

El Bosón de Higgs: masivo descubrimiento

Desde el 4 de julio pasado circula por todos los medios impresos, radiales, televisivos y electrónicos, la noticia del descubrimiento del Bosón de Higgs. Comentarios van y vienen, de la importancia y maravilla de la detección de esta partícula, hecha gracias a décadas de trabajo, varios millones de euros y equipos internacionales de centenares de científicos del orbe. El mundo de la ciencia está emocionado. ¿Por qué tanta bulla?

Comencemos desde el principio

El gran objetivo general de la física es entender de qué está compuesto el universo y cuales son las fuerzas y leyes que regulan los fenómenos que vemos en él.

Claramente, ése no es un trabajo fácil, pero hemos avanzado. Esta búsqueda de un orden, de una estructura global del todo, parte de un concepto básico, y es que si bien nuestros ojos perciben una multitud de variados fenómenos, muy en el fondo todas las cosas están formadas por los mismos bloques fundamentales y todas las acciones pueden describirse en función de fuerzas fundamentales. Así que andamos en busca de los fundamentos del universo, de las columnas que sostienen ese edificio, del diseño de las columnas que permiten sostenerlo y más importante aún, de los razones de ese diseño.

Esa búsqueda se ha hecho por dos vías, la de las ideas y la de los experimentos. En la ciencia, ambas deben ser consistente para tomar lo que ellas proponen y lo que ellos obtienen como digno de ser creído, como confiable para ser tomado como verdadero.

El átomo

La idea de un bloque fundamental que constituye todas las cosas materiales, es muy antigua. Los griegos ya habían planteado teóricamente su existencia, la llamaron átomo, que significa partícula indivisible. Fue apenas en el siglo XIX que tuvimos la tecnología para poner a prueba su existencia, con la realización de experimentos que demostraran su presencia y sus características. Uno de esos descubrimientos fué que el átomo no era indivisible, sino que estaba compuesto de tres partículas, los protones y neutrones que estaban apretujados formando un núcleo muy pequeño y los electrones que orbitaban ese núcleo a la distancia. Los protones tienen carga eléctrica positiva, los neutrones no tienen carga y los electrones tienen carga eléctrica negativa. Los protones y neutrones son bastante masivos comparados con los electrones, que son unas mil veces más ligeros. Parecía además que el átomo era mayormente espacio vacío, o sea que ¡estamos llenos de huecos!.

¿Si somos tan vacíos entonces por qué no podemos atravesarnos unos a los otros? Cargas iguales se repelen, entonces ¿Cómo es que los protones se mantienen juntos en el núcleo atómico? A estas interrogantes se agregaron otras más apremiantes. Hacia los años 70 y 80, cada acelerador de partículas que se construía parecía encontrar su propio conjunto de partículas, aparecían cada vez más, de distintas formas y tamaños, cargas y propiedades, y resultó que los protones y neutrones estaban formados por partículas aún más pequeñas, aunque los electrones sí eran indivisibles. Peor aún, se encontró además que cada partícula tenía una gemela idéntica aunque con carga eléctrica opuesta, su antipartícula, y que al chocar una partícula con su antipartícula, no quedaba nada material después sino solo energía pura, es decir radiación.

De pronto la física tenía ante sí un arroz con mango de partículas y no parecía hallar una manera de poner orden en esa borrachera.

El modelo estándar

Se llevó un tiempo poner orden y encontrar un sentido a todos esos resultados, pero así se hizo, y se obtuvo lo que actualmente se denomina el Modelo Estándar de la física de partículas. En este modelo, las partículas fundamentales forman la materia que vemos y transmiten las fuerzas que interactúan en ella. Este modelo descansa en la existencia - comprobada - de partículas fundamentales, 12 de ellas constituyen la materia, son llamadas **fermiones** fundamentales, y 3 de ellas que transmiten las fuerzas fundamentales, a las que se denomina **bosones** fundamentales.

Algunos fermiones fundamentales andan sueltos mientras que otros andan siempre en grupos. A los solitarios, que son 6, se les llama **leptones**, y éstos son: el electrón, el muón, el tau, y sus respectivos neutrinos: el neutrino electrón (llamado simplemente neutrino), el neutrino muón y el neutrino tau. A los fermiones sociales que son los otros 6, se les llama **quarks** y éstos son: up, down, charm, strange, top y down, que poseen la llamada carga de color¹, que puede ser roja, verde o azul. Los quarks se agrupan bajo ciertas reglas, que aseguran que se conserven ciertas propiedades físicas del conjunto: la carga de color debe ser neutra y la carga eléctrica debe ser entera (1 = carga positiva, -1 = carga negativa, 0 = carga neutra). A estas agrupaciones de quarks se les llama **hadrones**. Por tanto, el famoso colisionador de hadrones, no hace otra cosa que chocar a estos grupos de quarks.

Las reglas mencionadas hacen que los quarks se agrupan por pares, formando los **mesones** (que no son mesas grande) o por tríos, constituyendo los **bariones**. Por ejemplo un protón está formado por tres quarks (up+up+down), que en conjunto tienen una carga eléctrica

¹ Que no tiene nada que ver con el color que observamos en las cosas, es solo un nombre que se da a esta propiedad

positiva y el neutrón por su parte está formado por tres quarks (up+down+down) que en total producen una carga eléctrica neutra.

Otros bariones, es decir otros tríos de quarks distintos a los protones y los neutrones, son posibles y han sido observados pero son poco comunes. Igualmente, sería posible tener hadrones formados por cuatro quarks (tetraquarks) o cinco (pentaquarks) o más, pero no han sido observados. Esto tiene una explicación: las partículas más masivas decaen espontáneamente en partículas menos masivas y si queda un resto de masa ésta se libera en forma de radiación. Los neutrones y los protones son los bariones más comunes porque son los menos masivos y los más estables. La materia visible del universo está formada fundamentalmente por estos bariones, de allí la expresión de los astrónomos al hablar de la materia bariónica en contraposición a la materia oscura².

Jugando a las metras

¿Cómo saben los físicos qué partículas hay y qué propiedades tienen? Simple, ellos juegan a las metras con ellas. En el Gran Colisionador de Hadrones, los físicos usan unos imanes muy poderosos para poner, por ejemplo, a varios protones en rutas de colisión, y miden que hay antes y después del choque. Sabiendo que los números deben cuadrar, es decir, que se deben conservar las propiedades físicas fundamentales, como la carga eléctrica, la energía, etcétera, que se reparten de manera distinta a la que originalmente tenía antes del choque, los físicos pueden determinar que partículas salieron de la colisión, por ejemplo su masa, velocidad, carga eléctrica, entre otras propiedades. En las condiciones apropiadas, y con algo de suerte, alguna colisión puede dar como resultado partículas nunca antes vistas. Es un poco como jugar a la lotería, hay que intentarlo muchas veces hasta lograr el éxito.

¿Y qué pasa con los bosones?

El Modelo Estándar establece que las fuerzas fundamentales del Universo son transportadas por los bosones fundamentales. La ciencia ha logrado identificar cuatro fuerzas fundamentales: la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil, la fuerza electromagnética y la fuerza de gravedad.

La fuerza nuclear fuerte, es transportada por los **gluones**, ocho tipos de ellos en total, que mantienen a los quarks unidos formando hadrones. Dentro de un hadrón, los quarks están constantemente intercambiando gluones entre sí, para mantener esos pares y tríos de quarks unidos. Los gluones tienen también carga de color, y ésta es tal que el intercambio modifica las cargas de color de los quarks individuales, pero conserva la carga de color neutra del

² La materia oscura es materia de la que no conocemos todavía su "receta". Podría estar formada por otras partículas fundamentales no descubiertas todavía o ser una combinación no conocida de las que ya conocemos.

hadrón como conjunto. Más aún, los quarks de un hadrón pueden intercambiar gluones con los quarks de otro hadrón, y es así como los gluones mantienen unidos a los protones y neutrones dentro del núcleo atómico, pese a que los protones, todos de carga eléctrica positiva se repelen entre sí. El nombre gluón viene del inglés *glue*, que significa pegamento.

La fuerza nuclear débil, es transmitida por las partículas W^+ , W^- y Z^0 , y está detrás de los procesos de decaimiento que mencionamos hace unos párrafos atrás. Un fermión más masivo se convierte en uno menos masivo y libera en el proceso un bosón W (positivo o negativo según corresponda para la conservación de la carga eléctrica). El bosón W a su vez decae en mesones o leptones. El bosón Z, que no tiene carga eléctrica, interviene en las interacciones de los tres tipos de neutrinos (que son leptones sin carga eléctrica) y puede decaer finalmente en un par leptón-antileptón o quark-antiquark.

La radioactividad observada en los reactores nucleares por ejemplo, no es más que el decaimiento de átomos muy pesados a otros con menor número de protones. El alcance de la fuerza nuclear débil se restringe a distancias atómicas y es varias veces más débil que la fuerza nuclear fuerte y que la fuerza electromagnética, de ahí su nombre de *débil*.

La fuerza electromagnética es transmitida por los **fotones** y actúa sobre todas las partículas que tengan carga eléctrica positiva o negativa. Es la fuerza más familiar para nosotros, porque actúa a una escala que experimentamos como seres humanos. La fuerza electromagnética se manifiesta por ejemplo en la corriente eléctrica o en los imanes que se atraen o repelen. La fuerza eléctrica y la magnética son dos manifestaciones de la misma fuerza (como las dos caras de una moneda).

La fuerza electromagnética es la que mantiene a los electrones formando una nube alrededor del núcleo atómico de carga positiva. Cuando los electrones de un átomo son atraídos por los protones del otro, se forman una nube electrónica común dando origen a las moléculas, que forman las diferentes sustancias que observamos con nuestros ojos. Nuestro ADN está formado por moléculas de ácido desoxirribonucleico, por ejemplo.

La fuerza electromagnética es la que impide que podamos atravesarnos unos a otros, pese a que los núcleos atómicos son tan pequeños y compactos, ya que las nubes electrónicas ocupan el espacio y mantienen a las moléculas unidas en estructuras firmes comunes: con mucha rigidez como los cristales sólidos, con menos intensidad en los líquidos que se deforman según el envase que los contiene, y finalmente con poca fuerza en los gases, que se expanden para ocupar todo el espacio disponible. No estamos tan vacíos después de todo.

Partículas virtuales versus oscilaciones de los campos de fuerza

En esta visión que hemos descrito del Modelo Estándar es necesario aclarar un detalle: en todas las interacciones descritas se considera a los bosones como **partículas virtuales**, que son intercambiadas entre partículas reales, fermiones en este caso. Esto se trata meramente de un modo de ver las interacciones, explicando las mismas de un modo coherente y en última instancia correcto, aunque empleando una noción abstracta que no refleja estrictamente todos los detalles del fenómeno.

Los bosones existen en forma real, como partículas reales, y pueden surgir de colisiones de partículas fundamentales, pero en la explicación que recién hemos dado sobre las interacciones fundamentales, las fuerzas son transportadas por bosones virtuales intercambiados entre fermiones reales. Ese intercambio no obedece ninguna ley física, porque ese intercambio no ocurre, es meramente un modo de explicar cómo ocurren las interacciones³.

Una conceptualización más cercana al formalismo matemático del Modelo Estándar que describe todas estas interacciones, es la de **campo**. Se puede imaginar un campo como un océano invisible en reposo que localmente puede tener ondas que viajan. Una ondulación localizada en ese campo sería una partícula, que dentro del campo, puede surgir, viajar o disolverse, como una perturbación local del campo. Esta concepción se sustenta en lo que muchos experimentos han demostrado: las partículas fundamentales se comportan también como ondas, en lo que se llama **dualidad onda-partícula**.

Una propiedad muy especial de las ondas en un campo, es que tienen ciertas frecuencias de vibración, que dependen de la energía de ese campo, del mismo modo como la cuerda de una guitarra produce un único tono al tocarla sin importar que tan duro o suave se le toque (hay que estirar o aflojar o colocar un dedo sobre la cuerda para que suene distinto, eso cambia la energía de esa cuerda disponible para vibrar). Ese modo de vibración, es una porción fija y determinada de energía que está disponible para las vibraciones, y es llamado el **cuanto** de energía de ese campo.

Una ondulación local (partícula) dentro del campo puede recibir del o entregar energía al campo por un número entero de cuantos. Éste es el concepto básico de la física cuántica, que se diferencia de la clásica precisamente por esa concepción ondulatoria de las partículas, y que además implica que éstas posean solamente ciertos valores *cuantizados*

³ Las partículas virtuales surgen cuando se aplica la Teoría de Perturbaciones a la física cuántica. Otras metodologías no las requieren ni hacen uso de ellas en lo absoluto.

de energía. Así campo y partícula son equivalentes. Es necesario aclarar que dentro del Modelo Estándar, algunos campos son cuantizados y otros no.

El campo per se, sin partícula alguna en él, tiene además una energía mínima, a la que se llama **energía del vacío**. Una partícula en ese espacio, es decir es una onda local en éste, puede modificar su estado actual de masa y/o velocidad, en una cantidad en función del cuanto de ese campo. Esa interacción se puede describir también con ondas localizadas en ese campo, lo que equivale a los *bosones que aparecen portando una fuerza* que modifica el estado inicial de la partícula. En física se define a una fuerza como todo aquello que modifica la inercia de un cuerpo. Por tanto, cada *fuerza* fundamental tiene asociado un campo y cada campo tiene asociado su cuanto de energía y su correspondiente “portador” o bosón.

¿Y dónde entra el Bosón de Higgs en todo esto?

De todos los bosones o portadores de fuerzas, el fotón y el gluón no tienen masa, pero los bosones W^+ , W^- y Z^0 sí, y bastante. Las ecuaciones de campo del Modelo Estándar, originalmente requiere que todos los bosones tengan masa cero y sin embargo los experimentos demuestran que los bosones W^+ , W^- y Z^0 sí la tienen. La solución está en el llamado Mecanismo de Higgs.

Este mecanismo dice que algunos bosones, de todos los originalmente existentes sin masa, la adquirieron al interactuar con el campo de Higgs que permea el vacío. Esta interacción, como explicamos hace poco, supone una vibración local de ese campo que transmite esa interacción. La energía de esa onda localizada fue absorbida por algunos bosones sin masa y fué convertida en masa⁴. Esa ondulación local, que podemos conceptualizar también como una partícula, es la que se llama **Bosón de Higgs**. Es por ello que se dice que el Bosón de Higgs *le da masa* a otras partículas.

Ahora, para ser precisos, el mecanismo de Higgs explica por qué el los W^+ , W^- y Z^0 sí tienen masa mientras que los fotones no. Expliquemos.

La fuerza electrodébil

En las condiciones que actualmente nos rodean, las cuatro fuerzas fundamentales se manifiestan de cierta manera, pero en condiciones diferentes ellas modifican su comportamiento substancialmente. A medida que sube la temperatura, las fuerzas se van uniendo, de manera que las cuatro que vemos ahora, se hacen tres, luego dos y finalmente

⁴ Siguiendo la famosa ecuación de la equivalencia entre masa y la energía $E=mc^2$ de Einstein

una única fuerza que suponemos existió durante el Big Bang. La teoría que describe este proceso se llama **Gran Teoría Unificada**.

De las cuatro fuerzas actuales, las primeras que se unen son la fuerza electromagnética (transmitida por los fotones) y la nuclear débil (transmitida por los bosones W^+ , W^- y Z^0). A esa fuerza unificada se la llama **fuerza electrodébil**, que coexiste a esas temperaturas con la fuerza nuclear fuerte y la gravedad. Bajo esas condiciones, existen cuatro bosones sin masa, de la misma familia por así decirlo, que transmiten la fuerza electrodébil. En un determinado momento y condiciones, descritas por la Teoría de Weinberg y Salam dentro del Modelo Estándar, la fuerza electrodébil y esos cuatro bosones que la transportan, se separan, o dicho en el lenguaje de los físicos, *se rompe la simetría*. Entonces, surgen dos fuerzas diferentes, la electromagnética transportada por el fotón, y la nuclear débil transportada por los bosones W^+ , W^- y Z^0 . Durante esa rotura de simetría, actúa el Mecanismo de Higgs, dándole masa a los bosones W^+ , W^- y Z^0 pero dejando al fotón sin masa.

Las otras partículas, es decir los fermiones, que en la Gran Teoría Unificada también son de masa cero originalmente, pueden adquirir masa al interactuar con el campo de Higgs, pero no de la misma manera que lo hacen los bosones de la fuerza electrodébil. En otras palabras, el Mecanismo de Higgs actúa solamente en el caso ya descrito. ¿Cómo adquieren masa las fermiones? La respuesta no está clara todavía, pero se ha propuesto la interacción de Yukawa entre los fermiones originalmente sin masa y el Campo de Higgs, para que estos adquieran masa.

¿Y qué pasa con la gravedad, la cuarta fuerza fundamental?

El Modelo Estándar no es perfecto, tiene todavía preguntas y problemas por responder, situaciones que no ha logrado explicar o para las que solo tiene respuestas parciales. Uno de los más grande retos que tiene todavía que enfrentar el Modelo Estándar es una descripción, en sus términos, de la gravedad. Teóricamente la gravedad sería transmitida por un bosón llamado **gravitón**, cuyas propiedades no se conocen a ciencia cierta. Peor aún, no se ha encontrado la ecuación de campo que lo describa e inserte dentro de la Gran Teoría Unificada, en lo que se ha hecho llamar *gravedad cuántica*.

Hasta ahora, se ha podido describir la unión de las fuerzas electromagnética y nuclear débil en la electrodébil: Weinberg y Salam recibieron el Premio Nobel en 1979 por ello. Ya se ha logrado también describir la unión de la fuerza electrodébil con la fuerza nuclear fuerte: el modelo de Georgi-Glashow, propuesto en 1974, es uno de los que intenta describir a esta fuerza unificada.

La gravedad en cambio, sigue todavía a la espera. Hay quienes considera que la teoría de campos no es suficiente, y se proponene otros formalismos matemáticos como las cuerdas, las branas, etcétera.

Por lo pronto, el Modelo Estándar se ha anotado un punto más a favor, con la detección de una partícula, que exhibe todas las propiedades predichas para el Bosón de Higgs.

Seguiremos pendientes de los nuevos resultados que el Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés) produzca. Las colisiones que realizarán a energías cada vez más altas, se espera nos revelen más información sobre las elusivas partículas fundamentales que componen el universo.

Katherine Vieira. Julio 2012.