

SIMULACIÓN DE DETECCIÓN DE NEUTRINOS EN REACTORES NUCLEARES USANDO EL PROGRAMA GLOBES

Carmona Nava Cristofer José, Dr. David Yves Ghislain Delepine, Dra. Claudia Erika Morales Hernández

Bachillerato General, Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato | cristo11719@hotmail.com

División de Ciencias e Ingenierías, Campus León | delepine@ugto.mx

Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior] | ce.moraleshernandez@ugto.mx

Resumen

Los neutrinos son partículas cuyas propiedades son de gran interés puesto que presentan un fenómeno conocido como oscilación de neutrinos. Se presentan en tres sabores distintos los cuales pueden oscilar a otros lo que implica la presencia de masa en dichas partículas (en el modelo estándar el neutrino carece de masa), dichas oscilaciones consisten en el cambio de un sabor a otro, además existen tres neutrinos con autoestados definidos lo cual explica las diferentes mezclas que dan paso al cambio de sabor. El estudio de estas partículas es de gran importancia para conocer el comportamiento de diversos fenómenos físicos. El estudio de las oscilaciones de neutrinos fue llevado de manera puramente teórica, pues el principal objetivo es comprender dicho fenómeno físico mediante el lenguaje matemático así como en gran medida de manera conceptual. Se logró comprender en gran medida las diferentes propiedades de los neutrinos así como llevar a cabo algunos cálculos sobre la probabilidad de que se presenten tales oscilaciones. La principal conclusión es la importancia de los neutrinos en el estudio de física de partículas, pues no sólo implican propiedades muy extrañas sino una gran aplicación para conocer el comportamiento del Universo a escalas diminutas.

Abstract

The neutrinos are particles whose properties are of great interest being as they exhibit a phenomenon known as neutrinos oscillations. There are three different flavors who can oscillate to another flavors, that means the neutrino has to have mass (in the standard model the neutrino do not have mass), the oscillations process consist in the change of one flavor to another flavor, in addition there are three eigenstates with a defined mass, which explains the mixing that make the flavor change. The study of these particles is of great importance to understand the behavior of different phenomenal physics. The study of the neutrino's oscillations was taken of a purely theoretically way, because the main objective is understand that physic phenomenon using the mathematical language and to a large degree in a conceptual way. It was achieved largely understand the different properties of the neutrinos and do some calculations on the probability of such oscillations is presented. The main conclusion is the importance of the neutrinos in the particle physics, because not only involve the very strange properties of these particles but also in the other hand it could be a great way to understand how works the Universe in tiny scales.

Palabras Clave

1.- Modelo Estándar, 2.- Masa de Neutrinos, 3.- Sabores de Neutrinos, 4.- Autoestados Definidos de Masa, 5.- Oscilación de Neutrinos

INTRODUCCIÓN

En la física moderna existen dos pilares fundamentales que son la relatividad general (encargada del estudio de los objetos muy grandes como planetas, estrellas y galaxias) y la física cuántica (encargada del estudio de las partículas que lo conforman todo).

El Modelo Estándar

En física de partículas existe algo conocido como “modelo estándar” [1] el cual mediante partículas e interacciones explica una gran cantidad de fenómenos físicos en cuanto a escalas diminutas se refiere. Dicho modelo está conformado por tres familias de partículas: 1) los seis leptones que no tienen interacciones fuertes; 2) los seis quarks con los que se forman todos los hadrones; y 3) las partículas intermediarias para las diversas interacciones (gluones para la fuerte, fotones para la electromagnética, las partículas W^\pm y Z^0 para la débil).

En un sentido más amplio el modelo estándar agrupa a las partículas en familias así como describe propiedades de las partículas tales como que cada quark puede llevar cargas de color (roja, verde y azul) que son utilizadas para describir cómo interactúan mediante la interacción fuerte, los quarks tipo de up (up, top y charm) tienen una carga eléctrica de $+2/3$, y los de tipo down (down, strange, y bottom) presentan una carga eléctrica de $-1/3$, esto les permite participar en la interacción electromagnética. Los leptones son neutros en cuanto a carga de color se refiere por lo que no participan en las interacciones fuertes, los leptones de tipo up (neutrinos con partículas asociadas) no llevan carga eléctrica por lo que no participan en las interacciones electromagnéticas, los leptones de tipo down (electrón, muon y tau) tienen carga eléctrica de -1 por lo que estos sí pueden participar en interacciones electromagnéticas. De manera análoga cada partícula tiene su antipartícula.

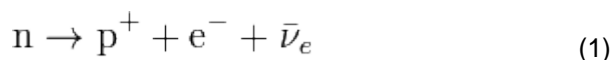
El modelo estándar constituye uno de los mayores logros que ha generado la física en el

aspecto de unificación, pero esto no quiere decir que no exista física más allá del modelo estándar.

Los Neutrinos

Los neutrinos [2] son partículas de tipo fermiónico sin carga, con spin de $1/2$ y una masa muy pequeña. [3]

La existencia de esta partícula fue propuesta por el físico Wolfgang Pauli para poder resolver las ecuaciones de la desintegración beta de los neutrones, pues se presentaba el problema de pérdida de energía y de momento, el neutrino puede corregir éste problema.



El 4 de diciembre de 1930 envió una carta a sus colegas diciéndoles que podían existir en el núcleo partículas eléctricamente neutras las cuales se emitirían a la vez del electrón, gracias a esto se daba la conservación del momento y de la energía.

La prueba experimental de la existencia del neutrino no fue dada hasta el año 1956 gracias a Clyde Cowan y Fred Reines en el experimento conocido como “experimento de neutrino” en cual fue utilizado como detector un tanque con agua y cloruro de cadmio, posteriormente fue posible detectar los neutrinos provenientes del Sol, gracias al detector ubicado en la mina de Kamioka Mozumi el cual contiene 50, 000 toneladas de agua y está recubierto por fotomultiplicadores, es más fácil detectar los neutrinos provenientes del Sol así como de rayos cósmicos, dicho detector es el llamado Super-Kamiokande.

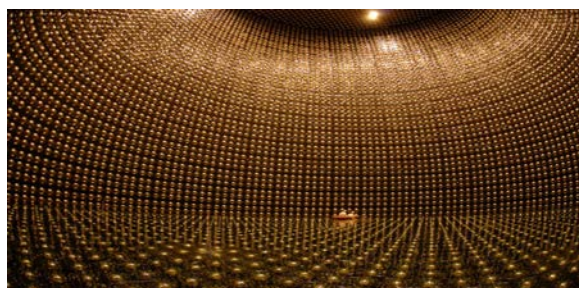


Imagen 1: Detector Super-Kamiokande [4]

Los resultados arrojados por dicho detector en el año 1998 dieron paso a un fenómeno que ya había sido discutido en el año de 1957 por Pontecorvo conocido como “oscilación de neutrinos”, dichas oscilaciones eran provenientes de neutrinos atmosféricos, más tarde en el año 2,000 se observó el neutrino tau mediante el experimento DONUT el cual ya había sido predicho con anterioridad gracias a los resultados del decaimiento del bosón Z proporcionados por LEP en el CERN puesto que éstos eran compatibles con la existencia de tres neutrinos. Un año más tarde el SNO midió las oscilaciones de los neutrinos electrónicos solares así como el flujo total de neutrinos provenientes del Sol. Los resultados sobre neutrinos son cada vez mayores y constituyen un importante campo de investigación.

La Masa del Neutrino

Uno de los aspectos más interesantes sobre los neutrinos es en referencia a su masa [5], cabe destacar que en el modelo estándar de partículas e interacciones fundamentales el neutrino carece de masa aunque debido al fenómeno conocido como oscilación de neutrinos la partícula en cuestión debe presentar masa aunque esta sea muy pequeña. Por ejemplo, el neutrino electrónico es el objeto se acopla al electrón mediante las corrientes de carga débiles, de igual manera esto sucede con los neutrinos muónicos y con los tauónicos. De esta forma si el neutrino adquiere masa esto no quiere decir que deba describir estados de partículas físicas con un autovalor de masa determinado. De esta forma los autoestados de la interacción V_e , V_μ y V_τ serán una superposición de los estados de masa. Por lo que los estados definidos de masa (V_1 , V_2 y V_3) no necesariamente tienen que coincidir con los neutrinos de partículas asociadas.

Otro aspecto importante en referencia a la masa de los neutrinos es el que respecta a la estabilidad de estos, puesto que si tienen masa las generaciones siguientes a la del más ligero deberían ser inestables debido a que en general no habría una simetría para prevenir dicho decaimiento. Pero la verdadera importancia de este fenómeno se refiere a que el decaimiento del

neutrino más pesado puede afectar en gran manera a los fenómenos cosmológicos que al Universo respectan.

Oscilación de Neutrinos

En el año de 1957 Bruno Pontecorvo propuso el fenómeno conocido como oscilación de neutrinos [6], en el cual un neutrino creado con un sabor leptónico puede oscilar a otro tipo de sabor.

Los neutrinos son producidos en procesos con corrientes débiles cargadas y por consiguiente son autoestados débiles de sabores (V_e , V_μ y V_τ), pero estos son diferentes de los autoestados de masa (V_1 , V_2 y V_3). Se debe recordar que en física cuántica una partícula se puede comportar como una onda por lo que los sabores pueden ser superposiciones de los autoestados de masa definida, lo quiere decir que los autoestados de masa definida no tienen que ser iguales de los de sabor.

La probabilidad de que un neutrino de sabor oscile a otro está dada por el tiempo que como se verá este es una aproximación de la longitud. Si los neutrinos no tuvieran masa esto querría decir que viajan a la velocidad de la luz por lo que la oscilación no podría darse, por lo que esto es una prueba fundamental de que los neutrinos tienen masa aunque ésta sea muy pequeña para poder ser medida con la tecnología de hoy en día.

MATERIALES Y MÉTODOS

La física utiliza el lenguaje del Universo para poder explicar los fenómenos que ocurren en la naturaleza, dicho lenguaje es (al menos para mí) el mayor logro que la mente humana ha podido crear: la matemática.

Los neutrinos fueron descritos en un inicio mediante la física teórica y durante varias décadas seguían siendo sólo parte de las ecuaciones, tiempo después gracias a los experimentos se descubrió su existencia. La investigación que se realizó en específica referencia al tema de los neutrinos fue de manera puramente teórica, se tuvo que investigar antecedentes del tema en

cuestión así como en cierta medida otros aspectos que aquí no es necesariamente tratar. El entendimiento de conceptos fue una base fundamental para poder comprender el tema en cuestión así como el uso del lenguaje matemático que sostiene toda la información teórica que en cuanto al tema se refiere.

Si bien la investigación realizada no fue de manera experimental sí se estudio cómo es el análisis experimental en los diversos centros de investigación. A continuación se mencionará de manera breve las fuentes de estas partículas.

El Sol es nuestra principal fuente de neutrinos [7], funciona mediante reacciones de fusión nuclear que dan paso a la desintegración beta, durante un tiempo se presentó el problema de los neutrinos solares. También en las supernovas de tipo II se libera energía en forma de neutrinos. Otra fuente de importancia son los rayos cósmicos y en muy poca medida los procedentes de la tierra conocidos como geoneutrinos los cuales son producidos mediante la desintegración beta de isótopos radioactivos presentes en la Tierra. También en menor medida son los reactores nucleares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan de manera breve resultados del análisis matemático en referencia al tema de la oscilación de neutrinos. [8]

Para la oscilación de dos sabores en el vacío [9] se toman los autoestados de la interacción débil V_e y V_μ :

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

Dichos autoestados presentan una evolución temporal la cual satisface la ecuación de Schrödinger expresada en el sistema de unidad natural (la velocidad de la luz $c=1$):

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle ; \quad E_i = \sqrt{\vec{p}^2 + m_i^2} \quad (3)$$

Haciendo el respectivo análisis de probabilidades y sabiendo que las masas de los neutrinos son pequeñas en comparación con su momento y puesto que neutrinos viajan a velocidad muy cercana a la velocidad de la luz, el tiempo queda como una aproximación igualitaria de la distancia L recorrida por los neutrinos en un tiempo t :

$$E_i \simeq |p| + \frac{m_i^2}{2|p|} ; \quad t \simeq L \quad (4)$$

Teniendo el caso de los dos sabores de neutrinos se puede expresar la probabilidad de que un autoestado de interacción débil haya oscilado a otro tras recorrer una distancia L :

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; L) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) L (m)}{|p| (\text{MeV})} \right] \quad (5)$$

De igual manera se puede realizar el análisis matemático para calcular la probabilidad de oscilación en el caso general en el vacío así como en presencia de interacción con materia.

CONCLUSIONES

El estudio de neutrinos es de gran importancia en la física de partículas, no sólo presentan propiedades peculiares como es el caso de su masa sino que además el fenómeno de oscilaciones es de gran importancia.

Con los resultados arrojados a través de los años los neutrinos han constituido un importante objeto de estudio tanto en la parte teórica como en la parte experimental, sus propiedades son de gran interés pues apenas interactúan con la materia, presentan una diminuta masa, pero sobre todo su principal importancia radica en el fenómeno de sus oscilaciones pues los resultados que han sido arrojados tanto de la parte teórica como en la parte experimental en los diversos centros de investigación podrían constituir física más allá del modelo estándar, esto abriría el estudio de física nueva para poder entender de manera más amplia nuestro Universo. Los

neutrinos constituyen un importante objeto de estudio en la física.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a la Universidad de Guanajuato por permitirme participar en los Veranos de Investigación, a la Dra. Claudia Erika Morales Hernández por el todo el apoyo que me ha brindado así como las diversas oportunidades que me ha proporcionado, al Dr. David Yves Ghislain Delepine por todo el asesoramiento en la investigación realizada así como el haberme aceptado para participar en el proyecto, a la maestra Psic. Juana Silvina Galván Rocha directora de la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato por el apoyo en el transporte así como en muchos otros aspectos, sin ellos esto no habría sido posible.

REFERENCIAS

- [1] <http://home.web.cern.ch/about/physics/standard-model>
Para introducción de información del modelo estándar
- [2] Kropp, Moe, Price, Schultz, Sobel.
Neutrinos and other matters selected works of F. Reines.
University of California, Irvine.
Section 2 Discovery of the Neutrino p. 59
- [3] Section 3: Neutrino Properties p.95
- [4] <http://t2k-experiment.org/photo/super-kamiokande/>
Para imagen e información de Super-Kamiokande
- [5] Mohapatra, Palash
Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics
University of Maryland, College Park
University of Oregon, Eugene
Chapter 3 Massive Neutrinos page 35
- [6] <http://home.web.cern.ch/about/accelerators/cern-neutrinos-gran-sasso>
Para introducción general a los neutrinos
- [7] Mohapatra, Palash
Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics
University of Maryland, College Park
University of Oregon, Eugene
Chapter 13 Solar neutrinos page 239

[8] <http://www.biblioteca.org.ar/libros/90081.pdf>
Para introducción general al tema de oscilación de neutrinos

[9] <http://www.ft.uam.es/personal/rubio/neutrinos.pdf>
Para introducción al cálculo de oscilaciones en el vacío