

Física de Partículas y el Origen de la Masa

Carlos Alberto Vaquera Araujo* y Mauro Napsuciale Mendivil*

RESUMEN

Se presenta una breve introducción al problema del origen de la masa desde la perspectiva de la física moderna de partículas. También se presenta una discusión elemental acerca del modelo estándar de las partículas y sus interacciones, todo esto incluyendo un esbozo del mecanismo de Higgs, que en este modelo es responsable de la generación de las masas de las partículas fundamentales.

ABSTRACT

A brief introduction is given to the problem of the origin of mass from the perspective of modern particle physics. Also an elementary discussion about the standard model of particles and their interactions is presented, together with a sketch of the Higgs mechanism, which in this model is responsible for the generation of the masses of the fundamental particles.

Recibido: 15 de Junio de 2009
Aceptado: 23 de Septiembre de 2009

¿QUÉ ES LA MASA?

*Quantitas Materiae est mensura ejusdem orta
ex illius densitate et magnitudine conjunctim*
Isaac Newton (*Principia*)

La descripción científica más antigua de la masa se lee en el *Principia*: “La cantidad de materia es la medida de la misma, que surge conjuntamente de su densidad y su corpulencia” (Newton, 1687, p.1). Esta sencilla definición fue suficiente por cerca de dos siglos. Siglos en los cuales era prioritario describir cómo funcionaba el mundo; ya habría tiempo después para entender por qué funcionaba así. Ese tiempo llegó hace cien años y hasta la fecha los físicos siguen invirtiendo una enorme cantidad de trabajo para responder preguntas como las siguientes: ¿Qué cosa es la masa? ¿De dónde diablos viene?

Ahora entendemos que la masa es una propiedad importantísima del mundo. La masa de un cuerpo codifica al movimiento del mismo como el radio al círculo; es una cantidad invariante, independiente de la opinión de los observadores posibles. Por lo tanto está intrínsecamente relacionada con la energía y el momento de los objetos (Einstein, 1924, p. 67). Además, la masa actúa en una multitud de fenómenos con una versatilidad impresionante: funge como cantidad de inercia, como carga gravitacional y como manifestación de energía.

En este artículo analizaremos el estatus del problema del origen de la masa desde la perspectiva de la física de partículas y campos, para lo cual comenzaremos con una descripción breve de la misma.

LAS CUATRO NOBLES VERDADES

*Grande era la descripción y el relato de cómo
se acabó de formar todo el cielo y la tierra,
cómo fue formado y repartido en cuatro partes.*
Anónimo (*Popol Wuj*)

Palabras clave:

Masa; Higgs; Modelo estándar.

Keywords:

Mass; Higgs; Standard model.

Casi todos los fenómenos que hasta el momento han sido observados en la naturaleza pueden explicarse a partir de cuatro interacciones fundamentales, a saber: la gravedad, el electromagnetismo, la interacción débil y la interacción fuerte. Un desafío de la física contemporánea consiste en explicar por qué los fenómenos asociados a cada interacción se presentan a escalas

* Departamento de Física, División de Ciencias e Ingenierías del Campus León. Universidad de Guanajuato. Loma del Bosque No. 103 Col. Lomas del Campestre. C.P 37150. A. Postal E-143. León, Gto. Correo electrónico: vaquera@fisica.ugto.mx, mauro@fisica.ugto.mx.

tan dispares de longitud, tiempo, energía y masa. Por ejemplo, la interacción débil resulta ser aproximadamente 10^{29} veces más intensa que nuestra conocida y amada gravedad (Griffiths, 1987, p. 55).

Otro desafío, intrínsecamente relacionado con el anterior, consiste en construir un modelo teórico que describa satisfactoriamente a cada una de tales interacciones. En este punto se vuelve importante distinguir dos tipos de posibles teorías: las fundamentales y las efectivas. Una teoría fundamental hace predicciones precisas para cualquier escala de energías, mientras que una teoría efectiva tiene un rango de aplicación limitado a un intervalo específico.

Es razonable esperar que a cierto rango de parámetros, la influencia de la contribución de escalas más altas o más bajas esté suprimida. De hecho, la teoría de la relatividad especial y la mecánica cuántica no fueron posibles antes del arribo del siglo pasado, pues involucran escalas ajenas a la experiencia cotidiana: para velocidades pequeñas comparadas con aquella de la luz, los efectos relativistas pueden ser ignorados sin riesgo; mientras que para escalas de energía y tiempo significativamente mayores a las implicadas por la constante fundamental de la mecánica cuántica, la constante de Planck, los efectos cuánticos pierden relevancia. Con el descubrimiento de la relatividad especial y la mecánica cuántica, la mecánica clásica de Newton pasó de ser considerada fundamental a ser efectiva.

El sueño de la física moderna es lograr una descripción de todos los fenómenos observados a partir de un conjunto simple de ingredientes gobernados por una dinámica sencilla. Encontrar la teoría fundamental de las cuatro interacciones sería maravilloso, pues unificaría en un esquema a las fuerzas conocidas de una vez por todas. Sin embargo, existen razones para pensar que aún si tal ideal existe y es encontrado eventualmente un análisis cuantitativo de los fenómenos al nivel más elemental, nos daría poca información para comprender y describir a la naturaleza a todas las escalas.

Las leyes de la química tienen su fundamento en la interacción electromagnética, pero el aparato completo del electromagnetismo a nivel cuántico y relativista resulta inadecuado para su derivación. Una descripción simplificada en términos de electrones no-relativistas ligados a un núcleo por medio de la vieja conocida ley de Coulomb resulta más fructífera en el entendimiento de la física relevante a escala atómica, de modo que esta aproximación es más apropiada para intentar estimar las interacciones químicas do-

minantes. Si cambiamos de nuevo la escala, incluso esta descripción simplificada resulta demasiado complicada para entender fenómenos como el metabolismo de una bacteria. En la física actual, es importante no solo la búsqueda de la teoría fundamental, sino también la formulación de teorías efectivas que nos permitan extraer la mayor información posible sobre los fenómenos que suceden a una cierta escala.

La interacción gravitacional se entiende ahora gracias a la teoría de la relatividad general de Einstein. Esta teoría es efectiva, sólo es aplicable en situaciones donde los efectos cuánticos son despreciables.

El electromagnetismo y la interacción débil son exitosamente descritos por la así llamada teoría electrodébil (Weinberg, 1996, p. 305). A pesar de su origen común, el electromagnetismo y la interacción débil se manifiestan de formas muy distintas. El electromagnetismo es una fuerza de alcance infinito, mientras que la influencia de la interacción débil responsable de la desintegración beta cubre distancias que parecen ridículas incluso comparadas con el radio de un protón. La teoría electrodébil es una teoría cuántica de campo y es especial por que ofrece predicciones finitas a cualquier escala de energía. Este tipo de teorías se denominan renormalizables, a diferencia de otras teorías cuánticas de campo que deben modificarse en cada escala (no-renormalizables). Las teorías renormalizables son importantes pues tienen las características que se esperan en la teoría fundamental ideal, aunque en un sentido menos estricto que el estipulado arriba.

La interacción fuerte es responsable -entre muchas otras cosas- del denso hacinamiento de protones en el núcleo atómico a pesar de sus cargas eléctricas iguales. Esta interacción es descrita por la cromodinámica cuántica; otra teoría cuántica de campo renormalizable que junto con la teoría electrodébil constituye el modelo estándar de las partículas elementales (Weinberg, 1996, p. 152).

EL MODELO ESTÁNDAR

NOMΩI ΘΕΡΜΟΝ, ΝΟΜΩΙ ΨΥΧΡΟΝ, ΕΤΕΗΙ ΔΕ ΑΤΟΜΑ ΚΑΙ ΚΕΝΟΝ
 Por convención el calor, por convención el frío,
 pero en la realidad sólo hay átomos y vacío
 Demócrito de Abdera (*Diógenes Laecio IX, 72*)

El modelo estándar es la descripción elemental más exitosa hasta el momento sobre las interacciones que comprende. Está basado en ideas a la vez profundas y elegantes acerca de las posibles simetrías de la naturaleza; es una teoría relativamente simple que no

deja de sorprender a la comunidad científica por la precisión de sus predicciones. Sin embargo, y aunque funciona como reloj suizo, sobran los motivos para pensar que el modelo estándar es la teoría efectiva de una teoría más fundamental. Resulta preponderante entonces buscar nuevos modelos teóricos, que nos permitan responder preguntas que escapan al alcance del Modelo Estándar. Estos nuevos modelos, que pueden ser tanto teorías efectivas como teorías con pretensiones de fundamentalidad suelen clasificarse colectivamente como física más allá del modelo estándar (Ellis, 2009, p. 1).

Comencemos describiendo las características e ingredientes del modelo estándar. El modelo estándar y muchas de sus nuevas extensiones pertenecen a las así llamadas teorías de norma.¹ Las teorías de norma se parecen a un juego de mesa cuyas piezas son objetos matemáticos que se mueven de acuerdo a un conjunto de reglas. La regla fundamental de las teorías de norma es simple: sus objetos matemáticos deben estar acomodados de forma tal que la teoría sea simétrica. Así, las piezas del juego pueden moverse a placer, siempre y cuando no se pierda la simetría del arreglo original.

Si aplicamos una transformación sobre un objeto y, después de realizada la transformación, no tenemos forma de notarla, decimos entonces que hay una simetría asociada a esa transformación y a ese objeto. Una esfera, por ejemplo, permanece sin cambio aparente ante cualquier rotación alrededor de su centro; así afirmamos que la esfera es simétrica ante rotaciones arbitrarias. En el caso de un cubo, sólo ciertas rotaciones lo dejan invariante frente al observador. En las teorías de norma, las transformaciones importantes (llamadas transformaciones de norma) se llevan a cabo en espacios matemáticos abstractos, internos, asociados a las propiedades de las partículas elementales y dependen de cada punto del espacio y cada momento en el tiempo. Notablemente, simetrías de este tipo describen exitosamente los fenómenos fundamentales de la naturaleza.

Las piezas que componen al Modelo Estándar forman un reparto pintoresco de personajes: quarks, leptones, antiquarks, antileptones, bosones de norma y Higgs. En escena entra también un ingrediente de suma importancia: el vacío. Sí, el vacío al que Aristóteles tanto temía.

Prácticamente toda la materia que vemos está compuesta de quarks y leptones, que en el modelo es-

tándar son considerados elementales, es decir, invisibles, sin estructura. Los quarks están disponibles en seis sabores. Sus nombres son *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* y *bottom*, tienen carga eléctrica fraccional y poseen otro tipo de carga, denominada color, que determina las posibles combinaciones entre los mismos. Cada sabor de quark viene en tres colores: azul, rojo o verde. Asociado a cada quark existe además su contraparte de antimateria. Los antiquarks también se manifiestan en seis sabores y tres anticolores.

Quarks y antiquarks se caracterizan por su comportamiento peculiar: tienen autofobia. Sólo pueden existir en grupo. Esta manía es consecuencia de la simetría de norma de la cromodinámica cuántica. Las partículas compuestas de quarks y antiquarks se denominan hadrones. Los quarks dentro de un hadrón se combinan de modo que este tenga carga eléctrica igual a un múltiplo entero de la carga del electrón. Además, la carga neta de color en un hadrón debe ser nula. Los protones y los neutrones que tanto estimamos son ejemplos de hadrones.

Los leptones también existen en seis sabores (sabor leptónico, distinto al sabor de los quarks), pero carecen de color. Tres de estos sabores de leptón tienen carga eléctrica y tres carecen de ella. El leptón más famoso es el electrón. Los otros leptones cargados son el muón y el tau. Completan el esquema tres tipos de neutrinos: El neutrino de electrón, el neutrino de muón y el neutrino de tau, que además de ser eléctricamente neutros, tienen masas pequeñísimas y son muy difíciles de detectar. Por cada sabor de leptón existe un sabor de antileptón.

Los antiquarks y antileptones lucen como sus contrapartes materiales pero tienen cargas opuestas. Cuando una partícula de materia se encuentra con su correspondiente antipartícula, ambas se aniquilan en una explosión de pura energía, que eventualmente puede condensarse en otras partículas.

Los quarks y leptones suelen clasificarse en tres familias: la primera está constituida por los quarks *up* y *down*, el electrón y el neutrino de electrón; la segunda por *charm*, *strange*, el muón y el neutrino de muón y la tercera por *top*, *bottom*, el tau y su neutrino. Se agrupan de este modo por que cada familia es una copia más masiva de la anterior. Como los tres tenores, las familias de quarks y leptones comparten la misma tesitura, pero poseen diferentes masas. La Naturaleza parece preferir los sabores más ligeros posibles, así sólo la materia compuesta por la primera familia es

¹ Traducimos el vocablo inglés *gauge* (literalmente *galga*) por *norma* como es común en México, aunque en muchos otros países de habla hispana se prefiere traducir por *calibración*, *aforo*, o se opta por el uso del anglicismo

estable; las copias pesadas no viven lo suficiente para formar parte de la materia cotidiana.

En el modelo estándar, las interacciones fundamentales son consecuencia de una simetría de norma. En este esquema, una interacción se produce por el intercambio de una partícula mensajera. El electromagnetismo, por ejemplo, se manifiesta a nivel fundamental con el intercambio de un fotón entre partículas cargadas. Los fotones carecen de masa (hasta donde sabemos) y son incansables: siempre viajan a la misma velocidad en el vacío.

La fuerza entre partículas de color es muy intensa, por eso se ganó el imaginativo nombre de interacción fuerte. Como esta fuerza mantiene unidos a los quarks para formar hadrones, sus partículas mediadoras son caprichosamente llamadas gluones por su labor aglutinadora.

La interacción débil es responsable de la desintegración de partículas masivas en otras más ligeras. Después de todo, la masa es una forma de energía. Las partículas que tienen mucha masa, pueden convertir una parte de la misma en energía cinética y al hacerlo se transforman en especímenes menos obesos, cambiando de sabor. En el modelo estándar, la interacción débil se manifiesta a través de tres partículas: los bosones de norma, cuyos nombres son W^+ , W^- y Z .

EL ORIGEN DE LA MASA

Insomma ha combinato quello che ha combinato e Sophia ci è rimasta dentro. Prigionera del mondo.
Umberto Eco (*Il Pendolo di Foucault*)

¿Por qué las partículas fundamentales tienen las masas que tienen? No lo sabemos, pero el modelo estándar sí que tiene algo que decir al respecto: predice la existencia de una partícula más, responsable de otorgar masa al resto. Esta partícula se llama bosón escalar de Higgs y es la única partícula del modelo que falta por descubrir. El Higgs no es una partícula como otra cualquiera: es la pieza más codiciada, es la *raison d'être* de la parte electrodébil del modelo.

La masa de una partícula es básicamente su cantidad de inercia, esa tendencia a preservar su estado de movimiento. Funciona así: en el modelo estándar, el vacío que todo lo permea tiene una estructura caprichosa que fuerza al campo de Higgs a ocultar la simetría subyacente de la teoría. A este fenómeno se le denomina *rompimiento espontáneo de la simetría*, aunque en realidad la simetría en cuestión (que en este caso es la electrodébil) no se rompe, sólo se esconde

(revelando solamente la simetría de la electrodinámica). Tras el rompimiento espontáneo de la simetría, el acoplamiento del Higgs al resto de las partículas del modelo estándar se convierte en una especie de fricción, esa fricción es justo la inercia buscada. Las diferentes masas son distintas porque los coeficientes de fricción lo son. Así de simple (Weinberg, 1967, p.1265). Este mecanismo de generación de masas se denomina mecanismo de Higgs. El bosón escalar de Higgs, la partícula física de Higgs, es un vestigio del rompimiento espontáneo de la simetría electrodébil. En cumplimiento de su labor, el campo de Higgs queda atrapado en el mundo de las partículas masivas y se manifiesta a su vez como una de ellas.

Suele decirse que el descubrimiento del Higgs, con las propiedades tan concretas que el modelo estándar le confiere, revelaría el origen de la masa en el universo, uno de los mayores misterios de la ciencia actual. Sin embargo, esta proposición es incorrecta. No solo existe la posibilidad de que el modelo estándar sea la teoría efectiva de otra más fundamental, con lo cual el mecanismo de Higgs sería análogo a los epiciclos, ecuantas y deferentes de Ptolomeo ante las órbitas elípticas de Kepler; sino que el problema del origen de la masa tiene alcances que rebasan la capacidad del modelo electrodébil. Esto reside en el hecho de que el mecanismo de Higgs sólo puede ser responsable de la masa de leptones, quarks y bosones de norma. La masa de los hadrones -por ejemplo- no es igual a la suma de las masas de sus quarks. Peor aún, la masa total del universo no es igual a la suma de las masas de los leptones y hadrones que vemos en él.

La experiencia cotidiana dicta que la masa de un objeto es la suma de las masas de sus partes ¿Cómo entendemos entonces la masa del protón y del neutrón? La respuesta proviene también del modelo estándar, mas no de la parte electrodébil, sino de la cromodinámica cuántica. De acuerdo con esta teoría, la contribución dominante a la masa de los hadrones ligeros proviene de la energía que se acumula al confinar los quarks en el pequeñísimo volumen que ocupan en el interior del hadrón (Wilczek, 2008, p. 449). De hecho, la masa de los quarks representa sólo el 2% de la masa de los nucleones (Quigg, 2007, p. 2). Con la identificación de la energía de confinamiento de los quarks como el origen de la masa de los nucleones podemos explicar prácticamente toda la masa visible del universo, pues la materia visible está constituida mayoritariamente por protones y neutrones. Bajo una muy buena aproximación, la masa visible del universo proviene de la cromodinámica cuántica, no del bosón de Higgs. Las masas de los quarks marcan, sin em-

bargo una pequeña diferencia: el neutrón (hecho de la combinación de quarks udd) es ligeramente más masivo que el protón (uud), y esto se debe a que la masa del quark down excede lo suficiente a la masa del up .

MAS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

...aus meinem sonnumrahmten Fenster
beschau ich frei die liebe Welt
und träum hinaus in selge Weiten...

Albert Giraud (*Pierrot Lunaire, versión alemana de O. E. Hartleben y A. Schoenberg*)

Aunque el rompimiento de la simetría electrodébil es de suma importancia para explicar la forma de nuestro mundo, existen detalles que siembran sospecha sobre la artificialidad del mecanismo de Higgs, por ejemplo, el hecho de que los coeficientes de fricción que explican los valores concretos de las masas se ponen a mano. No hay forma de que la teoría prescriba esos acoplamientos y no es por que el cálculo sea difícil, sino por que sencillamente ese cálculo no existe. En este sentido, la explicación de las masas de quarks y leptones involucra forzosamente física más allá del modelo estándar.

No solo las masas de quarks y leptones desafían el poder del modelo estándar. La medición de la distribución de velocidades de las estrellas contenidas en galaxias espirales y las mediciones de precisión de la radiación de fondo cósmico, un vestigio del universo temprano, indican la existencia de una nueva forma de materia: la materia oscura. Esta materia de identidad desconocida constituye por lo menos el 25% de la masa del universo. En el modelo estándar, los únicos candidatos posibles para conformar la materia oscura son los neutrinos, pero estos son tan ligeros que no son capaces de contribuir con más del 15% de la masa del universo (Komatsu, 2009, 36). El problema es aún más complicado, pues se estima que mas del 70% de

la masa del universo proviene de la así llamada energía oscura, para la cual el modelo estándar carece de candidatos. Así, la solución al problema del origen de la masa sólo puede provenir de nueva física.

En el mercado actual de la física de partículas existen múltiples alternativas que intentan sobrepasar las limitaciones del modelo estándar. En el contexto del rompimiento de la simetría electrodébil, tan importante para averiguar el origen de la masa, los hay desde modelos que prescinden del Higgs hasta aquellos que incorporan más de uno. Las ofertas son abundantes, y no es para menos, pues se espera que una vez que el LHC (*Large Hadron Collider*) en la frontera franco-suiza comience a arrojar datos experimentales en breve, seamos capaces de evaluar muchos escenarios posibles, en México y en el mundo.

REFERENCIAS

- Einstein, A. (1924). *Relativity: the special and the general theory*. 2a ed. Londres: Methuen & Co. Ltd.
- Ellis, J. (2009). *Physics beyond the standard model*. Summary talk at the 2008 PANIC conference. e-Print: arXiv: 0902.0357v1 [hep-ph].
- Griffiths, D. (1987). *Introduction to elementary particles*. 1a ed. New York: Wiley & Sons, Inc.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. 1a ed. Londres. (Facsimil 1965, Bruselas: Culture et civilisation).
- Quigg, C. (2007). Higgs Bosons, Electroweak Symmetry Breaking, and the Physics of the Large Hadron Collider. *Contemp.Phys.*48 p. 1-11. e-Print: arXiv: 0704.2045v1 [hep-ph].
- Weinberg, S. (1967). A model of Leptons. *Phys. Rev. Lett.* 19, p.1264 - 1266.
- Weinberg, S. (1996). *The quantum theory of fields*, Vol II. 1a ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wilczek, F. (2008). Particle physics: mass by numbers. *Nature* 456, p. 449-450.