

EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS¹

(The Standard Model of particle physics)

Marco Antonio Moreira
Instituto de Física – UFRGS
Código Postal 1505 - Campus
91501-970 Porto Alegre, RS
www.if.ufrgs.br/~moreira

Resumen

Inicialmente, se presenta, de modo simplificado, el Modelo Estándar como una teoría sofisticada que identifica las partículas elementales y sus interacciones. Después, en el ámbito de esa teoría, se enfocan aspectos – el vacío no es vacío; partículas desnudas y vestidas; materia oscura y viento oscuro; materia y antimateria; el campo y el bosón de Higgs; neutrinos oscilantes – que pueden ser motivadores desde el punto de vista de la enseñanza y del aprendizaje de la Física. Finalmente, se discute la probable superación de esa teoría por otra más completa.

Palabras-clave: modelo estándar, partículas elementales, enseñanza de Física.

Abstract

Initially, the Standard Model is presented, in a simplified way, as a sophisticated theory that identifies the elementary particles and describes how they interact. Then, within the scope of this theory, some aspects – the vacuum is not empty; naked and dressed particles; dark matter and dark wind; matter and antimatter; the Higgs field and the Higgs boson; oscillating neutrinos – are approached as motivating topics for the teaching and learning of physics. Finally, the eventual superseding of this theory by a more complete one is discussed.

Keywords: standard model, elementary particles, physics teaching.

El modelo estándar de la física de partículas

El llamado *Modelo Estándar* de las partículas elementales no es propiamente un modelo, es una teoría. Y de las mejores que tenemos. Alias, en la opinión de muchos físicos, la mejor de todas sobre la naturaleza de la materia. Por ejemplo, según Gordon Kane (2003), un físico teórico de la Universidad de Michigan:

... el Modelo Estándar es, en la historia, la más sofisticada teoría matemática sobre la naturaleza. A pesar de la palabra “modelo” en su nombre, el Modelo Estándar es una teoría comprensiva que identifica las partículas básicas y especifica cómo interactúan. Todo lo que pasa en nuestro mundo (excepto los efectos de la gravedad) es resultado de las partículas del Modelo Estándar interactuando de acuerdo con sus reglas y ecuaciones (p.58).

De acuerdo con el Modelo Estándar, *leptones* y *quarks* son partículas verdaderamente elementales, en el sentido de que no poseen estructura interna. Las partículas que tienen estructura interna se llaman *hadrones*; están constituidas por quarks: *bariones* cuando están formadas por tres quarks o tres antiquarks, o *mesones* cuando están constituidas por un quark y un *antiquark*².

¹ *Revista Brasileña de Enseñanza de Física*, 31(1): 1306, 2009.

² Antiquark es la antipartícula del quark.

Hay seis leptones (*electrón, muón, tau, neutrino del electrón, neutrino del muón y neutrino del tau*) y seis quarks [quark *up* (**u**) quark *down* (**d**), quark *charm* (**c**), quark *extraño* (**s**), quark *bottom* (**b**) y quark *top* (**t**)]. Sin embargo, los quarks tienen una propiedad llamada *color*³ y cada uno puede presentar tres colores (rojo, verde y azul). Hay, por tanto, 18 quarks. Pero, como a cada partícula le corresponde una antipartícula⁴, existirían en total 12 leptones y 36 quarks.

El electrón es el leptón más conocido y el protón y el neutrón son los hadrones más familiares. La estructura interna del protón es **uud**, o sea, dos quarks **u** y uno **d**; la del neutrón es **udd**, es decir, dos quarks **d** y uno **u**. El mesón π^+ está formado por un antiquark **d** y un quark **u**, el mesón π^- está constituido por un antiquark **u** y un quark **d**. Y así sucesivamente, o sea, la gran mayoría de las llamadas partículas elementales son hadrones y éstos están formados por tres quarks o tres antiquarks (bariones) o por un quark y un antiquark (mesones).

En principio, la teoría de los quarks, la Cromodinámica Cuántica, no prohíbe la existencia de partículas con estructura más compleja que tres quarks, tres antiquarks o un par quark-antiquark. Sin embargo, sólo recientemente (Scoccola, 2004) físicos experimentales han presentado evidencias de partículas con cinco quarks, o sea, *pentaquarks*, como el *teta más*, formado por cuatro quarks y un antiquark. Pero eso aún depende de resultados experimentales adicionales.

Una característica peculiar de los quarks es que tienen carga eléctrica fraccionaria, ($+2/3 e$) para algunos tipos y ($-1/3 e$) para otros. Sin embargo, *nunca se detectaron quarks libres, están siempre confinados* en hadrones, de tal modo que la suma algebraica de las cargas de los quarks que constituyen un determinado hadrón es siempre un múltiple entero de e . El protón, por ejemplo, está formado por dos quarks de carga ($+2/3 e$) y un quark de carga ($-1/3 e$) de modo que su carga es ($2/3 + 2/3 - 1/3$) e , o, simplemente, e . Es decir, el quantum de la carga eléctrica continúa siendo e ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

Resumiendo, según el Modelo Estándar, la gran cantidad de partículas elementales hasta hoy detectadas, cerca de 300, en aceleradores/colisionadores de partículas o en rayos cósmicos, puede ser agrupada en leptones, quarks y hadrones o en leptones y hadrones, ya que los quarks son constituyentes de los hadrones o, también, en leptones, bariones y mesones, pues los hadrones pueden ser divididos en bariones y mesones.

Pero, como se dijo al principio, el Modelo Estándar es una teoría comprensiva que identifica las partículas básicas y especifica cómo interactúan éstas. Vamos entonces a las interacciones.

En la naturaleza hay cuatro tipos de interacciones fundamentales: *gravitacional, electromagnética, fuerte*⁵ y *débil*. Cada de ellas es debida a una propiedad fundamental de la materia: *masa* (interacción gravitacional), *carga eléctrica* (interacción electromagnética), *color* (interacción fuerte) y *carga débil* (interacción débil). Si a cada una de esas propiedades las llamamos carga, tendremos cuatro cargas: *carga masa, carga eléctrica, carga color y carga débil*.

³ Se trata de una propiedad, no un color propiamente dicho. Rojo, verde y azul son sólo aspectos de esa propiedad. Así como la carga eléctrica, que es también una propiedad de ciertas partículas, puede ser positiva o negativa, la propiedad color, que se podría llamar carga color, presenta tres variedades que recibieron el nombre de rojo, verde y azul.

⁴ De modo general, una antipartícula tiene la misma masa y el mismo spin que la partícula en cuestión, pero cargas opuestas.

⁵ La interacción fuerte puede ser dividida en *fundamental* y *residual*; la fundamental es la propia interacción fuerte, la residual deriva de balances imperfectos de las atracciones y repulsiones entre los quarks que constituyen los hadrones.

Así, hay también cuatro fuerzas fundamentales en la naturaleza: *fuerza gravitacional*, *fuerza electromagnética*, *fuerza color*⁶ y *fuerza débil*. Todas las fuerzas que parecen ser distintas – como fuerzas elásticas, fuerzas de roce, fuerzas intermoleculares, interatómicas, inter-iónicas, fuerzas de viscosidad, etc. – son casos particulares o resultantes de esas cuatro fuerzas fundamentales.

Pero ¿cómo se da la interacción? ¿Quién “transmite el mensaje” de la fuerza entre las partículas que interactúan? Eso nos lleva a las *partículas mediadoras* o *partículas de fuerza* o, también, *partículas virtuales*.

Las interacciones fundamentales tienen lugar como si las partículas que interactúan “intercambiasen” otras partículas entre sí. Esas partículas mediadoras serían los *fotones* en la interacción electromagnética, los *gluones* en la interacción fuerte, las *partículas W* y *Z* en la interacción débil y los *gravitones* (aún no detectados) en la interacción gravitacional. Es decir, partículas eléctricamente cargadas interactuarían intercambiando fotones, partículas con carga color interactuarían intercambiando gluones, partículas con carga débil intercambiarían partículas W y Z, mientras que partículas con masa intercambiarían gravitones.

Las partículas mediadoras pueden no tener masa, pero tienen energía⁷, o sea, son pulsos de energía. Por eso, se llaman virtuales. De los cuatro tipos de partículas mediadoras⁸, las del tipo W y Z tienen masa, pero es común que todas sean llamadas partículas virtuales.

Entonces, se podría decir que las partículas de materia o partículas reales⁹ (leptones, quarks y hadrones) interactúan intercambiando partículas virtuales (fotones, gluones, W y Z, y gravitones). Aquí hay que tener en cuenta que las partículas de materia pueden tener más de una carga, de modo que experimentarían varias interacciones y fuerzas, pero el ámbito de la interacción puede variar mucho, de tal manera que en un determinado dominio una cierta interacción puede ser irrelevante. La fuerza gravitacional, por ejemplo, puede ser desconsiderada en el dominio subatómico. Es decir, aunque existan cuatro interacciones fundamentales, cuatro cargas y cuatro fuerzas, eso no quiere decir que todas las partículas tengan las cuatro cargas y experimenten las cuatro interacciones.

¡Pero faltan los campos! Los cuatro campos. Sabemos que un cuerpo con masa crea alrededor de sí un *campo gravitacional*, un campo de fuerza que ejerce una fuerza sobre otro cuerpo masivo y viceversa. Análogamente, un cuerpo cargado eléctricamente, crea un *campo electromagnético* (si está en reposo, se percibe sólo su componente eléctrico, si está en movimiento se manifiesta también el componente magnético) y ejerce una fuerza electromagnética sobre otro cuerpo electrizado y viceversa.

De la misma manera, está el *campo de la fuerza fuerte* y el *campo de la fuerza débil*. O sea, hay cuatro campos fundamentales: el electromagnético, el fuerte, el débil y el gravitacional¹⁰. Las

⁶ Así como la interacción fuerte puede ser distinguida entre *fundamental* y *residual*, la fuerza color puede ser diferenciada en *fuerza color fuerte* y *fuerza color residual*. O sea, a cada interacción corresponde una fuerza, entonces, si la interacción fuerte puede ser interpretada como fundamental o residual, correspondientemente, se puede hablar de fuerza color fuerte y fuerza color residual.

⁷ Recordemos que hay una equivalencia entre masa y energía, respectivamente.

⁸ Mesones también pueden actuar como partículas mediadoras, pero en el caso de la interacción fuerte residual. Son los quanta del campo mesónico, que no es un campo fundamental como el electromagnético, el fuerte, el débil y el gravitacional.

⁹ Las partículas que aquí se están considerando reales porque tienen masa, también pueden ser virtuales como, por ejemplo, las parejas electrón-positrón virtuales mencionados en la sección el *vacuo no es vacío*; todo depende de la energía.

¹⁰ Lo que se está buscando es mantener la simetría, diciendo que hay en cuatro campos fundamentales, cuatro cargas, cuatro interacciones y cuatro tipos de partículas mediadoras; en realidad, sólo en la gravitación newtoniana un cuerpo con masa crea en torno de sí un campo gravitacional, no en la Relatividad General.

partículas mediadoras son los quanta de los campos correspondientes: los fotones son los quanta del campo electromagnético, los gluones son los quanta del campo fuerte, las partículas W y Z del campo débil y los gravitones serían los quanta del campo gravitacional.

En otras palabras, los cuatro campos fundamentales son el campo de fotones (electromagnético), el de gluones (fuerte), el de partículas W y Z (débil) y el de gravitones (gravitacional).

El problema en esa bella simetría de *cuatro cargas, cuatro interacciones, cuatro fuerzas, cuatro tipos de partículas mediadoras y cuatro campos* es que aún no fue detectado ningún gravitón y la gravedad, en sí, no encaja bien en esa teoría llamada Modelo Estándar. Este asunto será retomado más adelante.

Para finalizar esta sección, se presenta, en la Figura 1, una visión esquemática del Modelo Estándar. Como consta en la leyenda de esa figura, se trata de una simplificación.

Hecho eso, el resto de este trabajo será dedicado a abordar aspectos de esa teoría que podrán ser motivadores desde el punto de vista de la enseñanza y del aprendizaje de la Física.

El vacuo no es vacío

En la sección anterior hablamos de partículas virtuales, como los fotones y los gluones, o sea, partículas sin masa. Pues bien, cuando la incertidumbre¹¹ en la energía es más que el doble de la masa del electrón (tal como ocurre a una distancia de aproximadamente 10^{-11} cm) algo muy extraño puede ocurrir *en el vacuo*: la producción de un par de partículas con un electrón y un positrón. Si, de alguna forma, hay un suministro de energía de fuera del vacuo, ese par se transformará en un par de partículas reales, sin violar la conservación de la energía. Si eso no sucede, el par desaparecerá tan rápido como fue producido. O sea, el par electrón - positrón es virtual, pero eso significa entonces que el vacuo está lleno de un gran número (esencialmente infinito) de pares electrón-positrón virtuales (Fritzsche, 1983, p. 146).

Entonces, además de fotones y gluones, hay también electrones y positrones virtuales, y otras partículas como muones y antimuones virtuales. De manera general, una partícula virtual es una “partícula que no aconteció”: no tiene masa y existe sólo durante un corto período de tiempo en una pequeña región del espacio. Las relaciones de incertidumbre son las responsables de que aparezcan partículas virtuales en la Física (ibid.). Tienen importancia en distancias muy pequeñas, pero son irrelevantes en la física macroscópica.

Por ejemplo, podemos suponer que el vacuo está lleno de pares virtuales de muones y antimuones que normalmente no son detectados. Sin embargo, en un experimento de aniquilación de un electrón y un positrón (reales) en un acelerador/colisionador de partículas aparecen muones reales que se observan en los detectores de partículas. ¿De dónde vinieron?: un par muón-antimuón virtual recibió la energía resultante de la aniquilación y dejó la región (muy pequeña) donde tuvo lugar la interacción, como un par de muones reales.

Lo interesante de todo eso es que el vacuo entonces no es vacío. Lo que parece tan simple macroscópicamente es un sistema muy complicado en la teoría cuántica.

¹¹ De acuerdo con las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, cuanto más precisas son las medidas del momentum o de la energía de una partícula, mayores las incertidumbres en mediciones en el espacio y en el tiempo.

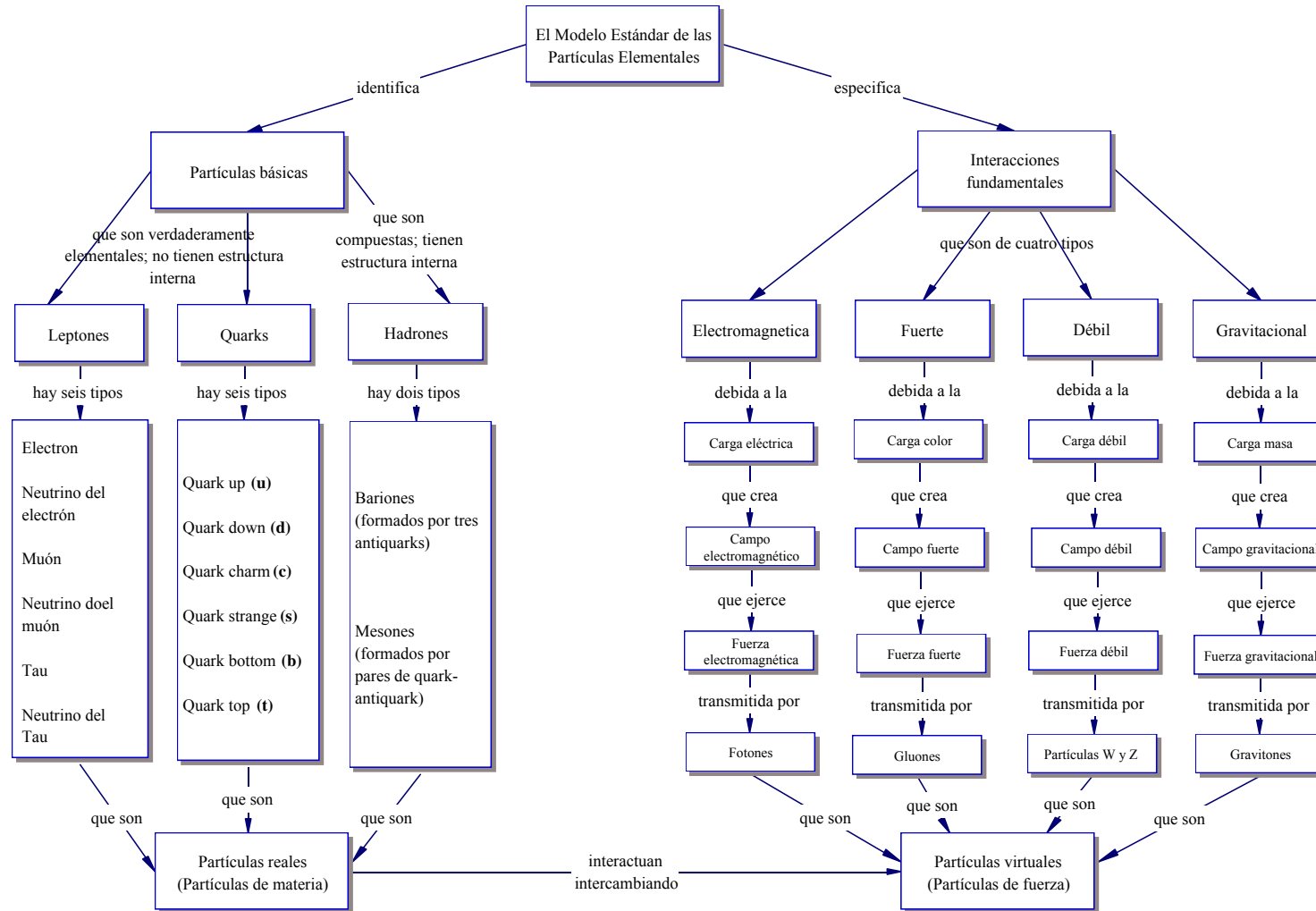


Figura 1. Un esquema simplificado para el Modelo Estándar. En ese esquema no se hace ninguna alusión al hecho de que para cada partícula existe una antipartícula, no se considera que los quarks tienen la *propiedad color* que se presenta en tres variedades (de modo que sería 18 el número de quarks) y que la interacción fuerte puede ser presentada como *fundamental* o *residual* (que estaría mediada por mesones). Además, sugiere que la interacción gravitacional está perfectamente integrada al Modelo Estándar, lo cual aún no ha ocurrido y tal vez nunca ocurra. Sugiere que las partículas W y Z son, de hecho, virtuales. Es una visión simplificada que pretende destacar la simetría de la teoría. Por eso, hay que aceptarla críticamente.

En verdad, identificar vacuo con espacio no ocupado por algo es una concepción errónea, incluso en el dominio de la Física Clásica, pues, aun cuando no hay materia en una región del espacio, ésta continúa rellena y recorrida por campos y ondas. *No está desprovisto de cualidades el espacio donde están y se mueven objetos o sistemas y, aunque podamos decir que un objeto se desplaza en el vacuo cuando no encuentra otras partículas en su trayecto, el espacio clásico nunca está literalmente vacío (Menezes, 2005, p.89).*

Pero no se trata del viejo conocido *éter* que físicos de otras épocas propusieron que rellenaba todo el espacio y servía de medio de propagación de la luz y de otras ondas electromagnéticas. Eso quedará más claro en las próximas secciones.

Partículas desnudas y vestidas

Supongamos que un electrón fuese colocado en el vacuo. Se podría pensar que no sucedería nada, sin embargo como el vacuo está lleno de pares electrón-positrón virtuales, el electrón, siendo negativo, repelería todos los electrones virtuales y atraería todos los positrones virtuales de los pares existentes en la región del vacuo alrededor de sí. El electrón quedaría, así, envuelto por una nube de positrones virtuales. Entonces, el vacuo quedaría polarizado por el electrón (Fritzsche, 1983, p.148).

¿Cuál es el efecto de eso?: la carga del electrón se queda parcialmente blindada por la nube de los positrones virtuales. De lejos no importa. Lo que se “ve” es el electrón y la nube como un todo y no se puede distinguir qué parte de la carga del electrón es del mismo y qué parte es de la nube polarizadora. Es el electrón físico, conocido, que genera corriente en los cables y que tiene carga $-e$. Es el electrón del “día a día”: el electrón “vestido”, o sea, con la nube.

Un electrón sin la nube de positrones virtuales se llama “electrón desnudo”. En altas energías, el efecto de la polarización puede ser percibido: a medida que el electrón va siendo “desnudado”, su carga eléctrica aumenta. O sea, la carga eléctrica del “electrón desnudo” es mayor que la del electrón “vestido” (el viejo conocido electrón), lo que explica por qué la Ley de Coulomb no vale para dos electrones a una distancia inferior a 10^{-11} cm. Es decir, en distancias de ese orden, la fuerza entre dos electrones es un poco mayor que la que se esperaría a partir de la Ley de Coulomb (ibid).

Es interesante cómo cambian las cosas en el dominio del muy pequeño: las partículas virtuales violan la conservación de la energía, pero por muy poco tiempo (si no hay un aporte de energía para que una partícula virtual se transforme en partícula real, ésta desaparece enseguida); la Ley de Coulomb no da el resultado esperado porque, en ese dominio, el electrón puede “quedarse desnudo” y su carga aumenta porque disminuye el efecto de la polarización.

Así como en la Electrodinámica Cuántica los electrones están envueltos por una nube de positrones virtuales, en la Cromodinámica Cuántica, los quarks están envueltos en una nube de gluones (el vacuo también está lleno de gluones, partículas igualmente virtuales). Entonces, se puede hablar también de quarks “desnudos” y quarks “vestidos” o, de manera general, de “partículas desnudas” y “vestidas”.

El campo y el bosón de Higgs

Teóricamente, el vacuo está relleno no sólo por las partículas virtuales (¿fantasmas?) y por los cuatro campos fundamentales, sino también por otro campo fundamental, llamado *campo de*

Higgs y, por consiguiente, por una partícula mediadora que sería el *bosón*¹² de Higgs (Colas y Tuchming, 2004).

Bosones de Higgs son partículas previstas teóricamente, en 1964, por el físico escocés Peter Higgs y usadas, posteriormente, por Steven Weinberg (1967) y Abdus Salam (1968) para explicar por qué otras partículas, los bosones W y Z, tienen masa. En la teoría electrodébil, formulada en 1962 por Sheldon Glashow, había una paradoja referente a las partículas W y Z. Por un lado, la debilidad de las interacciones débiles requeriría que tales partículas tuviesen masas relativamente elevadas. Por otro, la simetría de la teoría que explicaba esas interacciones exigía que sus masas fuesen nulas. Tal contradicción desaparecería si las masas de los bosones W y Z fuesen aparentes. Es decir, si sus masas fuesen “dadas” por otras partículas: los bosones de Higgs. De acuerdo con el llamado mecanismo de Higgs¹³, las partículas W y Z se chocarían incesantemente con otras partículas presentes en todo el espacio, las partículas de Higgs, que explicarían sus masas. O sea, la masa de las partículas W y Z sería dada por la masa de las partículas con las cuales estarían chocándose permanentemente. Existiría un *campo de Higgs*, fundamentalmente diferente de los demás campos, pues, según la teoría, el estado de energía mínima de ese campo ocurriría no cuando se anulase (como es el caso, por ejemplo, del campo electromagnético), sino en un determinado valor específico distinto de cero (Kane, 2003). *Por consiguiente, un campo de Higgs no nulo atraviesa el universo, y las partículas están siempre interactuando con él, desplazándose a través de él como personas vadeando en el agua. Esa interacción les da su masa, su inercia* (ibid., p. 62).

Hoy, el mecanismo de Higgs es considerado como el origen de la masa de todas las partículas elementales, pero la paradoja teórica a respecto de las partículas W y Z fue identificada antes de que las propias partículas hubiesen sido detectadas. Entonces, una vez detectadas las partículas (masivas) W y Z, el problema pasó a ser la detección del bosón de Higgs, que hasta ahora, pasados más de cuarenta años, aún no ha tenido lugar, pero que se espera que suceda en 2010.

Eso porque las máquinas, o sea, los aceleradores/colisionadores/detectores de partículas construidos hasta hoy no fueron capaces de alcanzar una energía suficiente para crear/detectar bosones de Higgs. Sin embargo, se espera que una máquina llamada LHC (*Large Hadron Collider*) en construcción en el CERN (Laboratorio Europeo para Física de Partículas), cuya conclusión estaba prevista para 2008, sea capaz de “descubrir” bosones de Higgs (o el bosón de Higgs, pues hay una teoría que prevé la existencia de un único bosón de Higgs). O, tal vez, otra máquina, llamada Tevatrón, existente en el Fermilab en Estados Unidos podrá también, por sus peculiaridades, permitir la detección del Higgs.

Aparentemente, nadie duda de la existencia del bosón de Higgs. Parece ser una cuestión de tiempo y lugar. ¿Cuándo? ¿Dónde? ¡Ah!, ¿y quién? ¿Ganará el Nobel quien descubra el bosón de Higgs? ¿O deberá ser para Peter Higgs que lo previó cuarenta años atrás?

¿Y si no es detectado? ¿Será necesario modificar el Modelo Estándar? ¿Hacer nueva(s) hipótesis auxiliar(es)?

¿Qué es masa?

Paradójicamente, la masa, una propiedad tan familiar de la materia, es de los asuntos más investigados en la Física de Partículas. Los físicos quieren explicar esa propiedad, quieren explicar

¹² Bosones son partículas con spin (momentum angular intrínseco) entero que no obedecen el Principio de la Exclusión de Pauli (dos partículas con el mismo spin no pueden ocupar el mismo estado al mismo tiempo).

¹³ Los físicos Robert Brout y François Englert también son responsables del desarrollo de ese aparato teórico, pero usualmente la literatura se refiere a él sólo como mecanismo de Higgs.

por qué las partículas tienen masa. Eso, como se vio en la sección anterior, tiene que ver con el bosón de Higgs y mejorará y extenderá el Modelo Estándar. En esta sección, ese asunto será explorado un poco más. Pero antes, veamos lo que hoy se consideran concepciones alternativas (*misconceptions*) sobre masa, en la visión de Okun (1987, pp. 12-13).

“Masa de reposo” y “masa relativística” es una terminología antigua, de inicio del siglo XX, para mantener la relación newtoniana entre momentum, masa y velocidad ($\vec{p} = m\vec{v}$). Sin embargo, la relación correcta es la expresión relativística $\vec{p} = m\vec{v}/\sqrt{1-v^2/c^2}$ de modo que, teniendo en cuenta que $\vec{F} = d\vec{p}/dt$, la expresión $\vec{F} = m\vec{a}$ es válida sólo en el límite no relativista, donde $v/c \ll 1$.

En la mecánica relativista, la “masa de reposo” no es ni la masa inercial (es decir, el coeficiente de proporcionalidad entre fuerza y aceleración) ni la masa gravitacional (es decir, el coeficiente de proporcionalidad entre el campo gravitacional y la fuerza gravitacional actuando en un cuerpo).

La atracción gravitacional no está determinada por la “masa de reposo”, pues un fotón es desviado por el campo gravitacional a pesar de tener masa nula. Como la atracción gravitacional sobre un fotón aumenta con la energía del fotón somos tentados a aceptar que por lo menos en ese caso tiene sentido hablar de masa relativística, o masa de movimiento, pero eso no es correcto. Una teoría consistente del movimiento de un fotón (o cualquier otro objeto que se mueve con velocidad comparable a la de la luz) en un campo gravitacional mostrará que la energía de un cuerpo no es equivalente a su masa gravitacional.

Otro ejemplo de esa desacertada terminología es la falsa afirmación de que en la Física de Altas Energías y en la Física Nuclear es posible transformar energía en materia y materia en energía. La energía se *conserva*. La energía no se transforma en cosa ninguna, son apenas distintas partículas que se transforman unas en otras. O sea, la energía *se conserva*, pero los portadores de energía y la forma en que ésta aparece, de hecho, cambian.

Concluyendo, los términos “masa de reposo” y “masa relativística” (o “masa de movimiento”) no deben ser más usados y masa debe significar siempre la masa relativísticamente invariante de la mecánica de Einstein (op.cit.).

Masa es, entonces, simplemente masa, una propiedad intrínseca de ciertas partículas elementales. Los quarks, por ejemplo, tienen masa. Los fotones y otras partículas virtuales no tienen masa. Pero la gravedad actúa también en fotones, o sea, actúa sobre energía, no sólo sobre masa.

Energía y masa están relacionadas por la ecuación de Einstein $E=mc^2$, pero eso no significa que la masa sea dependiente de la velocidad. Este asunto está bien discutido en el artículo *E = mc^2: origen y significados* (Lemos, 2001).

Pero ¿por qué tienen masa las partículas que tienen masa? ¿Cómo se explica la masa? Éste es un problema que el Modelo Estándar espera resolver con el campo y el bosón de Higgs.

La adquisición de masa por una partícula podría ser explicada de la siguiente manera: el campo de Higgs estaría en todo el espacio; la partícula mediadora de ese campo sería el bosón de Higgs. Una partícula real en ese espacio interactuaría con el campo y quedaría polarizada con bosones de Higgs que entonces le darían masa. Habría una nube de bosones de Higgs asociada a la partícula dándole masa. Metafóricamente sería análogo a lo que sucedería con una persona muy importante, o muy conocida, que llegase a una fiesta, o sea, a un “campo de personas”, e inmediatamente muchas otras personas viniesen a saludar y permaneciesen alrededor de ella allá

donde ella fuera. O lo que le pasaría a un vendedor de helados que pasase por un “campo de niños” (Kane, 2005).

Hay que notar que, a rigor, lo que daría masa a las partículas sería el campo de Higgs, caso contrario sería necesario otro mecanismo para explicar la masa del bosón de Higgs. Un único campo de Higgs sería suficiente para explicar la masa de las partículas, pero podría haber otros tipos de campos de Higgs. Alias, el Modelo Estándar Supersimétrico (una extensión del Modelo Estándar) prevé la existencia de cinco bosones de Higgs (op.cit., p.34). Hasta ahora, ninguno fue detectado, pero en el LEP (*Large Electron-Positron Collider*) ya se han obtenido evidencias experimentales indirectas de que ellos existen. Su detección, como ya se dijo, parece ser una cuestión de tiempo. ¡Y de máquina!

La antimateria

La antipartícula de una dada partícula tiene la misma masa y spin de esa partícula, sin embargo tiene carga eléctrica opuesta, así como son opuestos el número bariónico¹⁴, el número leptónico, etc. Para cada partícula, existe una antipartícula. Así, la antimateria está constituida de antiprotones, antineutrones, antielectrones (llamados positrones), antileptones, antiquarks. Partículas neutras como los fotones son iguales a sus antipartículas (Fritzsch, 1983). (Gravitones también serían iguales a sus antipartículas.)

Al inicio de los años treinta, parecía que la materia estaba constituida de protones, neutrones y electrones, y la interacción electromagnética explicaba por qué los electrones (negativos) quedaban ligados a los núcleos (positivos) en los átomos. Pero eso no duró mucho porque para explicar la estabilidad del núcleo fue necesario postular una nueva interacción fundamental, la interacción fuerte, y para una descripción del electrón que satisficiera a la teoría cuántica y a la teoría de la relatividad, fue necesario prever la existencia de antipartículas. Eso fue realizado por Paul Dirac y, enseguida, en 1933, Carl Anderson detectó en rayos cósmicos la antipartícula del electrón (antielectrón o positrón).

En los años cincuenta fueron descubiertos los antiprotones y antineutrones. Desde 1955, los físicos de partículas están creando haces de antiprotones y desde 1995 consiguen crear antiátomos (pares antiprotón-antielectrón, formando antiátomos de hidrógeno). (Collins, 2005).

Pero ¿por qué “crear” antipartículas y antiátomos? ¿No existen en la naturaleza?

Existen, pero hay en el universo una asimetría materia/antimateria: hay más materia que antimateria. En el universo hay una inmensa cantidad de materia, pero son raras las antipartículas que ocurren naturalmente. Esta situación puede ser embarazosa para la Física de Partículas, pero es afortunada para el mundo en que vivimos: materia y antimateria cuando entran en contacto se aniquilan mutuamente y convierten su masa total en una cantidad equivalente de energía, o sea, protón y antiprotón se aniquilan produciendo un rayo gama con la energía equivalente a la suma de sus masas; electrón y antielectrón se aniquilan, etc., materia y antimateria aniquilándose mutuamente. Eso significa que *un universo compuesto de la misma cantidad de materia y antimateria sería hostil e inestable, no el tipo de lugar donde grandes cantidades de materia del tamaño de planetas podrían existir en relativa paz y estabilidad durante mil millones de años* (Schumm, 2004).

¹⁴ Número bariónico es el número total de bariones presentes en un sistema menos o número total de antibariones. Análogamente, número leptónico es el número total de leptones presentes en un sistema menos el número total de antileptones.

El proceso de producción de antipartículas es lo contrario de la aniquilación. Parte de la energía producida en choques provocados en los aceleradores de partículas se convierte, por ejemplo, en pares de protones y antiprotones.

La simetría CPT

El interés por investigar antipartículas es, primariamente, teórico: el llamado teorema de la simetría CPT que relaciona las propiedades de las partículas y sus antipartículas; de acuerdo con la teoría, ambas deben seguir las mismas leyes físicas.

CPT significa “reversión de la Carga”, “inversión de la Paridad” y “reversión del Tiempo”. Reversión de la carga es la sustitución de todas las partículas por antipartículas. Inversión de la paridad es la reflexión especular o inversión del espacio con relación a un punto y reversión del tiempo significa pasar la “película” de la realidad de atrás para adelante (Collins, 2005, p. 58).

Decir que la naturaleza es invariante frente a la simetría P significa que cualquier proceso físico observado en un espejo sigue las mismas leyes del proceso no reflejo. Aunque parezca obvia, tal simetría se quiebra en la interacción débil involucrada en ciertos decaimientos radioactivos. De modo general, en muchas situaciones en las que la simetría P se rompe, la simetría CP es preservada, pero en raras ocasiones se rompe también la simetría CP y esa ruptura puede tener que ver con el predominio de la materia sobre la antimateria en el universo (ibid.). La violación de la simetría CP permitiría que partículas y antipartículas decayesen con tasas diferentes.

Otro aspecto intrigante de la asimetría materia/antimateria es que de las cuatro fuerzas fundamentales – electromagnética, gravitacional, fuerte y débil – sólo la débil afectaría diferentemente la materia y la antimateria. O sea, en cualquier reacción causada por las fuerzas electromagnética, gravitacional y fuerte, si nuevas partículas fuesen producidas, lo serían en iguales cantidades y tipos de materia y antimateria. Estas fuerzas no podrían entonces explicar el predominio de la materia sobre la antimateria. La fuerza débil tal vez sí, pero eso permanece aún como un gran desafío para los físicos de partículas (Schumm, 2004, p. 16).

Volviendo a la cuestión de las simetrías, si la simetría CP también es violada en ciertos procesos, queda la simetría CPT. La expectativa dentro del Modelo Estándar de las partículas elementales es que cualquier violación de la simetría CPT debe ser muy pequeña. En el Modelo Estándar, la simetría CPT es una propiedad fundamental del universo. Violaciones significativas de esa simetría indicarían problemas en el Modelo Estándar y sugerirían la necesidad de una teoría que fuese más allá del propio modelo. De ahí el interés en producir antipartículas y antiátomos, en los grandes aceleradores en Estados Unidos y en Europa, para estudiar profundamente sus propiedades.

EDQ & CDQ

La teoría de las interacciones entre fotones y electrones se llama *Electrodinámica Cuántica (EDQ)*; correspondientemente, la teoría de las interacciones entre gluones y quarks se llama *Cromodinámica Cuántica (CQD)*; (quarks tienen la propiedad color; *chromos* en griego significa color). Hay, sin embargo, una gran diferencia entre las dos cuando se tiene en cuenta la naturaleza de las partículas fundamentales involucradas (electrones y quarks): electrones pueden ser detectados libremente, quarks no. Además, tres quarks forman hadrones y éstos son “blancos”, pero tres electrones formarían un estado (no ligado) con carga $-3e$, pues la carga eléctrica se conserva. Eso significa que al contrario de una carga, como en la electrodinámica, en la cromodinámica hay varias cargas color (son ocho) y que la adición de estas cargas no es una simple suma escalar. Recordemos

que color es una propiedad de la materia que en el caso de los quarks presenta tres variedades (rojo, verde y azul), sin embargo en el caso de los gluones, combinando estos tres colores y sus anti-colores, se llega a nueve gluones, pero uno de ellos es blanco, quedando, entonces, ocho gluones coloridos. De ahí que se diga que en la CQD hay ocho cargas color (Fritzsch, 1983, p. 142).

Prosiguiendo con la analogía entre esas dos teorías, se observa que un campo electrodinámico crea una fuerza de atracción entre dos objetos cargados con cargas opuestas, la cual en términos cuánticos es creada a través del cambio de fotones virtuales entre esos objetos, de la misma forma que un campo cromodinámico crearía una fuerza de atracción entre quarks a través del cambio de algunas partículas virtuales análogas a los fotones virtuales. Tales partículas, como ya se vio, se llaman gluones.

Entonces, se puede “construir” un espacio cromodinámico en el cual las cargas color hacen el papel de la carga eléctrica en el espacio electrodinámico y los gluones el de los fotones virtuales. Sin embargo, el acoplamiento de gluones a quarks es más complicado que el acoplamiento de fotones a electrones, pues cuando un fotón interactúa con un electrón éste permanece siendo un electrón, sin embargo un gluón que interactúa con un quark puede alterar el color del quark, es decir, transformarlo en otro quark. Es decir, los colores de los quarks pueden alterar cuando éstos interactúan con gluones.

Sin embargo, hay que reiterar que la analogía no es total porque, como ya se dijo, en la electrodinámica hay una única carga, la eléctrica, mientras que en la cromodinámica hay ocho cargas color diferentes, u ocho gluones coloridos.

La materia oscura

Estrellas, planetas, cometas, polvo cósmico y otras formas ordinarias de materia parecen constituir aproximadamente 5% de la masa del universo. Los otros 95% serían de “materia oscura” y “energía oscura”¹⁵, si es que eso, que no se sabe lo que es, de hecho existe. Astrónomos, hace décadas, buscan registros de la existencia de la materia oscura y, aparentemente, están convencidos de que existe, pero la evidencia obtenida no es, aún, del todo convincente. Hace algunos años, los físicos de partículas pasaron a participar del esfuerzo de los astrónomos intentando detectar, experimentalmente, partículas de materia oscura. Es una tarea, en principio, muy difícil, que conduce a un dilema análogo al del bosón de Higgs: o se las detecta y se verifica que la materia oscura existe o las teorías que subyacen a la Física Moderna tendrán que ser modificadas (Cline, 2003).

La hipótesis de la materia oscura está relacionada a la cuestión de si el universo continuará en expansión o si éste disminuirá y será revertido llevando eventualmente a un período de contracción. Esa cuestión está relacionada a otra: ¿cuánta masa existe en el universo? Dependiendo de la cantidad, la expansión podrá ser revertida e, incluso, podrá ocurrir un “*Big Crunch*”¹⁶, o continuará para siempre. La primera posibilidad es conocida como *universo cerrado*, la segunda

¹⁵ A pesar del nombre similar, materia y energía oscura son sustancias distintas: materia oscura es una forma exótica de materia que no emite, no absorbe, ni lanza luz; la única interacción a la cual reacciona es la gravitación. Energía oscura es un nuevo ingrediente que entró en escena recientemente para explicar el universo porque las formas conocidas de materia y la materia oscura explican tan solo aproximadamente 30% del universo. El resto (70%) sería explicado por la energía oscura que se distingue de la materia oscura por el hecho de ser gravitacionalmente repulsiva llevando el universo a una expansión acelerada. O sea, el universo estaría dominado por una energía oscura que ocupa todo el cosmos y que aún no sabemos qué es (Adballa, 2006, pp.306-311).

¹⁶ Crunch significa aplastamiento ruidoso.

como *universo abierto*. Entre ellas, está la del *universo plano*, o sea, existiría una “masa crítica” del universo, suficiente para reducir la expansión, pero no suficiente para revertirla.

Estimando la masa del universo desde la materia visible, el resultado sería, como se dijo antes, muy pequeño y tendríamos el llamado universo abierto. Sin embargo, hay evidencias experimentales, aunque no totalmente convincentes, sobre la existencia de una materia oscura que traspasaría el universo. Combinando la masa de la materia observable con la masa estimada de la materia oscura, el resultado es bastante próximo a la “masa crítica”, dejando aún abierta la cuestión de si el universo continuará en expansión o acabará contrayéndose (Lederman y Teresi, 1993, p. 394).

Suponiendo, entonces, que la materia oscura exista, la pregunta que surge de inmediato es “de qué tipo de partículas estaría constituida?”.

Neutrinos eran fuertes candidatos porque debe haber en el universo una enorme cantidad de esas partículas elusivas resultantes del *Big Bang*, los llamados *neutrinos primordiales*, producidos en los primeros segundos de *Big Bang*. En verdad, serían candidatos ideales si no fuese el problema de que su masa es muy pequeña. Aun existiendo en abundancia contribuirían con una pequeña fracción de la materia oscura (Cline, 2004, p.59).

El viento oscuro

En verdad, ninguna de las partículas del Modelo Estándar responde a la pregunta de la constitución de la materia oscura.

Por consiguiente, se están realizando tentativas de extensión del Modelo Estándar. Una de ellas es la de la *Supersimetría*, la cual presupone la existencia de toda una nueva familia de partículas: cada partícula elemental del Modelo Estándar tendría una “súper compañera” más pesada. Siendo más pesadas, esas partículas serían, por tanto, más lentas que las partículas conocidas, constituyendo, entonces, lo que se podría llamar materia oscura “fría”¹⁷. De éstas, una posibilidad atrayente para físicos y astrónomos es el *neutralino*, una amalgama de las súper compañeras del fotón, del bosón Z (que transmite la fuerza débil) y tal vez de partículas de otros tipos (ibid.).

El neutralino sería la más leve de las súper compañeras; como sugiere el nombre, tendría carga eléctrica cero (por tanto, no afectada por fuerzas electromagnéticas) y sería estable. Su estabilidad y neutralidad asociadas a una determinada masa, satisfarían todos los requisitos de la materia oscura fría.

La teoría del *Big Bang* permite una estimativa del número de neutralinos que habrían sido creados en el plasma caliente inicial del universo. Ese plasma era una sopa caótica de todos los tipos de partículas, ninguna de las cuales sobrevivió por mucho tiempo: inmediatamente colisionaban con otras partículas aniquilándose mutuamente y produciendo nuevas partículas que también colisionaban con otras y así sucesivamente en un proceso cíclico de creación y destrucción. Pero, a medida que el universo se enfriaba y se volvía menos denso, los choques eran menos violentos y menos frecuentes permitiendo que las partículas se condensasen progresivamente. El neutralino sería una partícula menos propensa a choques de modo que habría sido una de las primeras que se

¹⁷ La materia oscura “caliente” sería aquella de los primordios del universo, constituida por partículas que se movían con velocidades comparables a la luz.

condensó¹⁸. Entonces, en ese período se habría producido una inmensa cantidad de neutralinos, cuya masa total corresponde bastante bien con la masa estimada de materia oscura existente en el universo (op.cit., p.60).

Teóricamente, entonces, la existencia del neutralino resuelve el problema de la materia oscura. Por consiguiente, hay que detectarlo. Pero para eso, es necesario saber como interactúa con la materia normal. Si la interacción es apenas la gravitacional, no hay esperanzas de detectarlo, pues la fuerza gravitacional es la más débil de todas en el dominio de las partículas elementales.

Sin embargo, la teoría de la supersimetría prevé que el neutralino interactuaría con la materia a través de la fuerza nuclear débil. Si así es, hay posibilidades de detectarlo, pues, aunque la fuerza sea débil, el número previsto de partículas es inmenso. Como se dijo al inicio de esta sección, la materia oscura es dominante en el universo. Siendo oscura no emite radiación, no pierde energía y no se aglomera para formar estrellas y planetas. Es decir, la materia oscura envuelve el espacio interestelar como si fuese un gas. Sería un gas estancado, o sea, las partículas que lo constituyen se moverían, pero aleatoriamente, sin movimiento organizado. Sin embargo, como nuestro sistema solar está orbitando alrededor del centro de nuestra galaxia a 220 km por segundo estaríamos sufriendo el impacto de un “viento oscuro” que, según estimativas de los científicos, sería del orden de un millón de partículas oscuras por metro cuadrado por segundo.

Hay por lo menos una decena de laboratorios intentando detectar el neutralino desde 1997. Además de la dificultad inherente al hecho de que la interacción de la materia oscura con la materia común es débil, está el problema de que los detectores, construidos de metal, contienen rasgos radioactivos de elementos como uranio y torio que decaen produciendo partículas que son confundidas con partículas oscuras. La dificultad no es tanto de sensibilidad, sino de impureza intrínseca a los detectores (op.cit., p.61).

Hasta mediados de los años setenta, la Física de Partículas y la Cosmología eran áreas de investigación completamente separadas, sin embargo, en esa época, tal vez en función de grandes cortes de presupuestos, investigadores en Física de Partículas se dieron cuenta de que estudios sobre los primordios del universo ofrecían una posibilidad única de investigar fenómenos de alta energía que no podían ser recreados en laboratorio (Kaiser 2007). Surgió así la Cosmología de Partículas, un área híbrida y altamente promisoría en Física.

Neutrinos oscilantes

El Modelo Estándar incluye tres tipos distintos de neutrinos: neutrino del electrón, neutrino del muón y neutrino del tau. Habría, entonces, tres “sabores” distintos de neutrinos.

De acuerdo con la teoría propuesta por el físico inglés Arthur Eddington, en 1920, la energía del Sol sería proveniente de reacciones de fusión nuclear que ocurrirían en su interior. Más tarde, con la hipótesis de Pauli (1930) sobre la existencia del neutrino y aún después con el Modelo Estándar, se llegó, teóricamente, a la conclusión de que tales reacciones producirían neutrinos del electrón en abundancia.

Sin embargo, desde los años 60 hasta 2002, los experimentos para detectar esos neutrinos solares siempre daban resultados significativamente inferiores a los previstos por la teoría. Esa incómoda diferencia, que quedó conocida como el *problema de los neutrinos solares* (McDonald et

¹⁸ En esa sopa primordial, quarks y gluones también habrían reducido mucho sus velocidades de modo que después de algunos microsegundos acabaron unidos por fuerzas muy fuertes y permanentemente confinados dentro de protones, neutrones y otras partículas llamadas hadrones (Riordan y Zajc, 2006, p. 40).

al., 2003), era también un problema del Modelo Estándar. Es decir, una previsión del Modelo Estándar no era confirmada por los resultados experimentales. En algunos casos, el número de neutrinos detectados era sólo un tercio de lo previsto.

Solamente en 2002, físicos del observatorio de Neutrinos SudBury, en Ontario, resolvieron este problema confirmando experimentalmente la hipótesis de los físicos Gribove y Pontecorvo, hecha en 1969, suponiendo que los neutrinos producidos en el interior del Sol cambian de sabor antes de llegar a la Tierra. O sea el número de neutrinos del electrón producidos en las reacciones de fusión nuclear, previsto teóricamente, estaba bien, pero el número detectado en la Tierra sería menor porque los neutrinos del electrón se convertían en otros neutrinos no detectables por los experimentos montados hasta entonces para detectar neutrinos solares.

Esa hipótesis de los *neutrinos oscilantes*, después de confirmada experimentalmente, resolvió el problema de los neutrinos solares, confirmó la teoría de Eddington y eliminó esa anomalía existente en el Modelo Estándar. Por otro lado, llevó a una modificación en el Modelo Estándar pues, según la teoría, los neutrinos serían partículas sin masa, pero los nuevos resultados implicaban que ellos tendrían masa, aunque muy pequeña (op. cit., p.24).

La hipótesis de la oscilación de los neutrinos requiere que los tres sabores de neutrino (del electrón, del muón y del tau) estén constituidos por mezclas de *estados de neutrinos* (identificados como 1, 2 y 3) con diferentes masas. Un neutrino del electrón podría ser entonces una mezcla de estados 1 y 2, mientras que un neutrino del muón sería una mezcla diferente de esos mismos estados. De acuerdo con esa hipótesis, mientras viajan (¡8 min!) hasta la Tierra, esos neutrinos, constituidos por distintas mezclas, oscilan entre uno y otro sabor. Hay varios modelos para la oscilación de los neutrinos, suponiendo que la oscilación tenga lugar aún en el propio Sol, o que ocurra en el espacio vacío o, también, que tenga lugar en el interior de la Tierra (ellos prácticamente no interactúan con la materia), todo dependiendo de la mezcla y de diferencias de masas.

Resultados experimentales recientes, en el observatorio de neutrinos antes referido, indican que del total de aproximadamente 5 millones de neutrinos solares que llegan a la Tierra por cm^2 por segundo, cerca de dos tercios son neutrinos del tau o neutrinos del muón. Como las reacciones de fusión nuclear en el interior del Sol sólo producen neutrinos del electrón, tales resultados confirman la hipótesis de los neutrinos oscilantes.

Oscilantes o no, los neutrinos constituyen uno de los más fascinantes tópicos de la Física de Partículas. Son dichos elusivos, o sea, ariscos, evasivos, huidizos, de difícil comprensión. Según parece, cuanto más los físicos de partículas sepan sobre los neutrinos, más sabremos sobre la naturaleza de la materia, sobre la formación de galaxias, sobre la asimetría materia - antimateria.

Conclusión

Como se dijo al principio, el Modelo Estándar es una excelente teoría, la mejor que ya tuvimos sobre la naturaleza de la materia. Es una teoría que identifica las partículas que constituyen la materia y describe cómo interactúan. Además, lo hace presentando varias simetrías y siempre buscando otras.

Pero no es una teoría acabada, ni definitiva. Al contrario es, como todas las demás teorías científicas, una verdad provisional, en el sentido de que, seguramente, será modificada, completada, extrapolada, a fin de explicar mejor lo que se propone y, en algún momento, dará lugar a otras teorías que, de alguna forma, se apoyarán en ella.

Entre los problemas que enfrenta el Modelo Estándar, se pueden destacar los siguientes (e.g., Kane, 2003, pp. 61-62).

- **La asimetría materia - antimateria:** si el universo empezó en el Big Bang como una inmensa explosión de energía, debería haber partes iguales de materia y antimateria (simetría CP). En lugar de eso, estrellas y nebulosas están hechas de protones, electrones y neutrones y no de sus antipartículas. Esa asimetría no se explica por el Modelo Estándar. En el universo hay mucho más materia que antimateria.

- **La materia oscura y la energía oscura:** la mayor parte del universo está constituida de la llamada materia oscura y de la energía oscura, que no están formadas por las partículas del Modelo Estándar.

- **El campo de Higgs:** la interacción con el campo de Higgs, mediada por el bosón de Higgs, daría masa a las partículas. Se espera que el bosón de Higgs sea detectado en los próximos años, pero aunque, de hecho, eso llegue a ocurrir, el Modelo Estándar tiene dificultades para explicar formas particulares de esa interacción. Una de ellas es que, por los cálculos de la teoría actual, la masa del bosón de Higgs sería muy grande y, por consiguiente, las partículas del Modelo Estándar tendrían masas también muy grandes.

- **La gravedad:** el gravitón nunca fue detectado y el Modelo Estándar no consigue incluir la interacción gravitacional porque no tiene la misma estructura de las otras tres interacciones.

Tales problemas podrán ser resueltos. La detección del bosón de Higgs será más un éxito espectacular del Modelo Estándar. La hipótesis de los neutrinos oscilantes resolvió el problema de la gran diferencia entre el número de neutrinos previstos y el número de neutrinos detectados en la Tierra. La detección del neutralino resolvería el problema de la materia oscura.

La gravedad podrá continuar siendo la gran “cefalalgia” del Modelo Estándar (Lederman y Teresi, 1993, p.99). Pero aunque se encuentre alguna solución para este problema conceptual de la teoría, los físicos creen que deberá ser suplantada por otra más completa. Modelos Estándar Súpersimétricos (Kane, 2005; Helayël - Neto, 2005) son serios candidatos.

Pero si el Modelo Estándar, a pesar de las anomalías, es una teoría con tanto éxito, ¿por qué los físicos quieren suplantarla? ¿No sería el caso de convivir con las dificultades?

La respuesta es sí y no. Por un lado, es normal que las teorías científicas tengan problemas que no consiguen resolver, siempre que resuelvan muchos otros. Por otro, el progreso del conocimiento científico depende de nuevas teorías, con mayor poder explicativo.

Para Bachelard (1991), por ejemplo, el conocimiento científico es un permanente cuestionar, un permanente no al conocimiento anterior, pero no en el sentido de negación, y sí en el de conciliación: cada nueva teoría dice no a la teoría antigua y así avanza el pensamiento científico. La *filosofía del no* de Bachelard surge no como una actitud de recusa, sino como de reconciliación. La nueva teoría dice no a la anterior, pero surge a partir de ella.

Esa filosofía del no es también una *filosofía de la desilusión*. O sea, el conocimiento científico es siempre la reforma de una ilusión, es fruto de la desilusión con lo que juzgábamos saber (Lopes, 1996).

La superación del Modelo Estándar, en la óptica de Bachelard, será una consecuencia natural de la desilusión que tendremos con él, de la necesidad de decir no a él si queremos aprender más sobre partículas elementales y sus interacciones, sobre la materia oscura, la antimateria, el campo de Higgs y otros tópicos abordados en este artículo.

Las teorías científicas están siempre en construcción. En este artículo se procuró ilustrar, con el Modelo Estándar, esta faceta fascinante de la ciencia.

Referencias

- Abdalla, M.C.D. (2006). *O discreto charme das partículas elementares*. São Paulo: Editora UNESP. 340p.
- Bachelard, G. (1991). *A filosofia do não*. Lisboa: Editorial Presença. 136p.
- Colas, P.Y. y Tuchming, B. (2004). Partículas elementales. *Mundo Científico/La Recherche*, nº247: 46-53.
- Collins, G. P. (2005). Making cold antimatter. *Scientific American*, June: 57-63.
- Cline, D. (2003). The search for dark matter. *Scientific American*, March: 28-35.
- Fritsch, H. (1983). *Quarks: The stuff of matter*. USA: Basic Books Inc. 295p.
- Helayël-Neto, J. A. (2005). Supersimetría e interações fundamentais. *Física na Escola*, 6(1): 45-47.
- Kaiser, D. (2007). When fields collide. *Scientific American*, June: 40-47.
- Kane, G. (2003). The dawn of physics beyond the standard model. *Scientific American*, June: 56-63.
- Lederman, L. and Teresi, D. (1993). *The God particle. If the universe is the question, what is the answer*. New York: Dell Publishing. 434p.
- Lemos, N.A. (2001). $E = mc^2$: origem e significado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(1): 3-9.
- Lopes, A. R. C. (1996). *Bachelard: o filósofo da desilusão*. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 13 (3): 248-273.
- Menezes, L. C. (2005). *A matéria: uma aventura do espírito*. São Paulo: Livraria Editora da Física. 273p.
- McDonald, A. B., Klein, J. R. and Wark, D.L. (2003). Solving the neutrino problem. *Scientific American*, April: 22-31.
- Okun, L.B. (1987). $\alpha, \beta, \gamma \dots Z$. *A primer in particle physics*. UK: Harwood Academic Publishers. 114 p.
- Riordan, M. e Zajc, W. A. (2006). Os primeiros microssegundos. *Scientific American Brasil*, Junho:40-70.
- Scoccola, N. N. (2004). Pentaquark. Nova partícula subatômica? *Ciência Hoje*, v.35, nº210: 36-40.
- Schumm, B. A. (2004). *Deep down things. The breathtaking beauty of particle physics*. Baltimore & London: The Johns Hopkins University Press. 378 p.

Agradecimento

El autor agradece a los Profesores Eliane Veit y Paulo Mors, del Instituto de Física de la UFRGS, por la revisión crítica de versiones iniciales de este trabajo; agradece también al revisor de la RBEF por las valiosas sugerencias recibidas.