100cias@uned
Facultad de Ciencias
Vida Científica
N.º 5 (nueva época) | 2012
ISSN: 1989-7189

COLABORACIONES EN FÍSICA

EL BOSÓN DE HIGGS EN UN CURSO DE FÍSICA ELEMENTAL

El 4 de julio de 2012 fue anunciado en el CERN el descubrimiento de una nueva partícula altamente compatible con el bosón de Higgs del Modelo Estándar. El Modelo Estándar es una teoría que describe tres de las cuatro interacciones fundamentales conocidas: electromagnética, débil y fuerte. Esta teoría ha sido contrastada por numerosos, variados y muy complejos experimentos a lo largo de más de tres décadas y sus predicciones han sido confirmadas en un grado extraordinario de precisión. El Modelo Estándar predice, además, la existencia de una partícula, el bosón de Higgs, que está asociada con el mecanismo de generación de masa de las partículas elementales, incluyendo la masa del propio bosón de Higgs. En su construcción, esta teoría incluye una condición que fuerza a que las partículas contenidas en este modelo no tengan masa. Dicha condición, sin embargo, parece contraria a las observaciones que revelan que las partículas son entidades masivas. A continuación vamos a discutir qué queremos decir con tal condición, qué entendemos por masa, cuál es el mecanismo responsable de su generación y, para finalizar, expondremos la necesidad del bosón de Higgs en este contexto. El desafío en este artículo será presentar y motivar (explicar sería indudablemente pretencioso) ideas que se nutren del andamiaje formal de la física actual de altas energías en el marco de un curso de física elemental, es decir, recurriendo únicamente a conceptos básicos de física.

Intentaremos ahondar entonces en las causas que determinan que “cuerpos no masivos”[1] adquieran masa, es decir, se transformen en “cuerpos masivos”. Para recorrer este camino repasaremos el significado del concepto de masa en el marco de la mecánica clásica, y luego introduciremos ciertas nociones fundamentales de la teoría de la relatividad con el objeto de ubicarlo en un contexto más amplio que nos permita tratar apropiadamente el problema que nos ocupa. Además, necesitaremos enunciar algunos fundamentos básicos de mecánica cuántica indispensables para dar cuenta de principios relevantes que rigen el mundo microscópico de las partículas elementales.

Para comenzar, y a modo de simple analogía, pensemos en una “fábrica de masas”. Ésta funcionaría del siguiente modo: la materia prima, constituida por cuerpos no masivos, después de la acción del proceso de manufactura daría lugar a productos compuestos por cuerpos masivos. Podemos hacernos una imagen aún más sencilla de esta analogía aplicándola a la segunda ley de Newton. En este caso, pensemos en una materia prima conformada por cuerpos en movimiento rectilíneo uniforme que, al ser sometidos a la operación de la fábrica, se aceleran. En este ejemplo, entonces, las fuerzas externas aplicadas sobre los cuerpos en movimiento rectilíneo uniforme juegan el rol de fábrica; esto es, la acción de las fuerzas sobre los cuerpos son la causa de su aceleración.

Nuestro objetivo en esta primera parte del artículo será comprender el modo de construir una fábrica de masas. Surge, entonces, una pregunta inmediata: ¿es posible construirla en el marco de la física newtoniana? Veremos a continuación que no.

La masa en el marco de la mecánica clásica es una propiedad intrínseca de todos los cuerpos (Newton la definía como la cantidad de materia contenida en éstos). En la física newtoniana no es, en consecuencia, posible ni necesario explicar las causas que hacen que los cuerpos tengan masa pues su origen se da por sentado. Tanto es así que, si quisiéramos dar sentido a la existencia de cuerpos no masivos en el marco de la mecánica clásica, llegaríamos inmediatamente a un absurdo y esto es sencillo de entender recurriendo una vez más a la segunda ley de Newton. Para una cierta fuerza aplicada, la aceleración adquirida por un cuerpo sin masa sería ilimitada y, por ende, también su velocidad. No obstante, no se observan cuerpos desplazándose a velocidades inmensamente altas en el universo. Hasta donde llega nuestro conocimiento, existe una velocidad límite que no puede ser excedida, y en un momento veremos cuál es su valor.

Vemos así que ya para sentar los pilares de nuestra fábrica resulta imprescindible una redefinición de la no-

[1] La expresión “cuerpos no masivos” tiene un sentido amplio en este contexto. En el marco de la física de partículas, por ejemplo, estos se corresponderían con partículas elementales sin masa.

ción de masa que suscriba un marco teórico que supere los límites de la mecánica clásica. La teoría de la relatividad plantea una reformulación en este sentido y, en particular, provee una interpretación consistente con la existencia de cuerpos no masivos.

¿Qué entendemos entonces por cuerpos no masivos? Apelemos al "Teorema de trabajo-energía" para comenzar a responder esta pregunta. Recordemos que este teorema establece que el trabajo realizado por todas las fuerzas externas que actúan sobre un determinado cuerpo masivo es igual a la variación de su energía cinética. Para ejemplificarlo supongamos que se ejerce una única fuerza F constante sobre un cuerpo de masa m. Si el cuerpo parte del reposo, después de haberlo desplazado una distancia bajo la acción de esta fuerza, adquirirá una energía cinética K dada por la siguiente ecuación:

$$K=\frac{1}{2}\,mv_{\Delta x}^{2}$$

donde $v_{\Delta x}$ es la velocidad alcanzada por el cuerpo después de recorrer la distancia Δx. Como primera observación, remarquemos que si tenemos dos cuerpos de distintas masas sometidos a la misma fuerza externa, el de masa mayor adquirirá en el mismo recorrido una velocidad menor que el cuerpo con menor masa. En consecuencia, cuanto mayor sea la masa, menor la velocidad alcanzada, o en términos más precisos, menor la variación de velocidad respecto de la situación inicial de reposo. En segundo término, señalemos que para un cuerpo dado con masa m, parecería ser posible hacerlo mover a una velocidad tan alta como quisiéramos en tanto aplicáramos la fuerza a lo largo de una distancia suficientemente extensa. Encontramos, de esta manera, que también en el caso de cuerpos masivos no se satisface el requisito empírico mencionado con anterioridad sobre la existencia de una velocidad límite. Valga esto, entonces, como razón adicional para explorar regiones fuera del dominio de validez de la mecánica clásica.

Supongamos ahora que tenemos un cuerpo cuya masa (entendiendo siempre a la masa como una medida de la resistencia al cambio de estado de movimiento) aumenta a medida que se acrecienta su velocidad; es decir, supongamos que la inercia del cuerpo crece conforme a un incremento en su rapidez. Para ilustrar tal situación, imaginemos un camión que podemos cargar con toda la arena que se nos ocurra y que la cantidad de arena que vamos depositando depende de la velocidad del camión de modo tal que, cuanto más rápido se mueve, más arena echamos sobre el camión. Está claro entonces que, según fuéramos cargando el camión, éste aumentaría su masa a un ritmo cada vez mayor. Por lo tanto, mientras actuara una misma fuerza constante sobre éste, sería cada vez más difícil producir incrementos en su velocidad (recordemos nuestra discusión previa: cuanto mayor es la masa de un cuerpo, la variación de velocidad debida al trabajo de una fuerza externa es más pequeña). Si, además, sucediera que, al acercarse a una cierta velocidad, que llamaremos v_{lim}, el camión con toda la arena encima tuviera una masa extremadamente grande, el incremento en su velocidad sería muy próximo a cero. Por lo tanto, v_{lim} sería la velocidad límite que el camión podría alcanzar.

Lo que hemos discutido en el párrafo precedente muestra que la presencia de masas ilimitadas podría implicar la existencia de una velocidad límite, pero es importante remarcar que hemos dado solamente un argumento de plausibilidad, un experimento conceptual (no existen camiones de carga ilimitada), elaborado para ilustrar la idea. No obstante este argumento, en la naturaleza se observa la existencia de una velocidad límite y un aumento en la masa (inercia) de los cuerpos a medida que su velocidad se acerca a v_{lim}. Asimismo, se observa la existencia de cuerpos que no pueden ser descritos en el marco de la física newtoniana, y como mencionamos antes, éstos son los cuerpos no masivos. Es la teoría de la relatividad especial (TRE) el marco teórico en el cual ambas observaciones son consistentemente consideradas. Vayamos sobre algunos puntos fundamentales de esta teoría para comprender mejor lo que hemos dicho:

1. Existe en la TRE una *velocidad límite* que no puede ser superada por cuerpo alguno. Esta velocidad es la velocidad de la luz en el vacío (c = 299 792 458 m/s).
2. Es posible inferir en el marco de la TRE que la masa de un cuerpo aumenta con su velocidad, o de forma equivalente, con su energía cinética. Esta conclusión posee un significado extremadamente profundo: la energía tiene inercia (a mayor energía, mayor masa). En otras palabras, la energía es una forma de masa y viceversa y, en consecuencia, existe una *equivalencia entre masa y energía* (la ecuación: $E=mc^2$ da cuenta precisamente de esta equivalencia).
3. La masa de un cuerpo en la física newtoniana puede ser interpretada como un caso particular dentro del marco de la TRE y se corresponde con la masa del cuerpo cuando éste se encuentra en reposo. La

masa newtoniana se corresponde, entonces, con la así denominada "masa en reposo". Dijimos al comienzo que la masa es una propiedad intrínseca de todos los cuerpos en la física newtoniana; en términos de esta nueva denominación de masa, decimos ahora que en la física newtoniana todos los cuerpos tienen masa en reposo no nula.

4. A diferencia de lo que ocurre en la mecánica clásica, la existencia de cuerpos con masa en reposo nula, o genéricamente, de cuerpos no masivos puede ser descrita de manera consistente por la TRE. Estos cuerpos poseen, sin embargo, una propiedad esencial que los distingue de los cuerpos masivos: se mueven necesariamente a la misma velocidad que la luz en el vacío. Recapitulando, este marco provee entonces la sustancia necesaria para que la fábrica de masas comience a funcionar, nos proporciona la materia prima: cuerpos no masivos.

Como acabamos de mencionar, disponemos entonces de la materia prima, pero antes de continuar con el proceso de producción, volvamos por un momento al segundo ítem de la lista previa. Analicemos con mayor profundidad el significado de la equivalencia entre masa y energía. Veamos cómo funciona la equivalencia cuando uno considera, por ejemplo, la energía potencial asociada a la fuerza gravitatoria. Tomemos un sistema compuesto por la Tierra y una pelota. Supongamos que ésta última (más precisamente, su centro) se encuentra a veinte metros de altura y en reposo momentáneo. Comparemos esta situación con una configuración posterior en la cual la pelota está instantáneamente en reposo a cinco metros sobre la superficie. Sabemos que la configuración inicial del sistema contiene más energía que la final (la velocidad con la que llegaría la pelota al piso en el primer caso sería mayor que en el segundo). En términos de la equivalencia entre masa y energía, podemos decir entonces que el sistema en su configuración inicial tiene mayor masa que en la final. Lo que hemos visto aquí es que la interacción gravitatoria "agrega" (en la configuración inicial) o "quita" (en la configuración final) masa del sistema; cuanto mayor sea la altura de la pelota, mayor la masa del sistema "Tierra–pelota", y viceversa. Debemos, sin embargo, remarcar un punto. La interacción modifica la masa del sistema pero no provee de "masa en reposo" a la Tierra ni a la pelota; éstas, como sistemas aislados, ya conforman cuerpos masivos independientemente de su interacción. Para reafirmar estos conceptos, volvamos sobre esta discusión recurriendo a una analogía que ilustra, heurísticamente pero de manera precisa, el alcance de la equivalencia entre masa y energía. Supongamos que tenemos una bolsa con tres paquetes de café y que la masa de cada uno es un kilogramo. Si despreciamos la masa de la bolsa frente a la de los paquetes, diríamos que el sistema "bolsa–tres paquetes de café" tiene una masa de tres kilogramos (la masa es una magnitud aditiva en la mecánica clásica). Supongamos ahora que existe una interacción entre los paquetes, una fuerza que produce una atracción mutua entre ellos (pensemos también que es mucho mayor que la atracción gravitatoria). Podría ocurrir, si la interacción "quitara" masa del sistema, que la masa total resultase menor que la suma de la masa de los tres paquetes. Esta posibilidad, a todas luces contraintuitiva, es observada en sistemas de partículas compuestas (núcleos atómicos, por ejemplo) en los que su masa es menor que la suma de las masas en reposo de las partículas constituyentes (protones y neutrones). Por ejemplo, el núcleo del átomo de helio (partículas alfa) tiene menor masa que la suma de las masas de sus dos protones y dos neutrones, y este hecho es consecuencia de la interacción fuerte (en términos de nuestra analogía, la interacción entre los paquetes) entre los protones y neutrones, y de su energía cinética debida al movimiento dentro de la región que define el núcleo. Lo que hemos analizado hasta aquí nos dice, por lo tanto, que una interacción dada modifica la masa de un sistema compuesto, pero es conveniente enfatizar nuevamente que todavía no hemos discutido la generación de masa en reposo como producto de una interacción.

Ahora bien, hemos dicho que se necesitan cuerpos no masivos para el adecuado funcionamiento de la fábrica pero, si nuestra intención es explicar el origen de la masa, debemos asegurarnos de que partimos de una situación en la cual existan solamente cuerpos no masivos, es decir, un estado sin cuerpos masivos en todo el universo. Debe haber, entonces, una *condición* que garantice la existencia de tal estado (la materia prima). Luego, debe existir también una *interacción* (las máquinas de la fábrica) que tendrá un doble propósito: *i*) impedir que tal condición persista; *ii*) generar, de manera semejante a lo discutido en el párrafo anterior, la masa en reposo de los cuerpos. Añadimos aquí que una condición tal que fuerce que una determinada magnitud física (como la masa) sea nula puede ser comprendida en términos de simetrías. Veamos qué queremos decir con esto último: representar la *condición* buscada por simetrías.

Apelemos una vez más a un ejemplo para tratar el problema. Supongamos que tenemos una esfera pintada de negro con una distribución uniforme de masa en todo su volumen (ver Figura 1). ¿Dónde diríamos que está ubicado el punto en el cual está equilibrada la distribución de masa? Dicho de otro modo, ¿cuál es el punto de la esfera que está rodeado por la misma cantidad de masa en todas direcciones? Antes de contestar estas preguntas, recordemos que este punto "promedio" recibe el nombre de "centro de masas" (CM). Entonces, diríamos, sin invocar conocimientos previos de física, que el CM se encuentra ubicado en el centro de la esfera. ¿Y por qué es así? Respondamos la pregunta sin hacer uso de la definición matemática de centro de masas y, para ello, apelemos a argumentos basados en propiedades de simetría. Vamos a suponer que el CM no se encuentra ubicado en el centro de la esfera y luego llegaremos a la conclusión de que tal hipótesis carece de sentido. ¿Qué sucede si suponemos entonces que el CM se encuentra, por ejemplo, en la superficie de la esfera y luego la hacemos girar alrededor de un eje cualquiera que pase por su centro (pero *no* por la posición del CM que hemos supuesto)? Después de efectuar una rotación cualquiera (o en otras palabras, un giro en un ángulo arbitrario) alrededor del eje escogido, obtendríamos que la ubicación del CM ha cambiado.

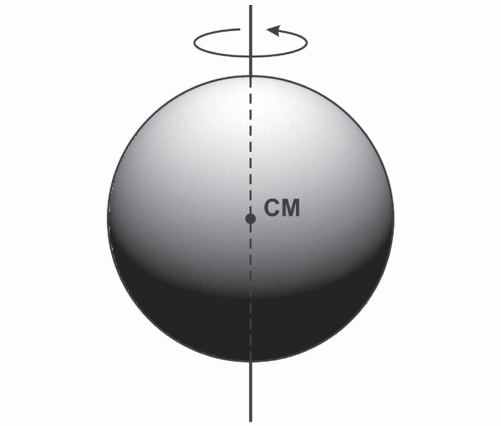

Figura 1. Esfera con distribución uniforme de masa ($r_{CM} = 0$).

Ahora bien, si la esfera tiene una distribución uniforme de masa, *no puede* haber manera alguna de diferenciar a la esfera antes y después de haberla girado. Sin embargo, si el CM cambiara realmente su posición después del giro, entonces sí habría una forma de distinguir ambas situaciones, y eso sería absurdo. En consecuencia, el CM sólo puede estar ubicado en aquellos puntos que no resulten afectados por la rotación de la esfera. ¿Cuál o cuáles son estos puntos? Observemos, en primer lugar, que en realidad podríamos hacer girar la esfera alrededor de cualquier eje de rotación que pase por su centro (no existe ningún eje preferencial) y, nuevamente, sería imposible señalar referencia alguna en la esfera que nos permita distinguirla de cómo lucía antes de que la hubiéramos girado (decimos que la esfera es invariante frente a rotaciones). Por lo tanto, el único punto que no cambia cuando la hacemos rotar alrededor de cualquier eje que pasa por su centro es el centro mismo, éste es el único punto no afectado por las rotaciones. Allí debe estar ubicado entonces el CM. Recapitulando, a partir de argumentos basados en simetrías, hemos concluido que la invariancia rotacional de la esfera asegura que el CM esté ubicado en su centro (si midiéramos distancias a partir del centro, diríamos que la posición del CM es $r_{CM} = 0$). Encontramos, por tanto, una *condición* que garantiza que una magnitud física sea nula. En este caso particular, la posición del CM en $r_{CM} = 0$ es el reflejo de la simetría de la esfera con distribución uniforme de masa. Aclaremos que esta condición es únicamente aplicable a este ejemplo y no se corresponde con la condición necesaria para asegurar la existencia de cuerpos no masivos, pero es análoga a esta última. Volveremos sobre este punto más adelante. Veamos, primero, en qué circunstancias o qué modificación deberíamos hacerle a nuestra esfera negra para que la condición $r_{CM} = 0$ deje de ser válida.

Supongamos que pegamos goma de mascar (ver Figura 2) en algún punto de la superficie de la esfera (a lo que nos referíamos anteriormente como *interacción* sería en este ejemplo la acción de pegar la goma de mascar). Lo que estamos haciendo con esto es que la esfera deje de tener una distribución uniforme de masa; hay más masa en la región donde pusimos la goma de mascar. Ahora veamos cómo esta diferencia es suficiente para que deje de valer que la posición del CM es ($r_{CM} = 0$).

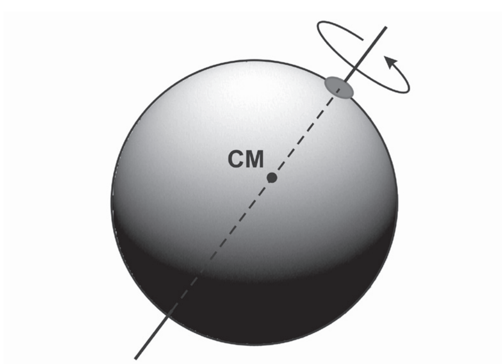

Figura 2. Esfera con distribución no uniforme de masa ($r_{CM} \neq 0$).

Una vez que adherimos la goma de mascar a la superficie, no sigue siendo cierto que la esfera sea invariante ante rotaciones en torno a un eje cualquiera, sino sólo ante rotaciones alrededor de un eje que pasa por su centro y, *además*, por la goma de mascar (suponemos el caso ideal en el que ésta ocupa un único punto de la esfera, o en otras palabras, la esfera tiene un tamaño mucho mayor que el de la goma de mascar). En consecuencia, siguiendo el razonamiento previo, sucede que el CM *debe* estar ubicado a lo largo de este eje en algún punto intermedio entre el centro y la goma de mascar (más cerca del centro cuanto menor la masa de esta última). Lo que ocurrió es que la simetría en el sistema "esfera–goma de mascar" es *menor* que la simetría del sistema "esfera" (se dice que se produjo una *ruptura* de la simetría inicial); la posición del CM ya no corresponde al centro de la esfera, esto es, no vale más $r_{CM} = 0$. Expresado de otro modo, la simetría reducida que presenta el sistema "esfera–goma de mascar" no es suficiente para garantizar la condición $r_{CM} = 0$. Si pudiéramos reemplazar en esta argumentación $r_{CM} = 0$ por "masa en reposo nula", tendríamos la condición buscada, pero aún falta recorrer un trecho para llegar a este punto. Antes de continuar, una observación que será útil posteriormente. Si bien resulta necesario escoger un punto de la superficie de la esfera en donde pegar la goma de mascar, remarquemos que este punto puede ser cualquiera, no hay motivo alguno para pegarla un algún punto en particular (recordemos que antes de adherir la goma todos los puntos de la esfera son equivalentes, no hay modo de distinguirlos). Por lo tanto, una vez pegada la goma de mascar se reduce la simetría del nuevo sistema *pero* la simetría de rotación original de la esfera nos permite poner la goma de mascar en cualquier punto de la superficie de la esfera.

Retornemos a la fábrica de masas. Vimos que son necesarios dos requisitos para su apropiado funcionamiento: 1) una *condición* que asegure la existencia de un estado de masa en reposo nula; 2) una *interacción* que inhabilite dicha condición generando la masa en reposo. Lo que haremos a continuación es discutir ambos requisitos conjuntamente. En este contexto, el mecanismo de generación de masa en reposo de las partículas elementales estará descrito por una interacción que permita dar cuenta de la ruptura de alguna simetría subyacente en la naturaleza que asegura la condición de masa en reposo nula. Nuevamente vamos a ilustrar este mecanismo mediante un ejemplo sencillo evitando toda formalización matemática y poniendo exclusivamente el acento sobre los conceptos involucrados (por supuesto, la argumentación no será, en consecuencia, estrictamente rigurosa).

Consideremos una taza de base circular sin asas y pared combada. Coloquemos en su interior la esfera negra con distribución uniforme de masa que usamos en el ejemplo anterior (ver Figura 3a). Supongamos que la taza luce igual en todo su contorno (no tiene ilustraciones en sus lados) de tal forma que no es posible saber si, estando ya la taza apoyada sobre su base, alguien la ha girado o no (decimos en este caso que la taza es invariante frente a una rotación arbitraria en torno a un eje vertical que pasa por el centro de su base circular). Imaginemos, además, que el tamaño de la esfera es tal que no hay espacio suficiente para desplazarla en la base, siendo su único movimiento posible a lo largo de la pared curva de la taza.

Figura 3a. Sistema "Tierra-taza-esfera" en su estado de mínima energía (simetría respecto al eje vertical).

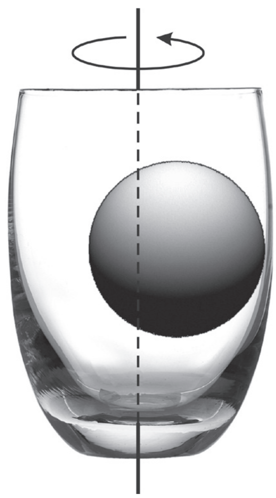

Figura 3b. Sistema "Tierra-taza-esfera" en su estado excitado (no conserva la simetría respecto al eje vertical).

Señalemos dos puntos esenciales del sistema "Tierra–taza–esfera" que estamos estudiando (incluimos a la Tierra porque evidentemente no es posible hablar de movimientos de la esfera sin tener en cuenta la atracción gravitatoria ejercida por la Tierra sobre ésta):

1. El estado de mínima energía del sistema se corresponde con una configuración en la cual la esfera se encuentra en el fondo de la taza. Para mover la esfera hacia arriba (único desplazamiento posible) es necesario entregar energía al sistema. Como discutimos previamente, el sistema tiene menos energía (o masa) cuanto menor es la altura de la esfera.
2. El estado de mínima energía respeta la simetría original de la taza. Esto es, cuando la esfera se encuentra en el fondo de la taza, el sistema es invariante ante rotaciones en torno a un eje vertical que atraviesa el centro de su base. Contrariamente, si la esfera está ubicada en un determinado instante a una altura de, pongamos por caso, cinco centímetros sobre la pared de la taza (ver Figura 3b), el sistema deja de respetar su invariancia rotacional original (es decir, resulta posible observar un cambio en la posición de la esfera respecto de algún objeto fijo situado en el exterior a la taza). Enfaticemos que *no* es el estado de mínima energía el que rompe la simetría rotacional en este caso sino *cualquier* estado de energía superior ("estado excitado") del sistema.

Con el ejemplo previo, hemos mostrado un caso en donde existe una interacción que modifica la masa del sistema pero no cumple con el segundo propósito requerido: impedir la realización de la *condición* que garantiza la invariancia rotacional (es importante recordar que, en realidad, apuntamos a la *condición* que garantiza el estado de masa en reposo nula). Discutamos esto más detalladamente. Hemos visto que la *interacción* rompe la invariancia rotacional pero sólo a través de los estados excitados del sistema. Más adelante veremos que esto no es suficiente; es necesario que el estado de mínima energía sea el que no respete la simetría. Mientras tanto, pensemos en un sistema en el cual la invariancia rotacional sí sea rota por su estado de mínima energía.

En lugar de usar una taza, tomemos un sombrero de tipo mejicano (ver Figura 4). Supongamos nuevamente que no hay ilustraciones en el sombrero de forma tal que no podemos saber si alguien lo ha girado o no, como decíamos antes acerca de la taza (el sombrero es entonces invariante frente a una rotación arbitraria en torno a un eje vertical que pasa por su centro).

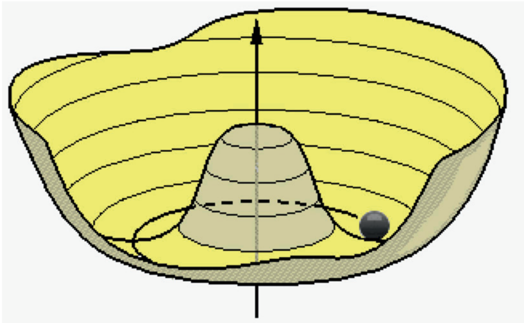

Figura 4. Esfera sin movimiento en el valle del sombrero mejicano.

Tomemos nuevamente nuestra esfera negra y realicemos las siguientes observaciones:

1. El estado de mínima energía se corresponde con una configuración en la cual la esfera está en reposo en algún lugar sobre el valle del sombrero (específicamente, llamamos "valle" a la línea comprendida entre el ala y la copa). Aclaremos tres cuestiones respecto de este punto: *i*) en el estado de mínima energía, la esfera debe estar necesariamente en reposo porque, en caso contrario, tendría energía cinética, es decir, se encontraría en un estado con energía mayor a la del estado de reposo; *ii*) cualquier otra posición fuera del valle sería más elevada y, por lo tanto, el sistema también tendría más energía; *iii*) al igual que ocurría con la goma de mascar, el estado de mínima energía puede estar ubicado en cualquier punto a lo largo del valle pues todos éstos son equivalentes. Como vimos, esto es consecuencia de la simetría rotacional subyacente en el sombrero.
2. Como también sucedía con la goma de mascar, la esfera situada en reposo en una posición arbitraria sobre el valle determina la pérdida de la invariancia rotacional del sistema. En este caso, sí es entonces el estado de mínima energía el que rompe la simetría.
3. Notemos, anticipando la siguiente discusión, que si el sistema se hallara en un estado en el cual la esfera se estuviera moviendo a una cierta velocidad sobre el valle, este estado tendría un momento angular no nulo (en lo que concierne al presente argumento, recordemos que el momento angular es básicamente el producto de la masa, la velocidad de la esfera y la distancia entre el centro y el valle del sombrero). Además, dado que el momento angular depende de la velocidad

de la esfera y ésta puede tener cualquier valor (por supuesto, menor a la velocidad de la luz), también lo tendrá el momento angular. Advirtamos, por último, que un estado tal de movimiento a lo largo del valle también rompe la invariancia rotacional original.

Retornemos a la cuestión que introdujimos algunos párrafos atrás: ¿por qué es necesario que sea el estado de mínima energía el que rompa la simetría? Para responder a esta pregunta debemos incluir en el análisis fenómenos que tienen lugar en espacios e intervalos temporales mucho menores a los propios de la escala humana (esto es, dimensiones muy pequeñas y/o procesos muy rápidos como son, por ejemplo, las transiciones entre niveles electrónicos en los relojes atómicos) y en las cuales los efectos cuánticos son relevantes. Presentemos algunos conceptos fundamentales de la mecánica cuántica (o, más precisamente, de la teoría cuántica de campo) que sustentarán nuestros próximos argumentos:

1) Lo que se entiende ordinariamente por "vacío" en el marco de la física clásica es el espacio vacío, la ausencia total de materia. Sin embargo, en el contexto de la mecánica cuántica, el concepto de vacío posee un significado diferente. En este contexto, lo que denominamos vacío corresponde al estado de mínima energía de un sistema; el vacío contiene energía. El contenido de energía de un sistema define una estructura energética que puede ser descrita en términos de entidades físicas denominadas "campos" (un ejemplo de campo en física clásica es la distribución de la presión en un fluido en reposo; en este caso, los valores numéricos que toma el campo a distintas profundidades aumenta a medida que descendemos en el fluido). Los campos contienen energía e información sobre su distribución espacial y temporal. El vacío corresponde entonces a la configuración de mínima energía de los campos. Enfaticemos, por último, que en el contexto cuántico el vacío tampoco contiene materia (partículas, en un lenguaje más exacto). Las partículas corresponden, por el contrario, a estados excitados de los campos.
2) En mecánica cuántica, el momento angular *no* puede adoptar cualquier valor numérico (a diferencia de nuestro ejemplo del sombrero mejicano); es una magnitud discreta: sólo se permiten valores enteros o semienteros, se dice que el momento angular está "cuantizado".
3) Recordemos que la trayectoria de un cuerpo en un cierto intervalo temporal queda definida si se conocen su posición y velocidad en todo instante de tiempo dentro de ese intervalo. Sin embargo, como consecuencia del denominado "principio de incertidumbre", no es posible conocer simultáneamente estas dos magnitudes en mecánica cuántica; es decir, no es posible definir trayectorias.

Dijimos, entonces, que el vacío tiene una estructura determinada por la configuración de mínima energía de los campos. Esta configuración particular puede afectar el movimiento o, genéricamente, la energía y, por ende, la masa de los cuerpos porque fija la estructura del espacio en el que tiene lugar su desplazamiento. Si, según lo que discutimos anteriormente, el vacío rompiera la simetría que asegura la condición de masa en reposo nula, podría determinar entonces una modificación en la masa de los cuerpos. Regresemos al sombrero mejicano (ver Figura 5).

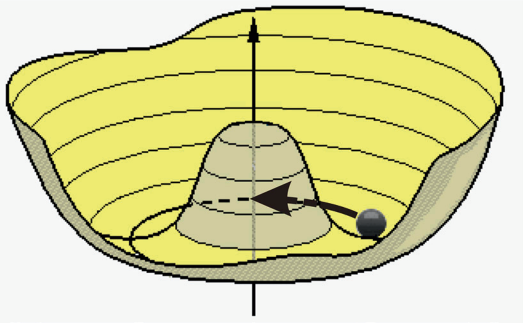

Figura 5. Esfera con movimiento (momento angular) en el valle del sombrero mejicano.

En el contexto en el cual los efectos cuánticos son importantes, el estado de mínima energía, el vacío, sigue correspondiendo a algún punto del valle pero existe una diferencia fundamental ahora respecto del caso discutido anteriormente. No puede ocurrir que este estado de energía mínima corresponda a una situación en la cual la esfera permanece en reposo en un punto arbitrario porque en tal estado la esfera tendría una trayectoria definida (conoceríamos su posición y velocidad en todo instante de tiempo). En consecuencia, el estado de mínima energía es tal que la esfera se mueve a lo largo del valle. Pero su movimiento no es arbitrario: *i*) no puede desplazarse a cualquier velocidad porque solo aquellas que dan lugar a valores enteros (en este caso, los valores semienteros están prohibidos) de momento angular están permitidas; *ii*) los valores permitidos son, sin embargo, indeterminados como consecuencia del principio de incertidumbre: posición definida implica velocidad indeterminada. El vacío es, por tanto, un estado con un valor entero e indeterminado de momento angular: ..., -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3,...

¿Qué ocurriría ahora si perturbáramos el sistema de tal manera que modificáramos el vacío agregando una unidad de momento angular? En otras palabras, ¿qué pasaría si metiéramos otra esfera con momento angular igual a 1 en el valle del sombrero? (ver Figura 6).

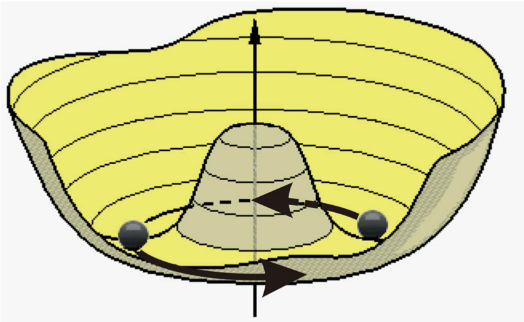

Figura 6. Segunda esfera (momento angular añadido) en el valle del sombrero mejicano.

Esto sumaría una unidad a los valores de momento angular del vacío. Dado que todos los valores enteros son posibles, vemos que el agregado de una unidad de momento angular no cambiaría nada. ¿Y si quitáramos una unidad de momento angular del sistema? El estado de vacío también seguiría siendo el mismo por la misma razón que acabamos de dar. Es decir, observamos que el vacío se comporta como un reservorio de momento angular: entrega y recibe momento angular sin variar su estado (más concretamente, imaginemos una gran superficie de mármol sobre la que apoyamos un cuerpo pequeño. En el equilibrio térmico el cuerpo alcanza la temperatura de la superficie de mármol, independientemente de que el cuerpo haya estado más o menos caliente que ésta antes de apoyarlo; es decir, la superficie de mármol se comporta como un reservorio de temperatura). Retornando a los términos de la analogía fabril inicial, veremos que para fabricar la masa en reposo de los cuerpos necesitaremos disponer de tal reservorio de momento angular.

Hasta el momento no hemos hecho referencia alguna al bosón de Higgs, pero comencemos por el significado del término “bosón” antes de ocuparnos de la partícula de Higgs. Las partículas elementales tienen asociado un momento angular intrínseco que recibe el nombre de “espín” (forzando la comparación, lo podemos pensar como una rotación alrededor de un eje que pasa por el centro de las partículas, como el movimiento de rotación de la Tierra sobre su eje) y se clasifican según dos categorías: bosones y fermiones. Los primeros corresponden a partículas de espín entero; los segundos, a partículas de espín semientero. Entre los fermiones, tomemos, por ejemplo, el electrón que es una partícula de espín ½. Las interacciones débil y electromagnética son descritas a partir de una simetría (ésta corresponde a una rotación análoga a la de rotación del sombrero) que asegura que su masa en reposo sea nula. Cuando la masa es nula, dijimos que el electrón debe moverse a la velocidad de la luz. Bajo estas condiciones, el electrón no puede cambiar su estado de momento angular intrínseco, digamos que el electrón sólo puede girar en sentido horario o antihorario pero no pasar de uno al otro. Para hacerlo necesitaría aumentar o disminuir en una unidad su momento angular. Ahora bien, ¿qué sucedería si el electrón atravesara una región en la que hubiera una fuente inagotable de momento angular? En tal caso, absorbería y eliminaría constantemente momento angular del entorno cambiando su momento angular y adquiriendo, por ende, masa. ¿Y cuál sería esa fuente de momento angular? Precisamente el reservorio del que hablamos antes y que surge como consecuencia de que el vacío rompe una simetría (la simetría de las interacciones débil y electromagnética; o más rigurosamente, la simetría de la interacción electrodébil) subyacente que asegura la condición de masa en reposo nula. Este mismo mecanismo actúa del mismo modo sobre las restantes partículas elementales conocidas, tanto fermiones como bosones. Es así, entonces, como funciona la fábrica que produce la masa en reposo de las partículas elementales, a partir del intercambio de momento angular con el vacío.

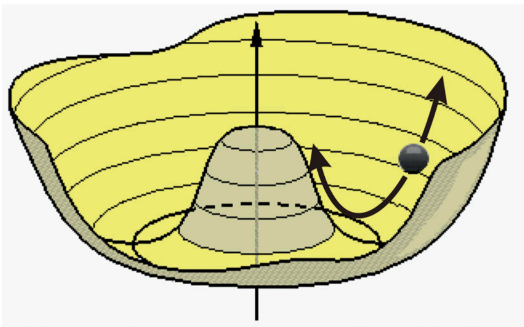

Figura 7. Movimiento oscilatorio de la esfera en torno al valle.

Y ahora sí, ¿dónde aparece el bosón de Higgs en toda esta argumentación? Dijimos que en el sombrero la esfera podía moverse a lo largo del valle, o bien, subiendo por el ala en alguna dirección (ver Figura 7). Esta segunda clase de movimiento, cuando se trata de una oscilación en torno al valle está asociada a una partícula (recordemos que en el lenguaje de campos los estados excitados corresponden a partículas) y esta partícula es justamente el bosón de Higgs. En el Modelo Estándar hay una pieza faltante (que todo indica que sería la recientemente descubierta), el bosón de Higgs. Era fundamental encontrar esta pieza para que la explicación del mecanismo de generación de masa tuviera sentido: no sería posible que explicáramos la producción de masa en reposo observando movimientos a lo largo del valle (el vacío) y no observáramos movimientos sobre el ala del sombrero. Digamos, por último, que el bosón de Higgs también adquiere masa interactuando con el vacío (en un sentido más estricto, este vacío es la configuración de mínima energía de un campo cuya excitación corresponde a la partícula de Higgs, es decir, adquiere masa interactuando con su propio campo).

Para finalizar, mencionemos que una confirmación del descubrimiento del bosón de Higgs en el CERN conllevaría un avance esencial en la comprensión de las interacciones fundamentales pero no implicaría, en ningún caso, que hayamos alcanzado un conocimiento acabado de las leyes que rigen el mundo microscópico, ya que quedan aún muchas cuestiones sin resolver. Por supuesto, éstas no pueden ser tratadas aquí.

Alejandro Szynkman, Ernesto Arganda y M.ª Teresa Dova
IFLP, CONICET – Dpto. de Física
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

El Bosón de Higgs deja de ser una hipótesis especulativa

El Modelo Estándar de la física de partículas es uno de los logros más grandes de la ciencia del siglo XX y la mejor teoría que los físicos tienen actualmente para describir los bloques fundamentales del edificio del universo. Utiliza para ello seis quarks, seis leptones y algunas partículas "portadoras de la fuerza".

Hay cuatro fuerzas conocidas (o interacciones), cada una mediada por una partícula fundamental, conocida como partícula intermediaria o portadora. Tres de ellas son los **fotones** (interacción electromagnética), los **gravitones** (interacción gravitatoria) y los **gluones** (interacción fuerte), y ninguna de las tres tiene masa, mientras que las partículas W± y Z^o, portadoras de la fuerza débil, tienen una masa de 80-90 GeV/*c*2. Pero este modelo no tiene sentido sin la existencia de la partícula (bosón) de Higgs, responsable de por qué unas partículas tienen masa y otras no. (La gravedad está incluida solamente en el Modelo Estándar como hipótesis especulativa, pues los gravitones no se han observado directamente todavía.)

El 4 de julio de 2012 fueron presentados por el CERN, con la presencia de varios científicos entre los que se encontraba Peter Higgs, los resultados preliminares de los análisis conjuntos de los datos tomados por el LHC en 2011 y 2012 en los dos principales experimentos del acelerador (ATLAS y CMS). El CMS anunció el descubrimiento de un bosón con masa 125,3 ± 0,6 GeV/c^2 con un nivel de confianza estadística de 4,9 sigma y el ATLAS, de un bosón con masa 126,5 GeV/c^2 con una sigma de 5. Con estos valores de nivel de confianza estadística se cumple con el nivel formal necesario para anunciar un descubrimiento, en este caso una nueva partícula consistente con el **bosón de Higgs**.