

LOS NEUTRINOS SOLARES



Elena García Broock

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Física
Curso 2015/2016
Universidad de La Laguna

ULL

Universidad
de La Laguna

La fotografía que aparece en la portada muestra el estado de la construcción, en 1966, del tanque usado en el experimento de neutrinos solares de la mina de oro Homestake. Imagen tomada de [19].

Índice

1	Introducción	2
2	Física de partículas	3
2.1	Modelo Estándar de Partículas Elementales	3
2.2	Desintegración β y predicción del neutrino	4
3	Detección de neutrinos	7
3.1	Descubrimiento del neutrino	7
3.2	Experimentos para la detección de neutrinos solares	8
3.2.1	Detectores radioquímicos	8
3.2.2	Detectores Cherenkov	11
4	Modelo Solar Estándar	15
4.1	Reacciones de fusión	18
4.1.1	Cadena P-P	18
4.1.2	Ciclo CNO	19
4.2	Heliosismología	19
5	El problema de los neutrinos solares	21
5.1	Comparación teoría-observación	21
5.2	Posibles explicaciones para las discrepancias	21
5.2.1	Modelos solares no estándar	22
5.2.2	Desviaciones del Modelo Estándar de Partículas Elementales	23
6	La solución al problema planteado	25
6.1	Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos	26
6.2	Los neutrinos atmosféricos	30
6.3	Sudbury Neutrino Observatory	32
6.3.1	Fases del experimento y eventos estudiados	32
6.3.2	Resultados finales del SNO	34
6.4	Síntesis	35
7	Conclusiones y proyectos futuros	36

Abstract

Solar neutrino problem is a controversy based on the detected solar neutrino deficit, when compared with Solar Standard Model and Standard Model of Particles Physics predictions. This work is intended to show milestones related to this discrepancy, XVIII century to nowadays, starting from previous discoveries to neutrino prediction to the oscillation theory confirmation. In order to do so, the introduction of some concepts and theoretical developments are required, being some of them considerations about nuclear reactions in the Sun or mechanics of neutrino detectors.

In section 1, fields studied in the following are introduced. In section 2, basic ideas of Standard Model of Elemental Particles are exposed, as well as the most important events in neutrino prediction history. In section 3, most relevant experiments on neutrino detection are explained, including the one destined to the first detection and those that made possible solar neutrino detections, that are the ones that reached the results that opened Solar Neutrino Problem. In section 4, most important ideas of Standard Solar Model are shown, as well as a review of nuclear fusion reactions destined to the production of solar energy, in which solar neutrinos are generated. In section 5, theoretical predictions and detections shown in the previous section are compared and theories that were born with the aim of explaining discrepancies between both parameters are exposed. In section 6, Neutrino Oscillation Theory, the one accepted nowadays as Solar Neutrino Problem solution, is explained and an exposition about the principles and results of Solar Neutrino Observatory, key for the acceptance of oscillatory theory, is shown. Finally, in section 7, some conclusions extracted from the development of this work are exposed, as well as some open future projects in neutrino physics field.

Resumen

El Problema de los Neutrinos Solares es una controversia basada en el déficit de neutrinos detectados provenientes del Sol, en comparación con los predichos por el Modelo Solar Estándar y por el Modelo Estándar de Partículas Elementales. En este trabajo, se pretende mostrar los sucesos acaecidos relacionados con esta discrepancia, desde finales del siglo XVIII hasta hoy, partiendo de los descubrimientos previos a la predicción de los neutrinos hasta la confirmación de la teoría de las oscilaciones de éstos. Para ello es necesario introducir algunos conceptos y desarrollos teóricos, como consideraciones sobre las reacciones de fusión en el Sol o la mecánica de los detectores de neutrinos.

En la sección 1 se introducen los campos que se van a estudiar durante el desarrollo del trabajo. En la sección 2 se exponen las ideas básicas del Modelo Estándar de Partículas Elementales, así como los sucesos más importantes de la historia de la predicción del neutrino. En la sección 3 se explican los experimentos más importantes de detección de neutrinos, tanto el destinado a su primera detección como experimentos planteados para la detección de neutrinos solares, que dieron los resultados debido a los cuales se abrió el Problema de los Neutrinos Solares. En la sección 4 se muestran los principios más relevantes del Modelo Solar Estándar, así como un repaso de las reacciones de fusión destinadas a la producción de energía solar, en las que se generan los neutrinos provenientes de la estrella. En la sección 5 se comparan las predicciones teóricas y las detecciones mostradas en la sección anterior, y se exponen teorías que surgieron con la intención de explicar las discrepancias entre ambos parámetros. En la sección 6 se explica la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos, aceptada actualmente como solución al problema, y se muestra una exposición del funcionamiento del Sudbury Neutrino Observatory, así como los resultados de sus detecciones, claves para la aceptación de la teoría oscilatoria. Finalmente, en la sección 7 se muestran las conclusiones extraídas en el desarrollo de este trabajo, así como algunos proyectos de futuro abiertos en el campo de la física de los neutrinos.

1 Introducción

Abstract

In this section, Solar Neutrino context is exposed, as well as the main goals of this work as an introduction to it.

Resumen

En esta sección, se expone el contexto del Problema de los Neutrinos Solares, así como los objetivos principales de este trabajo a modo de introducción.

Los neutrinos son partículas pertenecientes al grupo de los leptones, según la clasificación del Modelo Estándar de Partículas Elementales. Fueron predichos por Pauli [62] en 1930 para explicar las irregularidades observadas previamente en el Decaimiento Beta y detectados experimentalmente por primera vez por Reines y Cowan [65] en 1953.

En las reacciones productoras de energía del Sol se genera cierta cantidad de neutrinos, según el Modelo Solar Estándar, durante los procesos de quema de hidrógeno. Se planteó probar el Modelo Solar Estándar mediante la detección, desde Tierra, de los neutrinos solares predichos por la teoría, siendo pionero el experimento Homestake, a cargo de Davis y Bahcall [5]. En los primeros experimentos se observa un importante déficit de detecciones con respecto a las predicciones teóricas que se denomina Problema de los Neutrinos Solares.

Tras varios experimentos como el SAGE, el GALLEX [43] o el Kamiokande [42], se acepta como válida la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos [70], que explica cómo los neutrinos provenientes del Sol cambian su carga débil (sabor), es decir, varían entre neutrinos electrónicos, tauónicos y muónicos antes de llegar a los detectores, no pudiendo ser detectados en aquellos diseñados para capturar sólo neutrinos electrónicos, que son los emitidos en las reacciones nucleares del Sol. La teoría se ha aceptado siendo un requisito indispensable para su veracidad que los neutrinos tengan masas diferentes de cero, en contraposición a lo establecido antes de ésta.

En secciones posteriores, se exponen los sucesos más importantes relacionados con el Problema de los Neutrinos Solares, desde el descubrimiento de la radiactividad hasta la confirmación de la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos. Dentro de este espectro, se muestran las principales características del Modelo Solar Estándar y del Modelo Estándar de Partículas Elementales, premisas básicas para las predicciones de flujo de neutrinos recibidos en los detectores, además de descripciones de estos últimos y de las medidas tomadas en ellos.

También se plantean teorías surgidas con la intención de dar explicación al déficit entre teoría y experimentos, tanto aquellas que parten de posibles errores del Modelo Solar Estándar como de posibles errores del Modelo Estándar de Partículas Elementales, y se dan las claves de la solución al problema, presentando los principales razonamientos de la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos, tanto para propagaciones en medios diferentes del vacío como para propagaciones en éste. Además, se añaden los parámetros de la teoría obtenidos experimentalmente y las cotas de la suma de las masas de los neutrinos de los tres sabores.

2 Física de partículas

Abstract

In this section, basic principles of Standard Model of Particle Physics and an historical approachment to neutrino discovery are exposed.

Resumen

En esta sección se exponen los principios básicos del Modelo Estándar de Partículas Elementales, así como un desarrollo histórico en relación al descubrimiento de los neutrinos.

2.1 Modelo Estándar de Partículas Elementales

Conocer algunos parámetros del modelo es necesario para comprender el Problema de los Neutrinos Solares. Debido a esta consideración, a continuación se exponen sus principales enunciados.

El Modelo Estándar es un paradigma teórico, aceptado por la comunidad científica, que describe las partículas elementales y los mecanismos de interacción entre ellas. En él, se resumen los conocimientos teóricos y experimentales de la física de partículas obtenidos por numerosos científicos, desde el siglo XIX, cuando se concluía que los átomos eran los componentes últimos de la materia, hasta hoy.

Según este modelo (ver figura 1), las partículas elementales sin estructura interna son los leptones y los quarks. Las partículas con estructura interna se denominan hadrones y están formadas por quarks. Los hadrones se dividen en bariones y mesones. Los bariones están constituidos por tres quarks o antiquarks y los mesones por un quark y un antiquark, donde los antiquarks son las antipartículas de los quarks.

Los leptones y los quarks son fermiones, es decir, partículas de espín semientero. Los quarks sienten todas las interacciones fundamentales, mientras que los leptones no sienten la interacción fuerte, pero sí las demás. Existen seis leptones: el electrón, el muón, el tauón, el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico; y seis quarks: *up* (u), *down* (d), *charm* (c), *strange* (s), *bottom* (b) y *top* (t). Debido a que los quarks tienen una propiedad denominada color y a que cada uno se puede dar en tres colores (rojo, verde y azul), en realidad hay 18 quarks. Además, a cada uno de estos leptones y quarks le corresponde una antipartícula.

Los quarks tienen carga eléctrica fraccionaria, es decir, que es un submúltiplo de la carga del electrón, e . Este hecho es difícil de comprobar porque nunca se detectan libres, ya que están confinados en hadrones de carga entera.

En la naturaleza existen cuatro interacciones fundamentales: la gravitacional, la electromagnética, la fuerte y la débil. Cada una de estas interacciones lleva asociada una propiedad de la materia o carga, siendo la de la interacción gravitacional la masa, la de la interacción electromagnética la carga eléctrica, la de la interacción fuerte el color y la de la interacción débil el sabor.

Las interacciones fundamentales se producen gracias a partículas mediadoras que se intercambian entre las que sienten tales interacciones. En particular, las partículas mediadoras de la interacción electromagnética son los fotones, de la interacción fuerte los gluones, de la interacción débil las partículas W^\pm y Z^0 , y de la interacción gravitatoria los gravitones, aún no detectados experimentalmente. Además, asociado a cada interacción existe un campo que lleva el nombre de la interacción que lo produce. Las partículas mediadoras actúan como cuantos del campo correspondiente.

Quarks	u up	c charm	t top	g gluon	Force Carriers
	d down	s strange	b bottom		
Leptons	ν_e e neutrino	ν_μ μ neutrino	ν_τ τ neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	

Figura 1: En este esquema se muestran las partículas generadoras de la materia según el Modelo Estándar. Los tres primeros elementos de las dos primeras filas representan los quarks, mientras que los tres primeros de la tercera y cuarta fila representan los leptones. La columna de la derecha representa las partículas mediadoras de tres de las cuatro interacciones fundamentales: la electromagnética (γ), la fuerte (g) y la débil (Z y W^\pm). Imagen tomada de [44].

2.2 Desintegración β y predicción del neutrino

En el año 1896, Henri Becquerel observó que al colocar sales de uranio sobre una placa fotográfica en una zona oscura, esta se ennegrecía. Estudió cómo el uranio era capaz de emitir cierta radiación que atravesaba sustancias opacas a la luz ordinaria. Esta radiación se denominó rayos Becquerel, efecto que hoy se conoce como radiactividad. Rutherford y Owens [67] continuaron investigando al respecto y descubrieron dos tipos de radiación: las partículas α (más tarde identificadas como núcleos de helio) y las partículas β , mucho más penetrantes.

En 1900, Becquerel [11] midió la relación carga-masa de las partículas β por el método que J. J. Thomson había usado para estudiar los rayos catódicos e identificar el electrón, encontrando que las relaciones carga-masa de ambas partículas coincidían, por lo que sugirió que las partículas β eran precisamente electrones. El método utilizado por ambos consistió en la aplicación de campo magnético sobre corrientes de partículas: midiendo la desviación de la trayectoria de las partículas con respecto al campo se obtuvo su relación carga-masa.

En el año 1928, Paul Dirac [29] predijo que, a la par con los electrones, deben existir partículas de propiedades idénticas pero con carga positiva. Postuló que si esta partícula entra en contacto con el electrón, las dos desaparecen: se aniquilan y sus masas, de acuerdo con la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, se transforma en energía.

El siguiente paso hacia la comprensión de la desintegración β fue la llamada Ley de los Desplazamientos Radiactivos, también conocida como Ley de Soddy-Fajans [73]. Fue enunciada en 1931 por dos científicos que la desarrollaron al mismo tiempo de forma independiente, Frederick Soddy y Kasimir Fajans. Esta ley explica la transmutación de los elementos durante las desintegraciones radiactivas. En particular, para la desintegración β conocida en la época (β^- , emisión de un electrón desde un núcleo atómico), dictaba que cuando un núcleo emite una partícula β , el número másico se mantiene constante, mientras que el número atómico aumenta una unidad con respecto al núcleo de origen.

En 1932, la partícula predicha por Dirac, el positrón, fue detectada experimentalmente por Carl David Anderson [3][2], gracias a la cámara de niebla desarrollada por Charles Thomson Rees Wilson en 1911. Esta cámara es un dispositivo destinado a detectar partículas de radiación ionizante. Consiste en un recipiente cerrado que contiene vapor superenfriado y supersaturado. Al pasar una partícula cargada por el vapor, lo ioniza, actuando los iones producidos como núcleos de condensación, formando pequeñas gotas. Esto produce una estela al paso de las partículas que es característica de cada una de ellas. Aplicando sobre el dispositivo un campo magnético, las partículas cargadas toman una trayectoria con una curvatura dependiente del signo de su carga. Esta característica fue la que permitió la detección del positrón, ya que la estela de éste tiene las mismas propiedades que la del electrón, pero frente a un campo magnético, se curva en sentido opuesto.

Tras este descubrimiento, se observó que la desintegración β tenía otra variante en la que la partícula emitida era un positrón (o partícula β^+). Esta reacción se denominó desintegración β^+ . Para este caso, se hizo una ampliación de la Ley de Soddy-Fajans, añadiendo que al emitir un positrón, el número másico de un núcleo permanece constante, mientras que su número atómico disminuye una unidad. Otra variante de la reacción estudiada fue la captura electrónica, en la que un protón de un núcleo capta un electrón y como resultado produce un neutrón. En este caso no se irradia ninguna partícula β .

En resumen, en la década de los años 30 se conocían tres variantes de la desintegración β :

· **Desintegración β^- :**

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- \quad (1)$$

· **Desintegración β^+ :**

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z - 1) + e^+ \quad (2)$$

· **Captura electrónica:**

$$(A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z - 1). \quad (3)$$

donde (A, Z) representa un núcleo atómico con número másico A y número atómico Z .

Estas reacciones plantearon algunos problemas inesperados. Uno de estos problemas fue el espectro continuo de energías de los electrones emitidos. Según el principio de conservación de la energía, la energía total de la partícula emitida en la reacción debe ser igual a la diferencia de energías entre el núcleo original y el núcleo resultante. Experimentalmente, se detectaban partículas β con energías cinéticas comprendidas entre cero y la correspondiente a que la partícula tomara toda la energía disponible en la desintegración. Otro problema relacionado era la aparente no conservación del momento angular, ya que parecía observarse un déficit en los experimentos.

En Bruselas, en el año 1933, se celebró el VII Congreso de Solvay. Entre los trabajos mostrados en este congreso se encontraba la Teoría del Decaimiento Beta de Fermi [32], en la que se incluían unas partículas postuladas por Pauli [62] que podrían resolver los problemas teóricos planteados en la reacción. Pauli llamó a estas nuevas partículas *neutrones*. Debían ser eléctricamente neutras y se proponía que fuesen emitidas junto con los electrones en la desintegración β . De esta manera, la suma de las energías del neutrón y del electrón emitidos podría ser continua, respetando el principio de conservación de la energía. Además, debían tener una alta capacidad de penetración, por lo que su masa tenía que ser nula o muy pequeña. Fermi postuló que eran partículas de masa nula y esto se mantuvo así en el Modelo Estándar de Partículas Elementales hasta el Problema de los Neutrinos Solares.

Posteriormente, la palabra neutrón terminó usándose para designar la partícula que hoy se conoce con ese nombre y Fermi utilizó, para la postulada por Pauli, el término *neutrino*, que comenzó a designarse con el símbolo ν .

La aparición del neutrino permitió reescribir las reacciones de desintegración β de la siguiente forma:

· **Desintegración β^- :**

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu} \quad (4)$$

· **Desintegración β^+ :**

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z - 1) + e^+ + \nu \quad (5)$$

· **Captura electrónica:**

$$(A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z - 1) + \nu, \quad (6)$$

donde $\bar{\nu}$ es la expresión para designar a la antipartícula del neutrino, el antineutrino. De acuerdo con la teoría de Fermi, el neutrino poseía una carga y una masa en reposo iguales a cero y un espín de $\frac{\hbar}{2}$.

Todos los procesos expuestos hasta ahora están relacionados con el neutrino que se conocía en los años 30, que se corresponde con el llamado hoy neutrino electrónico. Los neutrinos muónico y tauónico se descubrieron posteriormente. El neutrino muónico fue predicho tras el descubrimiento del muón en 1936, por S.H. Neddermeyer y C. D. Anderson [51]. Fue detectado por primera vez en 1962, por Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger [27] en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. La existencia del neutrino tauónico fue deducida en 1975 por Martin Lewis Perl y colaboradores en el grupo SLAC-LBL (Centro del Acelerador Lineal de Stanford-Laboratorio Lawrence Berkeley) [55], junto con el descubrimiento del leptón tau. Su existencia se confirmó en el año 2000, gracias a la colaboración DONUT (Direct Observation of the NU Tau) [30], en Fermilab.

3 Detección de neutrinos

Abstract

In this section, some of the main neutrino detection experiments are explained. To begin with, there is an exposure of the first detection and, in the following, solar neutrino experiments are reviewed, as well as the obtained results, compared with theoretical predictions.

Resumen

En esta sección se exponen algunos de los experimentos más importantes destinados a la detección de neutrinos. Para comenzar, se explica el experimento mediante el cual se realizó la primera detección y, seguidamente, se muestran las características principales de algunos detectores de neutrinos solares, así como los resultados obtenidos, que se comparan con las predicciones teóricas.

3.1 Descubrimiento del neutrino

En 1953, Frederick Reines y Clayde L. Cowan [65] propusieron un experimento para capturar antineutrinos procedentes de un reactor nuclear. Pese al gran número de antineutrinos que el reactor producía, se esperaba un ritmo de detecciones muy bajo debido a su poca capacidad de interacción. Tras un primer intento sin resultados concluyentes en el reactor de Hanford, Reines y Cowan desplazaron el trabajo a la planta de Savannah River.

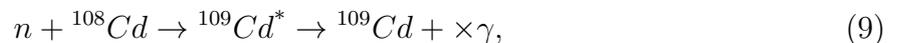
El material con el que los antineutrinos debían reaccionar consistía en una solución de cloruro de cadmio en aproximadamente 400 litros de agua contenida en un gran contador de centelleo (dispositivo que contabiliza los chispazos de luz). El proceso de detección comenzaba con la reacción



cuyos productos participaban, a su vez, en las dos reacciones productoras de fotones:



tras la que los fotones eran capturados al mismo tiempo por el detector, y



donde $\times\gamma$ representa un conjunto de fotones con una energía de 9 MeV en total. Estos fotones eran captados unos microsegundos después de la detección de fotones anterior, probando la detección del antineutrino.

Hubieron algunos problemas debidos a la contaminación de los datos ocasionada por los fenómenos del entorno, dadas las bajas cuentas reales. Durante el experimento sólo fueron registrados unos pocos eventos por hora pero, finalmente, se consiguió detectar la existencia del neutrino.

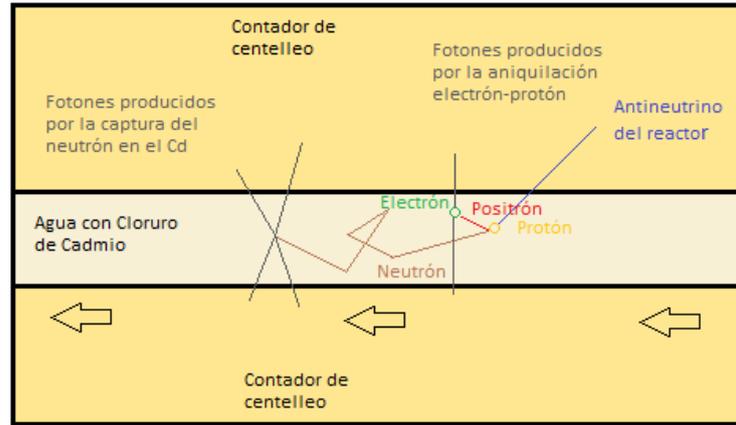


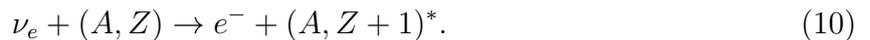
Figura 2: Dibujo esquemático del detector de neutrinos de Reines y Cowan [65]. Las flechas de la parte inferior del dibujo señalan el orden en el que ocurren las reacciones dentro del dispositivo.

3.2 Experimentos para la detección de neutrinos solares

A continuación, se expone una breve descripción de algunos de los experimentos más importantes destinados a la detección de neutrinos solares. Estos neutrinos se producen en las reacciones de fusión que tienen lugar en el Sol, fuentes productoras de la energía de la estrella, como se muestra en detalle en el próximo capítulo.

3.2.1 Detectores radioquímicos

La detección radioquímica utiliza la captura de neutrinos de la interacción débil, reacción también llamada desintegración beta inversa, por un elemento químico determinado caracterizado por los números másico y atómico A y Z ,



El átomo objetivo es transmutado en otro elemento químico, $(A, Z+1)^*$, donde $*$ denota que el producto es un átomo radiactivo con una vida media $T_{1/2}$. El método de detección requiere de un tratamiento radioquímico específico para separar y extraer los pocos átomos producidos del elemento $(Z+1)$. Dado que la sección eficaz de absorción de los neutrinos con la materia es muy pequeña (menor que 10^{-40}cm^2), el material que debe reaccionar con éstos debe ser suficientemente voluminoso, por lo que se suelen utilizar grandes cantidades (varias toneladas). Los experimentos se realizan bajo tierra para minimizar las interacciones con los neutrinos atmosféricos producidos por rayos cósmicos, ya que estas se pueden mimetizar con la captura de neutrinos solares.

Experimento de Homestake

El primer experimento llevado a cabo para medir el flujo de neutrinos procedentes del Sol fue el experimento de Homestake, en Dakota del Sur (EE.UU.), propuesto y llevado

a cabo por Raymond Davis Jr., John N. Bachall y colaboradores [8]. La reacción que se estudiaba era la siguiente:



Esta reacción es la inversa al decaimiento radiactivo usual del ${}^{37}\text{Ar}^*$. Fue propuesta años antes por Bruno Pontecorvo [57] y Luis Álvarez [1]. Una de sus principales ventajas es que el producto, ${}^{37}\text{Ar}$, es un gas noble que se puede extraer fácilmente de un líquido que contenga cloro, purgando con helio gaseoso. El umbral de energía del experimento, es decir, la energía mínima que los neutrinos deben tener a la llegada al dispositivo para producir la reacción y ser detectados, es de 0.814 MeV. El detector se contruyó entre los años 1964 y 1967, con el objetivo de observar el flujo de neutrinos solares y estuvo en funcionamiento entre 1967 y 1994. El líquido utilizado fue el percloroetileno, C_2Cl_4 , un disolvente barato usado para limpieza en seco en la industria textil.

El dispositivo de detección consistía en un tanque lleno con 3.9×10^5 litros de percloroetileno. Para aislar el experimento de los efectos de los rayos cósmicos, el tanque se construyó en una mina de oro perteneciente a la Homestake Mining Company. La compañía diseñó y excavó una cavidad especial en la mina, a 1500 metros de la superficie, para alojar el experimento. Otra característica que aísla el experimento de contaminaciones producidas por el entorno es la capacidad de la cavidad en la que está contenido el tanque para poder llenarse de agua. Este aislamiento permite evitar la interferencia de neutrones rápidos provenientes de reacciones espontáneas producidas en los muros de piedra que rodean el dispositivo. Este efecto es pequeño debido a la localización del experimento y queda casi completamente eliminado por el agua.

Finalmente, los neutrinos solares detectados fueron 2.56 ± 0.23 SNU, frente a los 8.1 ± 1.2 SNU predichos [53] (Modelo Solar Estándar BS05(OP) [6]), lo que provocó revisiones de las teorías que llevaron a tales predicciones (ver figura 3). Los datos de flujo se dan en Solar Neutrino Units (SNU), unidades utilizadas en los experimentos radioquímicos para las que 1 SNU equivale a 10^{-36} capturas por segundo por átomo objetivo, en este caso, ${}^{37}\text{Cl}$.

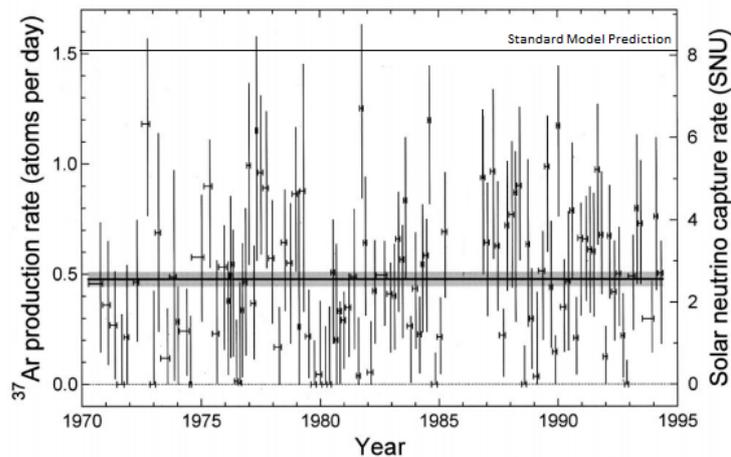


Figura 3: Gráfico que muestra las tasas de neutrinos solares capturados por el experimento de Homestake entre 1970 y 1995. La línea horizontal de la parte superior marca 8.1 SNU, predicción del flujo de neutrinos recibido de acuerdo con el Modelo Solar Estándar BS05(OP). Imagen tomada de [28].

La discrepancia mostrada entre teoría y observaciones, después de exhaustivas revisiones del experimento y de la teoría, propició la aparición de otros experimentos con el objetivo de dar solución problema planteado.

Experimentos de las colaboraciones SAGE y GALLEX-GNO

Ambos son experimentos radioquímicos basados en la reacción



El umbral inferior de energía de los neutrinos susceptibles de ser detectados con esta reacción es de 233.2 KeV, más bajo que en el caso del Experimento de Homestake, donde no se podían detectar neutrinos emitidos en las etapas iniciales de la cadena protón-protón, que tienen una energía superior de 420 KeV, como se mostrará en secciones posteriores.

El experimento SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) se encuentra situado en un laboratorio subterráneo especialmente construido para albergarlo en el Baksan Neutrino Observatory (BNO) del Institute for Nuclear Research de la Russian Academy of Sciences, en las montañas del Cáucaso. La cámara principal del laboratorio tiene 60 m de largo, 10 m de ancho y 12 m de alto. Las rocas aportan una protección contra el ruido producido por factores externos al experimento y reducen el flujo de muones en un factor 10^7 . Para reducir el ruido debido a rayos gamma de las rocas, el laboratorio está completamente cubierto por una capa de 60 cm de hormigón con una cobertura externa de 6 mm de acero. El blanco utilizado, sobre el que deben impactar los neutrinos, consiste en aproximadamente 50 toneladas de metal líquido de galio.

El valor predicho para la detección de neutrinos solares en experimentos de ${}^{71}\text{Ga}$ es 126 ± 10 SNU [53] (Modelo Solar Estándar BS09(OP) [6]). El valor medio extraído del SAGE fue 67 ± 5 SNU [53] (ver figura 4). El experimento ha estado en uso desde 1989 hasta hoy.

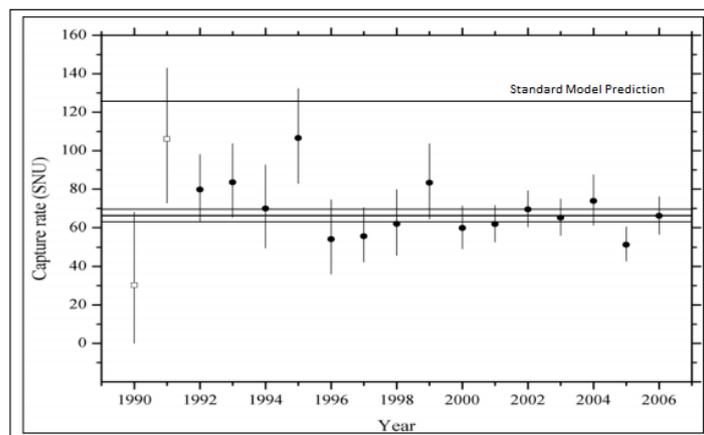


Figura 4: Gráfico que muestra las tasas de neutrinos capturados en el experimento SAGE hasta 2006. Imagen tomada de [43].

El experimento GALLEX (GALLium EXperiment) se encuentra situado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (LNGS), cerca de la montaña Gran Sasso en Italia. El

experimento comenzó a funcionar en 1991 y en 1998 fue modificado y renombrado como GNO (Gallium Neutrino Observatory). Se siguieron realizando experimentos hasta 2008. El detector es un tanque de 54 m^2 , lleno con 101 toneladas de una solución de tricloruro de galio en ácido clorhídrico, que contiene 30 toneladas de galio.

Los resultados combinados de GALLEX-GNO, contando con todas las observaciones, son de $69 \pm 5 \text{ SNU}$ (ver figura 5), mientras que las predicciones del Modelo Solar Estándar son las mismas que para SAGE, dado que ambos experimentos estudian la misma reacción. Como puede comprobarse, los resultados experimentales son prácticamente coincidentes con los del experimento de la colaboración SAGE. Los resultados de ambos experimentos coincidían también con el déficit de neutrinos solares detectados por el experimento Homestake, con lo que la disparidad entre teoría y predicciones se confirmaba.

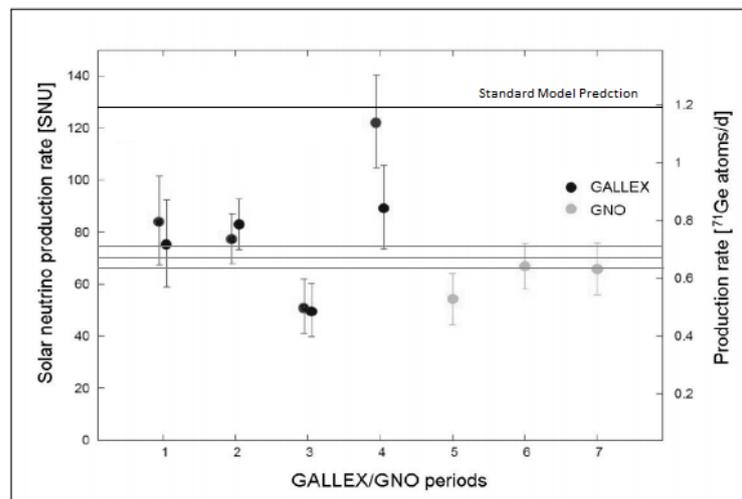


Figura 5: Gráfico que muestra las tasas de neutrinos capturados en los experimentos GALLEX y GNO hasta 2006. Imagen tomada de [43]

3.2.2 Detectores Cherenkov

Estos detectores llevan el nombre del fenómeno gracias al cual son capaces de cumplir su función: la radiación Vavílov-Cherenkov [80] [24]. Este tipo de radiación se produce cuando una partícula cargada avanza a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en el medio por el que se propaga. La partícula cargada polariza el medio a su alrededor, desviando los electrones de los átomos hacia un lado, y los núcleos, cargados positivamente, hacia el otro. Al volver al estado inicial, los átomos irradian ondas electromagnéticas. Cuando la velocidad de la partícula es mayor que la de la luz en el medio (ver figura 6, $V(p) > V(EM)$), los átomos no tienen tiempo de polarizarse antes de que ésta avance y surge una radiación que se propaga en forma de cono, sirviendo de vértice del mismo la partícula en vuelo.

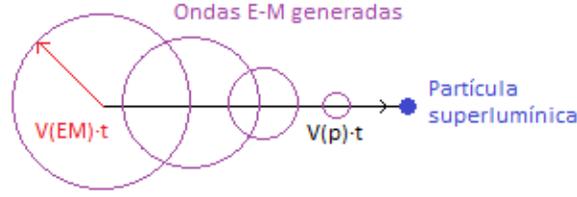


Figura 6: Dibujo esquemático de la radiación Vavílov-Cherenkov. La partícula superlumínica se mueve a mayor velocidad ($V(p)$) que la de propagación de la luz en el medio ($V(EM)$).

Los detectores Cherenkov consisten en conjuntos de fotomultiplicadores situados en las paredes del contenedor del medio de propagación usado, que amplifican las señales de las ondas electromagnéticas producidas por el efecto. Cuando un fotón Cherenkov es emitido, éste produce scattering con los electrones presentes en el agua. Son estos electrones los que llegan a los fotomultiplicadores y son interpretados. Los experimentos basados en este fenómeno tienen un umbral de energía de ≈ 7 MeV para los neutrinos incidentes, por lo que están destinados a captar neutrinos de altas energías, principalmente provenientes de la reacción de fusión de 8B , explicada en apartados posteriores. También se pueden detectar neutrinos procedentes de la última reacción de la cadena p-p (*hep*), pero la tasa esperada es muy baja.

KamiokaNDE

Este experimento fue el primer detector del Observatorio Subterráneo de Kamioka, localizado a 1000 m bajo tierra en las minas de Mozumi en Japón. Terminado en 1983, las observaciones comenzaron en julio del mismo año. El KamiokaNDE (Kamioka Nucleon Decay Experiment) consistía en un tanque que contenía 3000 toneladas de agua pura y unos 1000 tubos fotomultiplicadores acoplados, cubriendo el 20 % de la superficie interna del detector. Su primer objetivo fue la detección de desintegraciones de nucleones, cuyo tiempo de vida se había estimado en $10^{28} - 10^{32}$ años.

Al no conseguirse observar tal decaimiento y suponiendo que la causa era el ruido de base provocado por los neutrinos, se comenzaron a estudiar sus detecciones. La actualización que permitió que se utilizara para la detección de neutrinos solares se realizó en 1985, dando lugar al llamado KamiokaNDE-II. Tales neutrinos se observaron en 1988.

Las detecciones en el experimento se basan en las reacciones



para la detección de neutrinos electrónicos, y en



para la detección de neutrinos muónicos, captando radiación Cherenkov de los electrones en el caso de la primera reacción y de los muones en el caso de la segunda.

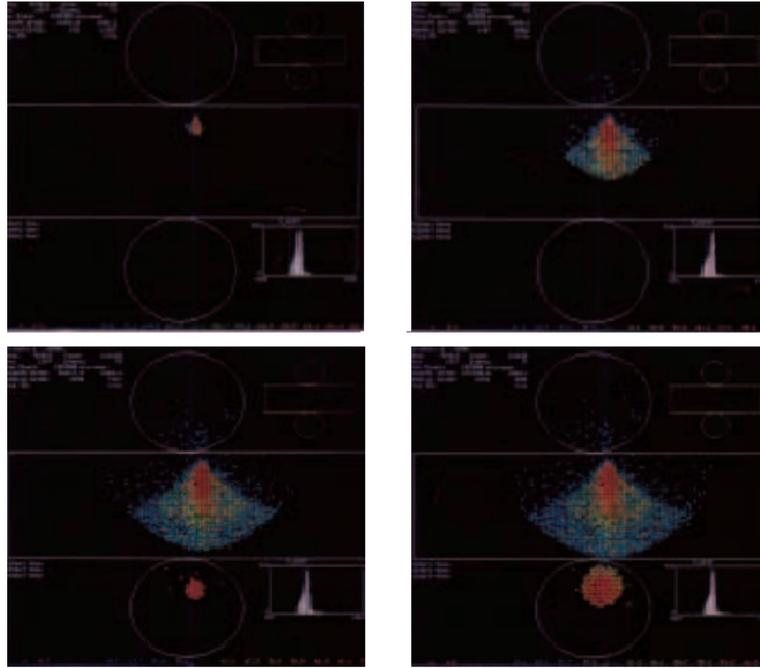


Figura 7: Detección de un muón en los fotomultiplicadores del KamiokaNDE. En la figura se puede observar un desarrollo de las detecciones en el que las imágenes han sido tomadas cada 50 nanosegundos. Cada punto representa un fotomultiplicador y los diferentes colores indican el número de fotoelectrones recibidos. La detección de los muones y los electrones es fácilmente diferenciable debido a la diferencia entre la masa de estas dos partículas. Esta diferencia de masa produce que los muones sufran mucho menos scattering, efecto muy notable en los resultados ya que los patrones de puntos aparecen menos dispersos. Imagen tomada de [42].

Tras un experimento que se realizó durante 2079 días y terminó en 1995, se obtuvo como resultado un flujo de neutrinos solares 8B de $2.80 \pm 0.33 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ [45], frente a los $5.69 \pm 0.91 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ predichos por el Modelo Solar Estándar para estos neutrinos [53] (Modelo Solar Estándar BS05(OP)[6]).

Tras el éxito del experimento, se constuyó en el mismo lugar geográfico y como versión mejorada del KamiokaNDE el Super-KamiokaNDE. Éste consiste en un tanque cilíndrico de acero inoxidable de 41.4 m de alto y 39.3 m de diámetro y contiene 50000 toneladas de agua pura. La reacción estudiada es la misma que en el caso del KamiokaNDE. Las observaciones comenzaron en 1996.

La cobertura de tubos fotomultiplicadores en la superficie interna del experimento es de un 40%. En 2001 implosionaron varios de estos detectores en una reacción en cadena provocada por la propagación de las ondas de presión que produjeron las primeras implosiones. Los daños fueron parcialmente reparados redistribuyendo el resto de fotomultiplicadores y añadiéndoles protecciones, dando lugar a lo que se bautizó como Super-KamiokaNDE II. En 2005 se comenzó una nueva reparación para restaurar el experimento en su forma original, añadiendo nuevos detectores. Esta actualización terminó en 2006, conociéndose el resultado como Super-KamiokaNDE III.

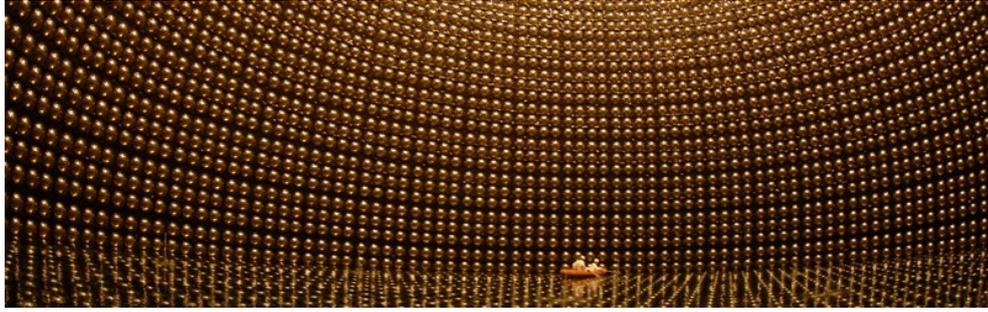


Figura 8: Tubos fotomultiplicadores del experimento Super-Kamiokande. Imagen tomada de [76].

A continuación se muestra una tabla con los flujos de neutrinos 8B detectados para cada una de las actualizaciones del experimento hasta 2011, frente a la misma predicción que para el experimento anterior.

Experimento	Flujo neutrinos 8B ($10^6 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)
<i>SKI</i>	2.38 ± 0.08
<i>SKII</i>	2.41 ± 0.16
<i>SKIII</i>	2.32 ± 0.05

Tabla 1: Flujo de neutrinos 8B detectados en los experimentos Super-Kamiokande [42].

Como se puede apreciar, diferentes experimentos, basados en técnicas y fundamentos físicos distintos, relatados por diversos grupos con tecnologías diferentes, obtuvieron resultados coherentes entre sí y discrepancias con las predicciones teóricas.

En el siguiente apartado se exponen algunas claves del Modelo Solar Estándar, para conocer algunos principios de los cuales se extraen las predicciones planteadas para los experimentos.

4 Modelo Solar Estándar

Abstract

In this section, main equations of Solar Standard Model and energy producer solar nuclear reactions are exposed, giving a special mention to neutrino producer reactions. Furthermore, a subsection about helioseismology relevance on Standard Model confirmation is added.

Resumen

En esta sección, se muestran las principales ecuaciones del Modelo Solar Estándar y las reacciones nucleares productoras de energía en el Sol, dando una mención especial a aquellas productoras de neutrinos. Además, se añade un apartado sobre el rol de la heliosismología en confirmaciones del Modelo Estándar.

El Sol se encuentra en el estado más común de evolución estelar: la secuencia principal. Esta es la fase en la que una estrella quema hidrógeno mediante reacciones de fusión nuclear. La mayor parte de las estrellas pasan aproximadamente el 90 % de su vida en estas circunstancias.

El Modelo Solar Estándar es el marco teórico más sencillo para la descripción del interior de una estrella como el Sol. Se basa en una serie de aproximaciones que dan resultados que reproducen los observables solares con gran eficacia. Se asumen simetría esférica y equilibrio cuasiestático. Además, la rotación, las pérdidas de masa y los campos magnéticos no se tienen en cuenta. Para desarrollar el modelo se admiten cuatro hipótesis:

La primera de estas hipótesis es el *Equilibrio Hidrostático*. Con ésta se asume que debe haber equilibrio entre las fuerzas gravitatorias que empujan la materia estelar hacia el centro de la estrella y las fuerzas producidas por los movimientos térmicos de las moléculas de gas. La ecuación que gobierna el equilibrio hidrostático es

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G}{r^2}M_r\rho, \quad (15)$$

donde P es la presión para una esfera de radio r concéntrica con el Sol y contenida en este, G es la Constante Gravitacional, M_r es la masa en el interior de la esfera de radio r y ρ es la densidad del interior estelar.

La segunda hipótesis es la *Continuidad de la Masa*. Se basa en que la masa del Sol es una variable continua y propone utilizar, para la obtención de su valor para un determinado radio, la siguiente ecuación:

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2\rho, \quad (16)$$

cuyos elementos ya han sido definidos para la ecuación 15.

La tercera hipótesis está relacionada con la *Producción de Energía*. Según ésta, toda la energía producida en el interior de la estrella debe ser transmitida a la superficie y ser emitida hacia el exterior. Llamando L_r al flujo de energía que pasa por una superficie de radio r en el interior del Sol por unidad de tiempo, y ε a el coeficiente de producción de energía (cantidad de energía emitida en la estrella por unidad de masa y tiempo), obtenemos

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2\rho\varepsilon dr. \quad (17)$$

La tasa de energía producida depende de la distancia al centro de la estrella. En su mayoría, toda la energía radiada por el Sol se produce en su núcleo. En las capas más externas, la producción de energía es despreciable y L_r es prácticamente constante.

La cuarta y última hipótesis está relacionada con el *Gradiente de Temperatura* con respecto al radio en el interior del Sol. La forma de la ecuación resultante de esta hipótesis depende de los métodos mediante los cuales la energía es transportada. Los tres principales mecanismos de transporte energético en la estrella son por conducción, por convección y por radiación. En el interior de una estrella como el Sol el mecanismo de conducción es muy ineficiente, debido a que los electrones no son capaces de viajar largas distancias sin colisionar con otras partículas. El mecanismo de conducción sólo es importante en estrellas compactas, enanas blancas y estrellas de neutrones. Para el resto puede considerarse despreciable.

El mecanismo de radiación se basa en la emisión de fotones en las partes más calientes de la estrella y su absorción en las partes más frías. Se dice que una estrella está en equilibrio radiativo si la energía producida en su interior es transportada al exterior únicamente por radiación. El gradiente de temperatura radiativo está relacionado con el parámetro de flujo L_r , mencionado anteriormente, según la ecuación

$$\frac{dT}{dr} = \left(\frac{3}{4ac} \right) \left(\frac{\kappa\rho}{T^3} \right) \left(\frac{L_r}{4\pi r^2} \right), \quad (18)$$

donde $a = 4\sigma/c = 7.564 \cdot 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$ es la constante de radiación (donde σ es la constante de proporcionalidad de la ley de Stefan-Boltzmann), c la velocidad de la luz, ρ la densidad y κ el coeficiente de absorción de masa, que aporta la tasa de absorción por unidad de masa. El valor de este último parámetro depende de la temperatura, la densidad y la composición química.

Para las capas más superficiales del Sol, el transporte por radiación se vuelve insuficiente. En dichas zonas, se producen movimientos convectivos en el gas que transportan energía más eficientemente que la radiación. La convección se produce cuando masas de aire caliente se elevan hacia capas más frías, en las que pierden energía y se desplazan de nuevo hacia el interior. El movimiento del material estelar producido por este fenómeno da lugar a una mezcla que causa que las zonas convectivas sean homogéneas. Los mecanismos de radiación y conducción no mezclan la materia, ya que sólo mueven energía y no gas. Para calcular el gradiente debido a la convección se utiliza un modelo de burbuja de aire que se eleva. Se asume que el gas que se mueve con la burbuja obedece la ecuación de estado adiabática,

$$T \propto P^{1-\frac{1}{\gamma}}, \quad (19)$$

donde γ es el cociente entre los calores específicos $\gamma = C_p/C_v$. γ depende de la ionización del gas y puede obtenerse conociendo la temperatura, la densidad y la composición química. Derivando de la ecuación de estado adiabática obtenemos la ecuación que gobierna el transporte convectivo de energía:

$$\frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}. \quad (20)$$

Las cuatro hipótesis tratadas definen las ecuaciones de equilibrio del modelo (ecuaciones 15, 16, 18 y 20). Además, para que el modelo funcione, deben asumirse las siguientes

condiciones de frontera:

- No existen fuentes de energía o masa en $r=0$.
- La masa total de la estrella se mantiene fija.
- La presión y la temperatura en la superficie de la estrella son tan pequeñas en comparación con las del interior que se pueden considerar nulas.

Para poder utilizar las ecuaciones expuestas, también es necesario conocer las expresiones de la presión, del coeficiente de absorción de masa y del coeficiente de producción de energía.

Debido a las altas temperaturas, se puede considerar que todo el gas del Sol está ionizado. La interacción entre las partículas es pequeña, por lo que una buena aproximación del comportamiento de estas es la ecuación de estado del gas ideal

$$P = \frac{k}{\mu m_H} \rho T, \quad (21)$$

donde k es la constante de Boltzmann, μ la media del peso molecular en unidades de m_H y m_H la masa del átomo de hidrógeno.

El coeficiente de absorción de masa se puede obtener de la opacidad, α , parámetro que describe la dificultad de la radiación para propagarse por un medio. Ésta se puede calcular conociendo composición química, densidad y temperatura del material. El coeficiente de absorción se puede obtener mediante la siguiente operación:

$$\kappa = \alpha / \rho. \quad (22)$$

Los parámetros del Modelo Solar Estándar (opacidad, densidad, abundancias, coeficiente de producción de energía, etc), pese a ser este un marco teórico de características solares comunes, han sido actualizados a lo largo de los años a medida que la precisión de los experimentos, mediante los cuales se comprobaban sus valores, iba aumentando. Esto ha dado lugar a numerosos Modelos Solares Estándar, debido a lo cual, cuando se aporta una predicción numérica concreta, debe especificarse el modelo utilizado, como ha ocurrido en el apartado anterior con el modelo BP05(OP) [6].

Las tasas de reacciones de fusión productoras de energía en el Sol se pueden determinar mediante experimentos y cálculos teóricos. Conociéndolas, se puede calcular el coeficiente de producción de energía ε . Tales reacciones serán tratadas en el siguiente apartado.

El Modelo Solar Estándar ha sido preciso en sus reproducciones de las condiciones observadas y produciendo simulaciones de interiores estelares que están de acuerdo con el resto de campos de la física y con medidas posteriores.

4.1 Reacciones de fusión

En 1967, Hans Bethe [13] recibe el premio Nobel de física por sus estudios sobre la generación de energía en el Sol basados en reacciones de fusión. Junto con Carl Friedrich von Weizsäcker [81] [82], trabajó investigando qué reacciones podían ser las responsables del comportamiento de la estrella. Finalmente, se demostró que existen dos procesos nucleares destinados a su producción energética: la Cadena protón-protón (p-p) y el Ciclo carbono-nitrógeno-oxígeno (CNO) .

La principal reacción productora de energía es:



cuyos positrones se aniquilan con electrones libres, liberando una energía de $2m_e c^2$, además de la energía nuclear y cinética de la fusión de las partículas implicadas en el proceso.

Esta reacción es la expresión final de la combustión de hidrógeno que ocurre como resultado de los procesos nucleares. En el Sol, la cadena predominante es la protón-protón, aunque ambas producen energía. A continuación se detalla cada una de ellas, especificando las fases en las cuales se producen neutrinos.

4.1.1 Cadena P-P

A continuación se muestra una tabla de los procesos incluidos en esta cadena de reacciones, añadiendo la energía de los neutrinos emitidos.

Reacción	Número de la reacción	ν (Mev)
$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ ó	1a(pp)	≤ 0.420
$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	1b(pep)	1.442
${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	2	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + 2p$ ó	3	
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	4	
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	5	(90%)0.861 (10%)0.383
${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2\alpha$ ó	6	
${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	7	
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	8	< 15
${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2\alpha$ ó	9	
${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	10(hep)	≤ 18.77

Tabla 2: Reacciones de la cadena p-p. Los núcleos que aparecen señalados con un asterisco se encuentran en estados excitados. Tabla tomada de [5].

La reacción 8, productora de neutrinos de energías muy altas, es fundamental ya que éstos se detectan más fácilmente que aquellos más abundantes con energías más pequeñas. La reacción 10 produce los neutrinos solares más energéticos. Estos neutrinos se producen en muy pocas ocasiones, pero a veces son detectables en algunos experimentos. A continuación se muestra un esquema de la sucesión de las reacciones con los porcentajes en los que suceden.

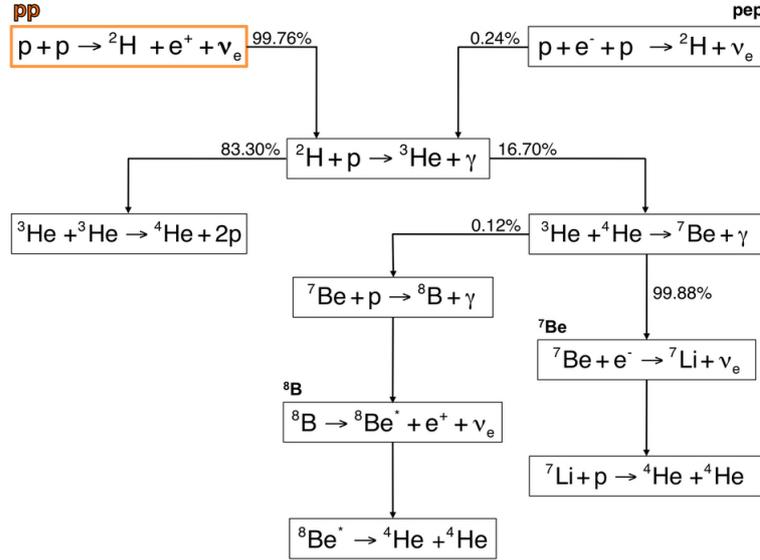


Figura 9: Esquema de las reacciones de la cadena p-p junto con los porcentajes en los que sucede cada una. Como se puede observar, la cadena comienza el 99.76 % de las veces con la reacción pp. Imagen tomada de [18].

4.1.2 Ciclo CNO

En este ciclo, la combustión de hidrógeno ocurre gracias a los núcleos de ^{12}C , el isótopo pesado más abundante en condiciones estelares normales. En la tabla mostrada a continuación se exponen las principales reacciones de este grupo y la energía de los neutrinos emitidos, en caso de que proceda.

Reacción	Número de la reacción	ν (Mev)
$^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$	1	
$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	2	≤ 1.199
$^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$	3	
$^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$	4	
$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	5	≤ 1.732
$^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha$	6	

Tabla 3: Reacciones del ciclo CNO. Tabla tomada de [5].

4.2 Heliosismología

La heliosismología es la rama de la astrofísica que estudia las oscilaciones en la superficie del Sol, mediante las cuales se puede acceder a información muy precisa sobre su interior. En este apartado se exponen los principales avances en Heliosismología que han ayudado a comprobar la veracidad del Modelo Solar Estándar y a aumentar su precisión cuantitativa.

La heliosismología comenzó a tener relevancia cuando se publicó, en 1962, el artículo de Leighton, Noyes y Simon [48], que descubrieron movimientos regulares de amplitud pequeña y periodo de aproximadamente 5 minutos en la superficie del Sol. Asociaron estos movimientos a la granulación solar, que es la manifestación observable de las capas altas de la zona de convección. Posteriormente en 1970, Ulrich [79] e, independientemente en 1971, Leibacher y Stein [47] propusieron una explicación teórica. Esta explicación se basaba en la existencia de cavidades resonantes dentro del Sol en las que las ondas que se propagan pueden interferir formando ondas estacionarias que se manifiestan en la superficie solar como las oscilaciones de 5 minutos. Entre el final de la década de los años 70 y el principio de la de los 80, la teoría se demostró cierta gracias a las observaciones de grupos universitarios europeos liderados por F.L. Deubner (Alemania), E. Fossat (Francia), G.R. Isaak (UK) y Teodoro Roca [63] (España).

Los movimientos vibratorios estacionarios se denominan modos propios de oscilación, debido a que sus frecuencias determinan la estructura física del sistema por el cual se propagan. En el Sol, la respuesta vibratoria está condicionada por sus dos fuerzas principales: la presión del plasma y la gravitación. Es por ello que la frecuencia de las oscilaciones depende fuertemente de los valores de la presión, la temperatura y la composición química de las zonas por donde viajan.

De esta manera, la heliosismología ha supuesto un mecanismo de refinamiento cuantitativo muy importante para el Modelo Solar Estándar, demostrando que el Problema de los Neutrinos Solares no se debe a ineficiencias de éste. El Modelo Solar Estándar es capaz de reproducir la velocidad del sonido en el interior solar con un error inferior al 0.5 % [26]. Además, pequeños ajustes del Modelo Solar Estándar basados en observaciones heliosismológicas han permitido el desarrollo de un nuevo modelo solar, el Modelo Solar Sismológico, que permite un acuerdo con la física de partículas a un nivel del 10 % [77]. Esto es, las predicciones de los flujos de neutrinos solares alcanzaron en 2011 un error con respecto a las detecciones inferior al 10 % , siendo la media de error de todos los experimentos de aproximadamente el 4 % .

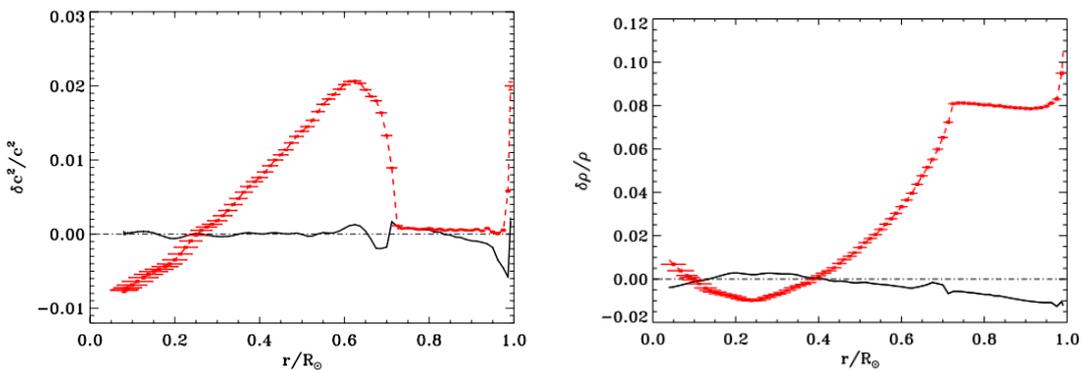


Figura 10: Representación de 2012 de dos parámetros solares en función del radio relativo de la estrella. La línea discontinua roja representa valores asociados al Modelo Solar Estándar, mientras que la línea continua negra representa valores asociados al Modelo Solar Sismológico. En la gráfica de la izquierda, el eje y representa la diferencia relativa entre los cuadrados de las velocidades del sonido observadas y de cada modelo ($\frac{\delta c^2}{c^2} = \frac{c_{obs}^2 - c_{mod}^2}{c_{mod}^2}$).

En la gráfica de la derecha, el eje y representa la diferencia relativa entre las densidades observadas y de cada modelo ($\frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{\rho_{obs} - \rho_{mod}}{\rho_{mod}}$). Nótese que cuanto más cercanos a $\frac{\delta X}{X} = 0$ estén los valores de las gráficas (donde X representa la variable), más se ajustan las predicciones del modelo a las observaciones. Imágenes tomadas de [78].

5 El problema de los neutrinos solares

Abstract

As it has been shown before, exposed solar neutrino experiments did not reproduce the predictions based on electronic neutrino generation in the Sun, according to Solar Standard Model. In this section, a comparative between experiments data and theoretical predictions is exposed, as well as some explanations that came out with the aim of giving an answer to the neutrino deficit, before the demonstration of Neutrino Oscillation Theory, that will be detailed in following sections.

Resumen

Como se ha expuesto anteriormente, los experimentos de detección de neutrinos no reproducen las predicciones basadas en los neutrinos electrónicos generados en el Sol, según el Modelo Solar Estándar. A continuación se muestra una comparación entre la teoría y las observaciones y se explican algunas de las soluciones planteadas antes de conocer lo que hoy se conoce como Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos, que se detallará más adelante.

5.1 Comparación teoría-observación

A continuación se muestra una tabla comparativa teoría-observaciones para los experimentos, basada en el Modelo Solar Estándar BS05(OP) [6]:

Experimento	Predicción	Detección
Homestake	$8.1 \pm 1.2 \text{ SNU}$	$2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$
SAGE	$126 \pm 10 \text{ SNU}$	$67 \pm 5 \text{ SNU}$
GALLEX	$126 \pm 10 \text{ SNU}$	$69 \pm 5 \text{ SNU}$
KamiokaNDE	$5.69 \pm 0.91 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$2.8 \pm 0.33 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Super-KamiokaNDE	$5.69 \pm 0.91 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$2.32 \pm 0.05 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

Tabla 4: Comparación entre la teoría y las observaciones para el Modelo Solar Estándar BS05(OP). En el caso del KamiokaNDE y el Super-KamiokaNDE, tanto las predicciones como las detecciones se corresponden a los neutrinos producidos en la reacción del ^8B de la cadena p-p.

5.2 Posibles explicaciones para las discrepancias

En este apartado se exponen algunas de las hipótesis más notorias que surgieron para explicar las irregularidades entre la teoría y los experimentos a partir de finales de la década de los sesenta. Se barajaron múltiples posibles causas de estas discrepancias antes de llegar a la solución aceptada hoy. Dado que las dos hipótesis de partida para las predicciones fueron el Modelo Estándar de Partículas Elementales y el Modelo Solar Estándar, se planteó que uno de estos dos modelos podía no ajustarse completamente a la realidad.

5.2.1 Modelos solares no estándar

Una de las ideas que se barajaron al inicio del problema de los neutrinos solares fue la falta de precisión en el Modelo Solar Estándar. De hecho, uno de los motivos principales por los que se comenzó a investigar en el campo de la detección de neutrinos solares fue poner a prueba las predicciones del modelo.

A continuación se muestran algunas de las proposiciones que se apartan del Modelo Estándar y que se plantearon para subsanar el problema dentro de este campo.

Fusión catalizada por medio de quarks

En 1968, Libby y Thomas [49] proponen una teoría de generación de energía en el Sol basada en que quarks cargados negativamente y antiquarks actúen como catalizadores de reacciones de fusión de elementos ligeros. La energía podría venir de reacciones de fusión de helio en la que participasen tales quarks, de manera que existiría un mecanismo adicional de producción energética en el que no participan neutrinos.

Sol consumido con núcleo de helio

En 1973, Prentice [60] propone un modelo solar en el cual la estrella cuenta con un pequeño núcleo en el que el hidrógeno se ha consumido (entre 0.02 y $0.03M_{\odot}$). Esta idea está basada en la hipótesis de que en las primeras etapas de formación del Sol existían pequeñas inhomogeneidades en la composición química del medio interestelar, provocando una composición inicial del Sol consecuentemente inhomogénea. Tal hipótesis podría desembocar en un Sol inicial con una abundancia de helio mucho mayor que la que supone el Modelo Solar Estándar y con un núcleo prácticamente carente de hidrógeno (fracción de masa de hidrógeno en el núcleo: $X_c=0-0.5$). Este modelo podría desarrollar el núcleo consumido de hidrógeno en sólo 4.5×10^9 años de quema nuclear. Prentice ajustó esta teoría a modelos estelares consistentes con la fase en la que se encontraría el Sol en el caso de que su hipótesis fuera correcta y demostró que el flujo de neutrinos se podría reducir hasta al menos una décima parte de la predicción estándar.

Mayor abundancia de ^3He en el Sol en la actualidad

En 1970, Kocharov y Starbunov [40] propusieron un modelo solar con una temperatura interior inferior a la predicha por el Modelo Solar Estándar. La teoría se basaba en que la reacción 3 de la cadena p-p (ver tabla 2) podría producir energía a bajas temperaturas, en caso de que existiera una abundancia mayor que la estándar de ^3He en el interior del Sol.

Agujero negro en el centro del Sol

En 1971, Hawking [34] propuso la existencia de agujeros negros microscópicos resultantes del big bang. Basándose en esta teoría, en 1975, Clayton y colaboradores [22] proponen un modelo solar basado en la presencia de un agujero negro central en el Sol. Este agujero negro podría participar en la producción de energía mediante la acreción de materia sin la intervención de neutrinos, de manera que las predicciones para el experimento Homestake

se reducirían a un límite superior coincidente con el observado.

Materia oscura en el interior del Sol

En 1985, Press y Spergel [61] plantearon una solución al problema proponiendo la existencia de materia oscura en el interior del Sol. Ésta provocaría que la temperatura del núcleo fuese menor que la del Modelo Solar Estándar, de manera que, con éste nuevo modelo, el flujo de neutrinos sería también menor que las predicciones de la época. La cantidad necesaria de materia oscura para que la teoría pudiese funcionar era coherente con la densidad media de ésta que supuestamente se encontraba cercana al Sol.

Finalmente, estos y otros modelos no se sostenían, a la vista de los resultados de la Heliosismología, que avalaban las predicciones del Modelo Solar Estándar.

5.2.2 Desviaciones del Modelo Estándar de Partículas Elementales

La demostración continuada de la precisión alcanzada por el Modelo Solar Estándar, gracias a la heliosismología, planteó la posibilidad de que existiesen errores en el Modelo Estándar de Partículas Elementales. A continuación se muestran algunas de las propuestas que se plantearon para subsanar el problema dentro de este campo.

Neutrinos taquiónicos

En 1985, Chodos y Hauser [25] proponen una teoría basada en neutrinos con masa negativa. Esta idea podría explicar el déficit de neutrinos suponiendo que algunos de ellos viajan con velocidades superlumínicas. En este caso, los neutrinos no detectados son aquellos con velocidades mayores a la de la luz. La teoría tuvo múltiples detractores, como Hughes y Stephenson, quienes en 1990 escribieron un artículo argumentando en contra de la idea [36].

Pruebas realizadas en el CERN por la colaboración OPERA [23] parecieron confirmar esta teoría en 2011, siendo desmentida en 2012 por el experimento ICARUS [37] en el laboratorio italiano de Gran Sasso.

Grados de libertad en dimensiones desconocidas

En 1999, Dvali y Smirnov [31] proponen una teoría basada la transformación de neutrinos electrónicos en fermiones de otras dimensiones. Se apoya en la teoría de supercuerdas.

Desintegración de neutrinos

En 1972, Bahcall y colaboradores [7] exponen la posibilidad de que los neutrinos no sean partículas estables si tienen masa finita. Esta teoría explica las diferencias entre los valores teóricos y experimentales suponiendo que parte de los neutrinos solares se desintegran en otras partículas antes de llegar a Tierra, no siendo detectados.

Oscilación de neutrinos

En 1962, Maki, Nakawaga y Sakata [50], teniendo como base dos artículos de Bruno Pontecorvo [58] [59], proponen un formalismo matemático para tratar posibles oscilaciones entre los diferentes sabores de los neutrinos. Esto se puede aplicar al problema de los neutrinos solares planteando que los neutrinos electrónicos oscilan entre sabores en su trayecto desde el centro del Sol hasta la Tierra, de manera que algunos de ellos llegan como neutrinos tauónicos o muónicos y no son detectados, ya que los experimentos iniciales sólo estaban destinados a la detección de neutrinos electrónicos. Esta teoría se expone con más detalle la siguiente sección de este trabajo.

6 La solución al problema planteado

Abstract

Solar neutrino problem was solved by Neutrino Oscillation Theory, based on the idea of flavour changing neutrino propagation from Sun to Earth. This idea explain why predicted rate of electronic neutrino production in nuclear solar reactions is not measured on the planet. In this section, an historical and mathematical explanation to neutrino oscillation theory, for two and three flavors, is exposed, as well as another problem which reached to the same solution than neutrino solar problem. Furthermore, some principles of MSW effect are shown, and a description of Sudbury Neutrino Observatory experiment and its results, doubtlessly key to the confirmation of oscillations theory.

Resumen

El enigma de los neutrinos solares fue resuelto gracias a la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos, basada en la idea de que los neutrinos cambian de sabor en su camino desde el Sol hasta la Tierra, de manera que no se reciben todos los neutrinos electrónicos creados en las reacciones solares de fusión porque estos han cambiado de naturaleza. Se presenta una introducción histórica y matemática sobre los principios de la Teoría de Oscilaciones de Neutrinos en el vacío, en profundidad para el caso de dos sabores de neutrinos y, además, se comenta la analogía para el caso más adaptado a la realidad, en el que se contemplan los tres sabores. Así mismo, se expone otro problema cuya solución parece ser también la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos. Además, se muestran las ideas principales del efecto MSW de oscilaciones de neutrinos en la materia y, por último, se describen el experimento del Sudbury Neutrino Observatory y sus resultados, claves para la confirmación de esta teoría.

En 1957, Bruno Pontecorvo [58] estudia la posibilidad de que se puedan dar transiciones neutrino-antineutrino. Desarrolla tal propuesta en un artículo en el año 1958 [59]. Tras sus trabajos, en 1962, Maki, Nakagawa y Sakata [50] escriben otro, proponiendo transiciones de neutrinos entre dos sabores. Introducen parte del formalismo utilizado actualmente para estudiar las oscilaciones, como los autoestados de masa y la notación matricial. Su teoría parte de la hipótesis de que los neutrinos no tienen masa nula, a diferencia de lo que se planteaba hasta el momento, que no había sufrido inconsistencias para ningún experimento hasta la fecha.

En 1963, Cabibbo [20] propone un objeto matemático destinado a calcular desintegraciones débiles que cambian el sabor de los quarks: la matriz unitaria Cabibbo-Kobayashi-Maskawa o CKM. A continuación se ilustra su uso con un ejemplo:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \quad (24)$$

donde $|V_{ij}|^2$ representa la posibilidad de que un quark de sabor j decaiga en uno de sabor i .

En 1968, Pontecorvo y Gribov [33] escriben un artículo en el que relacionan el déficit de neutrinos solares con las oscilaciones de neutrinos. Posteriormente, entre 1976 y 1978, Pontecorvo trabaja junto con Bilenky [16] [17] [14] [15] para desarrollar un formalismo matemático adecuado para tratar la teoría utilizando analogías con los estudios de Cabibbo y su matriz CKM, desarrollando lo que hoy se conoce como matriz Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata o PMNS, objeto matemático utilizado para estudiar las probabilidades de transición entre sabores de los neutrinos.

En 1985, Mikheyev y Smirnov [69], expandiendo el trabajo previo de Wolfenstein [84], estudiaron que las oscilaciones podrían ser modificadas cuando los neutrinos se propagan por la materia, aumentando las posibilidades de transición. Este efecto se denominó efecto Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein o MSW, y es relevante para el estudio de los neutrinos solares, ya que estos atraviesan materia densa del núcleo solar y la atmósfera terrestre.

En la década de los noventa comenzaron a aparecer consistencias con la teoría en varios experimentos. Las más importantes fueron la del Super-KamiokaNDE [74] en 1998 y la del Sudbury Neutrino Observatory (SNO) [71] en 2001. Por tales logros y posteriores confirmaciones [70], en 2015 Takaaki Kajita (por el experimento Super-KamiokaNDE) y Arthur McDonald (por el experimento SNO) recibieron el premio Nobel de Física.

6.1 Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos

Caso de dos sabores:

Para la comprensión de la teoría, la primera consideración es que los estados de los neutrinos vienen dados por combinaciones lineales de estados propios de masa $|\nu_1\rangle$ y $|\nu_2\rangle$, con masas m_1 y m_2 distintas de cero muy pequeñas. Por ejemplo, el estado de un neutrino muónico creado en un tiempo inicial $t=0$ viene dado por la combinación

$$|\nu(0)\rangle = |\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \quad (25)$$

y un neutrino electrónico viene dado por la combinación

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle, \quad (26)$$

donde el ángulo θ , que da cuenta de la mezcla de los estados propios, es denominado *ángulo de mezcla*. Tras un tiempo t , el estado del neutrino muónico pasará a ser

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta e^{iE_1 t} |\nu_1\rangle + \cos\theta e^{iE_2 t} |\nu_2\rangle. \quad (27)$$

en unidades de $\hbar = c = 1$, donde E_1 y E_2 son las energías de los estados $|\nu_1\rangle$ y $|\nu_2\rangle$, que se propagan como partículas libres. Para neutrinos relativistas ($E_\nu \gg m$), se pueden aproximar E_1 y E_2 como

$$E_j = (p^2 + m_j^2)^{1/2} \simeq p + \frac{m_j^2}{2p}. \quad (28)$$

Utilizando la hipótesis de que la masa de los estados propios es muy pequeña y que ambos tienen el mismo momento p se llega a $E_\nu \simeq p$. Sustituyendo las energías en el estado evolucionado del neutrino muónico se llega a

$$\begin{aligned} |\nu_\mu(t)\rangle &= -\sin\theta e^{-it\left(p + \frac{m_1^2}{2E_\nu}\right)} |\nu_1\rangle + \cos\theta e^{-it\left(p + \frac{m_2^2}{2E_\nu}\right)} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu(t)\rangle &= e^{-it\left(p + \frac{m_1^2}{2E_\nu}\right)} \left[-\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta e^{it\left(p + \frac{m_2^2}{2E_\nu} - p - \frac{m_1^2}{2E_\nu}\right)} |\nu_2\rangle \right] \end{aligned} \quad (29)$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = e^{-it\left(p + \frac{m_1^2}{2E_\nu}\right)} \left[-\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta e^{i\frac{\Delta m^2 t}{2E_\nu}} |\nu_2\rangle \right],$$

donde $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$. Debido a que la velocidad de los neutrinos en su camino hacia el detector será muy cercana a la de la luz, podemos aproximar $t \simeq x/c = L$, donde L es la distancia desde la fuente de neutrinos muónicos.

Así, la probabilidad de encontrar un ν_e en un L determinado es:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \langle \nu_\mu | \nu_e \rangle^2 = \left| \cos\theta \sin\theta \left(1 - e^{i\frac{\Delta m^2 L}{2E_\nu}} \right) \right|^2 \simeq \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu} \right). \quad (30)$$

Con esto se puede apreciar que las oscilaciones sólo son posibles para θ y Δm^2 distintos de cero, lo que implica que los estados de los neutrinos sean combinaciones de los autoestados y que al menos la masa de uno de ellos sea diferente de cero.

Al trabajar con la diferencia de masas Δm^2 en eV^2 , L en km y la energía E_ν en GeV, aparece un factor 1.27, con el que la ecuación queda

$$P_{\mu \rightarrow e} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L (km)}{4E_\nu (GeV)} \right). \quad (31)$$

Todas las oscilaciones pueden ser caracterizadas por θ y Δm^2 , ya que $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha)$.

La probabilidad de encontrar un ν_μ en el mismo L será el complemento de la calculada previamente, es decir

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu} \right) \quad (32)$$

Este caso es una representación de lo que ocurriría si los neutrinos oscilaran sólo entre dos sabores, pero el caso utilizado para explicar la deficiencia de neutrinos solares es el que se muestra a continuación, en el que las oscilaciones ocurren entre los tres sabores de neutrinos.

Caso de tres sabores:

En este caso, más ajustado a la situación real, los estados de los neutrinos electrónico, muónico y tauónico están conectados con los tres autoestados de masa (ν_1 , ν_2 y ν_3) por la matriz unitaria U, denominada matriz PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) [50] de la siguiente manera:

$$|\nu_\alpha\rangle = U |\nu_i\rangle, \alpha = e, \mu, \tau; i = 1, 2, 3. \quad (33)$$

donde U tiene la forma

$$U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}, \quad (35)$$

donde $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ ($i,j=1,2,3$) y δ es el la fase de violación CP, que representa las diferencias entre las oscilaciones de dos estados con puntos de inicio opuestos.

La fase δ se introduce en la matriz como ajuste a los resultados experimentales, justificado con el hecho de que existe una violación de la simetría carga-paridad en las transiciones entre neutrinos. Esta fase no se ha medido directamente, pero se ha aproximado con ajustes usando las medidas tomadas de otros parámetros, como las tasas de oscilación.

El valor mejor ajustado para δ es consistente con cero a 0.9σ . En física de partículas se dice que un resultado es consistente con un valor mientras no se desvíen en más de 2σ . Actualmente, todos los posibles valores de δ son consistentes con 1.8σ de los valores mejor ajustados, por lo que todos los valores posibles son consistentes con los valores experimentales, aunque los que mejor se ajustan son los que tienen más probabilidades de ser correctos.

Gracias a estas transformaciones, es posible llegar a las expresiones de las probabilidades de transiciones de neutrinos, siguiendo la misma idea que en el caso anterior pero teniendo en cuenta los tres sabores.

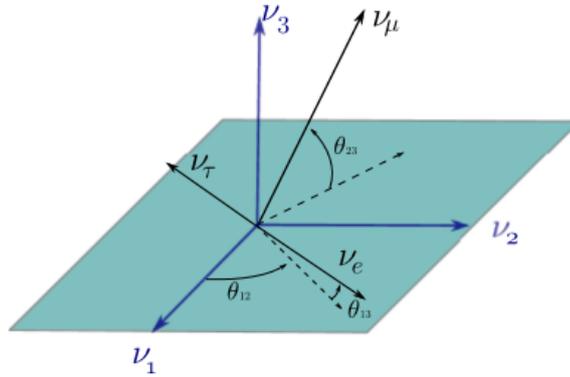


Figura 11: Representación geométrica de la combinación de autoestados de masas de los neutrinos para formar los neutrinos electrónico, muónico y tauónico. La matriz U se puede considerar como una matriz de rotación de la base de vectores ν_e, ν_μ, ν_τ a la base de vectores ν_1, ν_2, ν_3 . Imagen tomada de [46].

Efecto MSW:

Este efecto explica las variaciones de las oscilaciones de neutrinos en la materia con respecto a las oscilaciones en el vacío.

Usando de nuevo el caso de dos sabores, por sencillez, existe una manera de expresar las oscilaciones en el vacío mediante la ecuación de Schrödinger, con un Hamiltoniano que represente las transiciones de la forma

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = H_n \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad (36)$$

donde H_n es el Hamiltoniano que ilustra el caso de dos sabores, que es el que se utilizará por sencillez en esta exposición. La forma de tal Hamiltoniano es

$$H_n = \begin{pmatrix} \Delta m^2 \\ 4E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Esta forma viene de la ecuación de Schrödinger para los estados ν_1 y ν_2 , teniendo en cuenta la energía de cada estado y la transformación de los vectores de tales estados en los correspondientes a los neutrinos ν_e y ν_μ , forma que se ajusta a lo visto en apartados anteriores

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}. \quad (38)$$

El efecto MSW parte del hecho de que los neutrinos electrónicos y sus antineutrinos sufren interacciones con la materia diferentes a los otros dos sabores. Éstos pueden sufrir corrientes cargadas y neutras mientras que los neutrinos de los otros dos sabores sólo sufren corrientes neutras (fenómenos que se explicarán en el apartado del Sudbury Neutrino Observatory). Este hecho añade un potencial extra al Hamiltoniano de la forma

$$V_e = \pm\sqrt{2}G_F N_e \quad (39)$$

donde N_e es la densidad electrónica de la materia, G_F es la constante de Fermi y el signo depende de si la fórmula se aplica a neutrinos electrónicos (positivo) o antineutrinos electrónicos (negativo).

Con este potencial, el Hamiltoniano se puede escribir como

$$H_n = \begin{pmatrix} \Delta m^2 \\ 4E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_e & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (40)$$

y realizando algunas operaciones simples, sin cambiar la física de la teoría, se llega a una matriz de la forma

$$H_n = \begin{pmatrix} \Delta m^2 \\ 4E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta + A & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta - A \end{pmatrix}, \quad (41)$$

donde

$$A = \pm \frac{2\sqrt{2}G_F N_e E}{\Delta m^2}. \quad (42)$$

La solución a la correspondiente ecuación de Schrödinger es simple para densidades constantes, caso en el cual se puede re-diagonalizar la matriz para obtener una con parámetros análogos a los de las transiciones en el vacío, de la forma

$$H_n = \begin{pmatrix} \Delta m_m^2 \\ 4E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta_m & \sin 2\theta_m \\ \sin 2\theta_m & \cos 2\theta_m \end{pmatrix}, \quad (43)$$

donde los parámetros con subíndice m denotan la interacción con la materia, y donde la probabilidad de transición es análoga al caso del vacío pero con estos nuevos parámetros.

6.2 Los neutrinos atmosféricos

El problema de los neutrinos atmosféricos sirvió de impulso para la resolución del problema de los neutrinos solares ya que, mediante el estudio de neutrinos provenientes de fuentes diferentes al Sol, se planteó la solución de las oscilaciones de neutrinos ante importantes desviaciones entre las tasas de detección predichas por los modelos físicos y las finalmente obtenidas.

Estos neutrinos fueron los primeros estudiados en profundidad en el experimento KamiokaNDE, debido a que constituían un importante ruido de base en el intento de detectar decaimientos de protones y neutrones. Los neutrinos atmosféricos son partículas procedentes de reacciones provocadas por la llegada de rayos cósmicos a la atmósfera. Típicamente, las reacciones productoras de neutrinos y antineutrinos son las siguientes:

$$p + N \Rightarrow \begin{array}{l} \pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+, K^+ \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+ \\ \pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-, K^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^- \end{array} \quad (44)$$

donde N es un núcleo atómico de la atmósfera. Debido a la naturaleza de tales reacciones, se predice el siguiente resultado:

$$\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \geq 2. \quad (45)$$

Este resultado no es una igualdad debido a que para los rayos más energéticos, algunos muones llegan a tierra y no decaen antes, provocando una tasa menor de neutrinos y antineutrinos electrónicos. Se hizo un estudio en el experimento KamiokaNDE teniendo en cuenta para las predicciones los neutrinos atmosféricos, la capacidad de detección del experimento y la actividad solar y, en 1988, los resultados fueron

	Datos	Predicción
<i>Eventos ν_e</i>	93	88.5
<i>Eventos ν_μ</i>	85	144.0

Tabla 5: Eventos en el experimento realizado en el KamiokaNDE para estudiar los neutrinos atmosféricos. Tabla tomada de [35].

Dados estos resultados, el equipo científico del KamiokaNDE se planteó que la solución a las discrepancias fuesen las oscilaciones de neutrinos entre sabores. En 1992, resultados del IMB [10], otro experimento que estudiaba los neutrinos atmosféricos, confirman el déficit de eventos ν_μ obtenido por el KamiokaNDE.

Otra de las evidencias de la oscilación de los neutrinos atmosféricos fue la asimetría entre los neutrinos de alta energía que llegan al experimento desde arriba y desde abajo. Las trayectorias de los neutrinos atmosféricos pueden ser rastreadas hasta los rayos cósmicos primarios para energías superiores a 10 GeV. Por encima de esta energía, los rayos cósmicos no sufren grandes desviaciones debidas al campo magnético terrestre y llegan a la tierra más o menos isotrópicamente.

Estas consideraciones llevan a una predicción inicial de flujo de neutrinos atmosféricos igual para ángulos de llegada simétricos, tanto desde arriba como desde abajo, ya que debido a las altas energías de los neutrinos, no deberían interactuar con el interior de la tierra. Esto se ilustra en la siguiente imagen:

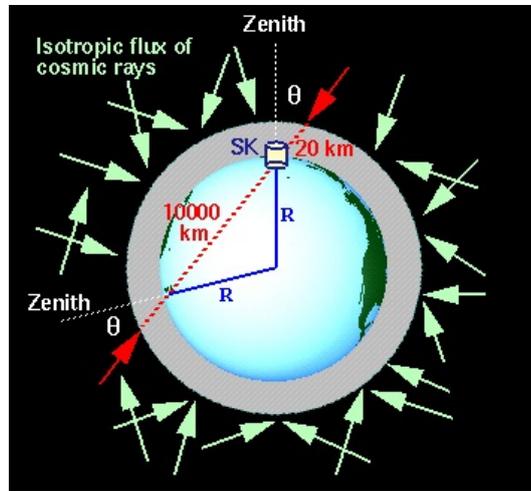


Figura 12: Esquema en el que se muestran dos ángulos para los cuales el flujo de neutrinos esperado en el experimento SK debería ser equivalente, debido a la isotropía de los rayos cósmicos en su llegada a tierra y con las altas energías de los neutrinos detectados, que no deben interactuar con el interior terrestre. Imagen tomada de [52].

A continuación, se muestra también un conjunto de gráficas con resultados parciales del experimento Super-KamiokaNDE, que muestra la asimetría de los eventos de neutrinos muónicos, frente a una alta simetría en los neutrinos electrónicos.

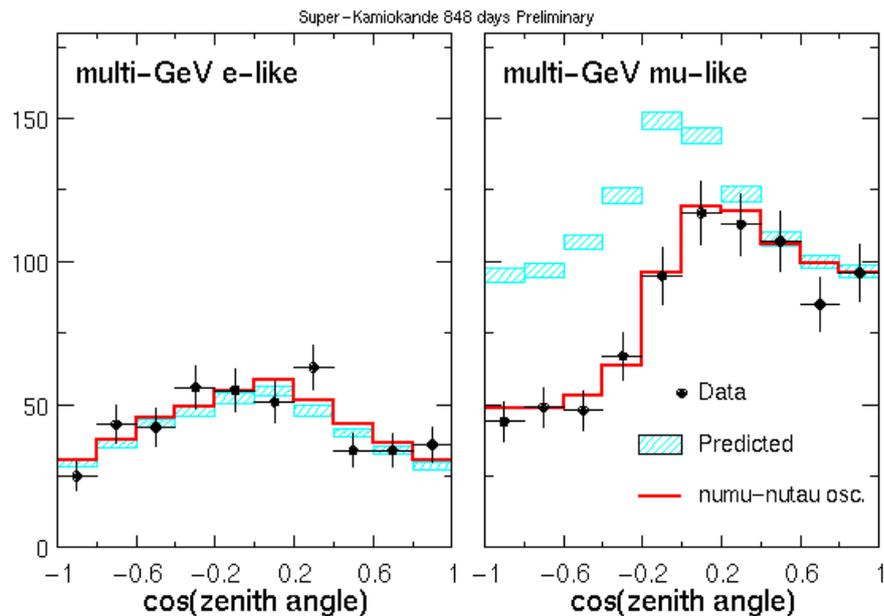


Figura 13: Gráficas que muestran la asimetría de los eventos de neutrino electrónico y muónico en el Super-KamiokaNDE en función del ángulo de llegada al detector en 848 días de detección. Imagen tomada de [75].

La prueba más clara de las oscilaciones fue la distribución de eventos en función del ángulo de llegada de las partículas al detector. Como se puede observar en la figura 13, existe un claro déficit de eventos detectados desde abajo. Tal déficit es mayor que 6σ , lo que implica que no es un error estadístico y que debe haber un mecanismo físico que reduzca el número de interacciones de neutrinos ν_μ que han viajado más de cientos de kilómetros hacia arriba.

Por otra parte, la distribución angular de neutrinos ν_e no muestra asimetrías importantes. Los eventos de neutrinos electrónicos son detectados como predice la teoría, independientemente de la longitud de vuelo de éstos. Se dedujo que los neutrinos electrónicos no oscilan, mientras la longitud de vuelo sea menor que el diámetro de la Tierra, y se concluyó de ese hecho que los neutrinos muónicos debían oscilar a otro tipo de neutrinos: neutrinos tauónicos. Por otra parte, la distribución de muones recibidos por el experimento desde abajo produce interacciones de altas energías de neutrinos con las rocas inferiores al Super-Kamiokande, mostrando una importante desviación con respecto al modelo Monte Carlo no-oscilatorio, lo que se tomó como otro indicador de oscilaciones.

Los neutrinos atmosféricos y los solares se diferencian en los detectores gracias a sus diferentes rangos de energías, siendo los atmosféricos mucho más energéticos que los solares.

6.3 Sudbury Neutrino Observatory

El Sudbury Neutrino Observatory o SNO fue la pieza clave para, complementando los resultados obtenidos en el Super-KamiokaNDE, llegar a la solución aceptada actualmente del Problema de los Neutrinos Solares: la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos.

Comenzó sus observaciones en 1999, en un detector instalado en una gran cavidad en la mina de Creighton, cerca de Sudbury, en Ontario (Canada). Usaba 1000 toneladas de líquido detector contenido en un recipiente de 12 m de diámetro. La radiación Cherenkov emitida por el scattering de partículas producido por los neutrinos que reaccionan con el líquido era detectada por un conjunto de 9600 tubos fotomultiplicadores montados en un soporte geodésico que rodea el recipiente. El detector se encuentra en la parte más profunda de la mina, lo que reduce el ruido provocado por rayos cósmicos.

6.3.1 Fases del experimento y eventos estudiados

La naturaleza del líquido detector ha cambiado durante los años de experimentación del SNO, pasando por tres fases:

Fase I: Se produjo entre los años 1999 y 2001 y en ella se utilizó agua pesada (agua que contiene más átomos de deuterio de lo habitual) como medio para las reacciones a detectar.

Fase II: Se produjo entre 2001 y 2003 contando con un dopaje de dos toneladas de NaCl purificado a una kilotonelada de agua pesada para provocar captura de neutrones, paso intermedio en la detección de neutrinos por corrientes de carga, explicadas más adelante.

Fase III: Se produjo entre 2004 y 2006 y se basó, tras extraer el NaCl del agua pesada, en añadir contadores proporcionales de ${}^3\text{He}$ y CF_4 para la detección de neutrones producidos por *corrientes neutras* mediante la reacción



El SNO es el único experimento de neutrinos que usa agua pesada como medio de detección y tiene la posibilidad de medir tanto el flujo como la energía de los neutrinos electrónicos con una reconstrucción directa de los eventos de *corrientes con carga*. También se dan otras reacciones sensibles a neutrinos de todos los sabores, como *corrientes neutras* y eventos de *scattering de electrones*. A continuación se detalla la naturaleza de cada uno de estos eventos.

Corrientes con carga: Cuando un neutrino electrónico se acerca a un núcleo de deuterio, un boson W se intercambia entre el neutrino y el quark d del neutrón. Esta reacción tiene como resultado la transformación del neutrón del deuterio en un protón y la del neutrino en un electrón. La radiación Cherenkov emitida por el electrón y su cono de luz son detectados por los fotomultiplicadores.



Corrientes neutras: El mediador de los eventos de corrientes neutras es el bosón Z^0 . La interacción entre un neutrino de cualquier sabor y un núcleo de deuterio libra un protón y un neutrón. Los neutrones emitidos por este proceso, tras sufrir scattering por el medio, pueden ser capturados por los núcleos de deuterio o de cloro y emitir rayos gamma como resultado. Estos rayos gamma provocan scattering de electrones que producen a su vez luz Cherenkov.



La reacción 48 es en la que se produce el neutrón y las 49 y 50 las posibilidades de captura electrónica que producirán los rayos gamma destinados a la detección del neutrino. Para el caso de la Fase III, en la que no hay Cl, la captura del neutrón se detectará mediante los contadores proporcionales de helio.

Scattering de electrones: El scattering de electrones ha sido comentado antes ya que es el principal mecanismo de otros detectores basados en agua. La interacción es sensible a neutrinos de todos los sabores, pero la probabilidad de que el evento ocurra debido a un neutrino electrónico es seis veces mayor que la del evento debido a los otros dos tipos de neutrinos. Mediante la dirección de los electrones recibidos en los fotomultiplicadores se puede estimar la dirección en la que llegan los neutrino incidentes.



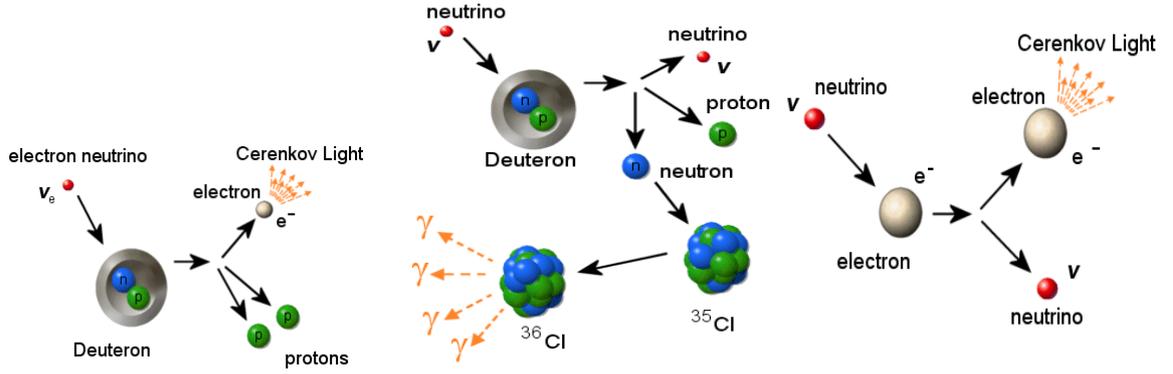


Figura 14: En la figura se muestran, de izquierda a derecha, ejemplos de eventos de corriente con carga, corriente neutra y scattering de electrones. Imagen tomada de [21].

6.3.2 Resultados finales del SNO

La toma de datos concluyó en 2006 y los resultados finales fueron publicados en 2013 [70]. El flujo final de neutrinos 8B , teniendo en cuenta todas las reacciones, fue

$$\Phi = \Phi(\nu_e) + \Phi(\nu_\mu) + \Phi(\nu_\tau) = 5.25 \pm 0.16 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}, \quad (52)$$

cantidad que se ajusta muy bien a el predicho por el Modelo Solar Estándar, $5.88 \pm 0.65 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Modelo Solar Estándar BPS09 [68]).

El flujo de neutrinos muónicos y tauónicos deducido de los resultados obtenidos en el mismo periodo fue

$$\Phi(\nu_\mu) + \Phi(\nu_{\text{tau}}) = 3.26 \pm 0.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}, \quad (53)$$

que se desvía significativamente de cero.

Comparando el flujo total recibido de neutrinos de la reacción del 8B con el teórico, se puede comprobar que aproximadamente dos tercios de los neutrinos electrónicos provenientes del sol cambian de sabor antes de ser detectados. Los resultados del SNO en relación al scattering de electrones son consistentes con los del Super-KamiokaNDE.

Las evidencias de oscilaciones de neutrinos presentadas por el SNO fueron confirmadas un año después por el experimento de reactor KamLAND (Kamioka Liquid scintillator AntiNeutrino Detector) [39], que fue propuesto en 1994 y fundado en 1997, comenzando a tomar datos en 2002. Los primeros resultados de KamLAND [38] fueron publicados en 2003 y mostraron evidencias de desaparición de antineutrinos electrónicos.

Finalmente, un análisis de las oscilaciones de neutrinos entre tres sabores usando los resultados del SNO permitió obtener los parámetros de mezcla siguientes [70]:

$$\begin{aligned} \Delta m_{12}^2 &= 7.46_{-0.19}^{+0.20} \times 10^{-5} \text{ eV} \\ \tan^2 \theta_{12} &= 0.443_{-0.026}^{+0.033} \\ \sin^2_{13} &= 2.5_{-1.4}^{+1.8} \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (54)$$

Además, medidas publicadas en 2014, en la recopilación de resultados de la Colaboración Planck [56], ponen los siguientes límites a la suma de los neutrinos de los tres sabores:

$$0.05eV < \sum_{\nu} m_{\nu} < 0.23eV. \quad (55)$$

medidas basadas en estudios de las anisotropías del fondo cósmico y en ajustes de parámetros teóricos de naturaleza cosmológica a medidas experimentales.

6.4 Síntesis

Tras muchos años de investigación, se aceptó la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos como solución al Problema de los Neutrinos Solares. Avalada experimentalmente por los equipos científicos del Super-KamiokaNDE y el Sudbury Neutrino Observatory (SNO), entre otros, la teoría consiste en el cambio de sabor de los neutrinos en su viaje desde las capas más internas del Sol hasta la Tierra, explicando de esta manera el déficit de neutrinos electrónicos detectados por los primeros experimentos. El papel del SNO fue decisivo, ya que permitió medir las tasas de detección neutrinos electrónicos y las de neutrinos de todos los sabores, aportando una relación entre estas cantidades que era coherente con las predicciones de la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos. Tal teoría implica que los neutrinos son partículas de masa no nula.

Los valores experimentales finalmente obtenidos para los parámetros de mezcla y para la suma de las masas de los neutrinos son los mostrados en las ecuaciones 54 y 55.

7 Conclusiones y proyectos futuros

Abstract

In this section, some conclusive ideas developed during the creation of this work are shown. Furthermore, future projects from key experiments are exposed, such as SNO+ and Hyper-KamiokaNDE. Neutrino-graphy is mentioned, as one important advance that neutrino physics can bring to science and as a motivation to keep working in this exciting field.

Resumen

En esta sección, se muestran algunas ideas conclusivas desarrolladas durante la creación de este trabajo. Además, se exponen proyectos de futuro de los experimentos clave, como el SNO+ y el Hyper-KamiokaNDE. La neutrino-grafía es mencionada, como un importante avance que la física de los neutrinos aporta a la ciencia, como motivación para seguir trabajando en este emocionante campo.

1. Como se ha mostrado en el desarrollo de este trabajo, la Teoría de las Oscilaciones de Neutrinos es actualmente la más aceptada para explicar las discrepancias teoría-experimentos obtenidas en los primeros detectores de neutrinos solares. De acuerdo con el desarrollo de los acontecimientos, es razonable pensar que la teoría es correcta, aunque esta afirmación se basa en medidas indirectas que se ajustan bien a ésta y no a medidas directas de las oscilaciones. Debido a esta consideración, no puede afirmarse que sea la única posibilidad para explicar los resultados y habrá que seguir obteniendo datos y comprobando afinidades entre las detecciones y esta teoría para continuar avalando su veracidad, hasta que se disponga de un desarrollo tecnológico que permita obtener pruebas reales de las oscilaciones.

2. Como proyección de futuro del SNO, existe un proyecto llamado SNO+ [72] que se encuentra en construcción y cuya primera fase se planea que comience en 2017. Es un experimento que usará el equipamiento instalado en el SNO. En lugar de agua pesada, en el interior del depósito se introducirá un líquido orgánico, el Alquibenceno Lineal o LAB, dopado con telurio. El principal objetivo del experimento es estudiar el decaimiento beta doble sin neutrinos: $2n \rightarrow 2p + 2e^-$, con lo que se podría comprobar si los neutrinos son su propia antipartícula (es decir, si son partículas de Majorana), y de ser así, conocer las masas absolutas de los neutrinos de cada sabor. Estos descubrimientos serían relevantes en estudios cosmológicos sobre la materia y la antimateria en un universo temprano. El experimento tendrá una sensibilidad notablemente más y también podrá utilizarse para avanzar en el estudio de neutrinos procedentes de Tierra, neutrinos de baja energía procedentes del Sol y neutrinos procedentes de supernovas.

3. Como proyección de futuro del Super-KamiokaNDE, existe un proyecto llamado Hyper-KamiokaNDE [83] cuyas primeras observaciones se planean para 2025. Estará localizado en la mina Tochibora, a aproximadamente 8 km del Super-KamiokaNDE. Contará con 60 kilotoneladas de agua para realizar detecciones Cherenkov, principalmente destinadas a permitir que el experimento actúe como el primer proyecto de tomografía de oscilaciones de neutrinos, con el objetivo de estudiar la química del interior terrestre mediante los neutrinos atmosféricos. Además, estará destinado a otros campos como la detección de neutrinos solares y de supernovas, como es el caso del SNO+.

4. El campo de investigación de los neutrinos, más allá del problema de los neutrinos solares, es un campo que, al igual que las recientemente confirmadas ondas gravitacionales, abre nuevas posibilidades de observación del universo. Dentro de este ámbito cabe mencionar la *Neutrínografía*: una forma de tomar imágenes dependiendo del flujo de neutrinos que se reciben de un determinado campo. Mediante esta forma de observación, se obtienen imágenes con una precisión angular mucho más baja que mediante la observación usual por fotones, debido al scattering de los neutrinos en su camino hacia los detectores, pero permite estudiar fenómenos diferentes a los que era posible previamente, así como recibir nuevos datos sobre fenómenos ya estudiados. Ejemplo de esto es el Fondo Cósmico de Neutrinos, que permite conocer nueva información sobre los primeros instantes del Universo.

Referencias

- [1] ÁLVAREZ, L. *Proposed test of neutrino theory*. Univ. of California Radiation Laboratory report., 1949.
- [2] ANDERSON, C. D. *The apparent existence of easily deflectable positives*. Science (76) 238-239, 1932.
- [3] ANDERSON, C. D. *The Positive Electron*. Phys. Rev. (6) 491-494, 1933
- [4] BAHCALL, J. N. *How the sun shines?* [en línea: <http://www.nobelprize.org>] Nobel Media, 2000.
- [5] BAHCALL, J. N. *Neutrino Astrophysics.*, Nueva York: Cambridge University Press, 1989.
- [6] BAHCALL, J. N. *New Solar Opacities, Abundances, Helioseismology, and Neutrino Fluxes*. The Astrophysical Journal (621) L85-L88, 2005.
- [7] BAHCALL, J. N., CABIBBO, N. y YAHIL, Amos. *Are Neutrinos Stable Particles?*. Phys. Rev. Lett. (28) 316, 1972.
- [8] BAHCALL, J. N. y DAVIS. R. *Solar Neutrino: a Scientific Puzzle*. Science (191) 264-267, 1976
- [9] BALANTEKIN, A. B. *Neutrino Magnetic Moment*. A aparecer en las actas del congreso Origin of Matter and the Evolution of Galaxies, 2006.
- [10] BECKER-SZENDY, R. *Electron- and muon-neutrino content of atmospheric flux*. Phys. Rev. (9) 3720-3724, 1992.
- [11] BECQUEREL, H. *Deviation du rayonnement du radium dans un champ électrique*. Comptes Rendus hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences (130) 809-815, 1900.
- [12] BERTHOMIEU, G. y colaboradores *Neutrino Capture Rates Predicted by Standard Solar Models*. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. (76) 109-115, 1994.
- [13] BETHE, H. A. *Energy production in stars*. Phys. Rev. (55) 434-456, 1939.
- [14] BILANKY, S. M. y PONTECORVO B. *Again on neutrino oscillations*. Lettere Al Nuovo Cimento Series 2. (17) 569-574, 1976.
- [15] BILANKY, S. M. y PONTECORVO B. *Lepton mixing and neutrino oscillations*. Physics Reports. (41) 225-261, 1978.
- [16] BILANKY, S. M. y PONTECORVO B. *Quark-lepton analogy and neutrino oscillations*. Physics Letters B. (61) 248-250, 1976.
- [17] BILANKY, S. M. y PONTECORVO B. *Yadernaya Fizika*. (3) 603, 1976.
- [18] Borexino Collaboration. *Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun*. Nature. (512) 383-386, 2014.
- [19] BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY, *Construction of the Homestake Mine Tank*. [en línea: <http://www.bnl.gov>], 1966.
- [20] CABIBBO, N. *Unitary Symmetry and Leptonic Decays*. Phys. Rev. (10) 531-533, 1963.
- [21] CARLETON University, *Neutrino Reactions in the Heavy Water*. [en línea: <http://www2.physics.carleton.ca>], 2016.
- [22] CLAYTON, D. D., NEWMAN, M. J. y TALBOT, R. J. *Solar Models of Low Neutrino-Counting Rate: The Central Black Hole*. The Astrophysical Journal. (201) 489-493, 1975.
- [23] CERN OPERA experiment reports anomaly in flight time of neutrinos from CERN to Gran Sasso. CERN Press Release, 2011.
- [24] CHERENKOV, P. A. *Vidimoe svechenie chistykh zhidkosti pod deistviem g-radiatsii (Visible glow of pure liquids under g-irradiation)*. Dokl. Akad. Nauk SSSR 2. (8) 451, 1934.
- [25] CHODOS, A. y HAUSER, A. I. *The neutrino as a tachyon*. Physics Letters B (150) 431-435, 1985.
- [26] CHRISTENSEN-DALSGAARD, J. *Helioseismology*. Rev.Mod.Phys. (74) 1073-1129, 2003.
- [27] DANBY, G., GAILLARD, J. M., GOULIANOS, K. y colaboradores. *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos*. Phys. Rev. (9), 1962.
- [28] DAVIS, R. *Nobel lecture: A half-century with solar neutrinos*. Review of Modern Physics. (75) 985-994, 2003.
- [29] DIRAC, P. *The Quantum Theory of the Electron*. Real Society (43) 601, 1928
- [30] DONUT Collaboration. *Observation of tau neutrino interactions*. Physics Letters B. (504) 218-224, 2000.
- [31] DVALI, G. y SMIRNOV, A. Y. *Probing Large Extra Dimensions with Neutrinos*. Nucl. Phys. (B553) 63-81, 1999.
- [32] FERMI, E. *Tentativo di una teoria dei raggi β* La Ricerca Scientifica (2) 12-31, 1933
- [33] GRIBOV, V. y PONTECORVO, B. *Neutrino astronomy and lepton charge*. Physics Letters B. (28) 493-496, 1968.
- [34] HAWKING, S. W. *Gravitationally collapsed objects of very low mass*. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. (152) 75, 1971.
- [35] HIRATA, K. y colaboradores. *Experimental Study of the Atmospheric Neutrino Flux*. Physics Letters B. (205) 416-420, 1988.

- [36] HUGHES, R. J. y STEPHENSON, G. J. *Against tachyonic neutrinos*. Physics Letters B. (244) 95-100, 1990.
- [37] ICARUS Collaboration. *A search for the analogue to Cherenkov radiation by high energy neutrinos at superluminal speeds in ICARUS*. Physics Letters B. (711) 270-275, 2012
- [38] KamLAND Collaboration. *First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance*. Phys. Rev. (90) 21802, 2003.
- [39] KamLAND Collaboration. *^7Be Solar Neutrino Measurement with KamLAND*. Phys. Rev. C (92) 55808, 2015.
- [40] KOCHAROV, G. E. y STARBUNOV, Y. N. *Concerning thermonuclear reaction in the interior of the Sun and solar neutrinos*. JETP Lett. (11) 81-83, 1970.
- [41] KOCHAROV, G. E. y STARBUNOV, Y. N. *Solar models with increased concentration of ^3He and neutrino fluxes*. Pros. 12th Intl. Cosmic Ray Conf. (7) 2865-2869, 1971.
- [42] KOSHIBA, M. *Nobel Lecture: Birth of Neutrino Astrophysics*. Review of Modern Physics (75) 1011-1020, 2003.
- [43] HAHN, R. L. *Radiochemical Solar Neutrino Experiments*. Lecture on Neutrino-2008 Christchurch Conference, 2008.
- [44] KING, S. F. *Neutrino Mass*. Contemporary Physics. (48) 195-211, 2007.
- [45] LANGACKER, P. *Neutrinos in Physics and Astrophysics: from 10^{-33} to 10^{28}* . University of Pennsylvania., 1998.
- [46] L.DE ICAZA ASTIZ, I. *Búsqueda de oscilaciones de neutrinos en el experimento MiniBooNE: análisis de aparición de neutrinos y antineutrinos del electrón*. Tesis presentada en la Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [47] LEIBACHER, J. W. y STEIN, R. F. *A New Description of the Solar Five-Minute Oscillation*. Astrophysical Letters. (7) 191-192, 1971.
- [48] LEIGHTON, R. B., NOYES, Robert W. y SIMON, G. W. *Velocity fields in the solar atmosphere I*. Astrophysical Journal. (135) 474-499, 1962.
- [49] LIBBY, L. M. y THOMAS, F. J. *Fusion Catalysis by Quarks*. Nature (219) 711, 1968.
- [50] MAKI, Z., NAKAGAWA, M. y SAKATA, S. *Remarks on the Unified Model of Elementary Particles*. Progress of Theoretical Physics. (28) 870-880, 1962.
- [51] NEDDERMEYER, S. H. y ANDERSON, C. D. *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*. Phys. Rev. (51) 884, 1937.
- [52] MAIANI, L. *Selected Topics in Majorana Neutrino Physics*. Riv. Nuovo Cim. (37) 417-466, 2014.
- [53] Particle Data Group. *Solar Neutrino Review*. [en línea: pdg.lbl.gov], 2007.
- [54] Particle Data Group. *Review of Particle Physics*. Chinese Physics C. (38) 1674-1137, 2014.
- [55] PERL, M. L. y colaboradores. *Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation*. Phys. Rev. (35), 1975.
- [56] Planck Collaboration. *Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters*. Astronomy & Astrophysics. (571) 66-, 2014.
- [57] PONTECORVO, B. *Inverse beta processes*. Chalk River Report. PD-205, 1946.
- [58] PONTECORVO, B. *Inverse beta processes and non-conservation of lepton charge*. J. Exptl. Theoret Phys. (34) 247-249, 1958.
- [59] PONTECORVO, B. *Mesonium and antimesonium*. Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki. (33) 549, 1958.
- [60] PRENTICE, A. J. R. *Early Inhomogeneities of Composition and the Solar Neutrino Problem*. Mon. Not. R. astr. Soc (163) 331-335, 1973.
- [61] PRESS, W.H. y SPERGEL, D. N. *Capture by the sun of a galactic population of weakly interacting, massive particles*. Astrophysical Journal. (296) 679-684, 1985.
- [62] PAULI, W. *Dear radioactive ladies and gentlemen*. Correspondencia personal, 1930.
- [63] ROCA, T. *Conocemos el Sol? La Heliosismología y la nave espacial SOHO*. El Universo. (4) 16, 1995.
- [64] ROCA, T. *Cosmología a $z \approx 0$* . Rev. Acad. Canar. Cienc. (27) 195-210, 2016.
- [65] REINES, F. y COWAN, C. L. *The Neutrino*. Nature. (4531) 446-449, 1956.
- [66] RICCIARDI, S. *Phenomenology of neutrino oscillation*. University of London Postgraduate Lectures for Particle Physicist, 2014.
- [67] RUTHERFORD, E. y OWENS, R.R. *Thorium and Uranium Radiation*. Trans. Roy. Soc. Canada (2) 9-12, 1899
- [68] SERENELLI, A. M. *New Results on Standard Solar Models*. Astrophysics and Space. (238) 13-21, 2010.
- [69] SMIRNOV, A. Y. y MIKHEEV, S. P. *Resonance amplification of oscillations in matter and spectroscopy of solar neutrinos*. Yadernaya Fizika (42) 1441-1448, 1985.
- [70] SNO Collaboration. *Combined analysis of all three phases of solar neutrino data from the Sudbury Neutrino Observatory*. Phys. Rev. C (88), 2013.

- [71] SNO Collaboration. *Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p+p+e^-$ interactions produced by 8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory*. Phys. Rev. Lett. (87) 701301, 2001.
- [72] SNO+ Collaboration. *Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment*. Advances in High Energy Physics. (2016) 6194250, 2016.
- [73] SODDY, F.. *The origins of the conceptions of isotopes*. Nature (112) 208-213, 1922.
- [74] Super-Kamiokande Collaboration. *Evidence of Oscillations of Atmospheric Neutrinos*. Phys.Rev. (81) 1562-1567, 1998.
- [75] Super-Kamiokande Collaboration. *Study of the atmospheric neutrino flux in the multi-GeV energy range*. Phys. Lett. (436) 33-41, 1998.
- [76] TK2 Collaboration. *Public Super-Kamiokande Gallery*.
- [77] TURCK-CHIÈZE, S. y COUVIDAT, S. *Solar neutrinos, helioseismology and the solar internal dynamics*. Reports on Progress in Physics. (7), 2011.
- [78] TURCK-CHIÈZE, S. y LOPES, I. *Solar-stellar astrophysics and dark matter*. Research in Astron. Astrophys. (12) 1107-1138, 2012.
- [79] ULRICH, R. K. *The five-minute oscillation on the solar surface*. The Astrophysical Journal. (162) 993-1002, 1970.
- [80] VAVILOV, S. I. *O vozmozhnykh prichinakh sinego g-svecheniya zhidkosti (On the possible causes of blue g-glow of liquids)*. Dokl. Akad. Nauk SSSR 2. (8) 457, 1934.
- [81] VON WEIZSÄCKER, C. F. *Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. I*. Physikalische Zeitschrift. (38) 176-191, 1937.
- [82] VON WEIZSÄCKER, C. F. *Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. II*. Physikalische Zeitschrift. (39) 633-646, 1938.
- [83] WENDELL, R. *Hyper-Kamiokande Status. 1st Neutrino Oscillation Tomography Workshop*. Lecture at University of Tokyo., 2016.
- [84] WOLFENSTEIN, L. *Neutrino oscillations in matter*. Phys. Rev. D (17) 2369, 1978.

