

ALEPH SUB – CERO
SERIE DE DIVULGACIÓN

№ 2016 - I №

pp. 5 - 20

DE NEUTRINOS

(About Neutrinos)

Adunador: **ALBERTO MEJÍAS***

Recepción: Marzo 2016. Revisión y aceptación: Abril 2016.

Resumen. Se repasan propiedades fundamentales de los neutrinos. La primera parte se centra en características básicas de los neutrinos en el Modelo Estándar y en cómo se detectan los neutrinos. Se presentan las masas y oscilaciones de los neutrinos y se proporciona un resumen actualizado, de importantes resultados experimentales con respecto a las oscilaciones de neutrinos. Luego, se discuten propuestas experimentales presentes y futuras, incluyendo nuevos experimentos de precisión, de reactor y acelerador. Por último, se revisan diferentes enfoques para medir la masa del neutrino y la naturaleza (MAJORANA o DIRAC) de los neutrinos. La detección de neutrinos procedentes de explosiones de supernovas e información que pueden proporcionar estas mediciones también se resumen al final.

Descriptores. Física de Partículas, Modelo Estándar, oscilación de neutrinos, partículas MAJORANA, partículas DIRAC.

Abstract. Fundamental properties of neutrinos are reviewed. The first part is focused on basic characteristics of neutrinos in the Standard Model and how neutrinos are detected. Neutrino masses and oscillations are introduced and a summary of important experimental results on neutrino oscillations to date is provided. Then, present and future experimental proposals are discussed, including new precision reactor and accelerator experiments. Finally, different approaches for measuring the neutrino mass and the nature (MAJORANA or DIRAC) of neutrinos are reviewed. The detection of neutrinos from supernovae explosions and the information that this measurement can provide are also summarized at the end.

* ALBERTO R. MEJÍAS E. es Licenciado en Matemáticas, egresado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de los Andes (ULA) Mérida-Venezuela. Es profesor emérito de Topología, jubilado por la Universidad de los Andes en 1999. alrame59@gmail.com

Adunador: ALBERTO MEJÍAS

Keywords. Particle Physics, Standard Model, neutrino oscillation, Majorana particles, Dirac particles.

0 Introducción

Los neutrinos (termino derivado del italiano que significa 'los pequeños neutrones', atribuido al científico italiano ENRICO FERMI) son partículas subatómicas de tipo fermiónico, sin carga y con espín 1/2.

Hace algunos años se sabe, en contra de lo que se pensaba, que estas partículas tienen masa, pero muy pequeña y es muy difícil medirla.

Actualmente (2015), se estima que la masa de los neutrinos es inferior a unos $5,5 \text{ eV}/c^2$, lo cual es menos de una milmillonésima parte de la masa de un átomo de hidrógeno. Esta conclusión se basa en el análisis de la distribución de galaxias en el universo y es, según afirman algunos científicos, la medida más precisa, hasta ahora, de la masa del neutrino. Además, su interacción con las demás partículas es mínima, por lo que pasan a través de la materia ordinaria sin apenas perturbarla.

La determinación de la masa del neutrino tiene importantes consecuencias en el modelo estándar de física de partículas, ya que implicaría la posibilidad de transformaciones entre los tres tipos de neutrinos reconocidos, en un fenómeno conocido como oscilación de neutrinos. Este hecho tiene un claro impacto no sólo en Física de Partículas, sino también en Física de Astropartículas y en Cosmología.

En todo caso, los neutrinos no se ven afectados por la fuerza electromagnética o la nuclear fuerte, pero sí por la fuerza nuclear débil y la gravitatoria.

Sin embargo, los neutrinos son, todavía, partículas bastante desconocidas.

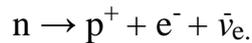
Por ahora, se sabe que hay tres neutrinos ligeros, aunque algunos modelos teóricos proponen la existencia de neutrinos estériles (que no interactúan débilmente con la materia).

Los neutrinos oscilan cuando se propagan por el espacio. Durante los últimos años se ha resuelto el problema del neutrino solar y los parámetros de oscilación solar y atmosférica han sido confirmados usando fuentes artificiales. Ha comenzado un período de mediciones de precisión en la física de neutrinos.

De Neutrinos

1 Historia

La existencia del neutrino fue propuesta en 1930 por el físico WOLFGANG PAULI para compensar la aparente pérdida de energía y de momento lineal en la desintegración β de los neutrones, según la siguiente reacción:



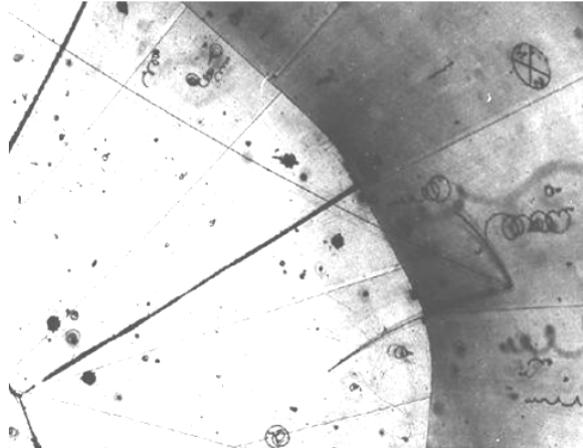
WOLFGANG PAULI interpretó que tanto la masa como la energía serían conservadas si una partícula hipotética, participase en la desintegración incorporando las cantidades perdidas. Desafortunadamente, esta partícula hipotéticamente prevista había de ser sin masa, ni carga, ni interacción fuerte, por lo que no se podía detectar con los medios de la época. Esto era el resultado de una sección eficaz muy reducida ($\sigma_\mu \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$). Durante 25 años, la idea de la existencia de esta partícula sólo se estableció de forma teórica.

De hecho, es muy pequeña la posibilidad de que un neutrino interactúe con la materia ya que, según los cálculos de física cuántica, sería necesario un bloque de plomo de una longitud de un año luz (9,46 billones de kilómetros) para detener a la mitad de los neutrinos que lo atravesaran.

En 1956, CLYDE COWAN y FREDERICK REINES demostraron la existencia del neutrino, experimentalmente. Lo hicieron bombardeando agua pura, con un chorro de 10^{18} neutrones por segundo. Observaron la emisión subsiguiente de fotones, quedando así determinada su existencia. A este ensayo, se le denomina 'experimento del neutrino'.

En 1962, LEON MAX LEDERMAN, MELVIN SCHWARTZ y JACK STEINBERGER mostraron que existía más de un tipo de neutrino, al detectar por primera vez al neutrino muónico.

Adunador: ALBERTO MEJÍAS



Primera observación de un neutrino en una cámara de burbujas, en 1970, en el Argonne National Laboratory de EE. UU. La observación se realizó gracias a las líneas observadas en la cámara de burbujas basada en hidrogeno líquido.

En el año 2000 fue anunciado, por parte de la Cooperación DONUT en **Fermilab**, el descubrimiento del neutrino tauónico. Su existencia ya había sido predicha, puesto que los resultados del decaimiento del **bosón Z**, medidos por LEP en CERN eran compatibles con la existencia de 3 neutrinos.

En septiembre de 2011, la **Cooperación OPERA** anunció que el análisis de las medidas para la velocidad de los neutrinos, en su experimento, arrojaba valores superlumínicos. En particular, la velocidad de una cierta clase de neutrino podría ser un 0,002 % mayor que la de la luz, lo que aparentemente contradiría a la **teoría de la relatividad**.

Sin embargo, en días posteriores al anuncio (que tuvo una espectacular difusión internacional), a través del británico **Institute of Physics**, se hicieron patentes algunos desacuerdos entre miembros del equipo internacional sobre la necesidad de efectuar más pruebas y de publicar los resultados en revistas con arbitraje, antes de dar más publicidad a estos primeros resultados.

Más recientemente, el 10 de noviembre de 2011, el director científico del **CERN** (Organización Europea para la Investigación Nuclear), **SERGIO BERTOLUCCI**, ha declarado a la prensa que "el experimento está siendo repetido por nosotros y por otros científicos en Estados Unidos, Japón e Italia" y que "lo más probable es que se demuestre que hubo un error en el experimento inicial y que el límite sigue siendo la velocidad de la luz". Se ha dicho desde el mismo organismo que a la hora de la medida de la distancia recorrida por los neutrinos hubo un fallo en el sistema

De Neutrinos

de posicionamiento (GPS), al tener un cable desconectado, por lo que la medida de la velocidad superlumínica ha sido descartada.

2 Clases

Existen tres tipos de neutrinos asociados a cada una de las familias leptónicas (o sabores): neutrino electrónico (ν_e), neutrino muónico (ν_μ) y neutrino tauónico (ν_τ), más sus respectivas antipartículas.

Los neutrinos pueden pasar de una familia a otra (es decir, cambiar de sabor) en un proceso conocido como '*oscilación de neutrinos*'. La oscilación entre las distintas familias se produce aleatoriamente y la probabilidad de cambio parece ser más alta en un medio material que en el vacío. Dada la aleatoriedad del proceso, las proporciones entre cada uno de los sabores, tienden a repartirse por igual (1/3 del total para cada tipo de neutrino) a medida que se producen sucesivas oscilaciones. Éste hecho permitió considerar, por primera vez, la oscilación de los neutrinos, ya que al observar a los neutrinos procedentes del Sol (que deberían ser principalmente electrónicos) se encontró que sólo llegaba un tercio de los esperados. Los dos tercios que faltaban habían oscilado a los otros dos sabores y por tanto no fueron detectados. Esto es el llamado '*Problema de los neutrinos solares*'.

La oscilación de los neutrinos implica directamente, que estos han de tener una masa no nula, ya que el paso de un sabor a otro sólo puede darse en partículas másicas (con masa no nula).

3 Implicaciones Astrofísicas de la Masa del Neutrino

En el modelo estándar se consideraba inicialmente, al neutrino, como a una partícula amásica (masa 0). De hecho, en muchos sentidos se le puede considerar de masa nula pues esta es, por lo menos diez mil veces menor que la del electrón. Esto implica que los neutrinos viajan a velocidades muy cercanas a la de la luz. Por ello, en términos cosmológicos al neutrino se le considera *materia caliente* o *materia relativística*. En contraposición, la *materia fría* sería la materia no relativística.

En 1998, durante la conferencia *0-mass neutrino*, se presentaron los primeros trabajos que mostraban que los neutrinos tienen una masa muy pequeña. Previamente a estos trabajos se había considerado que la hipotética masa de los neutrinos podría tener una contribución importante dentro de la *materia oscura* del Universo. Sin embargo, resultó que la masa del neutrino era insuficiente, demasiado pequeña para ser siquiera tenida en cuenta en la ingente cantidad de materia oscura que se

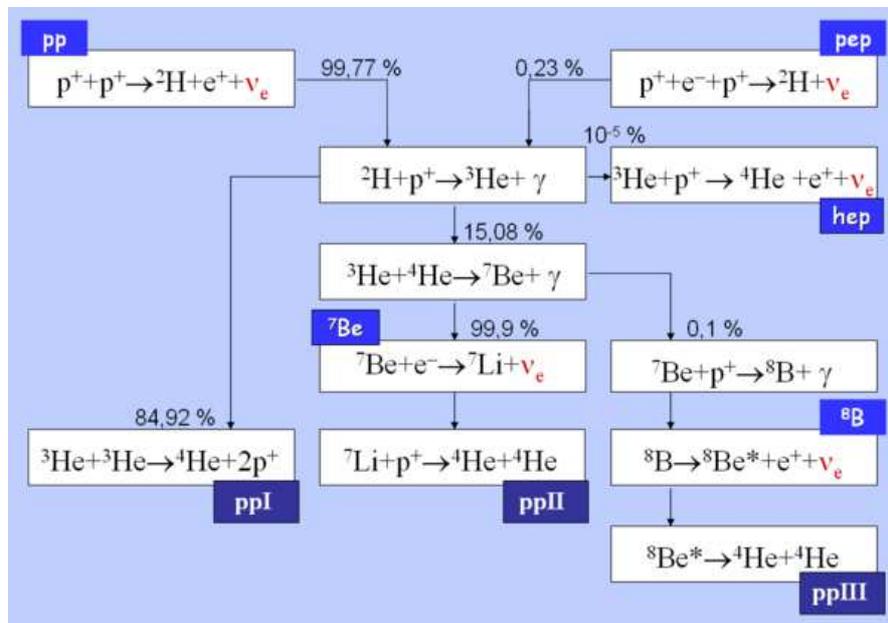
calcula que hay en el universo.

Por otra parte, los modelos de evolución cosmológica no cuadraban con las observaciones si se introducía **materia oscura caliente**. En ese caso las estructuras se formarían de mayor a menor escala. Mientras que las observaciones parecían indicar que primero se formaron las agrupaciones de **gas**, luego **estrellas**, luego **protogalaxias**, luego **cúmulos**, cúmulos de cúmulos, etc. Las observaciones, pues, cuadraban con un modelo de **materia oscura fría**. Por estos dos motivos se desechó la idea de que el neutrino contribuyera de forma destacada a la masa total del universo.

4 Fuentes

4.1 El Sol

El Sol es la más importante fuente de neutrinos a través de los procesos de **desintegración beta** de las reacciones que acaecen en su núcleo. Como los neutrinos no interactúan fácilmente con la materia, escapan libremente del núcleo solar atravesando también a la Tierra.



Generación de neutrinos solares en las cadenas protón-protón.

Aparte de las reacciones nucleares, hay otros procesos generadores de neutrinos, los cuales se denominan *neutrinos térmicos* ya que, a diferencia de los *neutrinos nucleares*, se absorbe parte de la energía emitida por dichas reacciones para

De Neutrinos

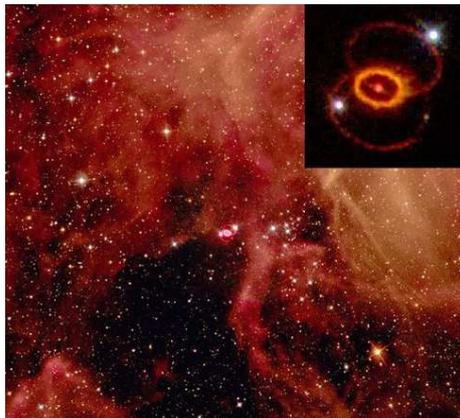
convertirla en neutrinos. De esta forma, una parte de la energía fabricada por las estrellas se pierde y no contribuye a la presión, siendo la razón por la que se dice que los neutrinos son *sumideros de energía*. Su contribución a la energía emitida en las primeras etapas (*secuencia principal*, combustión del helio) no es significativa, pero en los colapsos finales de las estrellas más masivas, cuando su núcleo moribundo se encuentra a elevadísimas densidades, se producen muchos neutrinos en un medio que ya no es transparente a ellos, por lo que sus efectos se tienen que tener en cuenta.

Según los modelos solares, se debería recibir el triple de neutrinos de los que se detectan, ausencia que es conocida como el '*problema de los neutrinos solares*'. Durante un tiempo se intentó justificar este déficit revisando los modelos solares.

El Sol quema el hidrógeno principalmente mediante dos *cadena de reacciones*, la PPI y la PPII. La primera emite un neutrino y la segunda dos. Se planteó la hipótesis de que, quizá, la PPII tuviera una ocurrencia menor a la calculada, debido a una falta de helio en el núcleo, favorecida por algún tipo de mecanismo (frenado de la rotación, por viscosidad) que mezclara parte del helio producido con el manto, lo cual reduciría la cadencia de la PPII. Actualmente el problema va camino de resolverse al plantearse la teoría de la *oscilación de los neutrinos*.

4.2 Fenómenos Astrofísicos

Cuando sucedió la SN 1987A los detectores captaron el débil flujo de neutrinos procedentes de la lejana explosión.



SN 1987A.

4.3 Radiación Cósmica de Fondo

Se cree que, al igual que la radiación de microondas de fondo, procedente del Big Bang, hay un fondo de neutrinos de baja energía en nuestro Universo. En la década de 1980 se propuso que estos pueden ser la explicación de la **materia oscura** que se piensa que existe en el universo. Los neutrinos tienen una importante ventaja sobre la mayoría de los candidatos a materia oscura: sabemos que existen. Sin embargo, también tienen problemas graves.

De los experimentos con partículas, se sabe que los neutrinos son muy ligeros. Esto significa que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Así, la materia oscura hecha de neutrinos se denomina 'materia oscura caliente'. El problema es que, al encontrarse en rápido movimiento, los neutrinos habrían tendido a expandirse uniformemente en el Universo, antes de que la expansión cosmológica los enfriara lo suficiente como para concentrarse en cúmulos. Esto causaría que la parte de materia oscura hecha de neutrinos se expandiera, siendo incapaz de formar las grandes **estructuras galácticas** que vemos. Además, estas mismas galaxias y grupos de galaxias parecen estar rodeadas de materia oscura que no es lo suficientemente rápida para escapar de dichas galaxias. Presumiblemente, esta materia proveyó el núcleo gravitacional para la formación de estas galaxias. Esto implica que los neutrinos constituyen sólo una pequeña parte de la cantidad total de materia oscura.

De los argumentos cosmológicos, se estima que los neutrinos 'reliquia' (del fondo de baja energía) tienen densidad de 56 por cada centímetro cúbico y temperatura de 1,9 °K ($1,7 \times 10^{-4}$ eV), en caso de no poseer masa. En el caso contrario, serían mucho más fríos si su masa excede los 0,001 eV. Aunque su densidad es bastante alta, debido a las extremadamente bajas secciones transversales de los neutrinos a energías por debajo de 1 eV, el fondo de neutrinos de baja energía aún no ha sido observado en el laboratorio. En contraste, se han detectado definitivamente, neutrinos solares de boro-8, que son emitidos con una mayor energía, a pesar de poseer una densidad espacial más baja que la de los neutrinos reliquia, de alrededor de 6 órdenes de magnitud.

4.4 La Tierra y la atmosfera

Las reacciones de desintegración beta, de isótopos radiactivos terrestres proporcionan una pequeña fuente de neutrinos, producidos como consecuencia de la radiación natural de fondo. En particular, las cadenas de desintegración de $^{238,92}\text{U}$ y $^{232,90}\text{Th}$, así como de $^{40,19}\text{K}$, incluyen desintegración beta que emiten antineutrinos.

De Neutrinos

Estos llamados geoneutrinos pueden proporcionar información valiosa sobre el interior de la Tierra. Una primera indicación de geoneutrinos fue encontrada por el experimento KamLAND en 2005. Los principales antecedentes de KamLAND en la medición de geoneutrinos son los antineutrinos procedentes de los reactores.

Varios experimentos futuros apuntan a mejorar la medición de geoneutrinos y estos necesariamente tendrán que estar lejos de los reactores.

4.5 Fuentes Artificiales

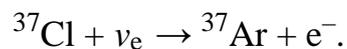
Las principales fuentes artificiales de neutrinos, son las **centrales nucleares**, las cuales pueden llegar a generar unos $5 \cdot 10^{20}$ anti-neutrinos por segundo y, en menor medida, los **aceleradores de partículas**.

5 Detectores

Al conocerse con precisión las reacciones nucleares que se dan en el Sol, se calculó que un apreciable **flujo** de neutrinos solares tenía que atravesar a la Tierra a cada instante. Este flujo es enorme pero los neutrinos apenas interactúan con la materia ordinaria. Incluso las condiciones del interior del Sol son "transparentes" a estos. De hecho, un ser humano es atravesado por miles de millones de estas diminutas partículas por segundo sin que se entere. Así pues se hacía difícil concebir algún sistema que pudiese detectarlos.

5.1 Detectores basados en procesos radiactivos

En 1967, **RAYMOND DAVIS** logró dar con un sistema de detección. Observó que el **cloro-37** era capaz de absorber un neutrino para convertirse en **argón-37** tal y como se muestra en la reacción siguiente:



Naturalmente, esta no era la única reacción entre los neutrinos y la materia ordinaria. Lo que tenía de especial el cloro-37 es que cumplía ciertos requisitos para poderse usar en un futuro detector:

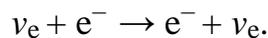
- La **sección eficaz** de la interacción cloro-37 con un neutrino es bastante grande, lo que implica una mayor probabilidad de que tal reacción se produzca.
- El argón-37 es **radioactivo** por lo que es posible detectar su presencia por sus emisiones.
- El cloro-37, aunque no es el isótopo del cloro más abundante, es muy fácil de

obtener.

Normalmente el cloro-37 aparece mezclado con otros isótopos. Particularmente con el cloro-35, el más abundante. Además, se puede tener mezclado con otros átomos o moléculas, conociendo siempre su proporción. Para evitar mediciones falsas debidas al argón-37 ya presente en la mezcla, el primer paso fue efectuar un limpiado del producto. Hecho esto, se debía dejar reposar la mezcla de cloro-37 durante unos meses hasta que llegaba a una situación estacionaria. Esto es cuando la cantidad de argón que se desintegra se iguala a la cantidad que se forma. El momento de equilibrio vendrá determinado por el **periodo de semidesintegración**. Para proteger al detector de la interferencia de fondo, producida por la **radiación cósmica** se enterró al tanque¹ de la mezcla clorada en una mina de oro de **Dakota del Sur** a mucha profundidad. Sin embargo, las primeras observaciones sólo dieron cotas superiores, compatibles aun con cero.² Los resultados eran menores a lo esperado y se confundían con el ruido. Tras repetidos aumentos en la **sensibilidad** de los instrumentos y en la **pureza** de la mezcla de cloro-37 se logró, por fin, calcular que nos llegaba aproximadamente un tercio del flujo esperado³. Estos resultados no fueron tomados muy en serio en un principio, por lo que se prosiguió experimentando con mezclas mejores pero también más caras basadas en el **galio** o el **boro**.

5.2 Detectores basados en el efecto CHERENKOV

Las dudas acerca de los métodos utilizados por DAVIS incentivaron la búsqueda de alternativas para la detección de tan escurridizas partículas. Así surgió una nueva línea de detectores que se basaban en la colisión de neutrinos con electrones contenidos en un medio acuoso.



Estos detectores se basan en el hecho de que el neutrino al impactar contra un electrón, le transmite parte de su momento confiriéndole a este una velocidad en oca-

¹ El tanque contenía 380.000 litros de **percloroetileno**, un líquido empleado frecuentemente en tintorería.

² La sensibilidad inicial del detector estaba prevista para detectar el flujo esperado de neutrinos solares. Pero al estar éste, por debajo de la precisión del sistema, inicialmente solo se obtuvo una cota superior.

³ Se esperaba una **media** de un neutrino y medio capturado cada día. Pero el resultado fue de solo medio neutrino al día.

De Neutrinos

siones superior a la de la luz en ese mismo medio acuoso. Es en ese momento cuando se produce una emisión de luz característica, conocida como 'radiación de **CHE-RENKOV**', que es captada por los fotomultiplicadores que recubren las paredes del recipiente. Como lo que se observa es una transmisión de momento lineal podemos inferir aproximadamente la masa de estos y la dirección de la que proceden mientras que con el anterior sistema de detección solo podíamos calcular el flujo de neutrinos.

5.2.1 Súper Kamiokande

Es el detector de neutrinos más famoso. Recibe su nombre por la mina japonesa en la que se encuentra **Kamioka** a 1.000 metros de profundidad. Consiste en un cilindro de 39.3 metros de diámetro y 41 metros de alto cuyas paredes están cubiertas por 11.200 multiplicadores para detectar la luz del efecto **CHE-RENKOV**. Está lleno de 50.000 toneladas de agua pura que sirven para provocar la interacción con los neutrinos. Lo primero que se hizo fue detectar los neutrinos procedentes de la **supernova 1987A**. Luego se midió el flujo de los **neutrinos solares** corroborando los resultados del detector de **DAVIS**. Con el experimento de la supernova el laboratorio se hizo famoso al poder determinar que la masa del neutrino no era nula llegando a acotar su valor (que no medirlo con exactitud) a partir de la medición del retraso con que llegaron los neutrinos procedentes de la explosión. Si estos hubiesen carecido de masa hubiesen llegado junto a los fotones (la luz de la supernova). Pero lo que les ha dado la fama mundial han sido los experimentos que demuestran la oscilación de los neutrinos y por lo que su director **TAKA- AKI KAJITA** recibió el Premio Nobel de Física 2015, junto al director del Observatorio de Neutrinos de Sudbury en Canadá.

5.2.2 Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Este detector de neutrinos consiste en una esfera de 17.8 metros de diámetro situada a 2.100 metros de profundidad en la mina Creighton, en Sudbury, Ontario, Canadá. En vez de agua convencional se usa **agua pesada** porque esta tiene más probabilidades de interactuar con los neutrinos, encerrada en una esfera acrílica de 12 metros de diámetro y con una capacidad para 1.000 toneladas. Alrededor de este recipiente, hasta rellenar el detector, existe agua normal pura para darle flotación y como escudo anti radiación. Sus resultados también demuestran el fenómeno de la oscilación de los neutrinos por lo que su director **ARTHUR B. MCDONALD** recibió también, el Premio Nobel de Física 2015.

Adunador: ALBERTO MEJÍAS

Conclusión

Los neutrinos constituyen a uno de los descubrimientos más importantes en los años recientes en la física de partículas y astropartículas. Datos experimentales han demostrado que los neutrinos oscilan y, por tanto, son partículas másicas.

Sin embargo, algunas cuestiones fundamentales sobre neutrinos permanecen sin resolver y experimentos sobre neutrinos, presentes y futuros, intentarán dar respuesta a ellas. Los principales objetivos de un tal programa de investigación incluyen la medición del desconocido ángulo de mixtura θ_{13} , el signo de Δm_{32}^2 (tipo de jerarquía de masa), la determinación de la existencia o no de violación CP en el sector leptónico, el valor de las masas de los neutrinos y la naturaleza MAJORANA o DIRAC de los neutrinos, entre otras. Nuevas instalaciones y detectores están siendo propuestos para responder a estas preguntas, usando experimentos de oscilación y no oscilación.

Los neutrinos aún tienen sorpresas para nosotros y el futuro próximo promete ser muy interesante. Tendremos una mejor comprensión de la física de los neutrinos gracias al programa experimental de los años venideros.

Referencias

- [1] C. L. COWAN, et al. *Science* **124** (1956) 103.
- [2] K. NAKAMURA et al. *J. Phys.* **G37** (2010) 075021.
- [3] T. KAFKA et al. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **64** (2010) 181-183.
- [4] P. Minkowski, *Phys. Lett.* B67 (1977) 421.
- [5] M. P. GELL-MANN et al in **Supergravity**, Eds. P. van Nieuwenhuizen and D. Z. FREEDMAN (North-Holland, Amsterdam, 1979).
T. YANAGIDA, in **Proceedings of Workshop on Unified Theory and Baryon Number in the Universe**, Eds. O. Sawada and A. Sugamoto (KEK, Ibaraki, 1979).
- [6] L. WOLFENSTEIN, *Phys. Rev.* **D17** (1978) 2369.
S. P. MIKHEEV and A. Yu. SMIRNOV, *Yad. Fiz.* **42** (1985) 1441; *Nuovo Cim.* **9C** (1986) 17.
- [7] J. N. BAHCALL and M. H. PINSONNEAULT, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 121301.
- [8] B. T. CLEVELAND et al. *Astrophys. J.* **496** (1998) 505-526.
- [9] W. Hampel et al. (GALLEX Collaboration), *Phys. Lett.* B447 (1999) 127-133.
M. ALTMANN et al. (GNO Collaboration), *Phys. Lett.* **B616** (2005) 174-190.

De Neutrinos

- [10] J. N. ABDURASHITOV et al. (SAGE Collaboration), *Phys. Rev.* **C60** (1999) 055801.
- [11] Y. FUKUDA et al. (Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **77** (1996) 1683.
- [12] S. FUKUDA et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 5656-5660.
- [13] J. BOGER et al. (SNO Collaboration), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A449** (2000) 172.
- [14] B. AHARMIM et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev.* **C75** (2007) 045502.
- [15] B. AHARMIM et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 111301.
- [16] B. AHARMIM et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev.* **C81** (2010) 055504.
- [17] G. ALIMONTI et al. (Borexino Collaboration), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A600** (2009) 568.
- [18] C. ARPESELLA et al. (Borexino Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 091302.
- [19] G. BELLINI et al. (Borexino Collaboration), *Phys. Rev.* **D82** (2010) 033006.
- [20] T. ARAKI et al. (KamLAND Collaboration), *Nature* **436** (2005) 499-503.
- [21] G. BELLINI et al. (Borexino Collaboration), *Phys. Rev.* **B687** (2010) 299-304.
- [22] Y. FUKUDA et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1562.
- [23] Y. Ashie et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev.* **D71** (2005) 112005.
- [24] Y. Ashie et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 101801.
- [25] R. WENDELL et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev.* **D81** (2010) 092004.
- [26] M. APOLLONIO et al. (CHOOZ Collaboration), *Eur. Phys. J.* **C27** (2003) 331-374.
- [27] S. ABE et al. (KamLAND Collaboration), *Phys. Rev.* **C81** (2010) 025807.
- [28] K. EGUCHI et al. (KamLAND Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 021802.
- [29] T. ARAKI et al. (KamLAND Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 081801.
- [30] A. GANDO et al. (KamLAND Collaboration), *Phys. Rev.* **D83** (2011) 052002.
- [31] M. H. AHN et al. (K2K Collaboration), *Phys. Rev.* **D74** (2006) 072003.
- [32] G. G. MICHAEL et al. (MINOS Collaboration), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A596** (2008) 190.
- [33] P. ADAMSON et al. (MINOS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011)

- 181801.
- [34] P. ADAMSON et al. (MINOS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 021801.
 - [35] P. ADAMSON et al. (MINOS Collaboration), *Phys. Rev.* **D82** (2010) 051102.
 - [36] A. AGUILAR et al. (LSND Collaboration), *Phys. Rev.* **D64** (2001) 112007.
 - [37] B. ARMBRUSTER et al. (KARMEN Collaboration), *Phys. Rev.* **D65** (2002) 112001.
 - [38] A. A. AGUILAR-AREVALO et al. (MiniBooNE Collaboration), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A599** (2009) 28.
 - [39] A. A. AGUILAR-AREVALO et al. (MiniBooNE Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 231801; *ibid.* **102** (2009) 101802.
 - [40] A. A. AGUILAR-AREVALO et al. (MiniBooNE Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 181801.
 - [41] K. Elsener (Ed.), The CERN neutrino beam to Gran Sasso (Conceptual Technical Design), CERN 98-02, INFN/AE-98/05 (1998).
R. BAILEY et al., The CERN neutrino beam to Gran Sasso (NGS) (Addendum to report CERN 98-02, INFN/AE-98/05), CERN-SL/99-034(DI), INFN/AE-99/05 (1999).
 - [42] N. AGAFONOVA et al. (OPERA Collaboration), *Phys. Lett.* **B691** (2010) 138-145.
 - [43] A. MENEGOLLI et al. (ICARUS Collaboration), *J. Phys. Conf. Ser.* **203** (2010) 012107.
 - [44] T. SCHWETZ et al., *New J. Phys.* **13** (2011) 062004.
 - [45] F. ARDELLIER et al. (Double Chooz Collaboration), arXiv:hep-ex/0606025.
 - [46] J. K. AHN et al. (RENO Collaboration), arXiv:hep-ex/1003.1391.
 - [47] X. GUO et al. (Daya Bay Collaboration), arXiv:hep-ex/0701029.
 - [48] K. ABE et al. (T2K Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth.* **A659** (2011) 106.
 - [49] K. Abe et al. (T2K Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 041801.
 - [50] D. KIELCZEWSKA et al. (T2K Collaboration), *Acta Phys. Polon.* **B41** (2010) 1565-1578.
 - [51] D. S. AYRES et al. (NOvA Collaboration), The NOvA Technical Design Report, FERMILAB-DESIGN-2007-01 (2007).
 - [52] J. BERNABEU et al., EURONU WP6 2009 yearly report: Update of the physics potential of Nufact, superbeams and betabeams [arXiv:1005.3146].
 - [53] C. KRAUS et al., *Eur. Phys. J.* **C40** (2005) 447-468.
V.N. ASEEV et al., *Phys. Rev.* **D84** (2011) 112003.
 - [54] A. MONFARDINI et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A559** (2006) 346-348.

De Neutrinos

- [55] A. OSIPOWICZA et al. (KATRIN Collaboration), arXiv:hep-ex/0109033.
- [56] B. MONREAL and J. A. Formaggio, *Phys. Rev.* **D80** (2009) 051301.
- [57] L. BAUDIS et al., *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 41.
C. E. AALSETH et al. (IGEX Collaboration), *Phys. Rev.* **D65** (2002) 092007.
- [58] H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS et al. *Mod. Phys. Lett.* **A16** (2001) 2409-2420.
- [59] H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS et al. *Phys. Lett.* **B586** (2004) 198-212.
- [60] H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS et al. *Mod. Phys. Lett.* **A21** (2006) 1547-1566.
- [61] G. ZUZEL et al. (GERDA Collaboration), *Acta Phys. Polon.* **B41** (2010) 1469-1476.
- [62] V. E. GIUSEPPE et al. (Majorana Collaboration), *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)* **B217** (2011) 44-46.
- [63] T. BLOXHAM et al. (COBRA Collaboration), *Phys. Rev.* **C76** (2007) 025501.
K. ZUBER, *Phys. Lett.* **B519** (2001) 1.
- [64] E. ANDREOTTI et al. (CUORICINO Collaboration), *Astropart. Phys.* **34** (2011) 822-831.
C. Arnaboldi et al. (CUORICINO Collaboration), *Phys. Rev.* **C78** (2008) 035502.
- [65] F. ALESSANDRIA et al. (CUORE Collaboration), *Astropart. Phys.* submitted [arXiv:1109.0494].
- [66] C. KRAUS et al. (SNO+ Collaboration), *Prog. Part. Nucl. Phys.* **64** (2010) 273-277.
- [67] A. TERASHIMA et al. (KamLAND Collaboration), *J. Phys. Conf. Ser.* **120** (2008) 052029.
M. KOGA et al., KamLAND double-beta decay experiment using ^{136}Xe , Int. Conf. on High Energy Physics (ICHEP), Paris, July 2010.
- [68] M. BONGRAND et al. (NEMO-3 Collaboration), arXiv:1105.2435.
- [69] C. MARQUET et al. (SuperNEMO Collaboration), *Proc. Sci. PoS (ICHEP 2010)* 307.
- [70] C. Hall et al. (EXO Collaboration), *Proc. Sci. PoS (ICHEP 2010)* 300.
- [71] F. Grafena et al. (NEXT Collaboration), arXiv:0907.4054.
- [72] J. J. GOMEZ-CADENAS et al., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **1106** (2011) 007.
- [73] K. HIRATA et al., *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 1490.
R. BIONTA et al., *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 1494.
E. N. Alekseev et al., *JETP Lett.* **45** (1987) 589.
- [74] C. LUNARDINI and A. Y. SMIRNOV, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0306** (2003) 009.
- [75] S. Choubey et al., arXiv:1008.0308.
- [76] K. SCHOLBERG, *J. Phys. Conf. Ser.* **203** (2010) 012079.

Adunador: ALBERTO MEJÍAS

- [77] C. A. DUBA et al., *J. Phys. Conf. Ser.* **136** (2008) 042077.
- [78] I. GIL-BOTELLA and A. Rubbia, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0408** (2004) 001; *ibid.* **0310** (2003) 009.
A. BUENO, I. GIL-BOTELLA and A. RUBBIA, arXiv:hep-ph/0307222.
- [79] P. ANTONIOLI et al., *New. J. Phys.* **6** (2004) 114.
- [80] J. MARICIC, *J. Phys. Conf. Ser.* **259** (2010) 012038.
- [81] K. NAKAMURA, *Int. J. Mod. Phys. A* **18** (2003) 4053.
- [82] A. BELLEFON et al., arXiv:hep-ex/0607026.
- [83] A. RUBBIA, *J. Phys. Conf. Ser.* **171** (2009) 012020.
- [84] B. BALLER et al., LAr5 — A liquid argon neutrino detector for long base-line neutrino physics, FERMILAB-PROPOSAL-0982.
- [85] T. Marrodan Undagoitia et al., *J. Phys. Conf. Ser.* **39** (2006) 278-280.
- [86] J. MARICIC, *J. Phys. Conf. Ser.* **203** (2010) 012137.
- [87] A. RUBBIA, *Acta Phys. Polon.* **B41** (2010) 1727-1732.
- [88] D. AUTIERO et al., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0711** (2007) 011.
- [89] M. MALEK et al., *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 061101.
- [90] J. F. BEACOM, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **60** (2010) 439-462.
- [91] A. G. COCCO et al., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0412** (2004) 002.
- [92] C. L. COWAN, F. REINES, F. B. HARRISON, E. C. ANDERSON and F. N. HAYES, *Science* **124** (1956) 103.
- [93] I. Gil-BOTELLA. arXiv:1504.03551v1 [hep-ph] 14 Apr 2015
- [94] Maveric149 et al. <https://es.wikipedia.org/wiki/Neutrino?oldid=87471804>.
- [95] C. GIUNTI and C. W. KIM, **Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics** (Oxford University Press, Oxford, 2007).
- [96] M. C. GONZALEZ-GARCIA and M. MALTONI, *Phenomenology with massive neutrinos*, *Phys. Rept.* **460** (2008) 1.
K. ZUBER, **Neutrino Physics**, Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation, 2nd edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, 2010).
- [97] A. de Gouvêa (Conv.) et al. *Neutrinos*. arXiv:1310.4340v1 [hep-ex] 16 Oct 2013.