conseguido tomarle el pelo a alguien. Sin embargo, pocos recuerdan los motivos que le llevaron a lanzarse a la piscina de bolas, que están directamente relacionados con el tema de este segundo capítulo. Y es que unos días antes Sheldon había pasado toda una noche en vela intentando resolver una paradoja

muy compleja: ¿por qué los electrones actúan como si no tuvieran masa cuando viajan a través del grafeno?

- Sheldon: Los electrones se mueven por el grafeno, actúan como si no tuviesen masa.
- Howard: ¿Cuánto lleva atascado?
- Leonard: Intelectualmente, unas 30 horas. Emocionalmente, unos 29 años.
- Sheldon: La unidad celular contiene dos átomos de carbono, el ángulo interior de un hexágono es de 120 grados.
- Howard: ¿Has probado reiniciándolo?
- Leonard: No. Creo que es un problema de *firmware*.

Las elucubraciones de Sheldon persisten más tarde, en la cafetería: «Estructura constante, un átomo (...)

El patrón es como el de los fermiones (...) Viaja por las vías (...) hexagonal, siempre es hexagonal».

Tres días después sigue intentando resolver el problema utilizando unas canicas para reproducir el modelo del grafeno. Como esto no es suficiente, decide acabar en la piscina de bolas porque necesita algo más grande. Así, le dice a Leonard desde la piscina: «Tú puedes empezar a clasificar protones y neutrones mientras yo construyo átomos de carbono».

¿Por qué los electrones actúan como si no tuvieran masa cuando viajan a través del grafeno? Podrás leer la respuesta a este enigma al finalizar el capítulo. Antes vamos a aclarar todos los nombres que hemos mencionado hasta ahora y que quizás no acabas de tener claro en qué consisten: átomos, electrones, fermiones... Para poder seguir los pensamientos de Sheldon es necesario volver a hacer un viaje en el tiempo, esta vez al año 450 AEC, y situarnos en Abdera, una ciudad floreciente, tanto en lo económico como culturalmente, a donde llegó el filósofo Leucipo de Mileto y poco después fundó allí una escuela, entre cuyos alumnos destacó Demócrito. La mayoría de lo que conocemos de él nos ha llegado a través de otros autores, como Platón y Aristóteles. De este modo, sabemos que Demócrito afirmaba que el universo es un espacio vacío

ilimitado y que todo cuanto hay en él está formado por diminutos corpúsculos que no pueden ser divididos en partes más pequeñas. Por ello los llamó «átomos», que en griego significa «indivisible». Las distintas combinaciones que podían formar al unirse explicarían la variedad de materiales observados en la naturaleza.

El modelo atómico

El modelo atómico de Demócrito surgía de una observación racional del mundo, desprovista de ideas preconcebidas, y se ajusta conceptualmente a la realidad tal como hoy la conocemos. Desafortunadamente, no recibió el reconocimiento que merecía, exceptuando algún caso aislado como el del filósofo griego Epicuro de Samos y el del poeta y filósofo romano Tito Lucrecio Caro. Ese desinterés, y sobre todo la persistente influencia de Aristóteles en la cultura occidental, hicieron que hubiera que esperar hasta el año 1649 (¡17 siglos más tarde!) para que el sacerdote francés Pierre Gassendi, doctor en teología y profesor de matemáticas, publicara un libro en el que recuperaba el modelo atomista y proponía que los átomos pueden juntarse (él decía

que mediante una especie de ganchos) para formar las moléculas de las distintas sustancias (aunque se sintió obligado a aclarar que la creencia en las ideas de un ateo como Lucrecio no significaba un menoscabo del cristianismo).

La propuesta de Gassendi llegó en un momento en que ya se apreciaba que la observación y la experimentación constituyen un medio más eficaz para llegar al conocimiento de la realidad que la creencia ciega en los autores antiguos. En esta línea, el astrónomo y matemático Edmond Halley, quien calculó la órbita del cometa que lleva su nombre, ideó un método para calcular el diámetro de un átomo. Consultó a unos joyeros la cantidad mínima de oro que necesitaban para recubrir un alambre de plata, con la creencia de que el grosor de la mínima capa posible debería corresponder al tamaño de un átomo. A partir del peso del oro utilizado, la densidad de este y la superficie recubierta, llegó a la conclusión de que el diámetro del átomo de oro debía ser inferior a 2×10^{-7} m (0,2 milésimas de milímetro). En realidad, el valor correcto es muy inferior, ya que conseguir por medios mecánicos un recubrimiento

formado por una sola capa de átomos (o unas pocas capas) es casi imposible. El valor que Halley obtuvo debía corresponder a unas 1500 capas, puesto que el átomo de oro mide realmente $1,4 \times 10^{-10}$ m.

Las primeras evidencias de la existencia de los átomos no llegaron hasta principios del siglo XIX, gracias al químico, físico, matemático y meteorólogo inglés John Dalton¹, quien llevó a cabo una gran cantidad de reacciones químicas y anotó en todas ellas el peso de cada uno de los elementos utilizados y el de las sustancias resultantes. Al analizar cuidadosamente los datos obtenidos, algo le llamó poderosamente la atención: cuando dos elementos químicos pueden combinarse entre sí para formar más de un tipo de compuesto, las proporciones necesarias en cada caso guardan una relación correspondiente a un número entero (o, en algunos casos, una fracción de números enteros). Un ejemplo lo ilustrará con mayor claridad. El carbono y el oxígeno pueden combinarse para obtener monóxido de carbono o dióxido de carbono. En el primero, cada gramo de carbono necesita 1,33 g de oxígeno, mientras que en el segundo requiere 2,66 g, justo el

¹El daltonismo recibe este nombre porque Dalton, que lo padecía, fue la primera persona que publicó un artículo científico sobre este trastorno (*Extraordinary facts relating to the vision of colours*, 1794).

doble². De ello Dalton dedujo que: 1) los elementos están formados por átomos; 2) todos los átomos de un elemento son iguales entre sí; 3) los átomos de diferentes elementos tienen propiedades distintas; y 4) en una reacción química los átomos se unen o se separan en determinadas proporciones para formar los compuestos. Dalton publicó estas conclusiones en 1808³, proporcionando una nueva orientación a esta ciencia.

El «átomo» deja de serlo

Se habían necesitado más de dos milenios para que la idea del átomo como constituyente elemental de la materia fuera aceptada de modo generalizado. Sin embargo, bastarían unas pocas décadas para descubrir que aquel «corpúsculo indivisible» imaginado por Leucipo y Demócrito estaba formado en realidad por otras partículas más pequeñas.

Aunque el descubrimiento de la primera partícula subatómica (el electrón) se produjo en 1897, el camino que condujo a él se inició de modo más o menos fortuito en el año 1800, cuando el químico William Nicholson y el cirujano Anthony Carlisle, ambos ingleses,

experimentando con una pila voltaica observaron que al hacer circular una corriente eléctrica a través de agua, esta se descompone en sus dos componentes: hidrógeno (que va al cátodo, conectado al polo negativo de la fuente de corriente) y oxígeno (que va al ánodo, conectado al polo positivo). Este fenómeno, denominado electrólisis, fue estudiado por el físico y químico británico Michael Faraday, que en 1834 publicó dos leyes que relacionaban la masa depositada en un electrodo con la cantidad de electricidad que lo ha atravesado, y con el peso equivalente de la sustancia (relacionado con su peso atómico).

En una conferencia pronunciada en 1874, el físico y matemático irlandés George Johnstone Stoney expuso que a partir de las leyes de Faraday debía deducirse que la cantidad de electricidad no podía adquirir cualquier valor, sino que debía ser un múltiplo de una carga elemental, a la que inicialmente denominó «electrino» y más tarde «electrón». De manera independiente, el médico y físico alemán Hermann von Helmholtz, en un seminario en

1881, propuso también la existencia de unos «átomos de electricidad», aunque tanto estos como los electrones eran considerados simples unidades de medida de la carga eléctrica, y no como partículas.

Por aquellos años, el inventor estadounidense Thomas Alva Edison trataba de perfeccionar sus lámparas eléctricas. Dos problemas le preocupaban: la escasa duración de los filamentos y el ennegrecimiento de la lámpara. En una de las muchas pruebas que llevó a cabo añadió en el interior de la lámpara una fina placa de platino que conectó al polo positivo de la alimentación a través de un galvanómetro que medía la corriente circulante. Edison observó que una parte de la corriente del filamento pasaba a través del vacío de la lámpara hacia la placa de platino, y que la cantidad de corriente era mayor cuando se aumentaba el voltaje aplicado a la placa. Aunque este hecho podía haberse atribuido a la existencia de partículas eléctricas, a Edison le interesaba más el efecto práctico del experimento, y cuando en 1883 solicitó la patente del dispositivo lo hizo definiéndolo como un

² Cada molécula de monóxido de carbono contiene un átomo de oxígeno y uno de carbono, mientras que la de dióxido de carbono está formada por dos de oxígeno y uno de carbono. Por esta razón, en el segundo caso se necesita el doble de oxígeno para la misma cantidad de carbono

³ En un libro titulado *A New System of Chemical Philosophy* (Un sistema nuevo de filosofía química).

«indicador eléctrico» que podía ser utilizado en «sistemas de distribución eléctrica para medir las variaciones de consumo en las diversas partes del distrito».

El pudín de pasas

Las investigaciones de las últimas décadas del siglo XIX ya parecían indicar que el electrón no era tan solo una unidad de medida de la carga eléctrica, sino una partícula material, pero también podía tratarse simplemente de un átomo cargado eléctricamente, como los iones de cloro y sodio que se producían en la electrólisis de la sal común. Faltaba, pues, un experimento que, además de confirmar la existencia corpórea del electrón, demostrara que es una partícula distinta de los átomos conocidos.

Tal experimento tuvo lugar en 1897 y lo llevó a cabo el físico inglés Joseph John (J. J.) Thomson cuando trabajaba con tubos de rayos catódicos (las pantallas de los televisores antiguos eran dispositivos de este tipo adaptados para la proyección de imágenes). Los utilizados por Thomson consistían en un tubo de vidrio cerrado herméticamente en cuyo interior se había eliminado la mayor parte del aire, y en el que se habían dispuesto dos electrodos conectados a sendos polos de una fuente de alimentación de alto voltaje. En un extremo del tubo se

hallaba el cátodo (conectado al polo negativo), y a cierta distancia, el ánodo (conectado al polo positivo), que tenía una pequeña ranura en su centro. Además, el extremo del tubo opuesto al cátodo estaba pintado interiormente con fósforo luminiscente. Al conectar la alimentación, el cátodo emite electrones que son atraídos fuertemente por el ánodo, por lo que adquieren una gran velocidad. Algunos de ellos pasan por la ranura y siguen su camino en línea recta hasta el otro extremo del tubo, donde provocan la luminiscencia del fósforo en el punto de contacto.

Con el objetivo de determinar las propiedades de los electrones, Thomson añadió, alrededor del camino que seguían los rayos tras pasar por la ranura del ánodo, dos placas cargadas eléctricamente y dos imanes. De este modo, observando la desviación producida en los rayos que llegaban al fósforo podía calcular la carga eléctrica y la masa de las partículas circulantes. Tras numerosas observaciones con variadas configuraciones de los componentes concluyó que:

- Los rayos catódicos son partículas con carga negativa.
- Tales partículas son las mismas cualquiera que sea el material del cátodo.
- Las partículas tienen una masa unas 2000 veces menor que la del

menor átomo existente (el de hidrógeno).

Con ello quedaba probado que los electrones eran partículas que formaban parte del átomo y que podían desprenderse de él, por lo que los átomos dejaban de ser las partes indivisibles de la materia y se hacía necesario buscar un nuevo modelo atómico. Fue el mismo Thomson el primero en proponerlo. Como el conjunto del átomo es neutro, si en él hay electrones (negativos) el resto del átomo debe contener cargas positivas que los equilibren. Así que imaginó que el átomo era una bola con carga positiva repartida uniformemente, dentro de la cual flotan los electrones. Por la semejanza de este modelo con cierto postre, es conocido con el nombre de «pudín de pasas».

El modelo nuclear

La teoría de que los átomos de un elemento podían convertirse en otros elementos fue formulada por Ernest Rutherford, en 1902, junto con el radioquímico inglés Frederick Soddy. Por sus investigaciones le fue concedido el Premio Nobel de Química. Además, Rutherford ideó y dirigió un experimento de gran importancia, habitualmente conocido como el «experimento de la lámina de oro». Su ejecución práctica, entre los años 1908 y 1913, corrió a cargo del físico alemán

Hans Geiger⁴ y el físico inglés Ernest Marsden, que cuando empezó a trabajar en el experimento tenía tan solo 20 años. El objetivo era estudiar la distribución de la materia en el interior del átomo, que por aquel entonces se suponía que seguía el modelo del pudín de pasas ideado por Thomson. Para ello, se disponía una muestra de un metal radiactivo (radio) en el interior de una caja de paredes espesas de plomo que absorbían la radiación, con una única minúscula perforación por la que podía salir un fino haz de partículas alfa (núcleos de helio). A la salida de este haz se colocaba una delgada lámina de oro rodeada por una pantalla detectora circular, de manera que las partículas que traspasaban la lámina o rebotaban en ella al chocar con la pantalla generaban un destello en el punto correspondiente. Si el modelo de Thomson era cierto, la carga del átomo estaría repartida por toda su extensión, con lo que la fuerza de repulsión en cada punto sería pequeña, y la mayoría de las partículas alfa pasarían con una desviación mínima o nula. En efecto, casi todas ellas traspasaban la lámina sin desviarse, pero sorprendentemente una mínima

cantidad, solo una de cada varios millares (el número dependía de las condiciones de los diversos experimentos), sufría una desviación de más de 90° (es decir, en vez de atravesar la lámina, retrocedía). Rutherford interpretó estos resultados proponiendo su modelo nuclear del átomo, que dice así:

- La mayor parte del átomo es espacio vacío (puesto que la mayoría de las partículas alfa lo traspasan sin sufrir ninguna desviación).
- La mayoría de la masa del átomo y de su carga positiva se encuentra concentrada en un pequeñísimo espacio en el centro del átomo, el núcleo (ello explicaría la pequeña fracción de partículas que sufren una fuerte desviación).
- Los electrones cargados negativamente estarían rodeando el núcleo, a cierta distancia de él.

Las primeras partículas

En 1919 Rutherford consiguió realizar la primera transmutación de un elemento en otro (aparte de las que había observado que se producían de modo natural en los fenómenos radiactivos) bombardeando átomos de

nitrógeno con partículas alfa (núcleos de helio), obteniendo átomos de oxígeno y núcleos de hidrógeno. Como el hidrógeno es el elemento con el peso atómico más bajo, el hecho de que fuera uno de los productos obtenidos en la reacción anterior condujo a Rutherford a pensar que el núcleo de hidrógeno en realidad era una partícula elemental, y que el núcleo de los átomos de cada uno de los restantes elementos contenía un número determinado de estas partículas, a las que llamó protones (del griego *πρῶτον*, *prôton* = primero).

La concentración de la carga positiva en el núcleo planteaba el problema de cómo este podía mantener su estabilidad a pesar de la fuerte repulsión mutua que debían experimentar los protones. Rutherford propuso que debía existir en el núcleo una nueva partícula que mantuviera la unión, a la que dio el nombre de «neutrón» (porque sería una especie de protón sin carga, es decir, neutro). Fue un ayudante de Rutherford, el físico inglés James Chadwick, quien lo descubrió en 1932, por lo cual obtuvo el Premio Nobel de Física del año 1935. El neutrón tiene una masa ligeramente superior a la del protón.

⁴Es la persona que ideó el principio en que se basa el contador Geiger, el instrumento usado para medir los niveles de radiación, y que posteriormente lo desarrolló junto a Walther Müller, por lo que el dispositivo utilizado en el contador recibe el nombre de tubo Geiger-Müller.

Dos años antes del descubrimiento del neutrón, el físico suizo-estadounidense Wolfgang Pauli, Premio Nobel de Física en 1945, había estado investigando la desintegración beta en la que parecía producirse una pérdida de energía contraria a la ley de conservación de la energía. Pauli propuso la hipótesis de que la diferencia de energía se debía a una nueva partícula sin carga, de masa muy pequeña. Sin embargo, no se atrevió a publicarlo en un artículo, y simplemente lo comunicó a un grupo de físicos, entre los que se encontraba el italiano Enrico Fermi, Premio Nobel de Física en 1938, quien tomó la idea en serio y desarrolló su teoría en 1934, asignando a la nueva partícula el término «neutrino» (en italiano, pequeño neutrón). Calculó que, en caso de existir, el neutrino debía tener una masa inferior al 1% de la del protón, e interactuar mínimamente con la materia, lo que le haría de difícil detección. El descubrimiento del neutrino no se produjo hasta 1956, y fue llevado a cabo por los físicos estadounidenses Clyde Cowan y Frederick Reines. Este último recibió el Premio Nobel de Física en 1995 por tal descubrimiento (Cowan no pudo recibirlo porque había

fallecido, y desde 1974 los estatutos de los Premios Nobel impiden conceder premios a personas fallecidas⁵).

Como los neutrinos solo se ven afectados por la llamada interacción débil, que tiene un radio de acción sumamente pequeño, pueden atravesar enormes extensiones de materia sin dificultades. Las reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas generan gran cantidad de neutrinos que salen disparados en todas direcciones. Se calcula que, en un segundo, cada centímetro cuadrado de superficie terrestre es atravesado por unos 65.000 millones de neutrinos procedentes del Sol, y por tanto en este mismo tiempo cientos de miles de millones de ellos pasan a través de cada uno de nosotros. Durante un largo viaje en coche, y como una forma de pasar el tiempo, Sheldon inventa una particular versión del juego «veo, veo» basándose en los neutrinos:

– Sheldon: ¿Quieres jugar a un juego de física para viajar que he inventado, llamado “no veo, no veo”? Tiene toda la tensión y emoción de “veo, veo”, con la diversión añadida de las partículas subatómicas y las ondas de fuera del espectro visible.

- Leonard: Si es la mitad de divertido que “Hay 10 elevado a 4 botellas de cerveza en la pared”, me apunto.
- Sheldon: Empezaré yo. No veo, no veo, una cosita... algo que nos acaba de atravesar.
- Leonard: El café con soja que me he tomado.
- Sheldon: ¿Quieres jugar, por favor? No veo, no veo, una cosita, algo que nos acaba de atravesar.
- Leonard: No sé... Si 65.000 millones de neutrinos del Sol atraviesan un centímetro cuadrado cada segundo, suponiendo que la superficie de este coche es de unos 60.000 centímetros cuadrados, eso significa... ¿3,9 por 10 elevado a 15 neutrinos del Sol?

El modelo básico

Llegados a este punto, la relación de partículas elementales conocidas se reducía a cuatro, que además podían estructurarse de una manera simple y elegante, pues había dos de ellas grandes y pesadas, que formaban el núcleo de los átomos, y otras dos pequeñas y ligeras. Además, en cada grupo había una con carga y otra neutra. A las grandes se las llamaba colectivamente «hadrones» (del griego ἄδρός, *adrós* = grande,

⁵A no ser que el fallecimiento se produzca después del anuncio de la concesión.

	Con carga	Sin carga
Grandes, masivas (hadrones)	Protón (+)	Neutrón
Pequeñas, ligeras (leptones)	Electrón (-)	Neutrino

masivo), y a las pequeñas, «leptones» (del griego λεπτός, *leptós* = pequeño, ligero).

Las partículas se multiplican

La constatación de la divisibilidad del átomo y, por tanto, de la posible existencia de más componentes de este, pareció abrir la caja de Pandora y provocó un continuo descubrimiento de nuevas partículas que destruían la simplicidad del modelo original. No solo esto, sino que muchas de estas partículas no formaban parte de los átomos ni de las radiaciones conocidos hasta entonces, lo que hacía que algunos de tales descubrimientos fueran una inesperada sorpresa. Así sucedió en 1936, cuando el ya citado Carl Anderson y el también físico estadounidense Seth Neddermeyer

descubrieron en los rayos cósmicos el muon, una partícula que, como el electrón, presentaba una carga negativa, pero con una masa muy superior. Al tener noticia de ello, el físico estadounidense, nacido en Austria, Isidor Isaac Rabi, Premio Nobel de Física en 1944, exclamó «¿Quién ha pedido eso?».

A mediados del siglo xx, el número de partículas conocidas era ya considerable, como lo muestran dos anécdotas. La primera la narra el estadounidense Leon M. Lederman, Premio Nobel de Física en 1988, que cuenta⁶ que, cuando era joven, se encontró casualmente con Fermi, e impresionado por tener la ocasión de hablar con un Premio Nobel le preguntó su opinión sobre el descubrimiento de una partícula llamada «K-cero-dos». Fermi le respondió: «Joven, si pudiese recordar los nombres de esas partículas habría sido botánico». La segunda corresponde al físico Willis E. Lamb, quien en su discurso de aceptación del Nobel de Física en 1955 dijo que «había oído decir que anteriormente al descubridor de una nueva partícula elemental se le recompensaba con un Premio Nobel, pero ahora un

descubrimiento de este tipo debería ser castigado con una multa de 10.000 dólares».

La antimateria

En 1928, el físico británico Paul Dirac desarrolló unas ecuaciones que lograron adaptar las teorías cuánticas⁷ a la relatividad de Einstein. Sus fórmulas describían las características de las partículas, pero para cada una de ellas admitían dos soluciones con cargas opuestas (del mismo modo que la ecuación $x^2 = 9$ admite las soluciones $x = 3$ y $x = -3$). Así, por ejemplo, tanto valían para el electrón de carga negativa como para una partícula que tuviera las mismas características del electrón, excepto que su carga fuera positiva. Aunque inicialmente Dirac no tuvo en cuenta este hecho (más tarde dijo que «por pura cobardía»), no tardó en darse cuenta de que lo que las ecuaciones predecían era la existencia de las antipartículas, que son como la imagen especular de las partículas conocidas. Cada partícula tiene su antipartícula, y del mismo modo que las partículas forman la materia, las antipartículas forman la antimateria⁸.

En 1932, el físico estadounidense Carl Anderson descubrió la primera antipartícula: el positrón (la opuesta

⁶ En su libro *The God Particle* (La partícula de Dios).

⁷ Descritas en el capítulo *El examen de Howard y la física cuántica*, pág. 61.

⁸ En 1995, el profesor Walter Oelert y un equipo internacional consiguieron sintetizar por primera vez átomos de antimateria a partir de antipartículas elementales.

del electrón). Anderson lo consiguió estudiando los rayos cósmicos a través de una cámara de niebla (una cámara con gas supersaturado de vapor de agua). Cuando las partículas lo atraviesan chocan con los átomos y liberan electrones, creando iones que provocan la condensación de minúsculas gotas de agua, que revelan el camino seguido por la partícula (dejan una estela o traza). La cámara estaba rodeada por un potente imán que provocaba la desviación de las partículas cargadas, en uno u otro sentido según su carga eléctrica. El grosor de la traza, así como su curvatura y dirección, permiten detectar la masa y la carga de la partícula. De este modo vio una partícula que seguía una trayectoria semejante a la del electrón, pero que se curvaba en dirección contraria.

Por sus trabajos, Dirac obtuvo el Premio Nobel de Física de 1933, y Anderson el de 1936. En su discurso de aceptación del premio, Dirac explicó la completa simetría de materia y antimateria, y afirmó que «debemos considerar un mero accidente el hecho de que la Tierra (y presumiblemente el conjunto del sistema solar) contenga preponderantemente electrones negativos y protones positivos. De hecho, podría haber la mitad de las estrellas de cada tipo (de materia y antimateria). Ambos tipos de estrellas mostrarían exactamente los

mismos espectros, y no habría manera de distinguirlos con los métodos astronómicos actuales».

Cuando sendas partículas de materia y antimateria se encuentran, se aniquilan mutuamente convirtiéndose en energía según la fórmula $E = mc^2$. Ello convertiría a la antimateria en una potente fuente de energía si no fuera porque tanto su producción como su almacenamiento requieren una energía miles de millones de veces superior a la que podría obtenerse posteriormente.

Los quarks

Hasta la década de 1960 se creía que los protones y los neutrones eran partículas elementales (indivisibles), pero en realidad cada uno de ellos está formado por tres partículas, denominadas genéricamente «quarks». La existencia de los quarks fue predicha en 1964 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann, Premio Nobel en 1969, y George Zweig, y fue comprobada en 1968 en el SLAC National Accelerator Laboratory (Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC).

En el modelo inicial, de solo cuatro tipos de partículas habíamos distinguido dos masivas (los hadrones: el protón y el neutrón) y dos ligeras (los leptones: el electrón y el neutrino). Mientras que los hadrones, como hemos visto, están compuestos cada uno por tres

quarks (o un quark y un antiquark), los leptones son partículas elementales. Posteriormente se descubrieron otros cuatro leptones: el muon, el neutrino muónico, el tauón y el neutrino tauónico (con sus correspondientes antipartículas); así como un nuevo tipo de hadrones: los mesones, compuestos de un quark y un antiquark.

Los bosones

Nuestra visión macroscópica del mundo nos hace interpretar la materia y las fuerzas como dos partes de la realidad muy diferenciadas. Entendemos habitualmente la materia como algo de lo que están hechas las cosas que nos rodean, que ocupa un espacio, tiene una masa y una perduración en el tiempo. Por el contrario, la fuerza es una acción capaz de modificar el estado de movimiento o la forma de los cuerpos materiales. Por ejemplo, una piedra es un fragmento de materia que podemos tocar y ver, mientras que el peso de esta piedra es la fuerza con que la Tierra la atrae.

Sin embargo, cuando penetramos en el mundo subatómico la diferencia entre materia y fuerza se difumina (como veremos con más detalle en el siguiente capítulo dedicado a la física cuántica). Por ahora, bástenos decir que en este entorno las fuerzas se manifiestan como interacciones producidas por el intercambio de unas partículas portadoras de fuerza

denominadas bosones gauge. Hay cuatro fuerzas o interacciones fundamentales, de las cuales dos tienen un radio de acción limitado a las distancias que se dan en el interior del núcleo de los átomos y otras dos tienen un alcance prácticamente ilimitado. Son:

- Interacción nuclear fuerte, ejercida por los gluones.
- Interacción nuclear débil, ejercida por los bosones.
- Interacción electromagnética, ejercida por los fotones.
- Interacción gravitatoria, ejercida en teoría por los gravitones.

Una diferencia fundamental entre las partículas de materia o fermiones (los quarks y los leptones) y las de fuerza o bosones es que los fermiones ocupan un espacio, es decir, en un mismo punto solo puede haber un fermión, y en cambio un número cualquiera de bosones puede compartir un único lugar (ello hace posible que la acumulación de bosones llegue a generar campos de fuerza intensos, observables macroscópicamente). Otra diferencia entre fermiones y bosones es que estos últimos, al no ser partículas de materia, no tienen sus correspondientes antipartículas.

El modelo estándar de partículas

El conjunto de partículas conocidas (18 quarks, 18 antiquarks, 6 leptones,

	1. ^a gen.	2. ^a gen.	3. ^a gen.	
QUARKS	u arriba	c encanto	t cima	g gluón
	d abajo	s extraño	b fondo	γ fotón
LEPTONES	e electrón	μ muón	τ tauón	Z bosón Z
	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	W bosón W
				BOSONES GAUGE

6 antileptones y 12 bosones gauge) puede ser representado simplificada en un cuadro de 4 × 4 que ofrece cierto grado de simetría y constituye la imagen gráfica del modelo estándar.

La simplicidad y la elegancia del cuadro esconde una serie de incógnitas que los científicos intentan desvelar, como las grandes diferencias entre las masas de unas y otras partículas, o entre las intensidades de las fuerzas generadas por los distintos bosones. Además, el modelo no incluye la partícula correspondiente a la fuerza de la gravedad, porque no se ha podido comprobar su existencia. Pero la limitación de nuestro conocimiento no acaba aquí.

El mundo oscuro

Ya en las décadas de 1920 y 1930 algunos astrónomos y astrofísicos observaron que el movimiento rotatorio de los cúmulos de galaxias no se ajustaba al que les correspondería por su masa (deducida a partir de la observación de su brillo y número de galaxias). Sin embargo, sus cálculos contenían algunos errores, por lo que fueron ignorados. Fue en la década de 1970 cuando la astrónoma estadounidense Vera Rubin y su colaborador Kent Ford, al estudiar la curva de distribución de velocidades de rotación a distintas distancias del núcleo galáctico, llegaron a la conclusión de que la mayoría de las galaxias deben contener seis veces más materia que la que observamos.

Además, esta materia interactúa con la fuerza gravitatoria (pues altera el movimiento de las estrellas), pero no con la electromagnética (ya que no la vemos), por lo que se la conoce como materia oscura.

En el mundo de *The Big Bang Theory*, la existencia de la materia oscura es probada en la segunda temporada cuando un físico llamado David Underhill aporta la primera prueba concluyente de su existencia, desmontando el trabajo de Leonard, que intentaba demostrar lo contrario. Como no le basta con esto, este científico también le arrebató el interés de Penny al ser bastante más atractivo que él. Afortunadamente para Leonard, también es un mujeriego y Penny acaba deshaciéndose de él. Tras el fracaso de su trabajo, Leonard ayudará más adelante a solidificar las pruebas de la existencia de la materia oscura con un fotomultiplicador. En la tercera temporada son Sheldon y Raj los que trabajan con la materia oscura y tienen que ponerse de acuerdo (sus conflictos son el centro del episodio) para llevar a cabo un experimento sobre el espectro de aniquilación resultante de la colisión de materia oscura en el espacio. En la séptima temporada Sheldon abandona, para

sorprender a sus amigos y también de la audiencia, su trabajo sobre la teoría de cuerdas⁹ para dedicarse precisamente a la investigación de la materia oscura. En la octava temporada vuelve a coordinarse con Raj, que le informa de que el gobierno está fundando el campo de la materia oscura enviando equipos a una mina de sal para llevar a cabo experimentos. Los dos quedan atrapados dentro de los túneles en una situación claustrofóbica en la que Sheldon entra en crisis, pues se da cuenta de que su trabajo en el campo de la materia oscura apenas acaba de empezar, mientras que cuando se dedicaba a la teoría de las cuerdas era uno de los físicos más brillantes de su campo.

En la actualidad se considera que el 85% de la materia existente en el universo es materia oscura, es decir, solo el 15% restante corresponde al modelo estándar de partículas. Si sumamos la cantidad de materia oscura a la de energía oscura¹⁰, resulta que el 95% del universo corresponde a un «mundo oscuro» del que no conocemos nada. Pero vamos a acabar este capítulo con algo que sí sabemos, que es la respuesta a la pregunta «¿por qué

los electrones actúan como si no tuvieran masa cuando viajan a través del grafeno?». La incógnita no fue solucionada en la serie, pero sí lo vamos a resolver aquí. Para empezar, tenemos que explicar qué es el grafeno, que se trata de una delgada lámina de carbón (puede obtenerse separando las capas de grafito, el material utilizado en los lápices), de solo un átomo de grosor (con una estructura de colmena), que tiene unas capacidades excepcionales: es extraordinariamente resistente, buen conductor de la electricidad y superior a cualquier otro material en cuanto a conducción del calor. Es casi transparente por completo. Y a diferencia de los materiales habituales, tridimensionales, el grafeno es bidimensional.

La extrema regularidad de su estructura permite que los electrones circulen a través de ella sin los numerosos obstáculos que encuentran en otros materiales, por lo que alcanzan una gran velocidad. Debido a ello, su comportamiento no responde a la mecánica cuántica «normal», sino a la mecánica cuántica «relativista», es decir, la electrodinámica cuántica (QED, *Quantum Electrodynamics*). En la QED, el comportamiento de los

⁹ En el capítulo *Amor y desamor por la teoría de cuerdas* (pág. 84) abordaremos la teoría de cuerdas y también los motivos que llevaron a los guionistas a hacer que Sheldon abandonara este campo de estudio.

¹⁰ Explicada en la pág. 47 de este cuaderno.

En la piscina de bolas: átomos, partículas y «bazinga»

electrones cambia y debemos considerarlos cuasipartículas de Dirac sin masa. El comportamiento de los electrones en el grafeno había sido previsto teóricamente por P.R. Wallace en 1947, pero no

pudo comprobarse experimentalmente hasta 2004, cuando los físicos Andre Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Manchester, experimentaron sobre el grafeno.

Curiosamente, ambos fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 2010, apenas 8 meses después de la emisión del episodio de la piscina de bolas de *The Big Bang Theory*.