Capítulo 2

Partículas fundamentales: Introducción al Modelo Estándar

Desde la antigüedad se ha dicho que la materia está compuesta por entidades llamadas átomos. Ahora sabemos que éstos átomos están compuestos por partículas más pequeñas que son las partículas subatómicas y éstas son los protones, neutrones y electrones.
En este capítulo se estudiará de manera general a las partículas fundamentales que propone el modelo estándar de física de partículas.
Sin embargo, esto no se detiene ahí. El **Modelo Estándar** (M.E.) es una teoría que describe el comportamiento de las partículas elementales que componen el universo. Estas partículas elementales son los **leptones, quarks y bosones** (los últimos se encuentran los bosones escalares y los llamados *bosones de gauge*).
A los protones y neutrones se les puso en una nueva categoría llamada "hadrones", que son partículas compuestas por **quarks**, éstas básicamente los bloques de construcción de la materia ya que ellos son los que componen al núcleo atómico. Los protones y neutrones están compuestos de ellos, cada uno con su distinta configuración.
Por otra parte, los **leptones** son otra partícula subatómica, aquí es donde cae el electrón. Este será detallado en su propia sección.
Por último los **bosones de gauge** que son los responsables de transportar la información de las distintas interacciones del Universo, las cuales son el electromagnetismo

y las fuerzas nucleares débiles y fuertes.[1]

2.1. Quarks

La palabra "quark"fue acuñada por M. Gell-Mann. Los quarks poseen una propiedad bastante peculiar que es la carga de color. Básicamente es una manera de representar la interacción nuclear fuerte y las cargas se difieren con tres colores (azul, verde y rojo), con sus respectivos anti-colores (anti-azul, anti-verde y anti-rojo). Sólo las partículas que posean carga de color pueden interactuar con los gluones que son responsables de las interacciones de la fuerza nuclear fuerte y la carga de color debe ser conservada, de tal manera que para que un quark pueda cambiar de carga de color en las interacciones, ellos deben emitir un gluón con la combinación de color y anti-color correcto. Este es el principal motivo por el cual no se han observado quarks en estado libre y a tal fenómeno se le conoce como *confinamiento de color*. Otra consecuencia de que no se puedan observar de manera independiente es que algunos parámetros como la masa sea difícil de calcular puesto a que esto lleva a un problema de tres cuerpos.

Los conjuntos de quarks son dos, ellos son los bariones y los mesones[2]. Los bariones son combinaciones de tres quarks, es aquí donde encontramos al protón y al neutrón que son los dos bariones más estables. Por otro lado se encuentran los mesones, que son combinaciones de un quark y un anti-quark. [1]
Existen seis tipos de quarks, ellos son: *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* y *bottom*. Cada uno posee distintas propiedades que serán descritas a continuación:

La estructura de quarks del núcleo del átomo se compone de la siguiente manera: el protón es udd , o sea, dos quarks u y uno d ; la del neutrón es udd , es decir, dos quarks d y uno u. [9]

[1] En el modelo estándar no se toma en cuenta a la gravedad y por eso es omitida.
[2] Los bariones y mesones son las dos subdivisiones de un hadrón

Quark, q	Masa (MeV/c^2)	Spin	Carga eléctrica
Up (u)	2.3 ± 0.7 ± 0.5	1/2	2/3
Down (d)	4.8 ± 0.5 ± 0.3	1/2	-1/3
Charm (c)	1275 ± 25	1/2	2/3
Strange (s)	95 ± 5	1/2	-1/3
Top (t)	173210 ± 510 ± 710	1/2	2/3
Bottom (b)	4180 ± 30	1/2	-1/3

Cuadro 2.1: Tabla de características principales de Quarks

2.2. Leptones

Los leptones son otro de los componentes de la materia. Estos no interactuan de la misma manera que lo hacen los quarks ya que la fuerza nuclear fuerte no hace nada en ellos, pero la fuerza nuclear débil y la electromagnética sí y, a diferencia de ellos, los leptones se pueden encontrar en el Universo de manera aislada sin restricciones. Como los quarks, existen tres familias de leptones cargados: el electrón, el muón, y el tauón; y cada uno con su compañero neutro, su neutrino característico.

El electrón es el leptón con el que más se está familiarizado, él interactúa de manera electromagnética, es una partícula estable. Los electrones cuando están acoplados a un átomo, son alojados en distintos orbitales que son asociados con el nivel de energía que tienen. Pueden cambiar de orbital si se les es excitado con la energía necesaria o si se les quita un excedente de energía. A menos de que estén libres, no pueden aceptar cualquier energía. Cuando ellos corren por un conductor los electrones saltan de átomo a átomo, dando como resultado una corriente eléctrica. Se le atribuye el descubrimiento del electrón a J.J. Thomson cuando fue identificado durante el estudio de la conductividad de los gases a bajas presiones. Al estudiar el comportamiento de las partículas en campos eléctricos y magnéticos, se le dio por convención al electrón la polaridad negativa y al protón la polaridad positiva [10]. A partir de los experimentos de Thomson, se encontró una relación entre la masa y la carga del electrón ($5{,}69 \times 10^{-12} kg/C$). Robert Millikan fue quien logró la medición de la carga y la masa del electrón.

Como parte de los leptones cargados se tiene al muón, el cual, no forma parte de

la estructura atómica de la materia, sin embargo, a diferencia del electrón, es inestable.[3] Fue descubierto en 1936 por Carl D. Anderson y Seth Neddermeyer en sus experimentos de cámara de niebla. [12]

Por último los tauónes son los leptones de tercera generación, aún más pesados que los muones. Ellos tienen una masa sumamente mayor que el electrón[4] y es el único que puede decaer a hadrones debido a la gran cantidad de masa. [15]

Leptón	Carga	Carga $\bar{l}$	*Spin*	Masa (MeV/c^2)	Vida media (s)
Electrón (e^-)	-1	+1	1/2	0.511	∞
Muón (μ^-)	-1	+1	1/2	105.65	$2{,}197 \times 10^{-6}$
Tauón (τ^-)	-1	+1	1/2	1776.84 ± 0.17	$2{,}906 \times 10^{-13}$

Cuadro 2.2: Tabla de características principales de Leptones

No obstante, existen otras partículas que no existen por mucho tiempo. Fermi al momento de estudiar sobre decaimientos beta de los neutrones, observó que algo no cuadraba. Por medio de este decaimiento, los neutrones se desintegraban en un protón y un electrón pero ni la energía ni la masa se conservaban a menos que existieran unas partículas pequeñas sin carga; *pequeños neutrones* que posteriormente les llamaría **neutrinos**.[5] [19] Esta partícula se mantendría como una partícula experimental debido a la tecnología de esa época no era muy potente. Sin embargo, en 1956 se encontró al neutrino de manera experimental. [16] [6]
El neutrino electrónico no sólo era el único neutrino que existiría, posteriormente en 1962 y en 2000 se encontró al neutrino muónico[7] [14] y al neutrino tauónico[8] [4] respectivamente.

El motivo del porque se les ha dado un nombre asociado a los leptones es porque acompañan a su leptón correspondiente en las interacciones nucleares débiles.

[3] Debido a que su masa es 200 veces más grande que el electrón, es inestable.

[4] Aproximadamente 3498 veces más grande que la del electrón.

[5] En específico, son los neutrinos electrónicos

[6] Fueron Clyde Cowan y Frederick Reines los que demostraron su existencia en el artículo llamado "El neutrino"

[7] Descubierto por Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger en su experimento en el Alternating Gradient Synchrotron (AGS), el mejor acelerador de partículas de la época

[8] Descubierto en las instalaciones del Fermilab el 21 de Julio

A continuación se muestra una tabla de los neutrinos:

Neutrino	Masa (MeV/c^2)	*Spin*	Carga	Vida media
Neutrino electrónico (ν_e)	$< 0{,}0000022$	1/2	0	Desconocida
Neutrino muónico (ν_μ)	$< 0{,}17$	1/2	0	Desconocida
Neutrino tauónico (ν_τ)	$< 15{,}5$	1/2	0	Desconocida

Cuadro 2.3: Tabla de características principales de Neutrinos

2.3. Bosones

Los bosones son otro tipo de partículas que pueden ser compuestos o fundamentales. La diferencia principal entre los bosones y los demás fermiones (los quarks y leptones) es que el *spin* de la partícula es entero en lugar del *spin* fraccionario de los fermiones. No obstante, los bosones pueden tener los números cuánticos iguales entre sí en un sistema cuántico, cosa que no pueden hacer los fermiones debido a que ellos siguen el principio de exclusión de Pauli. Por último, los bosones siguen la estadística de Bose-Einstein (es debido ésta estadística que obtuvieron ese nombre). En la física de altas energías, se dice que los bosones de *gauge* son encargados de portar la información de las fuerzas elementales del universo: el electromagnetismo, las fuerzas nucleares fuerte y débil, y la gravedad.

Por parte del electromagnetismo, el bosón de interacción es el **fotón**. El fotón vendría siendo el bosón que el humano está más familiarizado. Es el cuanto de energía luminosa más pequeña que hay, no tiene masa ni carga y viaja a la velocidad de la luz. Se pensaba que los fotones eran partículas, Isaac Newton fue quien propuso esta teoría corpuscular, sin embargo, científicos como Hooke estaban más inclinados por una teoría ondulatoria. Por siglos se tomaba al fotón como una onda pero fue Albert Einstein quien retomó la teoría corpuscular de la luz como cuantos resolviendo algunos problemas que la teoría ondulatoria no podría responder, como el efecto fotoeléctrico[9]. Posteriormente se deduciría que el fotón y las partículas seguirían

[9]Basado en la proposición de Planck para resolver la catástrofe UV de la radiación de cuerpo negro

una naturaleza dual onda-partícula. La energía del fotón depende únicamente de la frecuencia a la que oscila (o de la longitud de onda).

Los fotones se encargan de las interacciones entre partículas cargadas; por ejemplo, cuando el electrón puede ser excitado si se le incide con un fotón con energía suficiente para llevarlo al siguiente estado energético. De la misma manera, cuando el electrón es "desexcitado", éste emite un fotón. Por último, la creación de un par electrón-positrón es dada por un fotón que tenga la energía equivalente a las masas de los dos mencionados anteriormente.

Por parte de la fuerza nuclear fuerte, el bosón de interacción es el **gluón**. Una partícula que posee carga de color. Esto es clave ya que es responsable de la interacción fuerte. El gluón es la partícula que se encarga de que los quarks estén "pegados"(de ahí viene el nombre, glue, glu-on). Los quarks al cambiar de carga de color, emiten un gluón de carga del color que eran más el anticolor que serán. De este modo, la combinación de ambas partículas es de color blanco y es por ello que hay ocho tipos de gluones.

Por parte de la interacción nuclear débil se tienen a los bosones $\mathbf{Z^0}$ y $\mathbf{W^{\pm}}$. Ellos a diferencia del fotón y del gluón, sí poseen masa, pero mucha masa de tal modo que son inestables y, al menos el bosón $\mathbf{W^{\pm}}$, tiene carga eléctrica.

Por último, se tiene al **bosón de Higgs**. Éste bosón no es de *gauge* lo cual indica que no está a cargo de ningún tipo de fuerza fundamental, pero es importante ya que otorga masa a las partículas debido a la interacción con un campo que cubre a todo el espacio llamado "campo de Higgs". Obtuvo ese nombre en honor a Peter Higgs por la propuesta del mecanismo de Higgs que justifica la masa de los bosones Z^0 y $W^{\pm}$ [13].

A continuación se muestra una tabla de las características generales de los bosones:

Bosón	Masa (GeV/c^2)	*Spin*	Carga	Vida media
Fotón (γ)	0	1	0	∞
Gluón (g)	0	1	0	Desconocida
Bosón W^+	80.401	1	$\pm$ 1	1 $\times 10^{-25}$
Bosón Z^0	91.187	1	0	1 $\times 10^{-25}$
Bosón de Higgs (H)	125.3	0	0	1.56 $\times 10^{-22}$

Cuadro 2.4: Tabla de características generales de Bosones