



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 27 de Julio de 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

NEIVA

La suscrita:

Silvia Lucia Correa Angel, con C.C. No. 1.080.188.203 de Gigante, autora de la tesis y/o trabajo de grado titulado Oscilaciones de Neutrinos: Un Análisis Cualitativo, presentado y aprobado en el año 2022 como requisito para optar al título de Física;

Autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con sólo fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Silvia Lucia Correa Angel

Firma: *Silvia Lucia Correa Angel*



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Oscilaciones de Neutrinos : un Análisis Cualitativo

**AUTOR O AUTORES:** Silvia Lucia Correa Angel.

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CORREA ANGEL	SILVIA LUCIA

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GONZALEZ SIERRA	HERNANDO

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GONZALEZ SIERRA	HERNANDO

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** FÍSICA

**FACULTAD:** CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

**PROGRAMA O POSGRADO:** FÍSICA

**CIUDAD:** NEIVA

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2022

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 40

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas  Fotografías\_\_ Grabaciones en discos\_\_ Ilustraciones en general  Grabados\_\_ Láminas\_\_  
Litografías\_\_ Mapas\_\_ Música impresa\_\_ Planos\_\_ Retratos\_\_ Sin ilustraciones\_\_ Tablas o Cuadros

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: PDF

**MATERIAL ANEXO:** Carta de admision a postgrado en fisica de carácter internacional y certificado de participacion en congreso nacional / internacional como ponente.



PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): N/A

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español	Inglés	Español	Inglés
1. Neutrinos	Neutrinos	5. Sabor	Flavor
2. Masa del neutrino	Neutrino masses	6. Majorana	Majorana
3. Oscilaciones de neutrinos	Neutrino oscillations	7. Dirac	Dirac
4. Leptón	Lepton	8. Mecánica cuántica	Quantum mechanics

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

Uno de los mayores enigmas de la física contemporánea está relacionado con la física de los neutrinos. Dentro del modelo estándar de la física de partículas elementales, a los neutrinos se les asigna de manera arbitraria una masa de valor cero, mientras que a las otras partículas se les asigna masa a través del mecanismo de Higgs. Sin embargo, la idea de la existencia de masa en los neutrinos aparece como una hipótesis teórica que posteriormente se comprueba de manera experimental a través de las oscilaciones de neutrinos, un fenómeno puramente cuántico que consiste en la posibilidad de que un neutrino de un determinado sabor se transforme u oscile para otro sabor. Esta discrepancia entre teoría y experimento es considerada por toda la comunidad científica internacional como uno de los mayores problemas de la física de altas energías y su solución sería de enorme impacto no solo para la física de partículas, si no en diversas áreas como la cosmología, astrofísica, materia condensada, etc.

Teniendo en cuenta la enorme relevancia del tópico a abordar, en el presente trabajo de grado se hace una recopilación histórica y conceptual del estudio sujeto a los neutrinos, desde su teorización por Wolfgang Pauli hasta la actualidad, pues de dicho fenómeno surgen diversas incógnitas aún sin resolver, tales como la jerarquía de masas tanto en quarks como en leptones, la violación de la simetría CP y las oscilaciones de neutrinos en presencia de materia. Además de la revisión histórica, se discuten los diversos experimentos de neutrinos cronológicamente relevantes así como aquellos que se encuentran en actual funcionamiento. También se discuten diversas propuestas teóricas que posiblemente solucionan el problema de la masa de los neutrinos y sus impactos en los fenómenos de oscilación, así como algunas consecuencias en la llamada física de frontera.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

One of the greatest enigmas of contemporary physics is related to neutrino physics. Within the standard model of elementary particle physics, neutrinos are arbitrarily assigned a zero-valued mass, while other particles are assigned mass through the Higgs mechanism. However, the idea of the existence of mass in neutrinos appears as a theoretical hypothesis that is later experimentally verified through neutrino oscillations, a purely quantum phenomenon that consists in the possibility that a neutrino of a certain flavor transforms or oscillates to another flavor. This discrepancy between theory and experiment is considered by the entire international scientific community as one of the major problems of high-energy physics and its solution would have an enormous impact not only for particle physics, but also in several areas such as cosmology, astrophysics, condensed matter, etc.

Taking into account the enormous relevance of the topic to be addressed, in this degree work a historical and conceptual compilation of the study subject to neutrinos is made, from its theorization by Wolfgang Pauli to present, since several unsolved questions arise from this phenomenon, such as the hierarchy of masses in both quarks and leptons, the violation of CP symmetry and neutrino oscillations in the presence of matter. In addition to the historical review, the various chronologically relevant neutrino experiments as well as those currently in operation are discussed. Several theoretical proposals that possibly solve the neutrino mass problem and its impacts on the oscillation phenomena are also discussed, as well as some consequences in the so-called frontier physics.

**ANEXO : ACTA DE SUSTENTACION TESIS DE GRADO FORMATO pag 4.**



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE FÍSICA.

ACTA DE SUSTENTACIÓN TESIS DE GRADO

Ante el jurado evaluador, y el Jefe de Programa de Física, con participación de estudiantes, docentes e invitados, se hizo presente en el salón 220, el día quince (15) del mes de Junio de 2022, a las 2:00 p.m., la estudiante **SILVIA LUCIA CORREA ÁNGEL**, identificada con la cédula de ciudadanía No **1.080.188.203** de Gigante y código estudiantil: **20141124593** con el propósito de presentar y sustentar el trabajo de grado: "Oscilaciones de Neutrinos: un análisis cualitativo" bajo la dirección del docente **Hernando Gonzales Sierra**. Actuando como jurados, los docentes **Diego Alejandro Rasero Causil** y **Pedro Mario Cañate Casseres**, adscritos a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Surcolombiana.

La estudiante presentó una ilustración ante el Comité evaluador y asistentes, sobre la actividad realizada en este proyecto de grado y, entre otros, sobre los siguientes aspectos: Introducción, Planteamiento del Problema, Pregunta de Investigación, Área de Estudio, Objetivo General, Marco Teórico, Metodología, Resultados y Conclusiones.

Los jurados y asistentes realizaron algunas preguntas al tesista, las cuales respondió satisfactoriamente y el jurado otorgó al trabajo de grado la calificación de **Aprobado**.

*Diego A. Rasero C.*

Mag. **DIÉGO ALEJANDRO RASERO CAUSIL**  
Jurado

*Pedro Mario Cañate Casseres*

Dr. **PEDRO MARIO CAÑATE CASSERES**  
Jurado

*Gonzalo Edgardo Pedraza G.*

Mag. **GONZALO EDGARDO PEDRAZA G.**  
Jefe de Programa de Física



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**  
**PROGRAMA DE FÍSICA**



---

**Oscilaciones de Neutrinos: Un Estudio Cualitativo**

---

Trabajo de Grado para optar al título de Físico(a)

**Desarrollado por:** Silvia Lucia Correa Ángel

**Código:** 20141124593

**Firma:** Silvia Lucia Correa Angel

**Director:** Ph.D. Hernando Gonzalez Sierra

**Firma:** Hernando Gonzalez

**Área:** Física de altas energías

Neiva-Huila  
26 de julio de 2022

# Dedicatoria

A mi familia y amigos, por su amor y apoyo incondicional en el largo y estrecho camino.

*"Ars longa, vita brevis"* , Hipócrates

# Agradecimientos

No es posible prosperar fácilmente en la vida sin el cariño de la familia. A mis padres y hermanos, quienes nunca han dejado de creer en mi incluso cuando yo no lo hago. Gracias por su compañía, sus abrazos y soporte, especialmente en los días más difíciles.

Al profesor Hernando, por su asesoría durante el desarrollo del trabajo de grado, los libros compartidos y sus constantes observaciones con el objetivo de formar una mejor profesional.

Al profesor Miguel, por su apoyo incondicional y su cariño a lo largo del pregrado.

A los profesores Francis, Diego y Carlos por su excelente calidad humana, inmejorable labor docente y su exigencia en aras de formar profesionales de calidad.

A Mauricio por su invaluable y genuina amistad. Gracias por el cariño y soporte a lo largo de los años.

Al profesor Pedro por su valiosa orientación.

A mis amigos, en especial a Ángel, Alejandro, Cristian, Michelle y Sebastian, por su compañía durante las diferentes etapas de mi vida.

A todo aquel que haya contribuido en mi vida, gracias por estar presente.

Finalmente agradezco a la Universidad Surcolombiana, en especial al cuerpo directivo de la facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por el apoyo y servicio a lo largo de la carrera.

# Declaración

Me permito declarar que he realizado el presente trabajo de grado de manera autónoma y con la ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en el propio trabajo. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de artículos publicados y no publicados, libros y revistas, los he reconocido en el presente trabajo.  
Neiva, Colombia

Silvia Lucia Correa Angel

**Silvia Lucia Correa Angel**

**Cédula:** 1.080.188.203 de Gigante

# Abstract

One of the greatest enigmas of contemporary physics is related to neutrino physics. Within the standard model of elementary particle physics, neutrinos are arbitrarily assigned a zero-valued mass, while other particles are assigned mass through the Higgs mechanism. However, the idea of the existence of mass in neutrinos appears as a theoretical hypothesis that is later experimentally verified through neutrino oscillations, a purely quantum phenomenon that consists in the possibility that a neutrino of a certain flavor transforms or oscillates to another flavor.

This discrepancy between theory and experiment is considered by the entire international scientific community as one of the major problems of high-energy physics and its solution would have an enormous impact not only for particle physics, but also in several areas such as cosmology, astrophysics, condensed matter, etc.

Taking into account the enormous relevance of the topic to be addressed, in this degree work a historical and conceptual compilation of the study subject to neutrinos is made, from its theorization by Wolfgang Pauli to present, since several unsolved questions arise from this phenomenon, such as the hierarchy of masses in both quarks and leptons, the violation of CP symmetry and neutrino oscillations in the presence of matter. In addition to the historical review, the various chronologically relevant neutrino experiments as well as those currently in operation are discussed. Several theoretical proposals that possibly solve the neutrino mass problem and its impacts on the oscillation phenomena are also discussed, as well as some consequences in the so-called frontier physics .

**Keywords:** *Neutrinos, Neutrino Mass, Neutrino Oscillations, Lepton, Flavor, Majorana, Dirac, Quantum Mechanics.*

# Resumen

Uno de los mayores enigmas de la física contemporánea está relacionado con la física de los neutrinos. Dentro del modelo estándar de la física de partículas elementales, a los neutrinos se les asigna de manera arbitraria una masa de valor cero, mientras que a las otras partículas se les asigna masa a través del mecanismo de Higgs. Sin embargo, la idea de la existencia de masa en los neutrinos aparece como una hipótesis teórica que posteriormente se comprueba de manera experimental a través de las oscilaciones de neutrinos, un fenómeno puramente cuántico que consiste en la posibilidad de que un neutrino de un determinado sabor se transforme u oscile para otro sabor.

Esta discrepancia entre teoría y experimento es considerada por toda la comunidad científica internacional como uno de los mayores problemas de la física de altas energías y su solución sería de enorme impacto no solo para la física de partículas, si no en diversas áreas como la cosmología, astrofísica, materia condensada, etc.

Teniendo en cuenta la enorme relevancia del tópico a abordar, en el presente trabajo de grado se hace una recopilación histórica y conceptual del estudio sujeto a los neutrinos, desde su teorización por Wolfgang Pauli hasta la actualidad, pues de dicho fenómeno surgen diversas incógnitas aún sin resolver, tales como la jerarquía de masas tanto en quarks como en leptones, la violación de la simetría CP y las oscilaciones de neutrinos en presencia de materia. Además de la revisión histórica, se discuten los diversos experimentos de neutrinos cronológicamente relevantes así como aquellos que se encuentran en actual funcionamiento. También se discuten diversas propuestas teóricas que posiblemente solucionan el problema de la masa de los neutrinos y sus impactos en los fenómenos de oscilación, así como algunas consecuencias en la llamada física de frontera.

**Palabras clave:** *Neutrinos, Masa del Neutrino, Oscilaciones de Neutrinos, Leptón, Sabor, Majorana, Dirac, Mecánica Cuántica.*

# Índice General

Abstract	v
Resumen	vi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>4</b>
2.1. Objetivos . . . . .	4
2.1.1. Objetivo general . . . . .	4
2.1.2. Objetivos específicos . . . . .	4
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
3.1. Neutrinos y la interacción débil . . . . .	5
3.2. Modelo Estándar de las partículas elementales . . . . .	9
3.3. Fermiones relativistas y el fenómeno de oscilación . . . . .	15
3.4. Estudio experimental de las oscilaciones de neutrinos . . . . .	17
3.5. Masa de neutrinos . . . . .	21
3.6. Neutrino como prueba de nueva física . . . . .	24
<b>4. Conclusiones</b>	<b>32</b>
<b>5. Productos</b>	<b>33</b>
5.1. Participación en modalidad de ponencia oral en congreso nacional o internacional . . . . .	33
5.2. Carta de admisión a posgrado en física . . . . .	34
<b>6. Anexo I</b>	<b>35</b>
6.1. Mezcla de dos sabores . . . . .	35

# Índice de Figuras

3.1. Ilustración de partículas en el modelo estándar con sus respectivas masas y cargas. . . . .	11
3.2. Probabilidad de reacción. [24] . . . . .	19
3.3. Discrepancia de resultados experimentales de la medición de masa del boson W [54] . . . . .	30
6.1. Oscilaciones de neutrinos observadas desde el KamLAND.Las oscilaciones de neutrinos como $L/E$ demuestra la interferencia entre los diferentes eigenestados de las masa de los neutrinos . . . . .	36

# Índice de Tablas

3.1. Distribución de leptones en función de sus familias. . . . .	11
3.2. Distribución de quarks en función de sus familias. . . . .	11
3.3. Distribución de leptones en función de su multiplicidad y familia. . . . .	12
3.4. Distribución de quarks en función de su multiplicidad y familia. . . . .	12



# Capítulo 1

## Introducción

El Modelo Estándar (ME)<sup>1</sup> de la física de las partículas elementales, formulado originalmente por Gell-Mann, Weinberg, Glashow y Salam[1][2][3], es una teoría cuántica de campos que se destaca por ser uno de los esquemas teóricos más exitosos de la física, pues ha conseguido explicar tres de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza.<sup>2</sup> Su éxito se debe a que ha logrado superar casi todas las pruebas experimentales,<sup>3</sup> además de predecir nuevos fenómenos que posteriormente fueron confirmados. Una de las características más importantes del ME es que al exigir que la teoría sea invariante por transformaciones de norma locales<sup>4</sup>, es necesario introducir nuevos campos que mantengan dichas transformaciones de simetría y como consecuencia, estos mediarán las interacciones entre las diferentes partículas. Por otra parte y como se discute más adelante, el ME permite caracterizar las propiedades de estas partículas portadoras de las interacciones fundamentales y los constituyentes básicos de la materia, siendo estos últimos los quarks y leptones, los cuales actualmente se clasifican en tres familias que se distinguen por su jerarquía de masa. Los leptones pueden tener carga eléctrica, siendo el electrón el más conocido, o de carga neutra como los neutrinos, los cuales son el objeto principal de estudio de este trabajo. Los neutrinos, según el ME, solo interactúan a través de la interacción nuclear débil y tienen la particular característica de no poseer masa. Sin embargo, esta característica es incompatible con los datos obtenidos en experimentos de gran precisión, pues estos han arrojado resultados que vislumbran un raro fenómeno de la naturaleza conocido como “oscilaciones de neutrinos”, lo que significa que éstos, al salir de la fuente, son capaces de cambiar de sabor leptónico<sup>5</sup> durante su trayecto hasta su detección. Para que este hecho sea posible, los neutrinos deben ser masivos, cuestión que contradice a la teoría establecida en el ME.

El universo, según la evidencia experimental [4] y de acuerdo a la teoría de la relatividad

---

<sup>1</sup>En algunos textos se le representa como SM *Standard Model* por sus siglas en inglés.

<sup>2</sup>Al no existir una teoría cuántica de la gravedad, la interacción gravitatoria no se encuentra dentro del ME.

<sup>3</sup>En el presente trabajo se discutirán las discrepancias de los resultados teóricos respecto a los experimentales.

<sup>4</sup>También llamada invarianza de Gauge

<sup>5</sup>El sabor leptónico es una propiedad presente en los 6 tipos de leptones y es representada por el número cuántico leptónico que se conserva durante las interacciones fuertes y electromagnéticas, pero no en las interacciones débiles, hecho probado en la oscilación de los neutrinos

general, está conformado por alrededor de un 70 % de energía oscura, un 26 % de materia oscura y tan solo de un 4 % de materia ordinaria. Dicha materia ordinaria es perfectamente descrita por el ME. Sin embargo, a pesar de su gran éxito fenomenológico, no es posible considerarlo como una teoría completa, pues diversos resultados arrojados por experimentos durante los últimos años han sido incompatibles con la teoría y ha obligado a los físicos a desarrollar extensiones del ME que logren explicar dichas discrepancias. Se requiere un marco teórico más completo que explique el origen y naturaleza de la masa de los neutrinos, un mecanismo que explique la asimetría materia – antimateria en el Universo, la cuantización de la gravedad, la naturaleza de la materia oscura, entre otros fenómenos no abordados o explicados por el ME.

Luego de introducir brevemente la importancia del estudio de la naturaleza de los neutrinos, el problema de sus masas y su relación con las oscilaciones, el presente trabajo se focaliza en este último tópico, pues la existencia de neutrinos masivos implica una fuerte y contundente discrepancia con el ME, apuntando claramente a señales de nueva física que traería grandes consecuencias en otros tópicos de física de frontera. Al ser un tema de enorme impacto en la comunidad científica, este trabajo recopila la información disponible acerca de la naturaleza de los neutrinos, donde posteriormente se discutirán experimentos y algunas propuestas teóricas que resuelven el problema de sus masas, los impactos que tienen en las oscilaciones de neutrinos y en la llamada nueva física, tales como la naturaleza de la materia oscura, la desintegración doble beta sin neutrinos, la asimetría materia antimateria, entre otros.

De esta manera, el trabajo está organizado de acuerdo a la siguiente manera:

En el Capítulo 2 son presentados los objetivos que se alcanzaron durante el desarrollo del presente trabajo de grado. El Capítulo 3 hace énfasis al desarrollo histórico, teórico y conceptual de las cuestiones más importantes de los neutrinos, particularmente en la Sección 3.1, donde se realiza una introducción a la historia de los neutrino, desde su teorización por parte del Wolfgang Pauli hasta su posterior detección. Adicionalmente se incluyen puntualmente en orden cronológico algunos de los acontecimientos más relevantes que han sido pieza clave para la comprensión del estudio de los neutrinos. En la Sección 3.2 se hace una breve reseña teórica del ME y las características de sus interacciones y partículas elementales; adicionalmente se expone la manera como los neutrinos encajaban en el ME hasta antes de las pruebas fehacientes de la existencia de su masa y su naturaleza. En la Sección 3.3 se enuncia el carácter formal que envuelve la fenomenología de los neutrinos y sus cambios de sabor. También se incluye la matriz que describe la probabilidad de que un neutrino cambie de un sabor a otro, conocida como matriz de mezcla  $U_{PMNS}$  (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata). En la Sección 3.4 se recopila de forma breve pero consistente, la información de los diferentes experimentos que han sido pieza clave para la confirmación de la masa del neutrino y el fenómeno de oscilación. En la Sección 3.5 se exponen algunas de las extensiones del ME que logran explicar mecanismos de generación de masa para los neutrinos, siendo el mas conocido el mecanismo seesaw tipo I. La Sección 3.6 contiene información sobre los enigmas sin resolver por el ME y el impacto que los neutrinos podrían tener sobre cuestiones relacionadas con la materia oscura, los neutrinos provenientes de los agujeros negros, la desintegración beta doble

sin neutrinos, entre otras, exhibiendo así la importancia entre los neutrinos y la física de altas energías del futuro. Finalmente, para el último capítulo se plantean las conclusiones acerca de la importancia del neutrino en diferentes ramas de la física y las cuestiones que están por resolverse a partir de datos que podrían arrojarse en experimentos en actual funcionamiento.

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Objetivos

#### 2.1.1. Objetivo general

- Elaborar una revisión de tipo teórica y experimental acerca del estado actual del fenómeno de las oscilaciones de neutrinos.

#### 2.1.2. Objetivos específicos

- Revisar los avances y perspectivas actuales para explicar la masa de los neutrinos y sus cambios de sabor.
- Analizar los mecanismos de generación de masa que podrían explicar la existencia de los neutrinos masivos.
- Detallar los futuros experimentos de oscilaciones de neutrinos por desarrollar y las implicaciones de sus resultados frente a las extensiones del modelo estándar que podrían significar nueva física.

# Capítulo 3

## Marco Teórico

### 3.1. Neutrinos y la interacción débil

El neutrino es una partícula fundamental fermiónica<sup>1</sup> de espín 1/2 y de carga eléctrica nula [5]. Hace parte del contenido de partículas fundamentales del ME y se caracteriza por tener muy poca masa en reposo, siendo capaz de interactuar únicamente a través de la interacción nuclear débil [6][7], propiedad que la hace diferente a los leptones eléctricamente cargados (electrón, muón y tau) y los quarks (up, down, charm, strange, top, bottom) del ME. El tener poca masa y ser eléctricamente neutros hacen a los neutrinos extremadamente difíciles de detectar y como consecuencia de ello, son los perfectos mensajeros del universo pues son capaces de recorrer enormes distancias y atravesar grandes cantidades de materia sin apenas interactuar con ella[1][8].

La existencia de esta partícula fue propuesta en 1930 por Wolfgang Pauli para tratar de explicar y compensar la aparente violación de la conservación de la energía en la desintegración  $\beta^-$  de los neutrones. El proceso es descrito por la siguiente ecuación:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (3.1)$$

donde un neutrón se transforma en un protón, emitiendo en el proceso un electrón y un antineutrino electrónico<sup>2</sup>[9]. Según Pauli, en el núcleo de los átomos debería existir una nueva partícula eléctricamente neutra, de espín 1/2 y de interacción muy débil que se produciría junto al electrón en la desintegración beta. Él llamaría a esa partícula como “neutrón”, cuya masa inicialmente la consideraría de una orden menor o igual a la masa de electrón y no más grande que 0.01 veces la masa del protón ya que sería extremadamente evasiva y como consecuencia no era detectada por los experimentos. Sin embargo, el posterior descubrimiento del verdadero neutrón traería problemas a esta hipótesis.

Para Geiger, la solución propuesta por Pauli para compensar el balance energético de acuerdo a la equivalencia masa-energía de Einstein en la desintegración  $\beta^-$  podría funcionar. Sin embargo, su entusiasmo disminuyó cuando notaron que las masas nucleares

---

<sup>1</sup>Partículas con espín fraccionario son conocidas como fermiones y partículas con espín entero son llamadas bosones.

<sup>2</sup>En la ecuación se ha introducido al antineutrino para representar el proceso en una notación moderna. Sin embargo hasta esa fecha no era conocido la existencia del neutrino ni su antipartícula.

de los átomos necesitaban de una partícula neutra cuya masa fuera igual o al menos muy cercana a la del protón, lejos de la diminuta masa de una nueva partícula propuesta por Pauli para el decaimiento beta.

Justo un año después, luego de un encuentro con Fermi donde se discutió acerca de esta posible solución para el equilibrio energético, Chadwick descubre la existencia del neutrón en el núcleo con una masa del orden de la masa del protón. Este hallazgo significó que Pauli tenía razón acerca de la existencia del neutrón en el núcleo, pero a su vez, éste estaba equivocado acerca del resultado de la desintegración beta, pues para que su explicación fuera físicamente válida, en el estado final debería coexistir, junto con el electrón y el protón, una partícula eléctricamente neutra de masa ligera o nula. Pauli abandonó el término de neutrón, pero no de su hipótesis, y junto con Enrico Fermi decidieron llamar a la partícula producto de la reacción como "neutrino" que, en italiano, significa "pequeño neutrón".

A pesar de las hipótesis, muchos físicos de la época no creían en la existencia real del neutrino, pues argumentaban que este siendo libre, debería ser absorbido por algo, bien chocando o al menos afectando la materia y de esta manera revelando su propia naturaleza. Para Fermi, una forma de hacerlo era imaginar que si el neutrino chocaba con un neutrón, podría convertirlo en un protón y un electrón, es decir, el proceso inverso de una desintegración beta [10]. Con la idea de Fermi y los datos experimentales arrojados por las desintegraciones beta en varios elementos, Bethe y Pierls se dieron a la tarea de calcular la probabilidad con la que un neutrino interactuaría con la materia y concluyeron que la probabilidad era minúscula. Un neutrino podría perfectamente atravesar la tierra sin interrupción de ningún tipo.

Hasta ese entonces se pensaba que era imposible detectarlo debido a la creencia de su masa nula, y no fue hasta cuando el italiano Bruno Pontecorvo comenzó a idear la forma de hacerlo, pues para él, una probabilidad minúscula no es lo mismo que nula. Debido a que éste estaba llevando a cabo experimentos en un laboratorio de física nuclear, no tardó en notar que un reactor de uranio debería producir millones de neutrinos, solo necesitaba idear cómo capturarlos. Para esto, partió de la hipótesis de Fermi que afirmaba que cuando un neutrino choca con un núcleo atómico, este debería desaparecer, adquiriendo carga eléctrica y convirtiéndose luego en un electrón. Sin embargo, dado que el electrón se encuentra en todas partes, sería difícil determinar cuál de estos fue el producto de una reacción de este tipo. La segunda suposición de la hipótesis de Fermi decía que, si un neutrino chocaba con la materia, la aparición de un electrón con carga negativa sería contrarrestada por un incremento de la carga positiva del núcleo atómico receptor del impacto. Esto significaba que, si se incrementaba la carga positiva en una unidad en el núcleo, este podría atraer al electrón con carga negativa y el resultado de esto, sería la aparición de un átomo de otro elemento inmediatamente siguiente en la tabla periódica.

Tomando en cuenta la segunda suposición, Pontecorvo imagino que, si el átomo empleado era radiactivo, podría detectarse durante su desintegración. Su brillante idea fue idear un experimento que consistiera en un gran tanque de cloro por su bajo costo y una vez, los neutrinos chocaran con el núcleo, este átomo se convertiría en uno de argón, el cual

es un elemento radioactivo y que luego de su desintegración, sería capaz de emitir una radiación rastreable con los equipos adecuados. Ray Davis encontró el artículo del experimento y este, con conocimientos previos en radioquímica, pensó que era demasiado fácil de comprobar para ser verdad. El problema llegó cuando al llevarlo a cabo, no obtuvo más que las consecuencias de los rayos cósmicos. Lo que ignoraba de esos resultados, es que las reacciones nucleares no estaban produciendo neutrinos, sino antineutrinos, su antipartícula. A pesar de que esto parecía temporalmente como un fracaso, realmente fue la demostración de que el neutrino y su antipartícula eran diferentes<sup>3</sup> y de esta manera, la confirmación de su existencia quedaría por fin realizada y ya era solo cuestión de tiempo estudiar sus propiedades y sus interacciones con otras partículas, para posteriormente ser una pieza importante dentro del mejor marco teórico de toda la física: el modelo estándar de las interacciones fundamentales [11].

Los detalles fenomenológicos de los experimentos más importantes sobre el neutrino y su naturaleza serán discutidos con más detalle en la Sección 3.4. Finalmente para concluir esta sección sobre el neutrino, a continuación serán comentados los eventos históricos más relevantes relacionados con los neutrinos. Algunos de ellos fueron comentados durante esta sección y algunos otros serán explorados en secciones posteriores.

- **1930** W. Pauli sugiere la existencia del neutrino para dar solución al problema de la desintegración  $\beta$ .
- **1933-1934** Enrico Fermi propone la primera teoría para la desintegración  $\beta$  donde un neutrón era transformado en un protón con la emisión de un par electrón-neutrino.
- **1946** Bruno Pontecorvo propone el primer método de detección de neutrinos a través de un método de detección radioquímico:  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ .
- **1956-1959** Reines y Cowen descubren el antineutrino usando un reactor nuclear.
- **1957** La física nuclear Chien-Shiung Wu, usando  ${}^{60}\text{Co}$ , descubre la violación de la paridad en las desintegraciones  $\beta$ . Inmediatamente después Lee y Yang reciben el premio nobel de física por sus investigaciones teóricas sobre los experimentos de Wu y la violación de la paridad en las interacciones débiles.
- **1957-1958** Landau, Lee, Yang y Salam proponen una quiralidad definida para el neutrino: el neutrino es de mano izquierda y el antineutrino de mano derecha. Experimentos posteriores hechos por Goldhaber, Grodzins y Sunyar confirman experimentalmente esta hipótesis.
- **1958** Bruno Pontecorvo sugiere que los neutrinos pueden tener poca masa, el número leptónico es violado y presentan oscilaciones similares a los Kaones

---

<sup>3</sup>A principio ésta información no es completamente verdadera. Más adelante se discutirá la naturaleza del neutrino, pues al ser eléctricamente neutro, abre la posibilidad de que sea su propia antipartícula.

- **1962** Para explicar los resultados del Brookhaven National Accelerator Laboratory se propone un segundo neutrino: el neutrino muónico. Inmediatamente después Maki, Nakagawa y Sakata consideran la mezcla de estos dos tipos de neutrinos, asumiendo que ellos se pueden representar como una combinación lineal de autoestados de masa.
- **1965** Ocurre la primera detección de neutrinos atmosféricos.
- **1967** Glashow, Weinberg y Salam proponen una teoría unificadora de las interacciones débiles y electromagnéticas (electrodébiles) llamado Modelo Estándar.
- **1962** Fueron detectados neutrinos provenientes del Sol a través de la reacción propuesta por Pontecorvo en el año 1946. Los datos observados mostraban que el número de neutrinos provenientes del Sol era diferente al predicho por el Modelo Estándar. Este problema fue conocido como el problema de los neutrinos solares.
- **1987** Neutrinos de la supernova SN1987 de la Gran Nube de Magallanes fueron detectados por los detectores Kamiokande, IMB y Baksan.
- **1988** Neutrinos solares fueron detectados por el Kamiokande, confirmando el problema de los neutrinos solares.
- **1988** Lederman, Schwartz y Steinberg reciben el premio nobel de física por el descubrimiento del neutrino muónico, teorizado años atrás.
- **1991** GALEX y SAGE observan la misma anomalía con los neutrinos solares en el cual el flujo de neutrinos era al menos dos veces menos del predicho por el modelo estándar.
- **1998** El experimento Super-Kamiokande registra la primera evidencia de oscilaciones de neutrinos midiendo la diferencia cuadrada de masa entre dos neutrinos  $\Delta m_{23}^2 \approx 2,5 \times 10^{-3} eV^2$ .
- **2000** Es detectado por el FERMILAB la primera evidencia de un tercer sabor de neutrino, el neutrino tauónico.
- **2002** El experimento SNO resuelve el problema de neutrinos solares: El número total de neutrinos detectados en la Tierra provenientes del Sol es el mismo predicho por el modelo estándar. Son detectados un número de neutrinos electrónicos diferente a los del Sol debido a que en su trayecto éstos cambian de sabor gracias a la oscilación de neutrinos.
- **2002** El reactor experimental KamLAND realiza, a través de las oscilaciones de neutrinos, la segunda medición de la diferencia cuadrada de masa  $\Delta m_{12}^2 \approx 8 \times 10^{-5} eV^2$ .
- **2004** El experimento K2K confirma los datos obtenidos por el Super-Kamiokande.
- **2006** El experimento MINOS confirma los datos obtenidos por el Super-Kamiokande.

- **2010-2012** El experimento T2K proporciona la primera indicación de un valor no nulo para el ángulo de mezcla  $\theta_{13}$ . Dos años después los experimentos Daya Bay, RENO y Double Chooz determinan su valor.
- **2015** El premio nobel de física es otorgado a Takaaki Kajita y Arthur McDonald por el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos que demuestran que los neutrinos tienen masa.
- **2017** Comienza la construcción de DUNE, un experimento que busca señales del decaimiento del protón, formación de estrellas de neutrones y agujeros negros a través de la detección de neutrinos.
- **2020** Son detectados neutrinos solares provenientes de un proceso de fusión nuclear conocido como ciclo CNO. Es un proceso extremadamente raro a través del cual las estrellas convierten hidrógeno en helio. Fue teorizado durante mucho tiempo y se confirma gracias a los neutrinos.

Como se pudo observar, el estudio de los neutrinos a través de la historia se ha mantenido y se mantendrá como un tópico de gran interés y popularidad en la comunidad internacional de física debido a que está relacionado directamente con la formación, estructura y evolución del Universo y puede ayudar a develar directa e indirectamente otros misterios como la asimetría materia-antimateria, la naturaleza de la materia oscura, nuevas interacciones fundamentales de la naturaleza, etc. Para continuar con la discusión conceptual sobre el neutrino, a continuación, se aborda brevemente el marco teórico con el que se trabaja en física de partículas, el llamado Modelo Estándar de las Partículas Elementales.

## 3.2. Modelo Estándar de las partículas elementales

Luego de la revisión histórica y conceptual acerca del origen del neutrino a través de las interacciones débiles, ahora se introducen los principales conceptos del ME referente a los neutrinos. El ME es un marco teórico que logra explicar con una excelente precisión experimental tres de las cuatro interacciones presentes en la naturaleza, además de que consigue predecir nuevos fenómenos que han sido todos comprobados. Dicho modelo es concebido como una teoría cuántica relativista de campos a la cual se le exige ciertas simetrías que reproducen toda la fenomenología de las interacciones fundamentales [5][12].

Históricamente, el uso de la teoría cuántica de campos para describir la fenomenología de las partículas elementales no era suficiente debido a que las partículas seguían reglas cuánticas muy específicas. Los físicos notaron que era necesaria la ayuda de herramientas matemáticas más complejas que satisficieran estas exigencias a través de transformaciones de simetría muy específicas. Esta necesidad fue entonces resuelta usando, además de las poderosas herramientas de la teoría cuántica de campos, ciertas transformaciones de simetría de la ya conocida teoría de grupos. Así pues, el exitoso aparato matemático del ME está basado en el grupo de simetría local  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  donde C es para carga de color, L refiriéndose a *Left-Handed* o de mano izquierda y Y para la hipercarga débil. Estas etiquetas son escogidas para diferenciar los grupos de simetría y

sus respectivas teorías físicas.

El grupo  $SU(3)_C$  es el grupo que reproduce la fenomenología de las interacciones nucleares fuertes a través de la cromodinámica cuántica, la cual es la teoría física encargada de explicar el motivo por el que los nucleones permanecen juntos dentro del núcleo atómico, o cómo los quarks permanecen de la misma manera dentro de los hadrones<sup>4</sup>, venciendo la repulsión electromagnética. Dicha teoría tiene como pilar dos importantes cuestiones: la libertad asintótica y el confinamiento de la carga de color. La primera explica el porqué, a distancias cortas del orden de longitud de Planck, los quarks dentro de los hadrones parecen estar libres, mientras que a distancias grandes, la interacción nuclear fuerte se hace muy intensa, impidiendo que no estén libres. La segunda cuestión está relacionada con la existencia de la carga de color C (razón por la cual se etiqueta al grupo con la letra C), infiriendo que los quarks y gluones son partículas que poseen carga de color y no se les puede observar individualmente, solamente formando estados ligados de carga de color neutro llamados hadrones.

El grupo de simetría  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  es tratado como un grupo compuesto ya que es el resultado de la unificación de las interacciones débiles y electromagnéticas, llamada en conjunto como "interacción electrodébil". Por razones históricas, debido a que sólo neutrinos de quiralidad left-handed o de mano izquierda participan en las interacciones débiles, fue escogida la etiqueta L para denotar el grupo  $SU(2)$ , mientras que el grupo  $U(1)_Y$  de hipercarga<sup>5</sup> Y es el grupo, que luego del llamado rompimiento espontáneo de la simetría<sup>6</sup>, dará lugar a la interacción electromagnética.

Como se encuentra representado en la Figura 3.1, el espectro de partículas del ME comprende bosones y fermiones. Los bosones son las partículas encargadas de transmitir las interacciones entre las partículas de materia. Dentro de ellos tenemos 8 gluones sin masa para las interacciones fuertes, los bosones masivos  $W^\pm$  y Z para la interacción débil y un fotón para la interacción electromagnética. Como es mostrado en las Tablas 3.1 y 3.2, los constituyentes básicos de la materia son los quarks y leptones, los cuales están distribuidos en tres familias con propiedades idénticas, excepto por su masa.

---

<sup>4</sup>Los hadrones son partículas compuestas de quarks. Pueden ser bariones (compuestos por tres quarks) o mesones (compuestos por un quark y un antiquark).

<sup>5</sup>La hipercarga Y es una carga cuántica que poseen los campos fermiónicos y permite la interacción con los campos bosónicos de la teoría  $U(1)_Y$ .

<sup>6</sup>El rompimiento espontáneo de la simetría es un proceso físico que se encuentra dentro de la teoría, que a través del mecanismo de Higgs, dará lugar a las masas de las partículas. Debido a la falta de relación directa con los neutrinos, el estudio del rompimiento de simetría y Mecanismo de Higgs no será abordado en el presente trabajo.

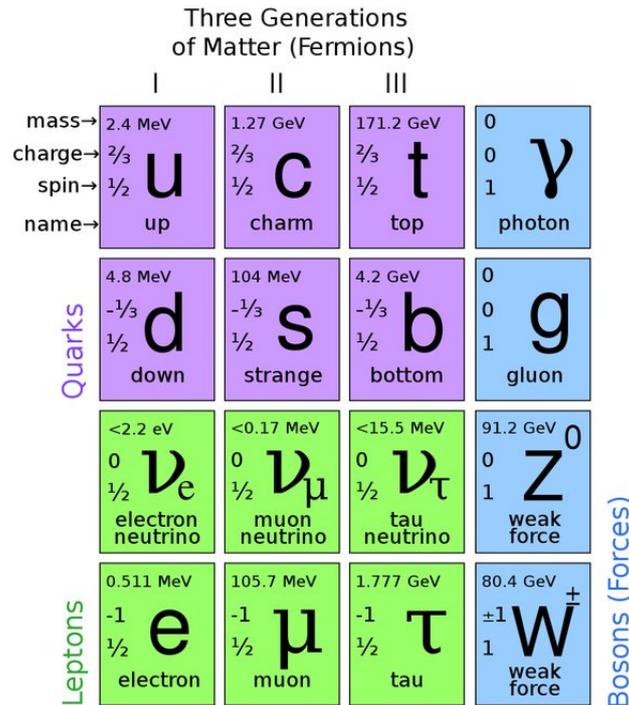


Figura 3.1: Ilustración de partículas en el modelo estándar con sus respectivas masas y cargas.

Familias	Leptones		
	Nombre	Carga eléctrica	Símbolo
1ra Familia	Electrón	-1	e
	Neutrino electrónico	0	$\nu_e$
2da Familia	Muón	-1	$\mu$
	Neutrino muónico	0	$\nu_\mu$
3ra Familia	Tau	-1	$\tau$
	Neutrino tauonico	0	$\nu_\tau$

Tabla 3.1: Distribución de leptones en función de sus familias.

Familias	Quarks		
	Nombre	Carga eléctrica	Símbolo
1ra Familia	Up (arriba)	$+\frac{2}{3}$	u
	Down (abajo)	$-\frac{1}{3}$	d
2da Familia	Charm (encanto)	$+\frac{2}{3}$	c
	Strange (extraño)	$-\frac{1}{3}$	s
3ra Familia	Top (cima)	$+\frac{2}{3}$	t
	Bottom (fondo)	$-\frac{1}{3}$	b

Tabla 3.2: Distribución de quarks en función de sus familias.

Los campos fermiónicos se agrupan como se muestra en las Tablas 3.3 y 3.4:

Multipletos	$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$	1er Familia	2da Familia	3er Familia
Leptones	$(1, 2, -1/2)$	$\nu_{eL}$ $e_L$	$\nu_{\mu L}$ $\mu_L$	$\nu_{\tau L}$ $\tau_L$
	$(1, 1, -1)$	$e_R$	$\mu_R$	$\tau_R$

Tabla 3.3: Distribución de leptones en funcion de su multiplicidad y familia.

Multipletos	$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$	1er Familia	2da Familia	3er Familia
Quarks	$(3, 2, 1/6)$	$u_L$ $d_L$	$c_L$ $s_L$	$t_L$ $b_L$
	$(3, 1, 2/3) / (3, 1, -1/3)$	$u_R$ $d_R$	$c_R$ $s_R$	$t_R$ $b_R$

Tabla 3.4: Distribución de quarks en funcion de su multiplicidad y familia.

Como es posible observar según las tablas<sup>7</sup>, la forma como los campos de materia transforman por los diferentes grupos de simetría del ME determina la manera en que esos campos interactúan con los bosones de la teoría. Por ejemplo, un campo singlete de  $SU(2)_L$ , como el electrón de quiralidad right  $e_R$ , no interactúa con los bosones  $W^\pm$  asociados a ese grupo por el hecho de ser singlete de ese mismo grupo.

En este caso es de interés revisar más detalladamente la naturaleza de los leptones, los cuales pueden ser eléctricamente cargados, siendo el electrón el más famoso de sus representantes, o con carga eléctrica nula como los tres tipos o sabores de neutrinos.

De acuerdo a la Tabla 3.3, los leptones pueden ser organizados como dobletes de  $SU(2)_L$  para los campos quirales izquierdos y singletes de  $SU(2)_L$  para los campos quirales derechos. Esto quiere decir que para describir correctamente la fenomenología de los experimentos, los campos leptónicos de mano izquierda deben ser escritos como una matriz  $2 \times 1$  en términos de autoestados de sabor

$$\text{Dobletes} : L_{aL} = \begin{pmatrix} \nu_a \\ \ell_a \end{pmatrix}_L \rightarrow \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L \quad (3.2)$$

$$\text{Singletes} : \ell_R^a \rightarrow e_R, \mu_R, \tau_R \quad (3.3)$$

Dichos campos entrarán en la lagrangiana del ME que se introduce, a modo de completez, más adelante. Por ahora es importante comentar que en el ME no se tienen campos de mano derecha para los neutrinos y ello trae grandes implicaciones en la naturaleza de esta partícula. En la teoría cuántica de campos es posible escribir un campo fermiónico como la suma de sus componentes de mano izquierda y derecha a través de los operadores de proyección quiral  $P_L$  y  $P_R$ :

$$\psi = \psi_L + \psi_R = P_L \psi + P_R \psi = \left(\frac{1 - \gamma_5}{2}\right) \psi + \left(\frac{1 + \gamma_5}{2}\right) \psi \quad (3.4)$$

<sup>7</sup>La notación (a,b,c) significa que el campo en cuestión transforma como a,b,c respecto al grupo  $SU(3)_C$ ,  $SU(2)_L$  y  $U(1)_Y$ , respectivamente. Por ejemplo (1,2,-1/2) significa que el campo en cuestión transforma como singlete **1** de  $SU(3)_C$ , doblete **2** de  $SU(2)_L$  y tiene hipercarga  $Y=-1/2$ .

### 3.2. MODELO ESTÁNDAR DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES 13

siendo  $\psi$  el campo de Dirac<sup>8</sup>,  $\psi_{L,R}$  las componentes mano izquierda y derecha respectivamente y  $\gamma_5$  la matriz de Dirac definida como  $\gamma_5 = i\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4$  [13][14].

Dentro del formalismo físico de la teoría cuántica de campos es posible escribir un término de masa  $m\bar{\psi}\psi$  para un campo  $\psi$  usando las componentes de mano izquierda y derecha a través de la ecuación 3.4:

$$m\bar{\psi}\psi = m(\bar{\psi}_R\psi_L + \bar{\psi}_L\psi_R) \quad (3.5)$$

donde el campo conjugado  $\bar{\psi}$  es definido como  $\bar{\psi} = \psi^\dagger\gamma^0$ . De esta manera, es posible construir la masa para cada una de las partículas del ME, exceptuando la de los neutrinos. Como se muestra en la sección 3.1.1, la no comprobación experimental de la componente de mano derecha de los neutrinos  $\nu_R$  impide, dentro del formalismo del modelo estándar, la construcción de un término de masa para los neutrinos similar a la ecuación 3.4. Luego según la Tabla 3.3 y las Ecuaciones 3.2 y 3.4 tenemos que:

$$m_{\nu^a}\bar{\nu}^a\nu^a = m(\bar{\nu}_R^a\nu_L^a + \bar{\nu}_L^a\nu_R^a) = 0 \quad (3.6)$$

Esto trae como consecuencia que en el ME a priori, se considera a los neutrinos como partículas no masivas, o sea,  $m_{\nu^a} = 0$ . Sin embargo, como se verá más adelante, la existencia del fenómeno de oscilaciones de neutrinos es considerada la primera evidencia de física más allá del modelo estándar pues dicho fenómeno sólo puede ocurrir si los neutrinos poseen masa diferente de cero. [15].

Como fue mencionado, por completez y de una manera ilustrativa, se comentarán solamente los términos de la lagrangiana del ME. La lagrangiana del modelo estándar se puede separar en sectores de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\mathcal{L}_{ME} = \mathcal{L}_{Fermion+Gauge} + \mathcal{L}_{Higgs+Yukawa} \quad (3.7)$$

donde

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{Fermion+Gauge} = & i\bar{L}_{aL} \not{D}L_{aL} + i\bar{Q}_{aL} \not{D}Q_{aL} + i\bar{l}_R^a \not{D}l_R^a + i\bar{u}_R^a \not{D}u_R^a + i\bar{d}_R^a \not{D}d_R^a \\ & - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}(x)B^{\mu\nu}(x) - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a(x)G_a^{\mu\nu}(x) \end{aligned} \quad (3.8)$$

La primera fila representa los términos cinéticos y de interacción de los campos fermiónicos con los bosones de la teoría, y la segunda fila, representa los términos cinéticos y de autointeracción de dichos bosones. Dicha lagrangiana no contiene términos de masa para las partículas ya que los términos de masa que tengan la forma de la ecuación 3.5 violarían las transformaciones de simetría que exige de la teoría [16]. Para que los términos de masa para los fermiones y bosones, similares a la ecuación 3.5 de los cuales se sabe que violan la simetría de la teoría, aparezcan explícitamente en la lagrangiana, se necesita un mecanismo teórico que genere de manera natural dichos términos de masa. Esto se consigue gracias al llamado rompimiento espontáneo de la simetría a través del Mecanismo Higgs, obtenido de acuerdo a la siguiente lagrangiana [17]

---

<sup>8</sup>El campo de Dirac es una solución de la ecuación de Dirac.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{Higgs+Yukawa} = & [D^\mu \Phi(x)]^\dagger [D_\mu \Phi(x)] - V(x) \\ & - Y'_{\alpha\beta} l'_{\alpha L} \bar{L}'_{\beta R} \Phi - Y'^D_{\alpha\beta} Q'_{\alpha L} \bar{\Phi} d'_{\beta R} - Y'^U_{\alpha\beta} Q'_{\alpha L} \bar{\Phi} u'_{\beta R} + h.c. \end{aligned} \quad (3.9)$$

El mecanismo requiere la existencia de un campo escalar  $\Phi$ , un potencial  $V(x)$  llamado potencial de Higgs y acoplamiento de este nuevo escalar a los fermiones de la teoría (a través de una interacción de Yukawa). Dentro del formalismo matemático de la teoría cuántica de campos, la interacción física que se encuentra en los experimentos es representada matemáticamente como el acoplamiento de los campos en un término específico. Por ejemplo, el primer término de la segunda línea de la ecuación 3.9 representa la interacción de Yukawa del doblete de leptones  $L'_{\alpha\beta}$ , los leptones de mano derecha  $l'_R$  con el campo de higgs  $\Phi$ . La intensidad de dicha interacción es proporcional a la matriz  $Y'_{\alpha\beta}$  llamada Matriz de Yukawa.

Como fue mencionado previamente, en este trabajo no se explorará el mecanismo de Higgs debido a que no es el objetivo de este. Sin embargo, solo es necesario comentar que el mecanismo, además de generar los términos de masa similares a la ecuación 3.5 para los fermiones, también produce términos de masa para los bosones  $W^\pm$ ,  $Z$  y adicionalmente deja al fotón sin masa como es requerido. También predice la existencia de un nuevo bosón escalar masivo, conocido como el Bosón de Higgs, del que fue comprobada su existencia en los datos experimentales de ATLAS [18] y CMS [19] del CERN en el 2012, confirmando así la veracidad de dicho mecanismo.

Pese al indudable éxito del ME, no es posible tomarlo como la última descripción completa de la naturaleza, pues como ha sido mencionado insistentemente, existen algunas cuestiones que aún no se logra explicar, relacionadas con la existencia de la masa de los neutrinos, la jerarquía de masas, la inclusión de la fuerza gravitacional, el problema de la materia oscura, entre otras, siendo la primera el objeto de interés del presente trabajo, ya que en el ME los neutrinos no poseen masa, cosa que contraría los datos experimentales de oscilaciones de neutrinos que han demostrado que sí la tienen, razón suficiente para justificar la importancia de su estudio conceptual en este trabajo de grado.

El descubrimiento del fenómeno de las oscilaciones de neutrinos ha dado resultados de gran importancia para la física de partículas de los últimos años. Partiendo de la existencia de la masa, se supone fehacientemente que los autoestados de masa son combinaciones lineales de autoestados que intervienen directamente en las interacciones débiles, conocidos como autoestados de sabor. Este cambio de paradigma explicaría los extraños resultados relacionados con la detección de neutrinos con un sabor diferente respecto a los producidos por una fuente conocida. La sola existencia de su masa implica física más allá del modelo estándar, hecho que obliga a los teóricos a crear extensiones de este modelo para intentar explicar las incógnitas de ciertos fenómenos y de esta forma, poder traspasar la frontera del conocimiento de la física fundamental como la conocemos hoy en día.

### 3.3. Fermiones relativistas y el fenómeno de oscilación

A continuación se comentarán los aspectos más generales relacionados a la oscilación de neutrinos. En Anexo I, estas ideas serán aplicadas para la oscilación de neutrinos considerando solo dos sabores de neutrinos.

Luego de la demostración experimental de la existencia de las oscilaciones de neutrinos, se postularon tres ideas básicas para la oscilación de los neutrinos en el vacío. La primera idea, es que estos son partículas altamente relativistas. La segunda, es que estas partículas son producto de procesos de interacción débil, donde los neutrinos de sabor (o autoestados de sabor<sup>9</sup>) se pueden escribir como una combinación lineal de autoestados de masa de la siguiente forma:

$$|\nu_\ell\rangle = \sum_i U_{\ell i} |\nu_i\rangle \quad (3.10)$$

donde ( $\ell = e, \mu, \tau$ ) y siendo U la matriz unitaria que relaciona los autoestados de sabor con los autoestados de masa, llamada matriz de mezcla de los neutrinos. Dentro del ME los autoestados de sabor son los mismos autoestados de masa con autovalor cero (es decir, masa cero), por lo que, U sería una matriz identidad, cosa que no tiene significado físico respecto a la fenomenología de las oscilaciones de neutrinos. Al introducir la matriz de mezcla U, se está suponiendo que al menos uno de los neutrinos tiene masa no nula. De la misma manera se pueden escribir los estados de neutrinos masivos  $|\nu_i\rangle$ , con autovalor  $m_i$ , como combinación lineal de los autoestados de sabor  $|\nu_\ell\rangle$

$$|\nu_i\rangle = \sum_\ell U_{i\ell}^* |\nu_\ell\rangle \quad (3.11)$$

Su energía  $E_i$  y momento  $\vec{p}_i$  están relacionados mediante la ecuación de energía-momento relativista

$$E_i^2 = |\vec{p}_i|^2 + m_i^2 \quad (3.12)$$

donde se escogió la notación de unidades naturales  $\hbar = c = 1$  y siendo  $m_i$  la masa en reposo. Dado que las partículas consideradas son relativistas, es posible usar la aproximación relativista a la ecuación anterior, luego

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{p} = E + \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{E} \quad (3.13)$$

donde se asume que, en media, los neutrinos en procesos de oscilación tienen una energía media E, donde  $E = p$ , aproximación válida cuando  $E \gg m_i$ .

La tercera idea afirma que el tiempo t de propagación de los neutrinos desde la fuente hasta el detector medido por este, es aproximadamente igual a la distancia L de la fuente

---

<sup>9</sup>Los autoestados de sabor son los neutrinos que son observados directamente en las interacciones a través de su compañero leptónico cargado. Por ejemplo, si en un proceso de interacción débil participa un electrón, el neutrino asociado deberá ser un neutrino electrónico (sabor electrónico).

al detector, pues al ser partículas con una masa en reposo extremadamente baja, se mueven casi a la velocidad de la luz:

$$v_{\text{neutrino}} \approx c \Rightarrow L = v_{\text{neutrino}} t \approx ct \approx t \quad (3.14)$$

Como fue mencionado, la matriz de mezcla  $U$  es unitaria. Esto es requerido para que sea posible obtener los valores correctos de probabilidad (conservación de la probabilidad)

$$UU^\dagger = U^\dagger U = 1 \quad (3.15)$$

Ahora se revisará superficialmente el proceso de oscilación de tres sabores. Tenemos entonces que:

$$|\nu_\ell\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\ell i} |\nu_i\rangle \quad (3.16)$$

Por lo tanto, la ecuación anterior puede ser escrita como:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

En el lado de la izquierdo se tienen campos de neutrinos de sabor, es decir, aquellos que participan en la interacción débil, mientras que en el lado derecho se tiene la matriz  $U_{PMNS}$  (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) [20] y el vector de autoestados de masa.

La matriz  $U_{PMNS}$  describe la probabilidad de que un neutrino de sabor  $\nu_\ell$  se encuentra en un estado propio de masa con autovalor  $m_i$ . Estas probabilidades son proporcionales a  $|U_{\ell i}|^2$ . Existe una manera adoptada por la comunidad de física de partículas de escribir la matriz  $U_{PMNS}$  llamada parametrización estándar, la cual es explícitamente

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -c_{23}s_{12} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{-i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - c_{23}s_{12}s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\beta} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

donde  $c_{ij}$  es igual al  $\cos(\theta)_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sin(\theta)_{ij}$ . El parámetro  $\delta_{CP}$  es una fase llamada fase de violación CP (Carga – Paridad) la cual será abordada después con más detalles. Existen adicionalmente dos fases más asociadas a neutrinos de Majorana ( $\alpha, \beta$ ), las cuales en caso de considerar neutrinos de Dirac no son necesarias tenerlas en cuenta. Pero ¿Qué es un neutrino de Dirac y un neutrino de Majorana? ¿Qué diferencias existen entre ambos tipos y por qué es importante mencionarlo?

Se conoce que los neutrinos no poseen carga eléctrica y que por ello no pueden tener acoples directos con fotones<sup>10</sup>. Por otra parte, dado que no se han observado en la naturaleza neutrinos de mano derecha, en el ME los neutrinos no tienen momento magnético, debido a que este parámetro proviene de la inversión de la quiralidad. El hecho de que un

<sup>10</sup>Recordemos que la forma como las partículas transforman por el grupo  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  determina la forma como dichas partículas interactúan con los bosones de la teoría.

neutrino sea de Majorana implica que estos son sus propias antipartículas, cosa que involucra que, si analizamos una simetría CPT<sup>11</sup>, los momentos magnéticos de una partícula y su respectiva antipartícula, deberían ser opuestos. Hasta el momento (exceptuando a los neutrinos, de quienes aún no se tiene certeza) todos los fermiones se comportan como partículas de Dirac. Como será mostrado más adelante desde una perspectiva conceptual, al introducir neutrinos estériles<sup>12</sup> como explicación de la oscilación de neutrinos con masas de Majorana, estos se comportarían como campos de Majorana y tres de ellos podrían tener masas muy altas y otros tres a escalas bajas por debajo de una unidad de electron-voltio. En el caso contrario, si se consideran los neutrinos como partículas de Dirac, sería necesario introducir estados adicionales de mano derecha para así, tener cuatro grados de libertad igualando las condiciones con los leptones cargados. Otro caso que podría funcionar es no postular estados adicionales debido a que ya se tiene un objeto de mano derecha. El problema de esto es que, al hacerlo, se violaría el número leptónico, situación que no ha sido detectado en la naturaleza.

En la matriz  $U_{PMNS}$ , los ángulos de mezcla de neutrinos ( $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ ) están directamente relacionados con los ángulos de mezcla de oscilaciones de neutrinos solares, atmosféricos y de reactores respectivamente. En un siguiente capítulo, veremos más a fondo el análisis de los resultados experimentales más importantes de la detección de neutrinos solares y atmosféricos [21][22][23].

## 3.4. Estudio experimental de las oscilaciones de neutrinos

### Neutrinos Solares

Desde la antigüedad, filósofos se cuestionaron sobre las causas del eterno brillo del Sol planteando diversas hipótesis acerca de su origen, combustible y tiempo de vida. Hoy se sabe que la luz proveniente del Sol es el resultado de reacciones de fusión nuclear que ocurre en él. Anaxágoras fue de los primeros filósofos que inició con la incesante búsqueda de las piezas del rompecabezas de nuestra enigmática estrella cuando encontró un trozo de meteorito a muy alta temperatura. Para él, la hipótesis más plausible y acertada era que este debía estar compuesto de hierro al rojo vivo. Esta creencia fue validada por diversos académicos durante casi dos mil años y hasta hace recientemente se comenzó a cuestionar la naturaleza de ésta.

A mediados de los años 1800s, en pleno auge de la revolución industrial y con conocimientos previos de termodinámica, se comenzó a sospechar acerca de que el Sol debía funcionar como resultado de reacciones químicas que debían alimentarlo día a día. Otra explicación de la naturaleza de éste fue la gravedad, pues comenzó a tomar fuerza la idea de que cuerpos rocosos debían ser atraídos por la acción de ésta, y que, al chocar con

---

<sup>11</sup>Una transformación de simetría CPT (Charge-Parity-Time por sus siglas en inglés) es una transformación discreta en la cual, para un determinado proceso, se invierte la carga, paridad y dirección temporal a las partículas involucradas.

<sup>12</sup>Un neutrino estéril es un término adjudicado a un neutrino que no participa en las interacciones débiles.

el Sol, debían generar energía suficiente para que emitiera luz. Sin embargo, esta idea dejaba muchas dudas al respecto pues los cálculos demostraban que esta hipótesis daba cortos resultados que no eran suficientes para explicar ésta conjetura.

Años más tarde, luego del descubrimiento de la radioactividad por Becquerel, Rutherford notó que, a partir de procesos radioactivos, los elementos podían convertirse en otros debido a cambios en su estructura y que la emisión continua de energía provenía de los cambios de ésta. Él demostró que la energía radiada era proporcional al número de partículas alfa emitidas, por lo que se dedujo que, si el Sol emitía energía continua, debía estar formado por materiales radioactivos. Sin embargo, esta hipótesis fue descartada debido a la falta de pruebas de que este estuviese compuesto por radio. La teoría que vislumbro respuestas acerca de su brillo llegó años después con la ecuación de equivalencia masa-energía de Einstein, pues si un cuerpo emite una energía  $E$ , su masa podría deducirse a partir de esta.

Las estrellas y por supuesto, nuestro Sol al estar a tan altas temperaturas del orden de  $10^3$  K, son capaces de separar los protones de los átomos de hidrógeno. Usualmente a temperaturas normales, la fuerza de repulsión electromagnética no permitiría que éstos chocasen debido a su carga positiva. Sin embargo, a altas temperaturas, es posible que éstos choquen y produzcan el fenómeno conocido como fusión nuclear. El proceso que genera neutrinos en el Sol inicia con la colisión de dos protones, que al fusionarse, forman un deuterón (más un positrón y un neutrino electrónico). El deuterón, que es un isótopo estable del hidrógeno, está compuesto de un neutrón, un protón y un electrón. Luego de la fusión entre dos protones, y de que éste es generado, el deuterón es capaz de capturar otro protón lo cual generaría un isótopo de Helio llamado  $3\text{He}$  y cuando dos de estos isótopos colisionan, dan lugar a un Helio estable y emiten dos protones:



El resultado de todo este proceso es que luego de que 4 protones iniciales chocan, producen un único átomo estable de Helio y emite energía en forma de positrones, fotones y neutrinos electrónicos como se muestra en la ecuación 3.19. En la figura 3.2, se ilustra la probabilidad con la que sucede esta reacción.

Los datos calculados acerca de la estimación del flujo de neutrinos electrónicos en el proceso pp es de  $6 * 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  [25]. Los cálculos del flujo esperado y de la probabilidad fueron basados en la teoría del ME y modelos solares, el cual toma en cuenta parámetros tales como la masa, el radio, la temperatura de la superficie de la estrella, entre otros.

El primer experimento cuyo objetivo era detectar los neutrinos provenientes del Sol, fue uno dirigido por R. Davis y sus colaboradores en la mina Homestake en Dakota del Sur en los Estados Unidos a finales de los años 60s [26]. Se construyó, para efectos prácticos, bajo la mina de oro perteneciente a Homestake Mining Company, con la intención de evitar que los resultados de éste fuesen afectados por los rayos cósmicos. El experimento consistía en un gran tanque con capacidad de  $3,9 * 10^5$  litros de percloroetileno. El compuesto químico permitía una reacción entre el cloro presente en el tanque y los neutrinos electrónicos, produciendo isótopos de Argón-37, el cual podía ser medido con

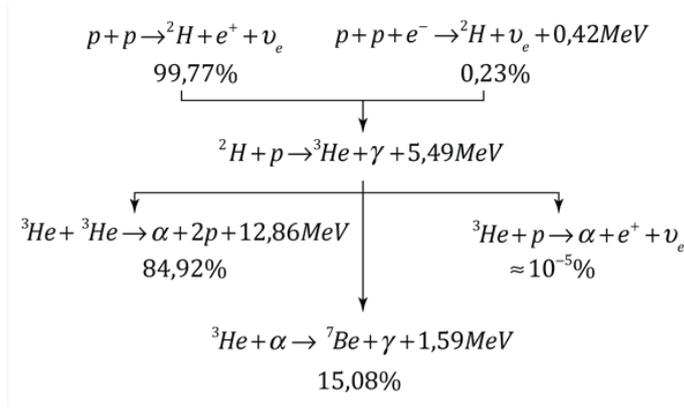


Figura 3.2: Probabilidad de reacción. [24]

técnicas radio-químicas y consecuentemente, medir indirectamente el flujo de neutrinos electrónicos.

El experimento fue exitoso, pues fue capaz de detectar los neutrinos electrónicos. El problema, sin embargo es que tan solo fueron detectados  $2,56 \pm 0,23\text{SNU}$ <sup>13</sup>, frente a los  $8,1 \pm 1,2\text{SNU}$  predichos por el ME, es decir que, el experimento concluía que existía un déficit de neutrinos de tipo electrónico provenientes del sol. A este déficit de neutrinos electrónicos se le conoció como el problema de los neutrinos solares [27].

A partir de estos resultados, se hicieron experimentos que buscaban explicar y corroborar el déficit de neutrinos, de los cuales destacan:

- Experimento SAGE: El experimento SAGE, de siglas (Soviet-American Gallium Experiment) fue basado en la desintegración beta inversa:



Se utilizó alrededor de 50-57 toneladas de galio metálico, el cual estaba almacenado bajo tierra a 2 km de profundidad en las montañas del Cáucaso en Rusia. Actualmente sigue en funcionamiento y extrae Germanio inducido por neutrinos ya que partir de éste y de su tiempo de vida media, es posible calcular datos aproximados del flujo de neutrinos. Los resultados obtenidos luego de la extracción de Ge, fueron incluso mejores que los obtenidos del Homestake, siendo de aproximadamente un 56% – 60% sobre la tasa de captura predicha por el ME [28][29].

- El experimento GALLEX, estuvo ubicado bajo la montaña Gran Sasso en Italia, y se trató de una colaboración internacional dirigida por científicos del Max Planck institute. Fue realizado al mismo tiempo que el SAGE, y consistía en un tanque detector de aproximadamente 100 toneladas con tricloruro de galio y ácido clorhídrico, donde la cantidad de galio era de aproximadamente el 30% de esta solución. Su

<sup>13</sup>La unidad de neutrino solar es una unidad de flujo de neutrinos solares

objetivo era el mismo que el experimento SAGE y gracias a la vida media de 11.43 días del germanio, fue posible detectar que cada desintegración correspondía a un neutrino electrónico detectado. Hasta 1997, el detector midió una tasa de captura de 73,1 SNU, y luego de que este concluyera y se realizara bajo el nombre de GNO, la tasa de captura (calibrada) fue de 62,9 [30][31].

Es importante destacar que hasta el momento los experimentos relacionados con detección de neutrinos solamente son capaces de detectar los neutrinos de sabor electrónico.

- Experimento Kamiokande : Este experimento de siglas en ingles ( Kamioka nucleon decay experiment) consistía en un tanque de aproximadamente 4500 toneladas de agua, 1000 metros bajo la tierra y fotomultiplicadores situados en la superficie interna del tanque. Su objetivo era investigar la estabilidad de la materia, sin embargo, fue capaz de detectar neutrinos provenientes de la Gran Nube de Magallanes y luego de esto, fue posible detectar neutrinos provenientes del Sol, lo que contribuyó a demostrar que éste realmente los produce. A pesar de sus resultados favorables, el experimento no detecto el decaimiento de protones, por lo que se inició la construcción del Super Kamiokande de aproximadamente 10 veces su tamaño. Éste comenzó a operar durante 1996. El experimento fue capaz de probar que el flujo de neutrinos electrónicos provenientes del sol era aproximadamente la mitad del flujo esperado [32][33]

### Neutrinos atmosféricos

Los neutrinos atmosféricos son producidos cuando los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera. Al hacerlo, se producen piones cargados que decaen a muones, y éstos a su vez, decaen en electrones. Este proceso es descrito por la siguiente ecuación



Siendo N y N' núcleos de átomos presentes en la atmósfera antes y después de la colisión. El decaimiento de los mesones puede expresarse mediante:



A partir de estas reacciones es posible concluir que el flujo de neutrinos - antineutrinos atmosféricos pueden ser del tipo electrónico y muónico. La relación entre la probabilidad de que resulte un sabor u otro está dada por la siguiente expresión:

$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) \sim 2 : 1 \quad (3.23)$$

La longitud de vuelo en distancia de los neutrinos atmosféricos está entre los 10 ~ 104 km y esta determinada por el ángulo cenital de la trayectoria del neutrino, que corresponde a la distancia entre la atmósfera y el diámetro de la tierra respectivamente. Este tipo de

neutrinos de entre  $10^{-1}$  y  $10^3$  GeV puede ser detectado por el Super Kamiokande. Durante la toma de datos en el mencionado experimento, se obtuvo solo la mitad del flujo esperado. A esto se le llamo “anomalía de neutrinos atmosféricos”. Sin embargo, se llegó a la conclusión que los factores que afectaban a los neutrinos atmosféricos son un tanto diferentes a los del problema de los neutrinos solares, pero siendo explicados nuevamente por el fenómeno de oscilaciones de neutrinos [36].

Como se ha podido contemplar, el fenómeno de oscilaciones de neutrinos es un fenómeno con una muy sólida comprobación experimental. En el capítulo anterior fue posible ver que dicho fenómeno sólo es posible si los neutrinos tienen masa, situación que no es prevista por el ME y por lo tanto es la primera evidencia de una necesidad de física más allá del modelo estándar. De esta manera la fenomenología de las oscilaciones de neutrinos es base suficiente para que el formalismo físico sea modificado, de tal manera que la lagrangiana del ME 3.7 sea sólo una teoría efectiva a bajas energías, y de esta forma, el ME sea solo una parte de una teoría más completa que involucre neutrinos masivos. En el siguiente capítulo se realiza una revisión conceptual sobre alguna de las maneras en las cuales esto se puede realizar dentro del formalismo físico y de esta forma dar respuesta al fenómeno de oscilaciones de neutrinos y sus implicaciones en otros problemas de física de frontera.

## 3.5. Masa de neutrinos

### Mecanismos de generación de masa

Tradicionalmente, la masa es una propiedad intrínseca de la materia. Sin embargo, cuando se trata de masas tan particularmente minúsculas como las masas de los neutrinos, existen varias dudas acerca de su origen. Una de las maneras más populares en la comunidad científica para generar masa a los neutrinos es el llamado “mecanismo seesaw”<sup>14</sup>. Este mecanismo podría explicar como se generan las masas de estas partículas y de ser demostrado experimentalmente, podría ayudarnos a clarificar varias incógnitas acerca de la naturaleza de las fuerzas fundamentales, el enigma de la asimetría materia – antimateria, la naturaleza de la materia oscura, entre otros misterios no resueltos por el ME. Como se ha explicado en capítulos anteriores, en el ME, los neutrinos no tienen masa y los experimentos de la época parecían coincidir con esta premisa. Sin embargo, dos décadas más tardes, los físicos demostraron que no solo existía un tipo de neutrino, si no que además, estos tenían la capacidad de cambiar de sabor o de tipo durante su trayecto. Este fenómeno conocido como oscilación de neutrinos obligó a los físicos de la época a reconsiderar las características de ésta partícula y su función dentro del ME, pues dicha oscilación solamente es posible si estos tienen masa. Actualmente, gracias a mediciones experimentales indirectas de esta partícula, sabemos que posee una minúscula masa y el mecanismo seesaw podría ser la pieza clave para explicar su origen y naturaleza.

Dentro del mecanismo seesaw, además de incluir a los neutrinos del ME, predice neutrinos pesados y de mano derecha, de los cuales, aún no se ha podido demostrar su existencia.

---

<sup>14</sup>En la literatura en español se le conoce como Mecanismo Balancín.

De ser comprobado esto experimentalmente, podría por fin darse respuesta también a un enigma que ha sido un dolor de cabeza relacionado con la naturaleza del neutrino: ¿Son los neutrinos fermiones de Dirac o de Majorana?.

Según lo propuesto, cuanto mayor sea la masa del neutrino diestro, menor sería la masa de los neutrinos de mano izquierda, lo que implicaría que los neutrinos diestros serían increíblemente masivos, del orden de  $10^{15}$  veces más pesados que el protón.

La explicación de los físicos de partículas a la pregunta de por qué aún no se ha podido detectar estos neutrinos pesados de mano derecha es porque la interacción nuclear débil es la única que actúa sobre los neutrinos del ME y ésta solo interactúa con partículas de mano izquierda, situación que implicaría que ninguna interacción del ME podría interactuar con estos neutrinos de mano derecha (por ello se le conocen como neutrinos estériles). La segunda razón de esto se debería también a que, al ser los neutrinos diestros tan pesados, se requeriría una energía descomunal para ser creados por los actuales colisionadores y poder ser detectados. Sin embargo, se cree que estos podrían dejar huella como energía perdida en dichas máquinas siendo ésta la pieza clave para la confirmación de este mecanismo.

Actualmente, los experimentos detectan indirectamente neutrinos ligeros con la esperanza de por fin tener una respuesta acerca de la generación de su masa y, además, demostrar si éstos son o no son su propia antipartícula. El mecanismo de seesaw está en armonía con teorías unificadas como el ME y teorías más allá del que darían lecciones importantes sobre la naturaleza fundamental de la materia.

En la presente sección abordaremos de forma superficial y conceptual el formalismo del mecanismo seesaw tipo I, II y III, pues actualmente es nuestra mejor carta para explicar la masa de los neutrinos y así trayendo grandes impactos a las oscilaciones de neutrinos y a la nueva física. Se hará énfasis en el mecanismo seesaw tipo I debido a que los demás mecanismos siguen el mismo espíritu físico: introducir nuevas partículas para suprimir el valor de la masa de los neutrinos del ME.

### Mecanismo de Seesaw Tipo I

Como mencionamos en la introducción de la presente sección, el mecanismo seesaw es una forma simple y natural de generar las minúsculas masas de los neutrinos del ME. Actualmente se ha convertido en el mecanismo favorito y más usado en cálculos físicos para reconciliar el problema de la masa de los neutrinos, las oscilaciones de neutrinos y el ME. La forma como lo hace es añadiendo tres neutrinos de mano derecha ( $N_{iR}$ ) al contenido de materia del ME. Estos nuevos singletes pueden acoplarse a los dobletes de mano izquierda a través de los acoplamientos de Yukawa. Al ser eléctricamente neutros, podrían ser partículas de Majorana.

La presente sección expondrá el formalismo desde una manera introductoria y conceptual, explicando las principales características de cada mecanismo.

Para construir la lagrangiana del mecanismo seesaw tipo I, se necesitan diferentes ingredientes que satisfagan las simetrías del ME<sup>15</sup>. De esta manera la lagrangiana que respeta las simetrías de la teoría y que se adiciona a la lagrangiana de la ecuación 3.7 es la siguiente

$$\mathcal{L} = -\lambda_{ai}\bar{L}_{aL}\tilde{\Phi}N_{iR} - \frac{M_i}{2}\bar{N}_{iR}N_{iR}^C + h.c. \quad (3.24)$$

donde  $i = 1, 2, 3$ ,  $L_{aL}$  son los dobletes de los leptones del ME,  $\Phi$  es el doblete de Higgs presente en el ME donde  $\tilde{\Phi} = i\tau_2\Phi^*$  (que incluye la matriz de Pauli),  $C$  es el operador de conjugación de carga que transforma partícula en antipartícula. En el mecanismo se ha asumido que el segundo término de la lagrangiana anterior es válida para una orden de masa  $M$  mucho mayor que la escala de la interacción débil, siendo  $M \sim 10^{15} GeV$  [37]. Como fue explicado en la sección 3.1.2, la interpretación de la lagrangiana en teoría cuántica de campos sigue la misma forma. Como comentario adicional, el primer término representa un término de masa de Dirac y el segundo término representa un término de masa de Majorana [38].<sup>16</sup>

Al escribir la lagrangiana anterior en la base de sabor  $(\nu^C, N_R)^T$  tenemos la matriz de masa

$$m_\nu = \begin{pmatrix} 0 & \frac{v}{\sqrt{2}}\lambda \\ \frac{v}{\sqrt{2}}\lambda^T & M \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Siendo  $v$  el valor esperado en el vacío del campo de Higgs. Cuando se diagonaliza la matriz de masa<sup>17</sup>, los autovalores de la matriz corresponden a los valores de la masa para los neutrinos leves y pesados del mecanismo. A continuación se comentan los resultados más importantes del mecanismo.

El proceso de construcción de la lagrangiana de la ecuación 3.24 deja como resultados los autovalores para la masa de neutrinos ligeros de orden  $m_{\nu_i} \approx \frac{\lambda v^2}{M}$  y para los neutrinos pesados del orden de  $M$ . De esta manera, ya que  $M \gg v$ , se consigue explicar la masa pequeña de los neutrinos del ME asumiendo la existencia de neutrinos pesados de mano derecha con masa del orden de  $M$ .

### Modelo triplete de Higgs: Mecanismo Sewsaw tipo II

Este modelo, conocido también como el modelo de triplete de Higgs fue propuesto por Gelmini y Roncadelli [39]. En éste, se añade al ME un triplete de Higgs  $\Delta$  que satisface las simetrías exigidas por el ME. La lagrangiana del mecanismo es la siguiente

$$\mathcal{L}_\Delta = -\lambda_{ab}L_{aL}^T C^{-1} i\tau_2 \Delta L_{Lb} + h.c., \quad (3.26)$$

<sup>15</sup>Las simetrías del ME deben ser llevadas en cuenta pues ellas representan la fenomenología encontrada en los experimentos. Proponer nuevas simetrías es posible siempre que no entre en contradicción con los datos experimentales.

<sup>16</sup>Un término de masa de Dirac es construído usando las dos quiralidades, mientras que un término de masa de Majorana es construído usando un solo tipo de quiralidad.

<sup>17</sup>El proceso de diagonalización es usado en física de partículas para pasar de la base de sabor a la base física.

donde  $C$  es la matriz de conjugación de carga,  $\Delta$  el triplete de escalares y  $\lambda_{\alpha\beta}$  una matriz compleja simétrica de Yukawa. Las componentes del triplete escalar vienen dadas por

$$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta^+/\sqrt{2} & \Delta^{++} \\ \Delta^0 & -\Delta^+/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

Luego de pasar a la base física y diagonalizar la matriz de masa resultante, la masa de los neutrinos del ME quedará proporcional a la masa de los nuevos escalares de acuerdo a  $m_{\nu_i} \propto 1/M_\Delta$ . Así pues, la introducción de nuevos escalares  $\Delta$  suprimirá la masa del neutrino, explicando las pequeñas masas de las partículas.

### Modelo triplete fermiónico: Mecanismo Seesaw tipo III

En este mecanismo, la lagrangiana que cumple con las simetrías exigidas por la naturaleza es la siguiente

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}Tr[\bar{\Sigma}M_\Sigma\Sigma^c] - \bar{L}_LY_\Sigma^*\Sigma\tilde{H} + h.c. \quad (3.28)$$

donde

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma^0/\sqrt{2} & \Sigma^+ \\ \Sigma^- & -\Sigma^0/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Como se advierte, se ha introducido un triplete de fermiones  $\Sigma$  que se acopla a los fermiones del ME [40]. Luego de pasar a la base física y diagonalizar las masas, es posible encontrar que la masa de los neutrinos leves es inversamente proporcional a la masa pesada de uno de los fermiones, justificando de esta manera la pequeña masa de los neutrinos del ME.

## 3.6. Neutrino como prueba de nueva física

### Asimetría materia - antimateria

El interrogante acerca de la asimetría de la materia - antimateria es uno de los grandes enigmas sin resolver de la cosmología moderna. El problema comienza con la teoría de expansión del Universo, que establece que en los primeros instantes del Universo éste se encontraba en un estado inicial increíblemente denso, excluyendo la separación macroscópica de la materia-antimateria.

En su artículo publicado en el año 1967, Andrei Sakharov expone tres premisas que podrían explicar la asimetría de materia bariónica y su evolución desde el universo primitivo hasta la actualidad [41]. La primera afirmaba que para que este desbalance diera lugar, el protón, un barión constituido por 2 quarks up y un quark down debería ser inestable, situación que hasta el momento los experimentos han demostrado la estabilidad del protón. La segunda, supone que el universo se expandió a velocidades muy altas, cosa que ocasionaría un desequilibrio térmico y produciría la asimetría de materia-antimateria. La tercera y última, de la cual se fundamenta esta sección, estaría relacionada con la violación de carga-paridad, más conocida como violación CP. Con la intención de introducir

apropiadamente el fundamento de este proceso y su relación con los neutrinos, es conveniente aclarar algunos términos que fueron definidos a un nivel muy introductorio durante el desarrollo de este trabajo.

La paridad es una propiedad fundamental a la hora de describir un sistema de partículas, que involucra una transformación en las coordenadas espaciales de la ecuación que lo describe en sus coordenadas "espejo", es decir, transformando  $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$ . Esto implica que si un sistema es invariante luego de aplicar la transformación en sus coordenadas espaciales, éste tendría paridad par, caso contrario, la paridad de este sería impar o negativa.

Otra propiedad de consideración es la llamada "helicidad". La helicidad mide la proyección del espín en relación a la dirección de movimiento de la partícula. Se dice que una partícula tiene helicidad positiva o de mano derecha si el espín va en el mismo sentido que la dirección de su velocidad. En el caso opuesto, es decir cuando el sentido del espín es contrario al de la velocidad de ésta, se dice que tiene helicidad negativa o es de mano izquierda<sup>18</sup>. El operador helicidad  $h$  está dado por la siguiente expresión:

$$h = \frac{\vec{\Sigma} \cdot \vec{p}}{|\vec{p}|} \quad (3.30)$$

Esta propiedad nos introduce otra propiedad llamada "quiralidad" la cual tiene exactamente la misma definición de helicidad, con la diferencia de que helicidad es una cantidad conservada pero no invariante de Lorentz<sup>19</sup>, mientras que quiralidad es una cantidad invariante de Lorentz pero no conservada. Cuando se aplica la transformación de paridad y el sistema es invariante en fermiones de Dirac (cuando las partículas son distintas a las antipartículas de la misma), se le denomina simetría quiral. Finalmente es importante mencionar la conjugación de carga, que consiste básicamente en cambiar el signo de las cargas de las partículas, cosa que al hacerse, involucraría que este proceso sustituye las partículas por sus correspondientes antipartículas. Este proceso es invariante en las interacciones electromagnéticas y en la interacción nuclear fuerte, por lo que se dice que tiene simetría C. Un ejemplo de la conjugación de carga está dado por la siguiente expresión:

$$e \rightarrow e^C = e^- \quad (3.31)$$

Históricamente, antes de la década de los 50s se tenía la premisa de que la paridad se conservaba en todas las interacciones de la naturaleza, hasta que Tsung Dao Lee y Cheng Ning Yang cuestionaron que a pesar de que la conservación de la paridad estaba fuertemente sustentada en la interacción fuerte y electromagnética, esto no había sido demostrado en interacciones débiles y no existían precedentes experimentales que lo acreditaran. En su artículo titulado "Cuestión de conservación de paridad en interacciones débiles" [42], los autores se dieron a la tarea de examinar espectros permitidos, espectros

<sup>18</sup>En caso de que no se supiese el espín, es posible determinar su helicidad a partir de su interacción con bosones W, pues en caso de hacerlo, implicaría que los leptones observados son de helicidad mano izquierda

<sup>19</sup>Una cantidad invariante de Lorentz es una cantidad que mantiene su forma en cualquier marco de referencia.

prohibidos, la correlación de  $\beta - \text{neutrino}$  y la correlación  $\beta - \gamma$  y concluyeron que estos experimentos no tienen relación con la conservación de paridad en las desintegraciones  $\beta$ , debido a que no existen términos que interfirieran entre las interacciones que conservan la paridad y las que no la conservan.

Para dar solución a la cuestión del caso, propusieron medir experimentalmente la distribución angular de los electrones procedentes de las desintegraciones  $\beta$  de los núcleos, pues de esta forma, si el ángulo  $\theta$  entre la orientación del núcleo padre y el momento del electrón da como resultado una distribución entre  $\theta$  y  $180^\circ - \theta$ , constituiría una prueba sólida de que la paridad no se conserva en procesos de desintegración  $\beta$ .

Uno de los argumentos más fuertes para cuestionar la conservación de la paridad se debía a que no existía explicación teórica valedera que justificara los resultados arrojados en desintegraciones de kaones, pues estos apuntaban a que debían existir dos tipos de mesones  $k$  o kaones, pues en un caso, éste se desintegraba dando lugar a 2 piones y en el segundo caso, el producto eran 3 piones.

El fin de este enigma llegó cuando ambos físicos contactaron a la reconocida física experimental Chien-Shiung Wu para que se llevara a cabo un experimento que de una vez por todas resolviera si la paridad se conservaba o se violaba en las interacciones débiles. El experimento hecho en el National Bureau of Standards (NBS) debía usar cobalto bajo la influencia de un campo magnético a temperaturas cercanas al cero absoluto para arrojar resultados confiables. Éste monitorizó la desintegración de  $^{60}\text{Co}$ , el cual mediante radiación  $\beta$  se transforma en el isótopo  $^{60}\text{Ni}$  [43], proceso descrito mediante la siguiente expresión:



El experimento arrojó resultados en los que se evidenciaba que los rayos gamma  $\gamma$  y la distribución de electrones resultaron orientadas en direcciones opuestas, lo que significó que los electrones tendían a oponerse al spin nuclear, cosa que suponía una prueba irrefutable de la violación de paridad en interacciones débiles.

A partir del experimento de Wu, se estableció que los neutrinos sin masa en el ME deberían ser levógiros, mientras que su respectiva antipartícula debería ser diestra. No obstante, se tiene suficiente evidencia sólida que demuestra que los neutrinos son partículas con masa, hecho que cambia por completo el panorama y deja abierta la posibilidad de la posible existencia de neutrinos de mano derecha. Para que esto sea posible, los neutrinos diestros solamente se podrían formar en condiciones altamente energéticas y deberían desintegrarse en intervalos diminutos de tiempo. La peculiaridad de estas condiciones y el tiempo de vida tan corto, sería el medio por el cual se explicaría porqué existe un exceso de materia sobre antimateria y porqué estas dos no se aniquilaron en el universo primordial.

Experimentos como el NuMI Off axis ve Appearance (NOvA) y el Tokai to Kamioka ( $T2K$ ) han arrojado resultados que apuntan a esa suposición [44][45], sin embargo se espera que el Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) y el sucesor del  $T2K$ , el Tokai to Hyper Kamiokande ( $T2HK$ ) lancen datos con mayor precisión estadística.

La violación CP en las interacciones débiles y por lo tanto en los neutrinos, podría ser la pieza clave para distinguir las características de la materia-antimateria y de esta forma solventar las cuestiones acerca de la proporción de éstas luego del inicio del Universo a partir del Big Bang.

### ¿Neutrino como candidato de materia oscura?

Nuestro vasto universo y la naturaleza de su comportamiento ha sido objeto de fascinación y estudio desde que el ser humano tiene consciencia de su existencia y del ambiente que lo rodea. Cuestiones relacionadas con la estructura del entorno y de sí mismos, han desconcertado a numerosos filósofos y físicos, quienes debido a la índole de su profesión, dedican su vida a resolverlas.

Gracias a ese interés genuino y el esfuerzo de muchos científicos a lo largo de la historia, hoy por hoy sabemos, gracias a resultados observacionales, que el universo está compuesto de aproximadamente  $\sim 70\%$  de energía oscura responsable de la reciente expansión acelerada, un  $\sim 4\%$  de materia ordinaria (o bariónica) y un  $\sim 26\%$  de materia oscura. Esta última, ha sido uno de los enigmas más fascinantes del último siglo, pues se trata de una sustancia difícil de detectar sensorialmente, y que requiere de sofisticados experimentos para la obtención de datos que puedan vislumbrar la condición de su composición.

La primera vez que se mencionó “materia oscura” fue durante la década de los 30s, cuando un científico de origen suizo Fritz Zwicky, durante observaciones hechas a un clúster galáctico (también llamado cúmulo de galaxias), intentó determinar la masa que debería estar presente en las galaxias en función de la cantidad de luz que emitían las estrellas contenidas en éstas. Gracias a la gravitación, fue posible calcular las velocidades de giro que debían tener, lo que resultó en una gran discrepancia entre sus cálculos y mediciones, pues las masas requerían de al menos dos órdenes de magnitud adicionales para que los resultados fueran coherentes con la teoría [46].

Debido al giro inesperado de los acontecimientos, se supuso que la deficiencia de materia visible en los cálculos se debía a la existencia de un tipo de sustancia difícil de detectar con los telescopios ópticos, cosa que implicaba que ésta no debía interactuar con los fotones, lo que le valió el nombre de “materia oscura”. El resultado de las observaciones e hipótesis hechas por Zwicky acerca del misterio de la masa faltante fueron ignoradas por gran parte de la comunidad científica de la época, y no fue hasta que la joven astrónoma Vera Rubin, durante los años 70s junto con su colega Kent Ford, al hacer uso de un sofisticado telescopio perteneciente al Departamento de Magnetismo Terrestre (DTM), logro establecer que las velocidades orbitales de las estrellas localizadas en la parte más próxima del extremo de las galaxias permanecen constantes [47], cosa que se opone firmemente a las leyes de Newton, donde el resultado esperado suponía una reducción en la velocidad. El exceso de velocidad observado en estas estrellas confirmaba firmemente la existencia de masa adicional más allá del polvo y gas del entorno analizado, tratándose de una sustancia exótica, no bariónica y de diferente naturaleza a la materia ordinaria, resultados que en el artículo “Rotation of Andromeda Nebula from a spectroscopic survey of emission regions”, fueron prueba fehaciente de la premisa años antes propuesta por Fritz.

Actualmente, la comunidad científica está involucrada en una ardua lucha en el diseño de experimentos que logren la detección de esta materia oscura desconocida, hecho que ha originado numerosas hipótesis que proponen diferentes candidatos de materia oscura, que en el caso de ser partícula, debería ser masiva, de carga neutra, no bariónica, con vida media alta, que logre explicar su existencia desde la formación de la radiación cósmica de fondo (CMB: Cosmic Microwave Background) hasta la actualidad, y de naturaleza fría, lo que significa que sus velocidades no deberían ser relativistas. Otra característica funda-

mental de las partículas candidato es que éstas solo deberían interactuar con la gravedad y de ser el caso, muy endeblemente con la interacción nuclear débil. No deberían ser capaces de interactuar con la luz, pero si generar un campo gravitacional suficientemente fuerte que explique la velocidad constante de las estrellas localizadas en los extremos de las galaxias.

Para la detección de materia oscura, recientemente se han usado distintos métodos, entre los que destacan: A) la detección indirecta, la cual, a partir de aniquilación de materia oscura, busca indicios de formación de materia ordinaria o partículas ya detectadas, B) la detección directa que concretamente busca la interacción de materia oscura con materia bariónica, C) Colisionadores que, al chocar protones entre sí, podrían lanzar partículas que, mediante su comportamiento, logren arrojar pistas de la existencia de esta rara sustancia.

Experimentos como el Fermi LAT (análisis de rayos gamma), el Xenón 1T que busca la interacción del Xenón con materia oscura, el LHC, o fenómenos astrofísicos como el Bullet Clúster y el mapeo de la radiación cósmica de fondo, son concretamente la pieza clave que podrían contribuir a descifrar de una vez por todas, la naturaleza de la materia oscura.

Entre los candidatos teóricos de materia oscura más sonados, se encuentra el neutrino estéril, que resultaría ser un neutrino dextrógiro suficientemente masivo que logre justificar las anomalías gravitacionales observadas en diferentes fenómenos astrofísicos, siendo el más importante, la velocidad de giro de las galaxias y su discrepancia en la masa. Son llamados estériles, debido a que, al ser de mano derecha, jamás interactuarían con electrones u otros leptones, y evadirían casi todas las interacciones de la naturaleza, exceptuando la gravedad, gracias a su masividad, lo que explicaría a ciencia cierta la dificultad a la hora de detectarlo. El indicio de su existencia se originó cuando investigadores haciendo uso del Liquid Scintillator Neutrino Detector (LSND) y del MiniBooNE, obtuvieron un alto número de conteo de partículas, resultados que insinuaban la oscilación de neutrinos muónicos a un tipo de neutrino estéril [48] y seguidamente a neutrinos electrónicos. Otra hipótesis plausible derivada de estos resultados, es que los neutrinos muónicos podrían estar produciendo los neutrinos estériles ya mencionados o por el contrario, otro tipo de partícula aun desconocida. Así pues, se espera obtener datos estadísticamente precisos que demuestren la existencia de éstos y de ser así, darían respuesta al enigma de la naturaleza de la materia oscura, que daría explicación formal a la naturaleza de la formación de estructuras y otras incógnitas cosmológicas. Otros candidatos de materia oscura son considerados minoritariamente, siendo los más famosos los axiones, fotones oscuros, las famosas partículas masivas de interacción débil (WIMPs) [49], entre otros, e incluso la modificación de la gravedad de Newton (Scalar-tensor-vector gravity" (STVG) ) propuesta por John Moffat [50], los cuales hasta el día de hoy, a pesar de lograr explicar algunos fenómenos astrofísicos, dejan preguntas abiertas de las que aún no se tiene respuesta.

### Desintegración beta doble sin neutrinos

Una de las cuestiones más importantes que ha generado la naturaleza de los neutrinos es el comportamiento de su antipartícula. Controversialmente ha surgido el debate de si éstos son su propia antipartícula, lo que los haría partículas de Majorana, físico italiano

quien en 1937 planteó que los fermiones podrían comportarse del mismo modo que sus correspondientes antipartículas [51] o en el caso contrario, si se comportasen diferente como el caso de los fermiones de Dirac [52]. Actualmente no se conoce evidencia de que ningún fermión sea partícula de Majorana, sin embargo, este misterio aun esta por resolverse en los neutrinos, que, de ser el caso y cumplir con esta condición, violaría la conservación del número leptónico que implica que los leptones tienen la capacidad de cambiar su sabor.

Uno de los procesos radioactivos que podrían dar respuesta a este misterio y al problema de la jerarquía de masas, es la desintegración doble beta si neutrinos ( $0\nu\beta\beta$ ), propuesta por Wendell H. Furry poco antes de la década de los 40s y que fundamentalmente consiste en la transformación simultanea de dos neutrones en protones y la emisión de solamente dos electrones, hecho que solo es posible si los neutrinos son su propia partícula, lo que implica que estos se aniquilarían o dado el caso, que llegase a existir un neutrino que cambie su quiralidad durante los procesos de emisión y absorción [53]. La desintegración beta doble sin neutrinos está dado por la siguiente expresión:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- \quad (3.33)$$

Actualmente diversos experimentos alrededor del mundo están a la caza de este raro fenómeno, sienten los más conocidos el Germanium detector array (GERDA) cuyo elemento principal es  $^{76}\text{Ge}$ , el Neutrinos Experiment with Xenon 136 TCP (NEXT con cámara de proyección temporal), cuya fuente principal es 100 kg de  $^{136}\text{Xe}$  ubicado en España, el NEMO, ubicado en Francia, el Candles perteneciente al Kamioka de Japón, entre otros, los cuales aún no han tenido datos que confirmen la detección del proceso. De llegarse a descubrir, no solo se demostraría que el neutrino es una partícula de Majorana, sino que esto también vislumbraría datos que ayudarían a entender el predominio de la materia sobre la antimateria en el universo y la jerarquía de masas presente en la oscilación de neutrinos.

### Masa incrementada de bosón W

Las interacciones débiles han sido objeto de estudio durante las ultimas décadas, hecho que genera resultados cada vez más precisos y difíciles de cuestionar. Muchas de estas mediciones son explicadas gracias al modelo estándar, quien rigurosamente sustenta muchos de los fenómenos existentes en la naturaleza. Sin embargo, recientemente se publicaron resultados acerca de una desviación de aproximadamente 7 sigmas pertenecientes a la masa del boson W tomados del CDF II, luego de analizar colisiones de protón y su correspondiente antipartícula: el antiprotón. Los resultados obtenidos son expuesto en la figura 3.3.

Como se puede apreciar, esta medición posee el error más pequeño en comparación con las demás mediciones que tienen a obtener resultados acorde al ME y arroja resultados acerca de un exceso de masa del esperado para el bosón W. Debido a que este resultado se aísla de los últimos tomados en diferentes experimentos, se espera obtener más datos que sustenten su veracidad. Entre las hipótesis más fuertes que justifican el incremento de esta masa en contraste con la esperada, se ha mencionado la existencia del neutrino estéril, lo que implica que para poder interactuar en este proceso analizado, se necesita adicionar una nueva interacción fundamental que permita que esta partícula teórica

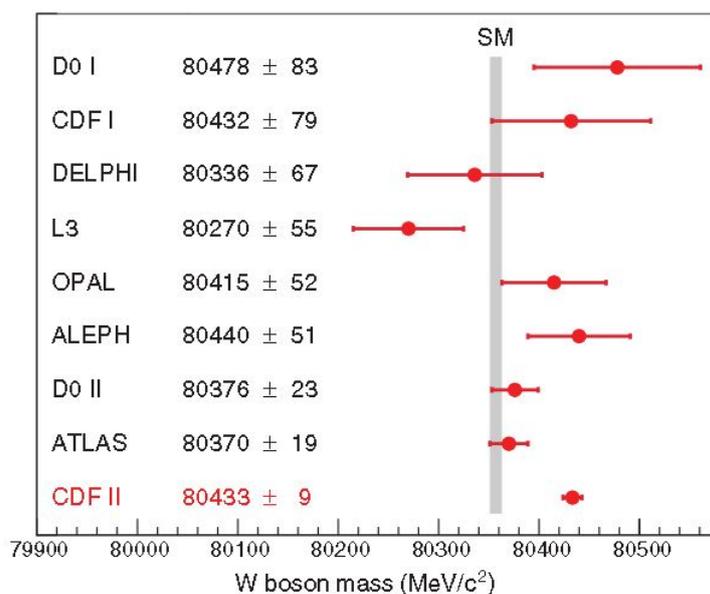


Figura 3.3: Discrepancia de resultados experimentales de la medición de masa del boson W [54]

neutra dextrógira esté presente.

Se espera recolectar datos adicionales que sustenten estos resultados, pues la información arrojada por el CDF II no es del todo satisfactoria, debido a que solo este resultado discrepa del modelo teórico del que se sostienen diversas teorías. Actualmente se están generando hipótesis valederas que logren de alguna forma explicar esta anomalía y resuelva de una vez por todas el misterio de esta información.

### Agujeros negros

Los agujeros negros han sido objeto de interés desde que científicos como Roger Penrose y Stephen Hawking retomaron la idea de estudio del inglés John Michell, quien afirmaba que existía un objeto astronómico de alta densidad, de quien ni siquiera la luz podría escapar. Se demostró que es compatible con las leyes de Einstein quien sustentó teóricamente que la luz podría verse influenciada por campos gravitatorios y que además emite radiación denominada radiación Hawking. Recientemente, gracias a la colaboración de experimentos e institutos alrededor del mundo, fue posible crear una imagen completa de un agujero negro, que, hasta el momento, se creía solo era un objeto teórico. Hoy por hoy sabemos que la Vía Láctea tiene un agujero negro en el centro denominado “Sagitario A\*”. A pesar de los grandes avances visibles durante los últimos años, aun queda un largo camino por recorrer en cuanto al entendimiento del comportamiento de estos colosales objetos y los neutrinos podrían ser la pieza clave para deducir y conjeturar su naturaleza. Experimentos como el IceCube ubicado en la Antártida y ANTARES al sur de Francia, durante los últimos años han detectado neutrinos altamente energéticos los cuales usualmente viajan en línea recta, gracias a que no se ven influenciados por objetos o fenómenos adicionales, y quienes se sospecha, lograron escapar luego que agujeros negros altamente masivos devoraran cuerpos celestes menores, proceso denominado acrecimiento o se fusionara con

otro de su mismo tipo. Esto es de gran importancia, puesto que los neutrinos podrían comportarse como partículas mensajeras, y al ser analizadas, podrían develar datos que contribuyan a develar el misterio de la naturaleza de estos enigmáticos objetos, y que de otra forma, sería prácticamente posible de acceder[55].

# Capítulo 4

## Conclusiones

A pesar del éxito fenomenológico del SM, en reiteradas ocasiones se ha demostrado que este requiere extensiones que logren explicar diversos inexplicados de la naturaleza, tales como la masa de los neutrinos, la distribución de familias entre leptones, la asimetría materia antimateria, la composición de la materia oscura, entre otros enigmas sin resolver.

En particular, es objeto de nuestro interés el fenómeno conocido como “oscilación de los neutrinos”, que, al ser observado experimentalmente, obliga a considerar a los neutrinos como partículas masivas, y que poseen la peculiar característica de cambiar de sabor luego de su emisión. Estas partículas hasta el momento se han detectado con quiralidad levógira, hecho íntimamente relacionado con la violación de paridad en las interacciones nucleares débiles. A pesar de esto, se han ideado mecanismos que puedan explicar su masa, pues el mecanismo de Higgs no logra hacerlo. El mecanismo más famoso que solucionaría esta cuestión es el mecanismo seesaw, del cual se hizo una breve reseña en base a su fundamento teórico.

Debido a los enigmas sin resolver de esta misteriosa partícula, se recopiló cada uno de los hechos relevantes, desde su teorización hasta su estado actual, para que posteriormente se hiciese una breve reseña acerca de su lugar en el modelo estándar y las discrepancias experimentales entre los datos obtenidos por diversos detectores alrededor del mundo y los diferentes esquemas teóricos. Adicionalmente se expuso la naturaleza de su comportamiento y los mecanismos que podrían exitosamente explicar su masa no contemplada en el SM.

No queda duda de su importancia en la naturaleza, pues comprender al neutrino, el origen de su masa, y su comportamiento como partícula de Dirac o Majorana, serian pieza clave para entender fenómenos del universo tales como la asimetría materia antimateria, la materia oscura, el comportamiento de los agujeros negros, entre otros.

# Capítulo 5

## Productos

### 5.1. Participación en modalidad de ponencia oral en congreso nacional o internacional



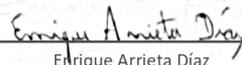
This is to certify that

**SILVIA CORREA**

Participated as a speaker with the talk

**Oscilaciones de Neutrinos: Un Análisis Cualitativo**

in the 6th Colombian Meeting on High Energy Physics,  
from November 29th to December 3rd, 2021



Enrique Arrieta Díaz

On behalf of the Organizing Committee

conhep@gmail.com  
<https://indico.cern.ch/event/1063786/>



ACREDITADA EN ALTA CALIDAD



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



## 5.2. Carta de admisión a posgrado en física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Natal, 09th March 2022.

Dear Mrs. Silvia Lucia Correa Ángel  
(Colombian passport number AV391331)

I am pleased to inform you that you are now accepted as a Master student in the Programa de Pós-Graduação em Física (Graduate Program in Physics, PPGF) at the Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Federal University of Rio Grande do Norte, UFRN), Natal, RN, Brazil. The PPGF of UFRN is part of the group of Graduate Programs associated to the Ministry of Education of the Brazilian government.

I hereby declare that your position will be available from 1st April 2022, according to the UFRN policy, and CAPES will provide you a fellowship, having monthly gains of R\$ 1.500,00, during the 24 months of the period as regular Master student. I also declare that Prof. Dr. Farinaldo da Silva Queiroz will be your professional advisor within the Program.

Yours sincerely,

Prof. Felipe Bohn  
Coordenador do PPGF- UFRN  
Mat. 1508687

---

Prof. Dr. Felipe Bohn  
Coordinator of the Programa de Pós-Graduação em Física  
Departamento de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Natal, RN, Brazil  
Telephone: +55-84-99403-4969  
E-mail: [felipebohn@fisica.ufrn.br](mailto:felipebohn@fisica.ufrn.br)

Programa de Pós-Graduação em Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Campus Universitário, Bairro Lagoa Nova  
CEP 59078-900, Natal, RN, Brazil  
Fone: +55-84-3342-2248, ext. 143; E-mail: [ppgf@fisica.ufrn.br](mailto:ppgf@fisica.ufrn.br)

# Capítulo 6

## Anexo I

### 6.1. Mezcla de dos sabores

Los neutrinos actualmente son identificables debido a sus interacciones, dependiendo de la partículas con las que lo hagan. Los valores propios de energía  $E_1$  Y  $E_2$ , correspondientes a  $m_1$  y  $m_2$ , están íntimamente relacionados con los estados propios de sabor, siendo esto especificado por los ángulos de mezcla como es posible aprecia en la siguiente ecuación:

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle - \sin \theta |\nu_2\rangle$$

Siendo esta anterior, la expresión relacionada con neutrinos electrónicos, y la siguiente, para neutrinos muónicos.

$$|\nu_\mu\rangle = \sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle$$

Mediante la oscilación de neutrinos, es posible medir el ángulo de mezcla. El valor propio de energía para un neutrino de masa  $m$  en reposo, esta dado, según la ecuación de equivalencia masa-energía de Einstein por:

$$E = [p^2c^2 + m^2c^4]^{-1/2} \approx pc(1 + \frac{m^2c^2}{2p^2})$$

Si luego de tiempo dado  $t = 0$ , se quisiera saber la probabilidad en la que un neutrino  $\nu_e$  sigue siendo de sabor electrónico en lugar de muónico, y en dado caso, se dejase que el sistema evolucionara con el tiempo hasta convertirse en un estado  $|\alpha, t\rangle$ , tal que:

$$\begin{aligned} |\alpha, t\rangle &= e^{-iHt/\hbar} |\nu_e\rangle \\ &= \cos \theta e^{-iE_1t/\hbar} |\nu_1\rangle - \sin \theta e^{-iE_2t/\hbar} |\nu_2\rangle \\ &= e^{-ipct/\hbar} \left[ e^{-im_1^2c^3t/2p\hbar} \cos \theta |\nu_1\rangle - e^{-im_2^2c^3t/2p\hbar} \sin \theta |\nu_2\rangle \right] \end{aligned} \tag{6.1}$$

La probabilidad de que el estado observado es  $|\nu_e\rangle$  será:

$$\begin{aligned}
 P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e | \alpha, t \rangle|^2 = \left| e^{-im_1^2 c^3 t / 2p\hbar} \cos^2 \theta + e^{-im_2^2 c^3 t / 2p\hbar} \sin^2 \theta \right|^2 \\
 &= \left| \cos^2 \theta + e^{i\Delta m^2 c^3 t / 2p\hbar} \sin^2 \theta \right|^2 \\
 &= \cos^4 \theta + \sin^4 \theta + 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta \cos \left[ \frac{\Delta m^2 c^3 t}{2p\hbar} \right] \\
 &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[ \frac{\Delta m^2 c^3 t}{4p\hbar} \right]
 \end{aligned}$$

Para escribir la energía media del neutrinos como  $E = pc$  y la distancia de vuelo  $L = ct$ , se tiene que:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[ \Delta m^2 c^4 \frac{L}{4E\hbar c} \right]$$

siendo  $\Delta m^2 \equiv m_1^2 - m_2^2$  [56].

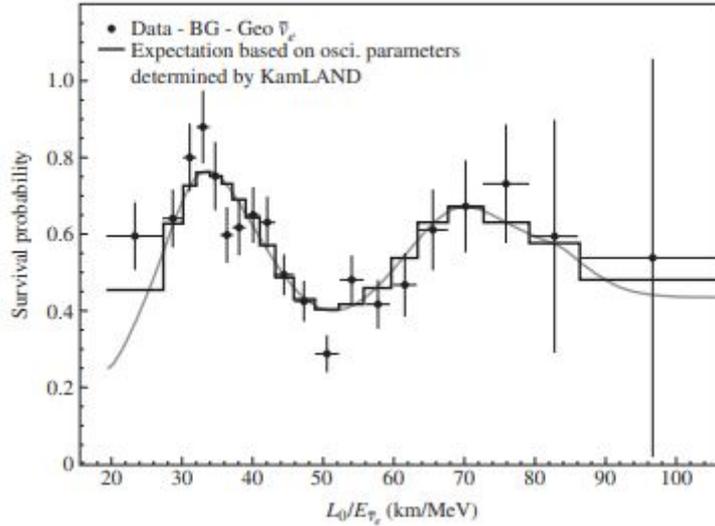


Figura 6.1: Oscilaciones de neutrinos observadas desde el KamLAND. Las oscilaciones de neutrinos como  $L/E$  demuestra la interferencia entre los diferentes eigenestados de las masa de los neutrinos

Como podemos observar en la Fig. 6.1, el anterior resultado teórico concuerda con los datos experimentales de oscilaciones de neutrinos reportados por el experimento kamLAND [57].

# Bibliografía

- [1] S.L. Glashow, "Partial-symmetries of weak interactions", Volume 22, 4, Pages 579-588, (1961).
- [2] S. Weinberg," A Model of Leptons", Phys. Rev. Lett. Volume 19, 21, Pages 1264-1266, (1967).
- [3] A. Salam, "Weak and Electromagnetic Interactions", Conf. Proc. C, Volume 680519, Pages 367-377, (1968).
- [4] Planck Collaboration, "Planck 2018 results", Astronomy & Astrophysics, Volumen 641, (2020).
- [5] A. Ferrer Soria, "Física nuclear y de partículas", 3ra Edición, Universitat de Valencia (2015)
- [6] Q. R. Ahmad et al., "Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory", Phys. Rev. Lett., Volumen 89, 011101, (2002).
- [7] T. Kajita, "Atmospheric neutrino results from Super-Kamiokande and Kamiokande: Evidence for  $\nu\mu$  oscillations", Nucl. Phys. Proc. Suppl. Volumen 77, 1-3, Pages 123-132, (1999).
- [8] D. Calvo Diaz, "Contribuciones a la electrónica de adquisición y sincronismo del telescopio de neutrinos KM3NeT", Institut de Física Corpuscular (CSIC-UV), (2021).
- [9] J.S. Nico, "Neutron beta decay", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., Volumen 36, 104001, (2009).
- [10] F. Guerra, N. Robotti, "Enrico Fermi's Discovery of Neutron-Induced Artificial Radioactivity: The Influence of His Theory of Beta Decay", Phys. Perspect., Volumen 11, 379 (2009)
- [11] F. Close,"Neutrino, La partícula fantasma",1ra edicion, RBA, Barcelona,(2012)
- [12] D. Griffiths, "Introduction to Elementary Particles", John Wiley & Sons Inc, (1987)
- [13] D.-G. Lee, "The Dirac gamma matrices as "relics" of a hidden symmetry?: As fundamental representations of the algebra  $sp(4,R)$ ", J. Math. Phys. Volumen 36, 524 (1995)

- [14] Y. Nagashima, "Elementary Particle Physics, Volume 1: Quantum Field Theory and Particles", WILEY-VCH, (2010)
- [15] C. Gomez Tarazona, "Análisis de las diferencias para neutrinos de Majorana y Dirac en medios magnetizados", Universidad Nacional de Colombia, (2016).
- [16] T. Teubner, "The standard model", Department of Mathematical Sciences, University of Liverpool, Liverpool L69 3BX, (2008)
- [17] J. Valencia Carrillo & J. A. Bernal Arroy, "A Didactic Model to Explain Higgs Boson as Part of the Standard Model of the Elementary Particle", Ciencia Ergo Sum, Volumen 23, núm. 2, 163-170, (2016)
- [18] ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Phys.Lett. B716, 1-29, (2012).
- [19] CMS collaboration, "Results from CMS on Higgs boson physics", J. Phys.: Conf. Ser., 878 012010, (2017).
- [20] C. Giganti, S. Lavignac, M. Zito, "Neutrino oscillations: the rise of the PMNS paradigm", Progress in Particle and Nuclear Physics, 98, 1-54, (2018).
- [21] C. Giunti & C. Kim, "Quantum Mechanics of Neutrino Oscillations", Foundations of Physics Letters, 14(3), 213-229,(2001).
- [22] N. Mohapatra, P. Bal, "Massive neutrinos in physics and astrophysics", World Scientific Lecture Notes in Physics. Vol. 72. (2004).
- [23] Y. Zhang, X. Zhang & Bo-Qiang Ma, "Quark-lepton complementarity and self-complementarity in different schemes", Phys. Rev. D 86, 093019 (2012)
- [24] W. B. Carroll & D. A. Ostlie, "An Introduction to Modern Astrophysics", 2nd Ed., Pearson Education, Inc., (2007).
- [25] Bruce T. Cleveland et al, "Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector", ApJ Volumen 496 505,(1998)
- [26] K. Lande et al., "The Homestake solar neutrino program", Nucl. Phys. Proc. Suppl. 77,13-19, (1999)
- [27] A. Pocar et al., "Solar Neutrino Measurements", Nuclear experiment , (2018)
- [28] J. N. Abdurashitov et al., "Medición de la tasa de captura de neutrinos solares con galio metálico. III. Resultados para el período de toma de datos 2002-2007". Physical Review C . 80, (2009).
- [29] J. N. Abdurashitov et al., "Measurement of the solar neutrino capture rate by SAGE and implications for neutrino oscillations in vacuum", (SAGE), Phys. Rev. Lett. 83,4686-4689, (1999).

- [30] V. N. Gavrin, <sup>EI</sup> "experimento de galio ruso-estadounidense SAGE". *Física-Uspekhi*, 54 (9), 941–949, (2011).
- [31] D. Vignauda, "The GALLEX solar neutrino experiment", *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Volume 60,3, Pages 20-29, 1998.
- [32] S. Hatakeyama et al. , "Measurement of the flux and zenith angle distribution of upward through-going muons in Kamiokande II + III, (Kamiokande)", *Phys. Rev. Lett.* 81, (1998)
- [33] Y. Fukuda et al., "Study of neutron background in the atmospheric neutrino sample in Kamiokande, (Kamiokande)", *Phys. Lett. B* 388, 397-401, (1996).
- [34] D. Waller & SNO Collaboration, "Results from the Sudbury Neutrino Observatory", *SLAC Summer Institute on Particle Physics (SSI04)*, 2-13, (2004).
- [35] Bellerive, A., Klein, J. R., McDonald & SNO Collaboration, "The sudbury neutrino observatory", *Nuclear Physics B*, 908, 30-51, (2016).
- [36] Jiang, Miao, "Study of the neutrino mass hierarchy with the atmospheric neutrino data collected in Super-Kamiokande IV", (2019).
- [37] Y. Cai, T. Han, T. Li, R. Ruiz "Lepton Number Violation: Seesaw Models and Their Collider Tests", *Frontiers in Physics*, Volume 6, (2018).
- [38] A. Santamaria, "Masses, Mixings, Yukawa Couplings and their Symmetries", *Phys. Lett. B* 305, 90 (1993)
- [39] G.B. Gelmini & M. Roncadelli, "Left-Handed Neutrino Mass Scale and Spontaneously Broken Lepton Number", *Phys. Lett. B* 99. 411-415, (1981).
- [40] S. Ashanujjamanab & K. Ghosh, "Type-III see-saw: Phenomenological implications of the information lost in decoupling from high-energy to low-energy", *Physics Letters B*, Volume 819, 136403, (2021)
- [41] A.D. Sakharov, "Violation CP invariance, C asymmetry and parity", *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz*, 5, 32–35", (1967).
- [42] T. D. Lee and C. N. Yang, "Question of Parity Conservation in Weak Interactions", *Phys. Rev.* 104, 254, (1956).
- [43] S. Wu et al, <sup>E</sup> "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay", *C.*, *Phys. Rev.* 105, 1413, (1957).
- [44] M.D. Messier, "First neutrino oscillation measurements in NOvA", *Nuclear Physics B.*, Volume 908, , 151-160, (2016)
- [45] F. R. Gonzalez, "Neutrinos and the matter-antimatter asymmetry in the Universe", *International Journal of Modern Physics E*, 20, 56-64, (2011)
- [46] F. Zwicky, "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln", *Helvetica Physica Acta.* 6: 110–127, (1933)

- [47] V. C. Rubin & W. K. Ford, "Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions", *Astrophysical Journal*, Volumen 159, 379, (1970).
- [48] C. Blanco, D. Hooper, P. Machado, "Constraining Sterile Neutrino Interpretations of the LSND and MiniBooNE Anomalies with Coherent Neutrino Scattering Experiments", *Physical Review D*, 101(7), 075051, (2020).
- [49] L. Roszkowski et al, "WIMP dark matter candidates and searches—current status and future prospects", *Rep. Prog. Phys.* 81 066201, (2018).
- [50] M. Milgrom, "The MOND paradigm of modified dynamics", 9(6):31410, (2014).
- [51] P.B. Pal, "Dirac, Majorana and Weyl fermions". *American Journal of Physics* 79 (5): 485-498, (2011)
- [52] M. Thompson, "Modern Particle Physics", Cambridge university press, 1st Edition, (2013)
- [53] W. H. Furry, "On Transition Probabilities in Double Beta-Disintegration", *Physical Review*. 56 (12) 1184–1193, (1939).
- [54] CDF Collaboration, "High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector", *Science magazine*, Volume 376, 6589, 170 - 176, (2022)
- [55] F. Halzen & A. Kheirandish, "Black holes associated with cosmic neutrino flares", *Nature Physics* volume 16, 498–500, (2020).
- [56] J.J Sakurai, "Modern Quantum Mechanics", 2nd Edition, Pearson (2014).
- [57] S. Abe et al. The KamLAND Collaboration, "Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND", *Phys. Rev. Lett.* 100, 221803, (2008)