

# ¿De qué están hechas las cosas?

Modelo estándar  
de partículas  
elementales

HELBER DUSSÁN<sup>1</sup>

## RESUMEN

**E**n este artículo se describe la teoría actualmente aceptada sobre la constitución de la materia, conocida con el nombre de Modelo Estándar de Partículas Elementales. Se explica la razón y el origen de la clasificación entre diferentes tipos de partículas, bosones, leptones, quarks, hadrones, mesones, etc. Se hace un análisis crítico del modelo, así como sus posibles perspectivas.

Palabras Clave: Partículas y elementos.

## SUMMARY

In this paper we described really theory accepted over matter constitutive, or standard model of elemental particles. We explained reasons and origin of classification between different particles, bosons, leptons, quarks, hadrons mesons. We made critical model, so like possible perspectives.

Key Words: Boson, meson and quark.

## 1. INTRODUCCIÓN

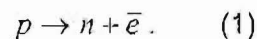
Desde que Demócrito enunció la teoría según la cual todas las cosas estaban hechas de pequeñas partículas (átomos) ha habido innumerables descubrimientos al respecto. Existen arduas investigaciones para estudiar la estructura de los átomos, y en sí la estructura de la materia, tanto en el campo teórico como experimental. Sin embargo, debido a los costos, en el campo experimental sólo hay unos pocos e inmensos laboratorios como el Fermilab o el CERN en los cuales se puede hacer investigación de punta al respecto<sup>1</sup>. Este interés no tiene ningún carácter práctico, es sólo la curiosidad de saber de qué estamos hechos nosotros y todo lo que nos rodea. Formalmente, si conocemos cómo son las interacciones entre las partículas que constituyen el sistema físico que nos interesa; podemos, en principio, predecir las propiedades y el comportamiento macroscópico de dicho sistema. Las consecuencias de conocer los constituyentes primordiales de toda la materia existente y como estos interactúan entre sí, conducen al conocimiento de las leyes fundamentales que rigen por completo la naturaleza del universo.

La concepción actual a cerca de qué están hechas todas las cosas es lo que se conoce como Modelo Estándar de Partículas Elementales<sup>2</sup>. Una descripción cualitativa de dicho modelo, sin todo el formalismo que este requiere, se presenta a continuación, examinando sus éxitos, falencias y perspectivas.

## 2. RESEÑA HISTÓRICA

A fines del siglo XIX sólo se conocía la existencia de las interacciones electromagnética y gravitacional. Por ese entonces, Beckerel descubrió la radioactividad, fenómeno que despertó el interés por entender la naturaleza del núcleo y las maneras como interactúa la materia. Lo más llamativo de los fenómenos observados era la aparente no conservación de la energía y el momento angular, lo cual estaba en contradicción con los fundamentos de la física y por tanto no se tenía

explicación alguna al respecto<sup>3</sup>. La desintegración  $\beta$  fue uno de estos modos de radioactividad, en la cual se observa que núcleos pesados decaen convirtiéndose en núcleos más livianos, emitiendo una partícula de carga positiva con masa igual a la del electrón, sin la aparente conservación del momento angular. Por ejemplo, se observa que el isótopo de cloro 37 se convierte en argón 37, pero que el momento angular inicial parecía ser diferente del final<sup>4</sup>. Posteriormente se propuso que durante el proceso, un protón  $p$  del núcleo pesado, se convierte en un "positrón"  $\bar{e}$  (la antipartícula del electrón) y un neutrón  $n$ , mediante:



La existencia del positrón fue predicha en 1928 por Paul Dirac, quien formuló la Teoría Cuántica Relativista, determinando la ecuación que describe el comportamiento de los electrones con velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Esta ecuación (llamada ecuación de Dirac) predice la existencia de antimateria y el hecho que el espín (momento angular propio) es una consecuencia de la Teoría de la Relatividad. Las partículas que obedecen la ecuación de Dirac tienen espín  $\frac{1}{2}$  y son llamadas fermiones. Como se confirmó experimentalmente, cada partícula tiene asociada una antipartícula, la cual posee igual masa y espín, mientras que su carga eléctrica es de signo opuesto. Este trabajo fue crucial ya que condujo al desarrollo de la Electrodinámica Cuántica (Quantum Electrodynamics, QED)<sup>5, 6, 7</sup>.

Para explicar cómo podría ocurrir la desintegración  $\beta$ , W. Pauli formuló la existencia de una partícula de carga eléctrica y masa nulas, llamada neutrino ( $\nu$ ). Así la aparente no conservación de energía y momentum angular se deben a que el neutrino, que es emitido en la reacción, porta esta energía y este momentum faltante: sin embargo, debido a que no tiene carga eléctrica ni masa, en los experimentos que se realizaban en esa época, diseñados para detectar sólo partículas que interactúan eléctricamente o gravitacionalmente, no podía ser observado. Por esta razón, durante mucho tiempo se pensó que el neutrino era sólo un truco para salvar estas dos leyes fundamentales de la física que parecían violarse. Teniendo en cuenta la existencia del

neutrino, la ecuación (1), la cual es una reacción realmente, toma ahora la forma:

$$p \rightarrow n + \bar{e} + \bar{\nu}_e, \quad (2)$$

en la cual  $\bar{\nu}_e$  representa el antineutrino. En 1933, Enrico Fermi elaboró una teoría fenomenológica de la desintegración  $\beta$ , en la cual se postulan la interacción débil y la existencia del neutrino  $n$ . La interacción débil sería de un carácter diferente a las interacciones eléctrica y gravitacional. Aunque la teoría de Fermi lograba reproducir los resultados experimentales, lo cual es de esperar ya que Fermi la elaboró basado en las observaciones que se tenían, las preguntas sobre lo que en verdad ocurría en la desintegración y el por qué se producía el fenómeno, seguían sin respuesta. Una de las más inquietantes características de la interacción débil es la no conservación de la paridad. Es decir, que si se invierten los ejes de referencia,  $\mathcal{P}$  por  $-\mathcal{P}$ , lo que se observa no es equivalente; posteriormente volveremos sobre este tema, que está profundamente relacionado con la naturaleza del neutrino. La existencia del neutrino fue comprobada experimentalmente por C Cowan y F Reines en 1956<sup>2</sup>. Con base en este descubrimiento y desarrollos teóricos como la teoría cuántica de campos y la QED se logró la formulación de la teoría de partículas elementales.

Además de la interacción débil, que se presenta a escala nuclear, existe otro tipo de interacción a dicha escala, la cual fue propuesta para explicar por qué los protones, siendo partículas de carga eléctrica positiva, constituyen el núcleo. La idea es que adicionalmente a su repulsión eléctrica hay otro tipo de interacción que no es repulsiva, sino atractiva y que a distancias nucleares es de mayor intensidad que la interacción eléctrica, la interacción fuerte. Una de sus características fundamentales es su corto alcance, de unos pocos fermis ( $10^{-15}$  m). Así, si un núcleo tiene muchos protones, la interacción fuerte no logrará mantener unidos los protones y el núcleo emitirá algunos de ellos debido a la repulsión eléctrica, en acuerdo con los hechos experimentales que muestran que los núcleos pesados como el uranio son inestables y tienen una alta probabilidad de desintegra-

ción<sup>8,9</sup>. Veamos ahora como se describen todo este conjunto de fenómenos desde la formulación actual de la física de partículas.

### 3. PARTÍCULAS FERMIÓNICAS

De acuerdo con el Modelo Estándar de Partículas Elementales, el universo está hecho de fermiones, es decir, partículas de espín  $\frac{1}{2}$ , las cuales se clasifican en dos grandes grupos, los leptones y los quarks. Esta clasificación se hace considerando la manera como interactúan las partículas.

Existe un teorema demostrado por W. Pauli, el teorema del espín y la estadística, el cual expresa que dos partículas idénticas fermiónicas no pueden tener los mismos números cuánticos, es decir que no pueden ocupar el mismo estado cuántico<sup>10</sup>. Por ello existen los estados de agregación de la materia y que no se observa que los átomos ocupen el mismo espacio físico. Así que, la materia como tal está hecha de fermiones. A continuación se describen dichas partículas y cómo se relacionan entre sí.

#### 3.1. Leptones

Como se mencionó anteriormente, los leptones son fermiones. En este grupo la partícula más famosa es el electrón ( $e$ ). Como sabemos, los electrones son partículas que vagan alrededor de los núcleos (conjuntos de protones y neutrones). Hasta el momento, con las energías alcanzadas en los aceleradores de partículas, no se ha observado algún indicio de que el electrón esté constituido de partículas más fundamentales. Por esta razón se cree que el electrón es una partícula elemental, de "carga" negativa y de masa muy pequeña ( $0.511 \text{ Mev}/c^2$ ). La carga es puesta aquí en comillas debido a que existen diferentes tipos de carga según cada tipo de interacción, en este caso nos referimos a la más común para nosotros, la carga eléctrica, implicando que el electrón interactúa electromagnéticamente. Análogamente, debido a que es una partícula masiva, esta interactúa gravitacionalmente, es decir, la masa es carga gravitacional. Además, se

Tabla 1. Leptones

Leptón	Símbolo	Carga (en unidades de e)	Masa (GeV/c <sup>2</sup> )
Electrón	e	-1	5.10999*10 <sup>-4</sup>
e-Neutrino	$\nu_e$	0	<1.8*10 <sup>-8</sup>
Muón	m	-1	0.105658
m-Neutrino	$\nu_m$	0	<2.5*10 <sup>-4</sup>
Tau	t	-1	1.7841
t-Neutrino	$\nu_t$	0	<3.5*10 <sup>-2</sup>

sabe que también participa en procesos nucleares, como la desintegración de b, descrita por la ecuación (2). Así que el electrón no sólo interactúa eléctrica y gravitacionalmente, también interactúa débilmente. Es decir, que también posee carga débil. Estas diferentes clases de carga son en realidad números cuánticos asociados a la partícula junto con el número cuántico de espín y son lo que identifica a las partículas. El electrón (e), por ejemplo, tiene espín  $\frac{1}{2}$ , masa (carga gravitacional), carga eléctrica y carga débil. No tiene carga fuerte, lo que implica que no interactúa fuertemente. Por otra parte, en los procesos débiles en los que el electrón interviene, también lo hace el neutrino ( $\nu_e$ ), llamado neutrino electrónico.

Este perfil es el que cumplen los "amigos" del electrón, es decir, son partículas de espín  $\frac{1}{2}$ , tienen carga gravitacional, carga eléctrica y carga débil, pero no carga fuerte. Además, en los procesos débiles en los que participan, interviene también una clase de neutrino. A este grupo pertenecen, el muón m, el tauón t y sus correspondientes neutrinos, neutrino muónico  $\nu_m$  y neutrino tauónico  $\nu_t$ . La diferencia entre el electrón e, el muón m y el tauón t está en los valores de sus masas<sup>11,12</sup>, como se muestra en la tabla 1, en la cual, como es usual en física de partículas, la masa se da en Giga-electrovoltios sobre velocidad de la luz al cuadrado,  $1 \text{ GeV}/c^2 = 1.782662 \cdot 10^{27} \text{ kg}$ . Además, es de aclarar que todas las correspondientes antipartículas también pertenecen a este mismo grupo. Es decir el positrón  $\bar{e}$ , el antimuón  $\bar{\mu}$ , el antitauón  $\bar{\tau}$ , el antineutrino electrónico  $\bar{\nu}_e$ , etc.

No parece existir ningún patrón esencial entre las masas de los leptones cargados, lo cual hace imposible predecir si hay más leptones o no en el universo. Por otra parte, tampoco hay una razón física para asegurar que los neutrinos sean no masivos, sin embargo existen innumerables especulaciones, ninguna justificada experimentalmente<sup>2</sup>.

### 3.2 Quarks

Actualmente sabemos que los protones y los neutrones que constituyen el núcleo no son partículas elementales, es decir que están compuestas por otras, llamadas Quarks, las que en principio sí son indivisibles. Los Quarks son masivos, tienen carga eléctrica, carga débil y carga de color, lo que implica que interactúan gravitacional, eléctrica, débil y fuertemente. Son fermiones porque tienen espín  $\frac{1}{2}$ . Los integrantes de este grupo son el Quark Down (d), el Quark Up (u), el Quark Strange (s), el Quark Bottom (b) y el Quark Top (t). Cada uno de estos nombres son llamados sabores de Quark. El nombre sabor no tiene que ver con nuestra percepción del sabor, es sólo que los físicos que desarrollaron esta nueva teoría eligieron nombres menos tradicionales. En la tabla 2, se muestran algunas de sus propiedades.

En cualquier proceso físico, en el que los quarks participen, estos siempre aparecen en parejas bien definidas, las cuales son (u, d), (c, s), y (t, b). Además, los quarks tienen asociado un número cuántico específico para cada uno, llamado carga de "color", el cual es denominado así para distinguirlo de la carga eléctrica y la carga débil.



Tabla 2. Quarks

Quark Sabor	Símbolo	Carga (en unidades de e)	Masa (GeV/c <sup>2</sup> ) <sup>0</sup>
Down	d	-1/3	0.008
Up	u	2/3	0.004
Strange	s	-1/3	0.15
Charm	c	2/3	1.2
Bottom	b	-1/3	4.7
Top	t	2/3	≥40

El número cuántico de color está asociado a la interacción fuerte e indica qué tan intenso es el acoplamiento o la interacción con otra partícula que también interactúe fuertemente. El acoplamiento fuerte se representa por los colores rojo (r), azul (a) o verde (v), que en realidad representan sólo números cuánticos y no los colores que vemos en nuestra vida cotidiana.

El quark t no ha sido observado experimentalmente, pero se tienen indicios de que su masa debe ser menor o igual a 40 GeV/c<sup>2</sup>. Las razones por las cuales se cree que existe son teóricas y tiene que ver con las simetrías asociadas a la interacción fuerte<sup>2</sup>.

#### 4. PARTÍCULAS INTERMEDIARIAS E INTERACCIONES

La formación de núcleos y átomos no sería posible si entre los fermiones no existieran interacciones, clásicamente representadas por fuerzas. Cuánticamente, dos fermiones interactúan si intercambian un tipo de partículas de espín entero. Qué partícula sea la que intercambien y qué tan intensa sea esta interacción depende del tipo de fermiones que participen en el proceso, esto es, depende de la carga que estos tengan. Por otra parte, las partículas intermediarias, que tienen espín entero, son bosones y por ello obedecen a una estadística diferente de la de los fermiones. Los bosones sí pueden ocupar un mismo estado cuántico. Estas partículas bosónicas, portadoras de las interacciones, son llamadas también partí-

culas gauge, ya que en el formalismo de la física de partículas las interacciones surgen de requerir que localmente y para cada instante de tiempo no haya cambios en el sistema. Esto último ocurre exigiendo que no haya cambios frente a transformaciones de calibración o de escala (transformaciones gauge). Por esta razón, la mayoría de la teorías modernas en física de partículas, son llamadas teorías gauge.

El Modelo Estándar como tal no incluye la gravedad, aunque existen teorías más modernas en las cuales la gravedad es representada por una partícula de espín 2. Sin embargo, dichas teorías no son fáciles de comprobar porque requieren energías demasiado altas para ser alcanzadas experimentalmente con los laboratorios con los que actualmente se cuenta. A continuación describimos los grupos en los que se han clasificado las partículas intermediarias de espín 1, las cuales se han logrado cuantizar. La gravedad no es considerada en el modelo.

##### 4.1. Partículas intermediarias de la interacción electrodébil

La primera unificación entre dos tipos de interacción en la materia la hizo Maxwell, quien unificó la electricidad y el magnetismo, la que hoy día conocemos como teoría clásica del electromagnetismo, la cual fue la primera teoría gauge. Recordemos que las ecuaciones de Maxwell que son las leyes básicas del electromagnetismo se pueden solucionar recurriendo a dos potencia-

les, el potencial vectorial y el potencial escalar. A partir de estos pueden hallarse los campos eléctrico y magnético. Sin embargo, la relación entre los potenciales y los campos no es unívoca. Por tanto, existe una arbitrariedad en la escala para medir los potenciales. De modo que una elección de escala, llamada una elección en el gauge, puede reproducir campos eléctricos y magnéticos iguales a otra escala elegida. Se dice entonces que la teoría electromagnética es invariante gauge. La consecuencia física de esta invariancia (también llamada por los físicos una simetría) es la conservación de la carga eléctrica.

La siguiente unificación tardaría casi un siglo, y sería descubierta teóricamente por S. Weinberg, A. Salam y Sheldon Glashow<sup>13,14</sup>. Ellos muestran que la interacción electromagnética y la interacción débil son manifestaciones de una misma interacción, llamada interacción electrodébil. Las partículas intermediarias en esta interacción son el fotón  $g$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ . Así que cualquier intercambio entre fermiones de estas partículas significa que dichos fermiones están interactuando electrodébilmente. Por consiguiente, las interacciones entre leptones ocurren sólo por intercambio de alguno de estos bosones, porque los leptones sólo interactúan electrodébilmente. Los quarks, en cambio, además de procesos en los que intercambien estos bosones, también participan en procesos de interacción fuerte.

Así que en los procesos como la desintegración  $\beta$  pueden participar, además del fotón, tres partículas intermediarias, dos cargadas  $W^+$ ,  $W^-$  y una neutra  $Z^0$ . La conservación de la carga en todos los procesos en que participan se cumple, incluidos procesos de interacción entre ellas mismas. La explicación de que supiéramos del fotón y sus efectos a gran distancia, pero no de las otras partículas, es que  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$  debían tener masa. Experimentalmente se sabía que la interacción débil es de corto alcance, por lo cual los físicos que estaban elaborando la teoría sabían que debían construir una teoría gauge de partículas intermediarias masivas. Es posible cons-

truir una teoría con bosones intermediarios masivos si se incluye una nueva partícula de espín cero, que se llamó el Higgs (H). El mecanismo teórico para dar masa a los bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$  manteniendo sin masa al fotón, se llama ruptura espontánea de la simetría. Dicho mecanismo (realmente es un método matemático) también sirve para dar masa a todas las otras partículas que tienen masa, es decir, el electrón, el muón, el tauón y los quarks<sup>15</sup>. Como se explicará en la sección 5, la ruptura espontánea de la simetría tiene profundas implicaciones físicas, que tienen que ver con la evolución del universo. Por otra parte la nueva partícula, el Higgs, no ha podido ser detectada experimentalmente, lo cual es uno de los principales problemas conceptuales del modelo.

#### 4.2. Partículas intermediarias de la interacción fuerte

Las partículas intermediarias de la interacción fuerte son llamadas gluones; igual que los bosones de la interacción electrodébil, son partículas bosónicas de espín 1; sin embargo, los gluones son todos no masivos. Como se mencionó en la sección 3.1 los leptones no interactúan fuertemente, luego los gluones participan sólo en procesos nucleares en los que haya quarks. Los gluones conforman un grupo de ocho partículas eléctricamente neutras. Como son no masivas, no se realiza ruptura espontánea de la simetría.

Las observaciones experimentales hechas hasta ahora, parecen confirmar esta teoría con ocho gluones. No obstante, es algo muy complicado de comprobar directamente, debido a que tanto los quarks como los gluones se encuentran "confinados" dentro de los protones y los neutrones. El fenómeno de confinamiento permanente de los quarks dentro de los nucleones (neutrones y protones) no ha sido explicado todavía. Todos estos fenómenos se pueden estudiar restringiéndose a procesos entre quarks y gluones; sólo considerando la interacción fuerte, sin tener en cuenta las otras interacciones, en una teoría conocida como Cromodinámica Cuántica (Quantum Chromodynamics, QCD)<sup>2</sup>.

Los gluones portan carga de color, rojo, verde o azul, al igual que los quarks. Cuando ocurre una interacción entre quarks, lo que está ocurriendo es que un quark emite un gluón (g), cambiando de estado, a su vez el gluón emitido puede ser absorbido por otro quark. Ambos quarks han cambiado de estado, han cambiado sus números cuánticos, lo cual se representa como un cambio en la carga de color de las partículas. Así que el gluón cambia la carga de color de los quarks dejándolos en estados diferentes. Para notar este efecto, los gluones no se denotan sólo por g, sino por  $g_{ij}$ , que significa que al emitirlo, el quark que tenía la carga de color i, quedó con una carga de color j, donde los índices j e i representan las cargas de color posibles, esto es rojo, verde o azul, aunque en un proceso de emisión de un gluón, siempre  $i \neq j$ .

Parte de los trabajos teóricos con gluones indican además la posibilidad de que estos pueden por sí solos formar un tipo de partículas, los glubolas (Glue-Balls), porque entre ellos puede haber intercambios de color, es decir pueden interactuar. Sin embargo, debido al fenómeno de confinamiento tampoco se ha comprobado experimentalmente. Surgen de esta manera una serie de nuevos fenómenos propios de la interacción entre gluones, física nueva la cual todavía no se puede corroborar experimentalmente.

Hemos descrito en la sección anterior y en la presente, las partículas que actualmente llama-

mos fundamentales; veamos ahora las consecuencias y las deficiencias de este modelo.

## 5. EL MODELO ESTÁNDAR

Esencialmente, el Modelo Estándar de Partículas Elementales explica de que está hecha la materia y por qué esta se forma, de la siguiente manera: Las partículas fermiónicas, es decir los leptones y los quarks constituyen toda la materia que observamos en el universo. La materia se forma, tal cual la conocemos, debido a las interacciones entre estas partículas; dichas interacciones ocurren como intercambio de partículas bosónicas.

Cuando empezó el desarrollo de la física de partículas en el campo experimental, se encontraron muchas partículas subatómicas, las cuales eran llamadas fundamentales. Debido a lo inesperado y aleatorio de cada hallazgo se acumuló gran cantidad de información sobre nuevas partículas, se detectaban Kaones, Muones, Piones, etc. Una clasificación de las partículas, una idea general de lo que ocurría era muy complicada, además que las herramientas matemáticas para una explicación formal de lo que se observaba sólo se alcanzó a finales de los años cincuenta. Ahora el Modelo Estándar explica que muchas de estas partículas, entre ellas el protón p y el neutrón n, están compuestas por quarks, llamados cuánticamente estados ligados, y se forman debido a una

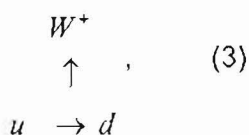
Tabla 3. Bariones

Quarks Constituyentes	Espín 1/2		Espín 3/2	
	Partícula	Masa (GeV/c <sup>2</sup> )	Partícula	Masa (GeV/c <sup>2</sup> )
uuu			D <sup>++</sup>	1.232
uud	p	0.9383	D <sup>+</sup>	1.232
udd	n	0.9396	D <sup>0</sup>	1.232
ddd			D <sup>-</sup>	1.232
uus	S <sup>+</sup>	1.894	S <sup>+</sup>	1.3828
uds	S <sup>0</sup>	1.1925	S <sup>0</sup>	1.3837
dds	S <sup>-</sup>	1.1973	S <sup>-</sup>	1.3872
uss	Ξ <sup>0</sup>	1.3149	Ξ <sup>0</sup>	1.5318
dss	Ξ <sup>-</sup>	1.3213	Ξ <sup>-</sup>	1.5350
sss			Ω <sup>-</sup>	1.6724

de las interacciones descritas anteriormente. El protón p, el neutrón n, así como otras partículas con características similares, están formados por trios de quarks y son llamados bariones. Algunas de estas partículas se muestran en la tabla 3.

El espín aquí tiene un efecto importante. Recordemos que los quarks son partículas de espín 1/2 y por tanto las partículas que ellos formen van a tener diferentes posibilidades de espín; estas posibilidades provienen de la teoría cuántica de adición de momento angular. Para entender de que se trata, representaremos aquí la componente de espín con respecto a un eje, por una flecha, hacia arriba (1/2) o con una flecha hacia abajo (-1/2). Por ejemplo, el protón p = uud y el neutrón n = udd, y en estos estados cada quark tiene los espines orientados ↑↑↓, con lo cual tanto el protón como el neutrón tienen espín 1/2. Pero los espines pueden estar todos hacia arriba ↑↑↑ y así el espín será 3/2, entonces tenemos otras partículas D<sup>+</sup> y D<sup>0</sup> respectivamente.

Basados en las tablas 2 y 3 podemos entender qué ocurre en un proceso de desintegración b. Recordemos que la ecuación (2) es una reacción típica b. En ella, un protón se transforma en un neutrón, un positrón y un antineutrino electrónico. Desde el punto de vista del Modelo Estándar, p = uud, y en el proceso de desintegración, un quark u emite un bosón débil W<sup>+</sup> convirtiéndose en un quark d, así:



por tanto, el protón se ha convertido en neutrón, n = udd. Posteriormente el bosón W<sup>+</sup> se desintegra emitiendo un positrón y un antineutrino. En este caso, la componente de espín del quark u con respecto a algún eje es inicialmente 1/2, después dicha componente de espín para el quark d es -1/2, y el bosón W<sup>+</sup> tiene espín 1, luego al final del primer proceso 1 - 1/2 = 1/2, el espín total es 1/2, como al principio. En la desintegración de W<sup>+</sup>, el positrón queda con espín 1/2 al igual que el antineutrino, lo cual suma el espín del bosón intermediario, manteniéndose la conservación del momento angular.

Además de los bariones, existe otro grupo de partículas formadas por quarks, los mesones, los cuales están formados por parejas de quarks, lo que hace que tengan una masa inferior a la de los bariones, pero superior a la de los leptones. El término mesón proviene de intermedio y hace referencia a este hecho. Algunos mesones se muestran en la tabla 4.

Veamos con cuidado qué implicaciones puede tener que los neutrinos tuvieran masa. Como se mencionó en la sección anterior, los procesos débiles no son invariantes ante inversión espacial. Aunque una descripción completa formal requiere toda la maquinaria de la teoría cuántica de campos y se sale de las intenciones de este artículo, fundamentalmente lo que ocurre es que en la interacción débil las partículas son emitidas con una cierta combinación de espines y cantidades de movimiento, de modo que el proceso no es invariante bajo el cambio de  $\vec{r}$  por  $-\vec{r}$ . Clásicamente podemos imaginar que una partícula que

Tabla 4. Mesones

Quarks Constituyentes	Espín 0		Espín 1	
	Partícula	Masa (GeV/c <sup>2</sup> )	Partícula	Masa (GeV/c <sup>2</sup> )
u $\bar{d}$ , d $\bar{u}$	$\pi^\pm$	0.13957	$\rho^{\pm 0}$	0.77
u $\bar{s}$ , s $\bar{u}$	$K^\pm$	0.4936	$K^{*\pm}$	0.8921
d $\bar{s}$ , s $\bar{d}$	$K^0, \bar{K}^0$	0.4976	$K^{*0}, \bar{K}^{*0}$	0.8921



se desplaza con momentum  $\vec{p}$  está girando sobre sí misma con velocidad angular  $\vec{\omega}$ , la dirección entre los dos vectores es diferente, en general, de modo que podemos definir una nueva cantidad física, la helicidad  $h$  como:

$$h = \frac{\vec{p} \cdot \vec{\omega}}{\|\vec{p}\| \|\vec{\omega}\|}, \quad (4)$$

la cual es la proyección del momento angular en la dirección en la que se mueve la partícula (dirección del momentum). En el caso clásico las partículas tienen una helicidad que puede variar entre cero y uno, continuamente, indicando qué tanta proyección tiene el giro propio en la dirección del momentum. En el caso de partículas cuánticas sólo hay dos posibilidades, debido a que el espín (momento angular propio) está cuantizado y su proyección sobre un eje dado sólo puede tener dos valores, 1 ó -1, con lo cual cuánticamente:

$$h = \frac{\vec{p} \cdot \vec{\omega}}{\|\vec{p}\| \|\vec{\omega}\|} = \pm 1, \quad (5)$$

encontrándose de este modo otro número cuántico, el número cuántico de helicidad. En general, ambos estados son probables, por tanto un estado se puede escribir como una combinación lineal de estos dos estados, siendo el estado de la partícula con helicidad -1 llamado un estado de mano izquierda y el estado con +1 llamado estado de mano derecha. Sin embargo, los resultados experimentales revelan que los neutrinos no tienen estados de mano izquierda, causando la no invariancia ante inversión espacial. Esto implica que existe un proceso que distingue la derecha de la izquierda. Un análisis profundo de este hecho conduce a que si los neutrinos tienen estados de mano derecha, deberían ser masivos, restableciéndose la simetría de paridad en los procesos débiles, pero no existen suficientes pruebas para asegurar que son o no masivos.

Estudios en cosmología indican que las partículas (ahora masivas), no siempre tuvieron

masa. Al principio, el universo era un gas formado por radiación; aparentemente todos los bosones intermediarios son manifestaciones de una sola interacción, por ello se busca una teoría que incluya a la gravedad, y que unifique todas las interacciones. El modelo considera la interacción nuclear fuerte, la interacción nuclear débil y la interacción electromagnética, las dos últimas son unificadas como una sola (interacción electrodébil). También se ha unificado la interacción fuerte y la electrodébil, en las teorías de gran unificación, que realmente no unifican tanto pues no tienen en cuenta la interacción gravitacional, aunque se han realizado grandes esfuerzos para incluirla dentro de teorías más amplias. Entre otras cosas esto significaría poder cuantizar la gravedad, lo cual ha llevado a la construcción de las teorías de Supercuerdas y Supergravedad, que requieren para su comprobación experimental energías sólo alcanzadas en las etapas tempranas del universo, del orden de 1000 GeV (Giga-electronvoltios) o más. En consecuencia los fenómenos cosmológicos que nos revelen la historia del universo que habitamos son la única manera de comprobar estas dos últimas teorías, las cuales no son tratadas aquí porque se salen del objetivo esencial de este artículo.

## 6. DEBILIDADES DEL MODELO ESTÁNDAR

Aunque el Modelo Estándar de Partículas Elementales tiene muchos éxitos al predecir muchos procesos que han sido confirmados experimentalmente, todavía no se tiene certeza sobre sus fundamentos básicos. El modelo tiene una serie de debilidades teóricas que colocan en tela de juicio todo lo que hemos venido explicando hasta ahora. Veamos de qué se tratan dichas debilidades y como se pueden superar algunas de ellas.

Como hemos visto, nuestras concepciones acerca de la estructura de la materia han cambiado sorprendentemente desde los tiempos de Demócrito, aunque su idea de un universo constituido por partículas indivisibles ha sido la base de este nuevo conocimiento. Por otra parte, la hipóte-

sis de Demócrito puede cuestionarse, ¿qué nos asegura que los quarks y los leptones son realmente indivisibles? La pregunta es natural ya que antes creímos que los átomos eran indivisibles, después creímos que los protones y los neutrones eran indivisibles y ahora sabemos que la materia está hecha de quarks y leptones, pero no sabemos qué tan fundamentales son estos. Al parecer de muchos físicos, los quarks podrían estar constituidos por partículas más pequeñas, así que se dedican a hacer cálculos y predicciones basados en esta hipótesis, en una rama de la Física de Partículas llamada Teorías más allá del Modelo Estándar; sin embargo, al igual que con las teorías de Supercuerdas y Supergravedad, no tenemos medios tecnológicos para realizar experimentos que puedan probar su validez<sup>2</sup>. Es de anotar, que la producción de trabajos en física de partículas en el campo teórico es sumamente mayor que en el experimental, debido a los costos que un experimento implica. Por esta razón, a los teóricos que investigan en Supercuerdas y Supergravedad se les dice que están trabajando en matemáticas abstractas, desconectadas de la realidad, y no en física.

Una debilidad difícil de visualizar con lo que hemos explicado hasta ahora, es el mecanismo Higgs. El Modelo Estándar postula acoplamientos entre la partícula Higgs y los bosones débiles y entre el Higgs y los otros fermiones (Quarks y leptones). Cada acoplamiento tiene una constante, introducida a mano al igual que el acoplamiento, que son en realidad parámetros libres que se introducen de entrada en la teoría para "cuadrar" la masa de las partículas masivas a partir de resultados experimentales<sup>1,13</sup>. La partícula Higgs es esencial en este proceso, sin embargo no ha sido detectada experimentalmente.

Otro punto en contra del Modelo Estándar es la emisión de neutrinos solares. Veamos de que se trata este fenómeno. En el interior del sol, debido a su actividad y dinámica a altas energías, ocurren desintegraciones débiles, es decir, procesos en los que participan partículas que interactúan débilmente. Debido a ello existe una

emisión de neutrinos a un ritmo o una tasa determinada, la cual ha sido medida experimentalmente. Aplicando el Modelo Estándar no ha sido posible predecir la tasa de emisión solar de neutrinos, lo cual sería una prueba de que el modelo tiene errores de fondo. Sin embargo, actualmente se cree que el desacuerdo entre teoría y experimento se debe a la manera como se ha calculado la tasa de emisión de neutrino, ya que no se ha tenido en cuenta la temperatura<sup>15-17</sup>.

Como último punto de discusión, no parece haber una explicación clara del por qué el universo que observamos está constituido solamente por partículas, aunque el Modelo Estándar establece simetría entre partículas y antipartículas. Es claro que nuestro universo está constituido por materia, no hay vestigios de antimateria a gran escala; por tanto, la antimateria pudo haber desaparecido del universo en una etapa temprana de su evolución. Se cree que "al principio" instantes después de la gran explosión (el Big Bang) el número de partículas y de antipartículas era igual, pero que debido a fluctuaciones térmicas este equilibrio se rompió, lo cual es conocido como bariogénesis. En algún tiempo posterior, las fluctuaciones en el número de partículas hicieron que la diferencia numérica fuera tal, que una cantidad de antipartículas se empezara a destruir con las demás partículas existentes; con lo cual, la asimetría actual quedaría explicada<sup>18</sup>.

Como hemos visto en esta última sección, son diversas y variadas las implicaciones de nuestro modelo actual acerca de sobre lo que están hechas todas las cosas, incluidos nosotros. Estas explicaciones han sido hechas sin adentrarnos en todo el aparato matemático que en sí involucran. Por ello, como ocurre con todos los tópicos relacionados con la Mecánica Cuántica, hemos sido un poco imprecisos en el lenguaje; sin embargo, esperamos haber dejado en el lector una idea básica de nuestra concepción actual de la estructura de la materia, ya que corresponde a una parte de la pregunta fundamental con respecto a nuestro origen, ¿De qué estamos hechos?

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- 1 TALON M., Quantum Theory of the Standar Model, Saint François Guadeloupe PAR LPTHE 93-58, Université Paris VI, CNRS UA 80 (1993).
- 2 COLLINS P. D.B., Martin A. D., Squires E. J., Particle Physics and Cosmology, Addison Wesley Interscience (1989).
- 3 MAYER-KUCKUK T., Física Nuclear, Fundação Calouste Gulbekian (1993).
- 4 DAVIS J. C. , Barshall H. H., Physical Review Letters B, 27, 636 (1968).
- 5 SCHWINGER J., Quantum Electrodynamics, Dover (1958).
- 6 FEYNMAN R. P., Quantum Electrodynamics, 2<sup>nd</sup> Edition, Frontiers in Physics, Edited by David Pines, W. A. Benjamin, Inc. (1973).
- 7 GREINER W., Quantum Electrodynamics, Springer- Verlag (1990).
- 8 FEYNMAN R. P., Leighton R. B.y Sands M., Física, Vol. 2, Electromagnetismo y Materia, Adisson-Wesley Iberoamericana (1987).
- 9 CLOSE F., Introduction to Quarks and Partons, Academic Press (1979).
- 10 LANDAU L. D. and Lifshitz E. M., Statistical Mechanics, Addison-Wesley (1959).
- 11 GEORGI H., Weak Interactions and Modern Particle Theory, Benjamin-Cummings Publishing (1984).
- 12 GREINER W., Müller B., Gauge Theories of Weak Interactions, Cambridge Univeristy Press (1994).
- 13 GLASHOW S., Nuclear Physics, 22, 579 (1961).
- 14 GOLDSTONE J., Salam A., Weinberg S., Physical Review Letters, 17, 965 (1962)
- 15 DUSSÁN H., Propagación de Neutrinos en Medios Térmicos, Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias (1998).
- 16 WELDON A., Phys. Rev. D, 26, 1394 (1982).
- 17 MABILAT H., Z. Phys. C, 75,155 (1997).
- 18 "PHYSICS OF EARLY UNIVERSE", Edited by J. A. Peacock, A. F. Heaves, A. T. Davies. Proccedings of the Thirty-Sixth Scottish Universities Summer Shool in Physics 1989. ANATO Advanced Study Institute.

## 8. LISTA DE SÍMBOLOS

p	Protón (Nucleón)
n	Neutrón (Nucleón)
S <sup>+</sup>	Barión sigma
S <sup>0</sup>	Barión sigma neutro
$\pi^{\pm}$	Piones
$K^{\pm}$	Kaones cargados
$K^0, \bar{K}^0$	Kaones neutros
u	Quark up
$\bar{u}$	Antiquark up
d	Quark down
$\bar{d}$	Antiquark down
s	Quark strange
$\bar{s}$	Antiquark strange
e	Electrón
$\bar{e}$	Positrón (Antielectrón)
m	Muón
$\bar{\mu}$	Antimuón
$\tau$	Tauón
$\bar{\tau}$	Antitauón
W <sup>-</sup>	Bosón débil doble-u menos
W <sup>+</sup>	Bosón débil doble-u mas
Z <sup>0</sup>	Bosón débil neutro zeta cero
H	Partícula Higgs