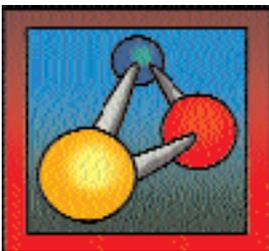


¿Cuál es el origen de la masa?



El modelo estándar de las interacciones fundamentales de la naturaleza ha resuelto el enigma del origen de la masa de las partículas elementales. Su confirmación experimental depende de la existencia de una nueva partícula: el bosón de Higgs.

Miguel Ángel Pérez Angón

Las partículas más elementales que conocemos tienen unas cuantas propiedades intrínsecas sobre las que todavía sabemos muy poco: masa, carga eléctrica y espín o giro magnético. En el cuadro 1 se presenta el esquema que propone para estas partículas el llamado “modelo estándar de las interacciones fundamentales”, postulado en 1969 por Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg. Este modelo ofrece una descripción cuantitativa muy precisa de todos los datos experimentales obtenidos hasta ahora en los grandes aceleradores de partículas. Los “tres reinos” de la materia mostrados en esta tabla consisten en la familia de los *leptones* (parientes del electrón), la familia de los *quarks* (constituyentes del protón, el neutrón y el resto de sus parientes: los *hadrones*), y cuatro tipos de *bosones intermediarios*: fotones, bosones vectoriales, gluones, gravitones y bosones escalares de Higgs.

Los bosones intermediarios reciben este nombre porque al ser intercambiados entre los leptones o los quarks generan las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza: los fotones (γ) generan las interacciones electromagnéticas; los bosones vectoriales (W^\pm , Z) inducen las interacciones débiles (que de-

terminan los decaimientos radiativos en núcleos atómicos); los gluones (g) producen las interacciones fuertes entre los quarks y son determinantes para la estabilidad de los núcleos atómicos; y los gravitones (G) generan las interacciones gravitacionales. Al igual que los gravitones, los bosones de Higgs (H) no han sido detectados todavía; como el acoplamiento de los bosones de Higgs a las otras partículas elementales sería proporcional a la masa de cada una de ellas, la confirmación de su existencia deberá interpretarse como un nuevo tipo de interacción.

La carga eléctrica y el espín de las partículas incluidas en el cuadro 1 siguen un patrón bien definido. En cada caso, ambos son múltiplos sencillos de la carga eléctrica del electrón o de la constante de Planck, h , que caracteriza las escalas de energía de los fenómenos físicos involucrados en el mundo atómico. En cambio,

CUADRO 1.

Los tres reinos de la materia: leptones, quarks y bosones intermedarios.

		Masa (MeV)	Carga (e)	Espín (h)
Leptones	e	0.51	±1	—
	ν_e	$\sim 10^{-8}$	0	—
	μ	105.65	±1	—
	ν_μ	$\sim 10^{-8}$	0	—
	τ	1784.1	±1	—
	ν_τ	$\sim 10^{-8}$	0	—
Quarks	u	4	±2/3	—
	d	8	±1/3	—
	c	1300	±2/3	—
	s	150	±1/3	—
	t	178000	±2/3	—
	b	4400	±1/3	—
Bosones intermedarios	γ	0	0	1
	Z	91,173	0	1
	W^\pm	80,220	±1	1
	g	0	0	1
	G(?)	0	0	2
	H(?)	>118,000	0, ±1, ±2,...	0

el espectro de masas de las partículas elementales no muestra un patrón regular. En el caso de la carga eléctrica y del espín, se dice que presentan un “espectro cuantizado”, debido a que su regularidad involucra saltos (cuantos) de números enteros o fraccionarios (1/2, 1/3, 2/3) y a que su origen se puede remitir a los principios básicos de la mecánica cuántica. En cambio, hasta ahora no contamos con un solo indicio sobre el origen del espectro de masas ni sobre la consecuente falta de regularidad del patrón de masas incluido en el cuadro 1.

MECÁNICA CLÁSICA

La masa juega un papel dual en la mecánica clásica. Hace más de trescientos años, Isaac Newton introdujo el concepto de masa en dos de sus leyes más famosas. En la llamada segun-

da ley de Newton, la *masa inercial* representa la resistencia que ofrece cualquier cuerpo a ser puesto en movimiento. A mayor masa deberá corresponder una fuerza más intensa para acelerarlo, es decir, para cambiarle su estado de movimiento (velocidad). Por otra parte, en la ley de la gravitación universal, que explica la fuerza de atracción entre dos objetos con masa, la *masa gravitacional* juega un papel de carga o fuente de campo gravitacional: a mayor masa, la intensidad de la atracción gravitacional será mayor.

Desde la formulación de estas dos leyes surgió la pregunta natural de si existe una relación entre las masas inercial y gravitacional. En 1964 esta duda se disipó con un alto grado de precisión. Los físicos estadounidenses Peter G. Roll, Robert V. Kortkov y Robert H. Dicke realizaron una serie de experimentos con un sistema muy sensible construido con esferas de aluminio y oro. De acuerdo con sus mediciones, los valores de las masas inercial y gravitacional coinciden hasta una parte en cien mil millones. No obstante, para el propósito del presente artículo basta decir que en la mecánica clásica el concepto de masa

se debe considerar como *primitivo*: no es posible derivarlo de alguna otra propiedad de la materia. Lo único que podemos hacer es medirla, que no es otra cosa que compararla con otra masa estándar.

RELATIVIDAD

La primera señal de que el concepto de masa puede surgir de algo más fundamental vino del dominio de lo muy pequeño. Para la materia ordinaria manipulada en nuestra experiencia cotidiana o en un laboratorio químico, la masa de un objeto compuesto es igual a la suma de las masas de sus partes. Pero para la materia en escala atómica —los núcleos del átomo por ejemplo—, cuando dos unidades se combinan en una sola, la masa del objeto compuesto es ligeramente menor que la suma de sus partes. El problema se resolvió con la teoría de la relatividad especial de Einstein. La masa no es una cantidad física conservada: depende del estado de movimiento del objeto y se puede transformar en diferentes tipos de energía. En cambio, la energía total de una partícula o de un sistema sí satisface una ley de conservación si incluimos no sólo la energía cinética, o de movimiento y la energía de interacción, o potencial, sino también la energía en reposo asociada a la masa del sistema, según la superconocida ecuación $E = mc^2$. La pequeña diferencia de masa observada en la formación de núcleos o desintegración de partículas está asociada a una transformación de la masa en otro tipo de energía.

En su teoría general de la relatividad, Einstein postuló la equivalencia de la masa inercial y la masa gravitacional. De ello se sigue que la fuerza gravitacional sobre un objeto no es ahora proporcional a su masa, sino a su energía. Como consecuencia, esta teoría contempla la predicción —ya verificada durante los eclipses solares— de que el fotón, la partícula sin masa que resulta de la cuantización del campo electromagnético, es también atraído por el campo gravitacional. Sin embargo, aun con estos avances sobre la naturaleza de la masa, en ambas teorías de la relatividad la masa sigue utilizándose como un concepto primitivo.



En su teoría general de la relatividad, Einstein postuló la equivalencia de la masa inercial y la masa gravitacional. De ello se sigue que la fuerza gravitacional sobre un objeto no es ahora proporcional a su masa, sino a su energía

ELECTRODINÁMICA

La posibilidad de que la masa de las partículas pudiera surgir de un proceso dinámico se originó en la electrodinámica clásica. A principios del siglo pasado, el físico holandés Hendrik A. Lorentz propuso la autoenergía generada por el campo electromagnético como la fuente de la masa. Propuso un modelo muy sencillo del electrón: una esfera de radio a con una carga eléctrica distribuida de manera uniforme. Calculó la energía electromagnética generada por esta distribución de carga y la identificó con la masa del electrón: $m = e^2/c^2a$, donde e es la carga eléctrica y c la velocidad de la luz.

A principios del siglo pasado,
el físico holandés
Hendrik A. Lorentz
propuso la autoenergía
generada por el campo
electromagnético como
la fuente de la masa

Este resultado parece satisfactorio a primera vista, excepto por un pequeño problema: como el electrón parece no tener tamaño —lo único que sabemos es que su tamaño debe ser menor que 10^{-16} cm—, la masa del electrón se haría infinita (diverge, en la terminología matemática) si su radio fuera cero.

Con la electrodinámica cuántica la situación mejora ligeramente. Esta teoría surgió como resultado de la exigencia de que se satisfagan en forma simultánea para el electrón y su campo electromagnético (o los fotones) los principios de la relatividad especial, la mecánica cuántica y las ecuaciones de Maxwell que describen el campo electromagnético mismo. Como resultado se obtiene la electrodinámica cuántica, una de las teorías más poderosas, en términos predictivos, que han podido construir los físicos. La masa del electrón en esta teoría se puede explicar también como la autoenergía que resulta de la interacción relativista del electrón con los fotones. El resultado que se obtiene ahora para la masa del electrón es $m = m_0 (e^2/hc) \ln(h/m_0ca)$, donde ahora m_0 es la masa (desnuda y desconocida) del electrón en ausencia de interacciones y el radio del electrón, a , está asociado al inverso de una energía que define la escala de energía de interacción del electrón con su propio campo electromagnético (Λ).

En este esquema se obtiene de nuevo una masa divergente (infinita) en el límite ideal del radio cero para el electrón. No obstante, la novedad es que el grado de divergencia (logarítmica) es mucho más suave que en el caso clásico del modelo de Lorentz. Además, resulta que nuestro grado de ignorancia sobre la masa desnuda m_0 y la escala de energía Λ se puede aprovechar en nuestro beneficio, dentro de lo que los expertos conocen como “un esquema matemático autoconsistente de renormalización”, para absorber estas cantidades divergentes y mantener el poder predictivo de la teoría en términos únicamente de cantidades físicas bien definidas (finitas). Sin embargo, el costo que se paga con ello es la pérdida de la predicción para la masa del electrón, por lo que en la electrodinámica cuántica volvemos a tenerla como un concepto primitivo.

MECANISMO DE HIGGS

El modelo estándar de las interacciones electrodébiles introduce un mecanismo de generación de masas, conocido como mecanismo de Higgs, que resulta ser el primer intento exitoso de explicar la masa de las partículas elementales a partir de otros principios más básicos. En esencia, el modelo estándar predice que la masa de cada partícula debe estar determinada por tres

parámetros: $m = \lambda gv$, donde λ es una constante numérica asociada a grados de libertad internos de cada partícula, g es la constante de acoplamiento semidébil —y que ya está medida con mucha precisión a través del decaimiento del muón—, y v es una cantidad en unidades de energía asociada a la autointeracción de un nuevo tipo de partícula: el bosón de Higgs, H .

En el estado actual de desarrollo del modelo estándar, y mientras no se haya detectado el bosón de Higgs, no es posible determinar si se trata en realidad de una nueva partícula elemental —con el mismo grado de estructura que el electrón— o es tan sólo una partícula compuesta por otros constituyentes más fundamentales. Lo único que sabemos es que su presencia dentro del modelo estándar es necesaria para que la teoría sea autoconsistente y predictiva —al mismo nivel que la electrodinámica cuántica—, a tal grado que sus predicciones concuerden con todos los resultados obtenidos hasta hoy en los grandes aceleradores de partículas.

Antes de abordar el misterio que rodea a los bosones de Higgs, es necesario recordar brevemente los actuales paradigmas de las *teorías cuánticas del campo*: los modelos matemáticos que surgen de la unificación de la relatividad especial y la mecánica cuántica, y de los cuales el modelo estándar y la electrodinámica cuántica son dos ejemplos particulares. Entre dichos paradigmas se encuentran el concepto de simetría, el principio de invariancia ante transformaciones de norma, el rompimiento espontáneo de la simetría y el proceso de renormalización.

ROMPIMIENTO DE SIMETRÍA

En el lenguaje de la física se dice que existe una *simetría* cuando se presenta una invariancia de una ley física con respecto de las transformaciones que actúan sobre los elementos que participan en ella. Por ejemplo, el campo de una carga eléctrica tiene simetría esférica, porque las ecuaciones que lo describen son invariantes frente a rotaciones espaciales. Las simetrías pueden incluir transformaciones de naturaleza no geométrica, en cuyo caso se dice que son simetrías *internas* o *globales*, como por ejemplo las asociadas a la conservación de la carga eléctrica. Si las transformaciones dependen de las coordenadas espaciotemporales del punto donde se aplica, se dice que son simetrías *locales*. La simetría llamada *de norma* del modelo estándar pertenece a este último tipo.

Las teorías que describen las interacciones entre las partículas elementales satisfacen dos propiedades fundamentales: 1) se derivan de un principio geométrico asociado a la invarian-

cia ante transformaciones de norma locales. Son transformaciones de norma porque no cambian la magnitud de las probabilidades de transición entre diferentes estados del sistema, y 2) este principio determina además la dinámica del sistema, esto es, las ecuaciones que describen su movimiento. En particular, predice que los transmisores de la interacción son los bosones intermediarios o de norma: el fotón para la interacción electromagnética, los bosones W^+ y Z^0 para la interacción nuclear débil, los gluones para la interacción nuclear fuerte y los gravitones para las interacciones gravitacionales.

En el estado actual de desarrollo del modelo estándar, y mientras no se haya detectado el bosón de Higgs, no es posible determinar si se trata en realidad de una nueva partícula elemental o es tan sólo una partícula compuesta por otros constituyentes más fundamentales

En el mundo real muy pocas simetrías (invariancias) se manifiestan en forma exacta. Sólo después de que se demostró que las simetrías pueden ser rotas en forma espontánea, ha sido posible reconciliar la complejidad del mundo real con principios de simetría universales. La superconductividad (circulación de corrientes eléctricas sin resistencia) y el ferromagnetismo (como el que presentan los imanes comunes) son ejemplos de procesos donde se rompe espontáneamente la simetría. La base de este mecanismo está en que la solución de un problema no necesariamente muestra algún indicio de la simetría de las ecuaciones de movimiento originales. El ejemplo clásico es un imán (por ejemplo, la aguja de una brújula), para el cual las ecuaciones que describen el metal no distinguen una dirección preferente del espacio (son invariantes ante rotaciones): no obstante esto, el imán, que es una solución a estas ecuaciones, sí lo hace, ya que su magnetismo apunta en una dirección bien definida y única.

Una forma más pictórica de apreciar el rompimiento de una simetría, en este caso ante reflexiones espaciales o simetría especular, se da en el diseño del calendario azteca, mostrado en forma esquemática en la figura 1. En este caso la simetría ante reflexiones del eje vertical del calendario está rota en algunos detalles (los glifos de los meses, de las cuatro eras anteriores a la actual y de Tezcatlipoca y Huitzilopochtli, las dos deidades que rematan las serpientes estilizadas en el perímetro de diseño). En palabras de T. D. Lee, premio Nobel de física en 1961, “el calendario azteca exhibe un patrón de simetría (especular) que, sin ser perfecto, aumenta la belleza y el poderío del orden cósmico que esta escultura representa”. En el caso de las teorías de norma, la simetría original se rompe espontáneamente mediante el llamado mecanismo de Higgs. Se realiza partiendo de un campo que es invariante ante la simetría interna del estado base o de mínima energía. Para que la teoría resultante tenga sentido es necesario cambiar el estado base, y como resultado se rompe la simetría y se generan las masas de los fermiones y bosones de norma a través de la interacción del campo de Higgs con ellos mismos. De esta manera adquieren masa los bosones W y Z, pero no el fotón; la interacción electromagnética sigue siendo de largo alcance, mientras que la nuclear débil se transforma en una de corto alcance, determinado por el inverso de la masa del W y Z (del orden del 10^{-15} metros).

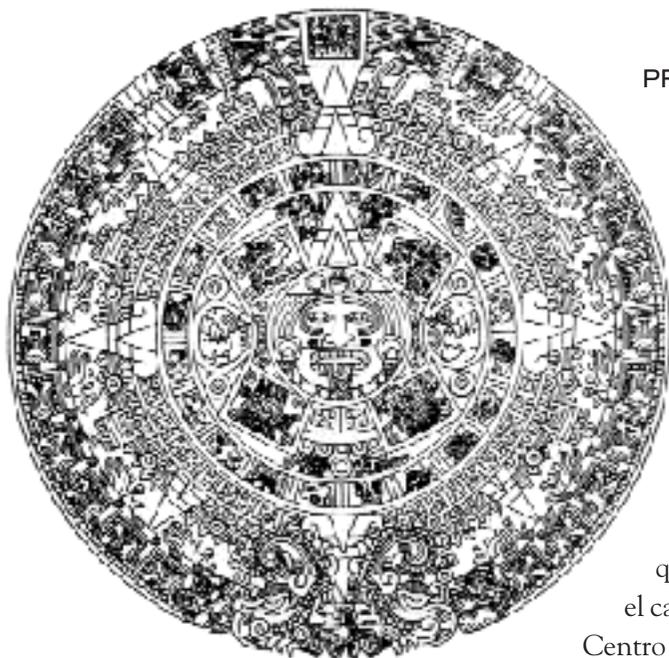


Figura 1. Diseño esquemático del calendario azteca, que es un ejemplo del rompimiento de la simetría especular.

PRODUCCIÓN Y DETECCIÓN DE BOSONES DE HIGGS

Dado que el bosón de Higgs se acopla a las demás partículas de manera proporcional a su masa, tenderá a decaer principalmente en las partículas más pesadas que sean accesibles al valor específico de la masa del bosón de Higgs. Se supone que su masa no es muy pequeña, pues de otra manera ya habría sido observado en los decaimientos de las partículas conocidas. En la figura 2 se muestran dos de los procesos más probables de producción del bosón de Higgs. En la figura 2(a) se muestra un proceso de aniquilación de haces de electrones y positrones –como sería el caso en el acelerador LEP (*large electron-positron collider*) del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) de Ginebra, Suiza. En la figura 2(b) se muestra un proceso de producción a través de colisiones protón-antiprotón, como sería el caso en el acelerador norteamericano denominado Tevatrón, situado en el

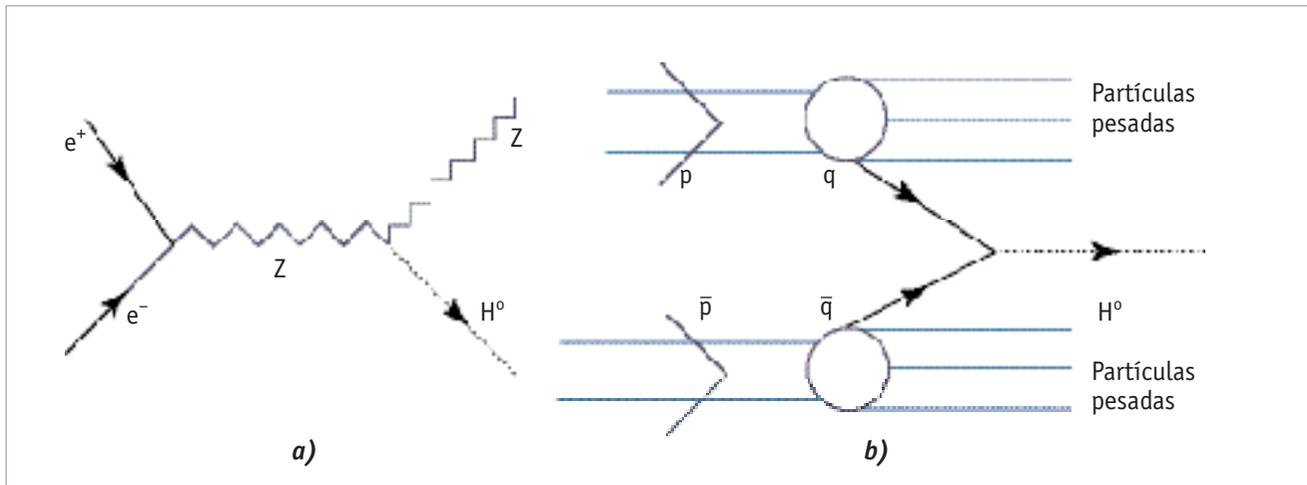


Figura 2. Procesos de producción de bosones de Higgs en colisionadores $e^+ e^-$ y pp .

Laboratorio Nacional de Fermi (Fermilab), en la ciudad de Chicago.

Para concluir este artículo, conviene subrayar que el descubrimiento del bosón de Higgs confirmará el modelo estándar de las interacciones electrodébiles. Cualquier variación de la física esperada para los bosones de Higgs nos indicará la dirección en que tendremos que generalizar el modelo estándar. Incluso si el bosón de Higgs no se produce en los futuros aceleradores como el LHC (*Large Hadron Collider*, del CERN), ya sea porque es más pesado que 850 veces la masa del protón o porque no exista en realidad, tendremos oportunidad de averiguar las características de fenómenos nuevos que ocurren a altas energías. Finalmente, estas interacciones nos revelarán también la naturaleza del rompimiento espontáneo de la simetría entre las interacciones electromagnéticas y débiles, y entonces nos aclararán las bases físicas del origen de la masa.

Bibliografía

Gunion, J., H. Haber, G. Kane y S. Dawson (1992), *The Higgs Hunter's Guide*, Addison-Wesley, Reading.
 Lee, T.D. (1972), *Symmetry principles in physics*, Cinvestav, México.
 Nambu, Y. (1992), *The Sciences*, mayo-junio, p. 37.
 Pérez, M. A. (1993), "El enigma de la masa", *Avance y Perspectiva*, 12, 273.
 Pérez, M. A. (2000), "Simetría oculta", *Avance y Perspectiva* 19, 37.

Cualquier variación de la física esperada para los bosones de Higgs nos indicará la dirección en que tendremos que generalizar el modelo estándar

Miguel Ángel Pérez Angón es investigador titular del Departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados. Obtuvo su doctorado en Ciencias en esta misma institución. Su área de interés es la fenomenología de las interacciones electrodébiles. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.
 mperez@fis.cinvestav.mx.