

Neutrinos

Edgardo V. Bonzi¹

¹Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba. Medina Allende y Haya de la Torre, Ciudad Universitaria, X5000HUA Córdoba, Argentina.

E-mail: bonzie@famaf.unc.edu.ar

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

(Recibido el 5 de octubre de 2015; aceptado el 14 de diciembre de 2015)

Resumen

En este artículo vamos a repasar brevemente el Modelo Estándar de Partículas, luego haremos una revisión cronológica del descubrimiento del neutrino. Por último mencionaremos el Observatorio de Neutrinos de Sudbury y Super-Kamiokande, donde han trabajado los recientes ganadores del Premio Nobel de Física, los investigadores Arthur B. McDonald y Takaaki Kajita, respectivamente.

Palabras clave: Modelo Estándar de Partículas, Premio Nobel de Física 2015, Neutrinos, Oscilaciones de neutrinos.

Abstract

In this article we will briefly review the Particles Standard Model, then we will make a chronological revision of the discovery of the neutrino. Finally we will mention the Sudbury Neutrino Observatory and Super-Kamiokande, where have worked the recent winners of the Nobel Prize in Physics, the researchers Arthur B. McDonald and Takaaki Kajita, respectively.

Keywords: Standard Model of Particles, Nobel Prize in Physics 2015, Neutrinos, Neutrino oscillations.

I. INTRODUCCIÓN

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

Así está anunciado el premio Nobel en Física del año 2015, en la página oficial de los premios nobeles (Premio Nobel, 2015).

Para poder comprender que significa esta premiación debemos hablar primero de los neutrinos y luego de las oscilaciones.

La mejor manera de comenzar es partiendo del "Modelo Estándar" de la física de partículas, la cual es una teoría en proceso de elaboración, que puede explicar mucho de cómo está hecho y de cómo funciona el mundo conocido.

A. El Modelo Estándar de Partículas

Los elementos más importantes del modelo estándar (Griffiths, 2008; Kibble, 2013) fueron encajando en su lugar a lo largo de un siglo de intensos trabajos experimentales y teóricos, desde el descubrimiento del electrón realizado por J.J. Thomson en 1897, al descubrimiento del quark top en el Fermilab en 1995. Hechos históricos que luego revisaremos en función de la importancia que tienen para el descubrimiento del neutrino.

En el modelo Estándar hay dos grandes grupos de partículas, denominadas quarks y leptones, los cuales se diferencian en una propiedad llamada "color".

La propiedad color guarda una lejana semejanza con la carga eléctrica, sin nada que ver con los colores del espectro de luz, pues sólo es un nombre metafórico. Así como existen dos cargas eléctricas, una positiva y una negativa y cuando las juntamos se anulan, las cargas de la fuerza fuerte son tres y

cuando las juntamos a las tres se anulan, como si fuera los colores primarios. A su vez también existe un borrador de cada color a los que se les llama anti, por ejemplo rojo y antirrojo, de manera similar a como lo son las cargas eléctricas negativas y positivas.

Estas partículas interactúan entre sí mediante cuatro interacciones, las que son llamadas fuerza gravitatoria, fuerza electromagnética, fuerza nuclear y fuerza débil y cada una de estas interacciones se transmiten mediante otro tipo de partículas que son los bosones, partículas mediadoras, es decir, quienes llevan la información, ejemplo de ello son los fotones en el campo electromagnético.

Los quarks poseen color, los leptones no poseen color, por ello, los quarks interactúan con la fuerza fuerte o fuerza color y los leptones no.

Según el Modelo Estándar actual, los protones y neutrones se componen de quarks y constituyen la parte más importante de la masa del átomo y están sometidas a las 4 interacciones. En tanto que los leptones están solo sometido a todas las interacciones sin contar la fuerza fuerte o color, los leptones son inmunes a la fuerza fuerte o interacción fuerte o fuerza color. El electrón es el más famoso representante de la familia de los leptones.

A su vez, el mundo científico maneja una clasificación de las partículas elementales que componen la materia. En esta clasificación se consideran 3 generaciones de partículas con cuatro tipos de partículas. Hay pruebas convincentes de que no existe una cuarta generación.

La primera generación está formada por dos quarks up y down, electrón y antineutrino electrónico. El quark up posee $+2/3$ de carga eléctrica y spin $1/2$, en tanto que el quark down posee carga eléctrica $-1/3$ y spin $1/2$. Toda la materia conocida del universo está constituida solamente por estos cuatro elementos, incluidos nosotros.

Los elementos de la segunda generación y tercera generación tienen una vida muy breve que pueden ser del orden de microsegundos y solamente se han observado en los rayos cósmicos y en laboratorios.

Los miembros de la segunda generación son los quarks strange y charm, y el muón y su antineutrino. El muón es una partícula similar al electrón, con una carga eléctrica negativa, pero su masa es 200 veces mayor que la masa del electrón.

Y los de la tercera generación son los quarks top y bottom y la partícula tau con su pertinente antineutrino. El tau es una partícula también similar al electrón, pero su masa es 3.500 veces mayor que la masa del electrón.

A su vez, todas estas partículas tienen su contraparte denominada antipartícula. Si uno de ellos se encuentra con su contraparte, ambos desaparecen y quedará como remanente dos quantum de energía equivalente a sus masas. Ejemplo de ello es el positrón, que es la antipartícula del electrón, en éste caso el electrón y su contraparte, el antielectrón, llamado positrón, si se encuentran se aniquilan y quedarán dos fotones de 0,511 MeV cada uno. Al igual que los seis quarks, existen sus anti quarks, y los antineutrinos tienen sus partículas que los aniquila que son los neutrinos.

Uno de las interrogantes esenciales de la física es lo que llamamos masa original. Nadie sabe por qué las partículas de las tres generaciones tienen masas crecientes, y tampoco qué es lo que decide que algunas partículas no tengan masa.

Las familias de partículas pueden ser observado en la figura "Modelo Estándar de Partículas Elementales".

Las tres generaciones de la
Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
nombre →	u up	c charm	t top	γ photon
	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z fuerza débil
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	+1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
Leptones	e electron	μ muon	τ tau	W [±] fuerza débil

Bosons (Fuerzas)

FIGURA 1. Modelo Estándar de Partículas Elementales. Columnas I, II y III, representan cada una de las tres generaciones de partículas. La cuarta columna representa a las partículas portadoras de información o de interacción (Partícula elemental, 2015).

Los hadrones conforman las partículas pesadas, de allí su nombre, cada partícula está formada por quarks. Una sub familia son los bariones, los miembros más conocidos son los protones y neutrones que están compuestos por tres quarks. Ejemplo de ello, es el caso del protón que tiene dos quarks u y un quarks d; por el contrario, el neutrón tiene dos quarks d y un quarks u.

En tanto que, la combinación de un quark y un anti-quark forman la sub familia de los mesones; por ejemplo, el mesón pi, que está formado por un quarks u y un anti-quarks d.

Los mesones son partículas inestables y decaen en otras partículas. Un ejemplo sería el decaimiento de los mesones: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$; y $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. Esto es, una partícula pi positiva decae en un muón positivo y un neutrino, y en el segundo caso una pi negativa decae en una mu negativa y un antineutrino.

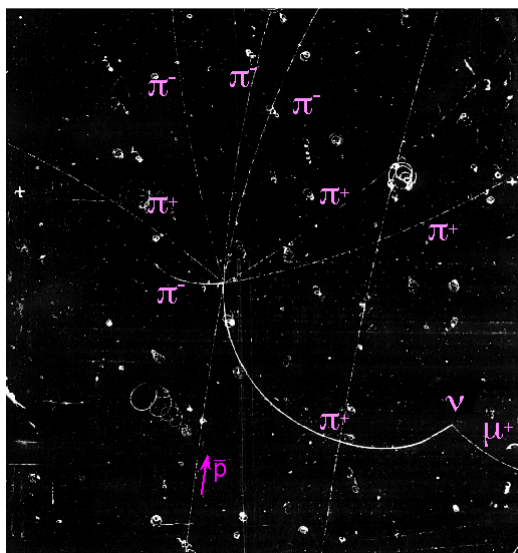


FIGURA 2. Fotografía de una reacción en la cual un antiprotón entra y choca con un protón. Como resultado de esta colisión la materia del protón y del antiprotón se convierte en energía ($E=mc^2$) para la creación de nuevas partículas, fueron producidos ocho piones en esta aniquilación, y posteriormente, un pi+ decae en un muón positivo y un neutrino. Los piones positivos y negativos se curvan de modo diferente en el campo magnético (Cámara de burbujas, 2015).

B. Los primeros pasos del neutrino

El físico Wilhelm Conrad Röntgen, nacido en el 1845 en Alemania, realizó el descubrimiento de los rayos X. Este hallazgo hizo pensar al físico francés Antoine Henri Becquerel, nacido en 1852, que ésta nueva radiación podría estar relacionada con la fluorescencia y la fosforescencia, conocidas desde 1560 por estudios de Bernardino de Sahagún y de Nicolás Monardes, nacido en 1565.

Becquerel, efectuando experiencias en estos campos descubrió casualmente que un compuesto de uranio velaba las placas fotográficas envueltas en papel negro al ser colocado sobre ellas, deduciendo que este fenómeno era característico del átomo de uranio, descubriendo así la emisión de rayos, similares a los rayos X.

Con la ayuda de Pierre Curie, Marie Curie se embarcó en la tarea de aislar de la pechblenda nuevos elementos que tuvieran esa cualidad. En julio de 1898 identificaron la presencia de un nuevo elemento al que llamaron polonio, en honor a la Polonia natal de Marie, y en diciembre otro nuevo elemento, el radio, del Latín radius que significa rayo de luz. Marie llamó radiactividad a la propiedad de emitir rayos.

El radio produce aproximadamente un millón de veces más radiación que el uranio, por lo que se constituyó en una fuente invaluable para el estudio de la radiactividad, y atrajo el interés de científicos de todo el mundo.

Ernest Rutherford, nacido en 1871 en Nueva Zelanda, publicó en 1899 un documento esencial, en el que estudiaba el modo que podían tener esas radiaciones de ionizar el aire, situando al uranio entre dos placas cargadas y midiendo la corriente que pasaba. Estudió así el poder de penetración de las radiaciones, cubriendo sus muestras de uranio con hojas metálicas de distintos espesores. De ello dedujo que el uranio emitía dos radiaciones diferentes, pues tenían poder de penetración distinto.

En 1900, Paul Ulrich Villard químico y físico francés nacido en 1860, proporcionó evidencia de un tercer tipo de radiación en el radio, que denominó radiación gamma.

En 1904, Rutherford, junto a su ayudante en la Universidad de Manchester Johannes Wilhelm Geiger, físico alemán nacido en 1882 conocido como Hans, descubrieron que la radiación alfa estaba constituida

por algo que se asemejaba a átomos de helio. Finalmente, los tres tipos de radioactividad fueron identificados:

- Radiación alfa: constituida por núcleos de Helio 4 (dos protones y dos neutrones).
- Radiación beta: constituida por electrones.
- Radiación gamma: constituida por fotones de alta energía.

La radiación beta, emisión de un electrón, presumía emitir solamente un tipo de partículas y, entonces, una energía bien definida, fija, similarmente a las partículas alfa. Sin embargo, tras diferentes estudios de esta radiación realizados por Lise Meitner, física austriaca nacida en 1878; Otto Hahn, químico alemán, nacido 1879, Johann Friedrich Wilhelm Adolf von Baeyer, químico alemán nacido en 1835; James Chadwick, físico inglés nacido en 1891; se mostró en 1914 que éste no era el caso dado y que el espectro de energía del electrón era continuo, lo que no era lógico.

Muchos científicos se hacían la pregunta de si había llegado el momento de abandonar el principio de conservación de la energía, el sagrado principio que los científicos siempre han verificado mediante experimentos. Incluso, Niels Henrik David Bohr, físico dinamarqués nacido en 1885, entre otros, empezó a creer que la respuesta tal pregunta era afirmativa.

La mayoría de los descubrimientos tienen su origen en problemas que la comunidad científica encara frecuentemente sin percatarse de ello. Antes de la llegada del neutrino, tuvo que aparecer el problema de la desintegración beta y para que ésta apareciera, tuvo que ser descubierta la radioactividad.

C. La propuesta del Neutrino

En el año 1930 Wolfgang Ernst Pauli, físico austriaco nacido en 1900 nacionalizado suizo, propuso otra solución para tratar de salvar el principio de conservación de la energía. El 4 de diciembre de 1930, invitado a un congreso de físicos en Tübingen, Alemania, envió a sus colegas una carta en donde proponía que, conjuntamente con la partícula beta, podría ser emitida otra partícula más, pero sin carga, la cual se lleva parte de la energía y que por ser neutra no había podido ser descubierta aún.

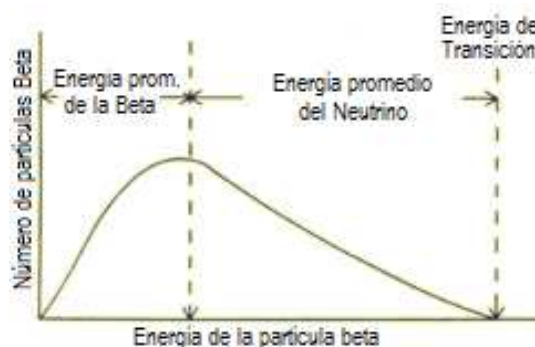


FIGURA 3. Espectro de Energía de las partículas Beta.

En febrero de 1932, el físico inglés James Chadwick nacido en 1891, descubre el neutrón, pero los neutrones son demasiado pesados y por ello no se corresponden a la partícula imaginada por Pauli.

En 1932 Carl David Anderson, físico estadounidense nacido en 1905, descubre el positrón. El positrón fue la primera partícula de antimateria observada, verificando la teoría de Paul Adrien Maurice Dirac, un físico británico nacido 1902. A finales de 1933, mientras Frederic Joliot-Curie, yerno de los esposos Curie, descubre radioactividad beta positiva, esto es, un positrón es emitido en lugar de un electrón, en tanto que Enrico Fermi toma la hipótesis del neutrino y construye su teoría de la desintegración beta.

En la conferencia Solvay de Bruselas, Octubre de 1933, Pauli dice, hablando sobre sus partículas:

"... su masa no puede ser mucho más que la masa del electrón. Con el fin de distinguirlos de los neutrones pesados, el señor Fermi ha propuesto nombrarlos "neutrinos". Es posible que la masa adecuada de los neutrinos sea cero ... me parece factible que los neutrinos tengan un spin de un medio ... no sabemos nada de la interacción de los neutrinos con otras partículas de materia y con los fotones, la hipótesis de que tengan momento magnético a mí me parece que no están fundadas en absoluto."

Enrico Fermi nacido en 1901, físico italiano, postuló la teoría del decaimiento o desintegración beta cuya primera explicación fue expuesta en su "Tentativo di una teoria dei raggi beta" en 1933, que se popularizó en el congreso de Solvay. Esta teoría trata de manera casi completa los aspectos formales del proceso, desarrollando a partir de allí, el mismo Fermi, la primera teoría de la fuerza débil o interacción débil que actúa en el decaimiento de las partículas.

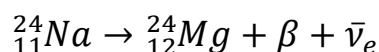


FIGURA 4. El ${}^{24}\text{Na}$ sufre una desintegración β^- formando el elemento superior, el magnesio y emitiendo un antineutrino.

En 1933, el físico francés Francis Perrin, nacido en 1901, mostró que la masa del neutrino tiene que ser mucho más pequeña que la del electrón.

Desde entonces, los físicos hemos hecho grandes progresos en la comprensión de la interacción débil y ahora también hablamos de protones y neutrones, por otra parte compuestos por quarks.

Los protones y neutrones, por ser bariones poseen tres quarks que pueden transformarse unos en otros. Cuando uno de los quarks denominado down del neutrón se transforma en otro denominado up, produce la emisión de un bosón W, quantum portador de la interacción, que se desintegra en un electrón y un antineutrino, el famoso decaimiento beta.

La búsqueda del neutrino comienza mientras que Hans Albrecht Bethe, físico alemán-estadounidense nacido en Estrasburgo en 1906 y Rudolf Ernst Peierls, físico británico nacido en Alemania nacido en 1907; mostraron en 1934 que la probabilidad de interacción (sección eficaz) entre neutrinos y la materia es extremadamente pequeña, esto es, miles de millones de veces más pequeña que la de un electrón con la materia. El neutrino interactúa tan débilmente con la materia que puede atravesar completamente la Tierra sin interactuar con átomo alguno.

D. La Primera búsqueda

En 1952, Frederick Reines nacido 1918 junto con Clyde Lorrain Cowan Jr nacido en 1919, ambos físicos estadounidenses, acuerdan usar la planta nuclear de Hanford, Washington, como fuente de neutrinos. El experimento propuesto es llevado a cabo y los primeros resultados son obtenidos durante el verano del año 1953. A pesar de todo, los resultados obtenidos no son claros ni determinantes. Realizan de nuevo el experimento en 1956, más cuidadosamente y esta vez cerca de la planta nuclear de Savannah River, Carolina del Sur. Con las mejoras realizadas logran mejorar la relación señal ruido y ello les proporciona la evidencia que estaban buscando, habían detectado al neutrino.

Reines y Cowan realizaron el experimento usando un detector que constaba de un blanco de 400 litros de agua y cloruro de cadmio. El antineutrino producido en el reactor nuclear es emitido e interactúa con un protón del detector, produciendo un positrón y un neutrón. El positrón se aniquila con un electrón del material emitiendo simultáneamente dos fotones y el neutrón con baja energía cinética (neutrón térmico) es capturado eventualmente por un núcleo de cadmio, produciendo una emisión de fotones aproximadamente 15 microsegundos después de la aniquilación del positrón. El proceso observado es el inverso del decaimiento beta conocido.

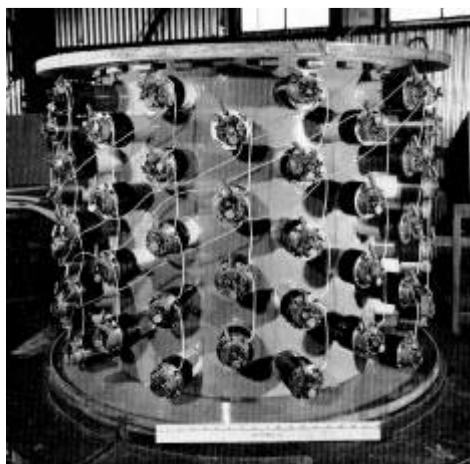


FIGURA 5. El detector de neutrinos del experimento de 1953. 400 litros de una mezcla de agua y cloruro de cadmio y tubos fotomultiplicadores a su alrededor.

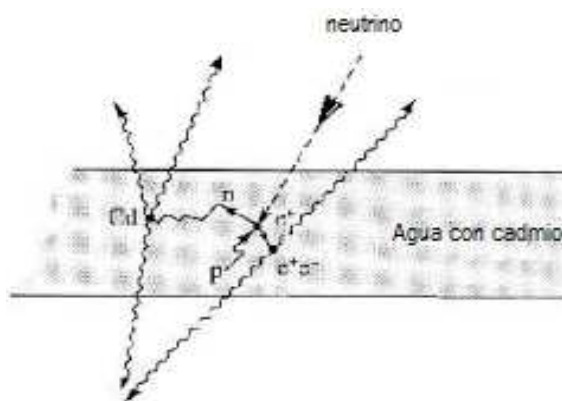


FIGURA 6. Esquema del experimento de 1956.

E. La segunda búsqueda

El neutrino, o más precisamente el antineutrino, que sale de un reactor nuclear es un neutrino de tipo electrónico porque es producido en la desintegración beta y es emitido junto a un electrón. La pregunta ahora era si los neutrinos asociados a los otros leptones son diferentes.

En 1959, en la Universidad de Columbia, Nueva York, comenzó la búsqueda del neutrino muónico. M. Schwartz se dio cuenta de la posibilidad de producir un haz de neutrino bastante intenso mediante desintegración de piones, partículas producidas en gran cantidad cuando un haz de protones de energía del orden de los GeV colisiona con la materia.

En conjunto, Melvin Schwartz físico estadounidense nacido en 1932, Leon Max Lederman físico estadounidense nacido en 1922, Jack Steinberger físico nacido en Alemania en 1921 que estudió en EEUU radicado en Suiza; se centran en un método de detección de los neutrinos que permitió observar a los leptones. Este descubrimiento permitió a los teóricos elaborar un esquema, conocido como modelo estándar, para la clasificación de todas las partículas elementales.

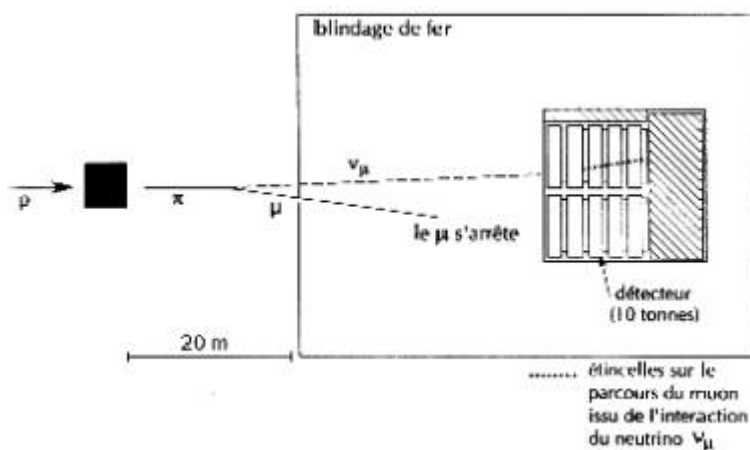


FIGURA 7. Detector de neutrinos.

Tsung-Dao Lee físico chino nacido en 1926 y Chen Nin Franklin Yang físico chino estadounidense nacido en 1922, juntos se entusiasman sobre la idea y comienzan a calcular las secciones eficaces esperadas.

Martin Lewis Perl, físico estadounidense nacido en 1927, entre 1974 y 1977 dirigió experimentos donde fue detectada por primera vez la partícula tau, y con él la tercera familia de leptones.

En 1983, el bosón W muestra su existencia por decaimiento en un electrón y un antineutrino. Luego se descubre el bosón Z. La interacción débil y el neutrino muestran definitivamente su señal en la historia de la física de las partículas. Un largo camino se ha recorrido desde la primera desintegración beta descubierta en 1898, pero aún no se logró todo el entendimiento de los neutrinos.

Poco después, en 1998, el neutrino tauónico es observado experimentalmente, el cual fue anunciado en julio de 2000 en la colaboración DONUT (Direct Observation of the NU Tau) del Fermilab.

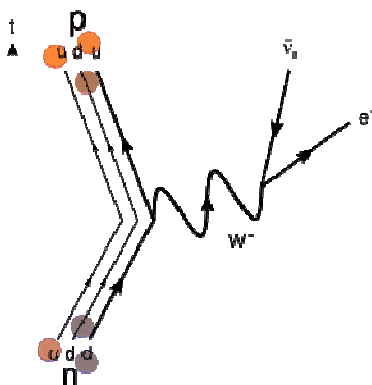


FIGURA 8. En el diagrama adyacente, vemos el mecanismo de desintegración beta, mediante el cual, un neutrón da como resultado un protón, un electrón y un antineutrino. En realidad se produce un proceso intermedio, en el que por brevísimo tiempo entra en escena el bosón W^- , que se transforma en un electrón y un antineutrino. Obsérvese en la imagen que el cambio de neutrón a protón implica el cambio en uno de los quarks que los componen.

F. Los neutrinos y sus masas

La idea de que el problema de los neutrinos solares podría ser causada por las oscilaciones de neutrinos se remonta a una sugerencia hecha en 1967 por Bruno Maksimovič Pontekorvo (Pontekorvo, 1967; Gribov y Pontekorvo, 1969) físico italiano naturalizado soviético nació en 1913.

A partir de allí, mediante consideraciones teóricas y experimentales, algunos físicos propusieron que el neutrino puede tener una masa no nula, salvo posibilidades más ocurrences o exóticas. La mecánica cuántica permite el fenómeno llamado “oscilaciones” de estados de neutrinos, esto es, un neutrino electrónico mientras vuela puede cambiar su estado convirtiéndose en un neutrino muónico o incluso tauónico. Vale aclarar que cada estado del neutrino tiene una masa diferente, y por ello se dice que tiene una masa oscilante. En realidad la teoría explica que oscila entre los tres estados. Si los tres estado tuvieran la misma masa no podrían alterar sus estados. Por ejemplo:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \text{sen}^2(2\theta)\text{sen}^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 L}{E}\right) \quad (1)$$

aquí P es la probabilidad para oscilar del estado neutrónico α al β , que representan por ejemplo los estados electrónicos y muónicos. θ representa la superposición de estados que termina siendo un factor de normalización, E representa la energía del neutrino y el dato más importantes es Δm_{12}^2 , que representa la diferencia de masa entre los estados α y β . Aquí se puede observar la necesidad de que ambos estados tengan masas diferentes y que al pasar de un estado al otro, cambiará de masa, si las masas fueran iguales la oscilación sería nula.

Desde 1969, Raymond Davis Jr. físico estadounidense nacido en 1914, intentó en la mina Homestake, bajo 3000 metros de tierra y rocas, capturar unos exiguos neutrinos solares por año usando un detector hecho de 600 toneladas de una solución de agua con cloro propuesto por Pontekorvo. Sus primeros resultados son sorprendentes y hasta hoy, con más de 30 años de experimentos, siguen siendo confirmados. Así, entonces, nace el problema de los neutrinos solares, es decir, se detectan tres veces menos neutrinos electrónicos provenientes del Sol que los predichos por el modelo estándar solar.

Frederick Reines físico estadounidense nacido en 1918, propone un experimento en la planta nuclear de Savannah River en 1979, y lleva a cabo la mediciones con antineutrinos. El resultado no fue compatible con las predicciones teóricas y también podría ser explicado por oscilaciones de los estados de los neutrinos, aunque no había conclusiones definitivas todavía.

Los astrofísicos realizan proyectos y experimentos para confirmar este hecho y ratificar el déficit inesperado según el modelo estándar solar. Especialmente tres experimentos, llamados:

- GALLEX (GALLium EXperiment) o Experimento galio fue un experimento de detección de neutrinos radioquímica que funcionó entre 1991 y 1997 en el Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italia.
- SAGE (Sovietic-American Galio Experiment) y GALEX/GNO (Galio Neutrino Observatory) basaron su detección de neutrinos en la reacción de galio. Comenzaron a medir neutrinos solares en 1989 y 1991 respectivamente, por medio de la reacción $Ga^{71} + \nu_e \rightarrow Ge^{71} + e^-$

- KAMIOKANDE, desarrollado en la mina Kamioka y llamado KamiokaNDE (Kamioka Nucleon Decay Experiment), por su diseño experimental no observa los mismos tipos de neutrinos, que son distintos de acuerdo a su origen en las reacciones termonucleares del sol.

La pregunta es si el déficit observado de neutrinos solares de tipo electrónico es a consecuencia de las oscilaciones de los estados de los neutrinos. La idea es interesante pero es difícil de comprobarla, los resultados de los experimentos y posteriores argumentos teóricos muestran sus dificultades.

Por otra parte, en 1985, Stanislav Pavlovich Mikheyev nacido en 1940 y Alexei Yuryevich Smirnov nacido en 1951, ambos físicos rusos, desarrollaron el trabajo previamente propuesto por Lincoln Wolfenstein físico estadounidense nacido en 1923, sobre oscilaciones neutrónicas amplificadas por la materia, crean el efecto MSW. El efecto Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (a menudo denominado efecto de la materia) es un proceso de la física de partículas que puede actuar para modificar las oscilaciones de neutrinos en la materia.

El déficit de neutrinos solares podría ser explicado por una ampliación de las oscilaciones como consecuencia de atravesar un medio material, como las capas exteriores del sol y el medio interestelar que hay entre el sol y la Tierra.

Fukuda y otros (1998) presentaron el trabajo "Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos", en donde presenta un análisis de datos de neutrinos atmosféricos de medidos en el detector Super-Kamiokande.

G. Arthur B. McDonald - Director del Observatorio de Neutrinos de Sudbury

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury (Sudbury Neutrino Observatory - SNO) (Jelly y otros, 1995) fue un observatorio de neutrinos situado 2.100 m bajo tierra en la mina INCO 's Creighton en Sudbury, Ontario, Canadá. El detector ha sido diseñado para detectar los neutrinos solares a través de sus interacciones con un gran tanque de agua pesada. El director del experimento, Arthur McDonald, Nació en 1943 en Sydney, Canadá, fue co-galardonado con el Premio Nobel de Física en 2015 por su contribución del experimento para el descubrimiento de la oscilación de neutrinos.

El detector se activó en mayo de 1999 y se desactivó el 28 de noviembre de 2006. Si bien ya no se están tomando nuevos datos, la colaboración SNO seguirá analizando los datos registrados durante ese período en los próximos años. Actualmente el laboratorio subterráneo se ha ampliado y continúan operando otros.

Las primeras medidas del número de neutrinos solares que arriban a la tierra fueron tomadas en la década de 1960, y todos los experimentos anteriores al SNO observaron menos neutrinos de los que predice el Modelo Solar Estándar. Como varios experimentos confirmaron este déficit, el efecto se hizo conocido como el problema de los neutrinos solares. Durante varias décadas, muchas ideas se presentaron para tratar de explicar el efecto, uno de los cuales era la hipótesis de oscilaciones de neutrinos. Todos los detectores de neutrinos solares antes del SNO habían sido sensibles principal o exclusivamente a los neutrinos electrón y produjo poca o ninguna información sobre los neutrinos mu y neutrinos tau.

En 1984, Herb Chen de la Universidad de California en Irvine señaló las ventajas del uso de agua pesada como un detector de neutrinos solares. A diferencia de los detectores anteriores, el uso de agua pesada haría el detector sensible a las dos reacciones, una reacción sensible a todos los sabores de neutrinos, y la otra reacción sensible sólo neutrino electrónico. Por lo tanto, tal detector puede medir las oscilaciones de neutrinos directamente. Algún lugar en Canadá era atractivo, porque la Atomic Energy of Canada Limited, que mantiene grandes reservas de agua pesada para apoyar sus reactor CANDU de las plantas de energía, estaba dispuesto a prestar la cantidad necesaria sin costo alguno.

La mina de Creighton en Sudbury, entre las más profundas del mundo y, por consiguiente baja en la radiación de fondo, fue rápidamente identificada como un lugar ideal para el experimento propuesto por Chen a construir, y desde la administración de la mina estaban dispuesto a hacer el lugar disponible por sólo los costos incrementales.

En el experimento se observó la luz Cherenkov producida por electrones relativistas en el agua, los cuales son impulsados por las interacciones de neutrinos.

La radiación de Cherenkov es una radiación de tipo electromagnético producida por el paso de partículas cargadas eléctricamente en un determinado medio a velocidades superiores a las de la luz en ese medio.

H. Takaaki Kajita - Centro para Neutrinos Cósmicos del Instituto para la Investigación de Rayos Cósmicos (ICRR), Super-Kamiokande.

La construcción del Observatorio Subterráneo de Kamioka, el predecesor del actual Observatorio de Kamioka (Instituto para la Investigación de Rayos Cósmicos, Universidad de Tokio) comenzó en 1982 y concluyó en abril de 1983. Su propósito fue la detección del decaimiento de protones, una de las interrogantes fundamentales de la física de partículas elementales (Super-Kamiokande, 2015).

Super-Kamiokande es un gran detector Cherenkov de agua. La construcción se inició en 1991 y la observación se inició el 1 de abril de 1996. El Super-Kamiokande es operado por una colaboración internacional de cerca de 110 personas y 30 institutos de Japón, Estados Unidos, Corea, China, Polonia, España y Canadá.

Takaaki Kajita físico japonés nacido en 1959, es conocido por experimentos con neutrinos en el Kamiokande y su sucesor el Super-Kamiokande. En 2015 fue co-galardonado con el Premio Nobel de Física 2015 por su contribución del experimento para el descubrimiento de la oscilación de neutrinos.

El detector Super-Kamiokande consiste en un tanque de acero inoxidable, de 39.3m diámetro y de 41.4m de altura, lleno de agua ultra pura. Cerca de 13.000 fotomultiplicadores se instalaron en la pared del tanque. El detector se encuentra a 1.000 metros bajo tierra en la mina de Kamioka, en la ciudad Hida, Gifu, Japón, de allí su nombre.

Uno de los propósitos del experimento Super-Kamiokande es revelar las propiedades de neutrinos a través de la observación de neutrinos solares, neutrinos atmosféricos y neutrinos producidos por el hombre.

En 1998, a partir de la observación de neutrinos atmosféricos se descubrieron las oscilaciones de neutrinos, en la cual los neutrinos cambian de tipo de neutrinos en vuelo, es decir cambian de neutrinos de electrón a neutrinos de muon, etc. En 2001, las oscilaciones de neutrinos solares fueron descubiertos. En 2011, el tercer modo de oscilación de neutrinos fue descubierto por la observación de neutrinos hechos por el hombre.

La investigación de las propiedades de los neutrinos nos permitirá entender cómo la materia fue creada en el universo temprano. Mediante la observación de neutrinos solares, podemos conocer las actividades en el interior del sol. Por detección de neutrinos de explosiones de supernova, se puede investigar los detalles del mecanismo de explosión de la estrella.

Por otro lado, la Teoría de la Gran Unificación (GUT), que puede unificar las fuerzas fundamentales de la naturaleza, las cuales predicen que el protón puede desintegrarse en partículas energéticas cargadas más ligeras. Ahora, el Super-Kamiokande busca este fenómeno desconocido. Si se observa el decaimiento de protones, puede ser posible probar la Teoría de la Gran Unificación.

II. CONCLUSIONES

A lo largo de más de un siglo hemos aprendido mucho acerca de las interacciones débiles y de los neutrinos, aunque éste siempre ha permanecido envuelto en misterio.

Desconocemos aún los valores de su masa y su momento magnético con precisión, aunque la existencia probada y confirmada en los últimos experimentos realizados apuntan a una masa no nula y neutrinos que cambian de estados mediante el fenómeno de las oscilaciones, como un aspecto que va más allá de que tenga masa nula o no el neutrino.

El problema de los neutrinos solares fue la primera evidencia indirecta de las oscilaciones del neutrino y puede entenderse perfectamente en términos de las oscilaciones, algo que el resto de soluciones propuestas a este enigma no pueden conseguir.

Otro problema aún por resolver es si el neutrino es una partícula de Majorana (partícula igual a su antipartícula) o de Dirac (partícula distinta de su antipartícula), así como el de la materia oscura y los rayos cósmicos de alta energía, que podrían involucrar a los neutrinos.

REFERENCIAS

Cámara de burbujas, 2015. fuente: <http://www.particleadventure.org/spanish/bubbles.html>. Acceso: Nov de 2015.

Fukuda, Y., Hayakawa, T., Ichihara, E., Inoue, K., Ishihara, K., Ishino, H., ... y Kobayashi, K., 1998. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical Review Letters*, 81(8), p. 1562.

Gribov, V. y Pontecorvo, B., (1969). Neutrino astronomy and lepton charge. *Physics Letters B*, 28(7), pp. 493-496.

Griffiths, D., 2008. *Introduction to Elementary Particles*. ISBN: 978-3-527-40601-2. Verlag GmbH: WILEY-VCH

Jelley, N., McDonald, A.B. y Hamish Robertson, R.G., 1995. The Sudbury Neutrino Observatory. *Annu. Rev. Astron. Astroph.*, 33, pp. 459-503.

Kibble, T. W. B., 2013. The Standard Model of Particle Physics. *25th Anniversary Academia Europaea Conference* in Wroclaw, 16 - 19 September 2013.

Partícula elemental, 2015. fuente https://es.wikipedia.org/wiki/Partícula_elemental. Acceso: Nov de 2015.

Pontecorvo B., 1967. Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 53, pp. 1717-1725.

Premio Nobel (2015). http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/. Acceso: Nov de 2015.

Super-Kamiokande, 2015. The Super-Kamiokande: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>. Acceso: (Nov de 2015).

<https://es.wikipedia.org/wiki/Biografía/> Acceso: Nov de 2015.

The Sudbury Neutrino Observatory: <http://www.sno.phy.queensu.ca/> Acceso: Nov de 2015.

The Nobel prize organization: <http://www.nobelprize.org/> Acceso: Nov de 2015.