

NEUTRINOS DEL SOL Y DEL COSMOS

ENRIQUE FERNÁNDEZ SÁNCHEZ *

* Departamento de Física, Universidad Autónoma de Barcelona, Instituto de Física de Altas Energías.

EL SOL Y LA ENERGÍA SOLAR

Casi todas las formas de energía de las que disponemos en la Tierra se deben, directa o indirectamente, a la energía que nos viene del Sol. La energía de los combustibles fósiles, la energía hidráulica y la energía eólica son ejemplos bien familiares. Una excepción notable sin embargo es la energía nuclear. La energía liberada en la fisión de uranio no se debe ni directa ni indirectamente a la energía solar, pero a este tema volveremos más adelante. A partir de mediciones diversas sabemos con bastante precisión que el Sol radia energía con una potencia de 3.8×10^{26} vatios, cantidad denominada *luminosidad solar*. ¿Cómo se produce la energía solar? ¿Es la luminosidad solar constante o varía con el tiempo?, ¿Durante cuanto tiempo ha estado el Sol radiando esa energía? La respuesta a estos interrogantes ha avanzado de una manera muy significativa recientemente, en gran medida mediante el estudio de una partícula elemental un tanto especial, el neutrino.

Las preguntas anteriores, y las respuestas contradictorias a las mismas de eminentes científicos, dieron lugar a un debate importante en la segunda mitad del siglo XIX. Por una parte los naturalistas, Charles Darwin entre ellos, consideraban que la edad del Sol debería de ser, como mínimo, unos trescientos millones de años. Esta afirmación estaba fundada en la evidencia geológica y biológica. Por un lado los procesos de erosión, debidos en último término a la energía del Sol, deberían de haber estado actuando durante ese tiempo para dar lugar a algunas de las formaciones geológicas en la tierra (en concreto el valle

de Weald, en Inglaterra, según Darwin). También se necesitaba un tiempo muy grande para poder acomodar la evolución de las especies, que obviamente sin el Sol no podrían haber existido.

Por otra parte algunos físicos hicieron hipótesis sobre el origen de la energía solar a partir de las cuales también podían calcular la edad del Sol. La hipótesis más extendida, defendida especialmente por Hermann von Helmholtz, es que la energía del Sol provenía de la contracción gravitatoria de su masa. Basándose en dicha hipótesis William Thompson (más adelante nombrado Lord Kelvin) estimó la edad del sol en, como máximo, unos veinte millones de años (Kelvin también se oponía firmemente a la hipótesis de evolución por selección natural introducida por Darwin). En lo que todos parece que estaban de acuerdo es que la producción de energía solar no se debía a un proceso químico de combustión, pues si este fuese el caso el sol solamente habría durado unos miles de años.

La respuesta correcta al anterior dilema comenzó a vislumbrarse con el descubrimiento de la radioactividad natural. En 1903 Pierre Curie y su ayudante Albert Laborde notaron que algunas sales de radio emitían calor constantemente sin enfriarse, evidenciando una nueva forma de producción de energía. La radiación alfa también producía enormes cantidades de energía como midió Ernest Rutherford ya en 1904. El propio Rutherford apuntó a que quizás la fuente de energía solar fuesen procesos radioactivos. Sin embargo la hipótesis no acababa de cuadrar. El espectro de la luz solar indicaba que el sol contenía

sobre todo hidrógeno pero no elementos radioactivos. Por otra parte parecía haber una relación entre la luminosidad de las estrellas y la temperatura de su superficie (la cual puede estimarse por su color), y esta relación no es característica de los procesos radioactivos.

Un paso clave para entender el problema fue la famosísima ecuación $E = mc^2$, que Albert Einstein primero escribió en 1905. En 1920 el eminente químico Francis William Aston midió con precisión las masas de muchos átomos encontrando que cuatro átomos de hidrógeno tenían más masa que uno de helio. Su compatriota Sir Arthur Eddington enseguida se dio cuenta que quizás la energía del sol podría deberse a la conversión de masa en energía, al for-

marse helio a partir de hidrógeno y, en su alocución como presidente de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia de 1920, avanzó dicha hipótesis. Eddington también alertó, en una frase que causa escalofríos, que el control de esa energía sub-atómica latente que da origen a la energía de las estrellas podría llevarnos a utilizarla "para el bienestar de la humanidad o para su suicidio". Y esto en 1920.

Hoy sabemos con bastante certeza que la energía solar se debe a las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en su interior. Durante los años treinta varios físicos, Gamow, Teller, Weizsäcker y otros, desarrollaron los conceptos que permitían calcular la tasa de reacciones nucleares de fusión que podían producirse en una estrella a las altas temperaturas exis-

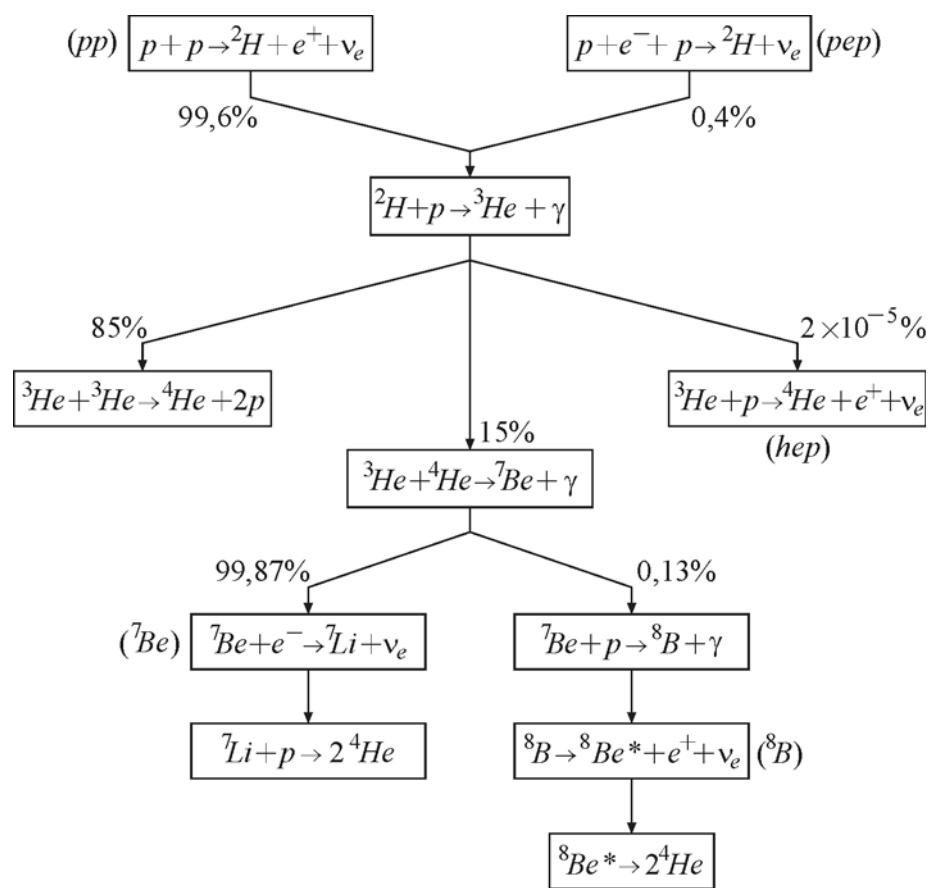
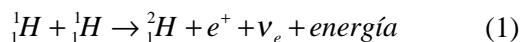


Figura 1. Las reacciones de fusión nuclear que se producen en el interior del sol. Este conjunto de reacciones se les denomina ciclo p-p y como consecuencia de ellas 4 núcleos de hidrógeno (4 protones) acaban formando un núcleo de helio-4 junto con la emisión de 2 positrones y 2 neutrinos. Existe otro ciclo de reacciones conocido como el ciclo CNO que en el sol también contribuyen en menor medida a la generación de energía y de neutrinos, pero que en estrellas mucho más masivas que el sol son predominantes.

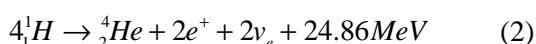
tentes en su interior. El cálculo detallado fue realizado por Hans Bethe en uno de sus monumentales trabajos al que tituló "Producción de Energía en las Estrellas".

En una estrella como el Sol, o de menor masa, la cadena de reacciones nucleares más frecuente constituye el ciclo llamado p-p (protón-protón; véase figura 1). Este ciclo comienza con la fusión de dos núcleos de hidrógeno (dos protones) en uno de deuterio, con la emisión de un positrón (el positrón es la antipartícula del electrón, es un electrón positivo) y un neutrino



En esta reacción el 0.7% de la masa de los protones del estado inicial se convierte en energía. Este número, 0.7%, es enorme comparado con el de una reacción química (una combustión, por ejemplo), que es típicamente del orden de 0.000000001%. El deuterio puede a su vez fusionarse con otro hidrógeno, este con helio, etc.

La figura 1 ilustra el conjunto de reacciones que tienen lugar. Desde un punto de vista energético lo que ocurre como consecuencia de todas estas reacciones es que cuatro núcleos de hidrógeno se fusionan produciendo uno de helio, dos positrones, 2 neutrinos y 24.68 MeV de energía cinética,



Los positrones se aniquilan rápidamente con electrones del medio produciendo a su vez 2.1 MeV de energía adicional en forma de fotones y si a ello descontamos la energía cinética de los neutrinos nos encontramos con que por cada dos neutrinos se libera una energía de 26.1 MeV. Esta energía se genera en forma de fotones, los cuales son a continuación absorbidos y reemitidos muchas veces, hasta que, después de miles de años, llegan a la superficie del sol de donde salen en todas las direcciones, entre ellas hacia nosotros. Esta es la energía radiante con potencia de $3.8 \times 10^{26}\text{W}$. Una parte de esta energía es la que percibimos como luz visible.

La temperatura en el interior del Sol es tal que se mantiene un equilibrio de tipo hidrostático: la presión hacia afuera contrarresta la debida a la atracción gravitatoria. También se establece un equilibrio térmico: la tasa de las reacciones nucleares es tal que la energía

que producen es igual a la radiada. El equilibrio, junto con la enorme eficiencia energética del proceso de fusión, hace que el sol se haya mantenido estable durante miles de millones de años y vaya a mantenerse en el futuro durante un tiempo similar. La situación cambiará cuando todo el hidrógeno en la parte más interior se haya convertido en helio, un punto al que retornaremos más adelante.

LOS NEUTRINOS

Acabamos de ver que en las reacciones de fusión en el sol, junto con los fotones que percibimos en forma de luz y calor, también se producen neutrinos. Pero ¿qué son los neutrinos? Digamos que son partículas elementales, igual que lo es el electrón, pero, a diferencia de este, no forman parte de los átomos, ni de la corteza ni de los núcleos. Y sin embargo, cuando algunos núcleos se desintegran por la llamada desintegración beta, se emiten neutrinos!

Para entender lo que son los neutrinos podemos seguir un proceso paralelo a al histórico, explicando cómo primero se llegó a la conclusión de que existían los neutrinos y cómo se puso de manifiesto dicha existencia de manera experimental. Ello nos servirá al mismo tiempo para explicar algunas de sus sorprendentes propiedades. La historia del neutrino es fascinante, y de hecho está por acabar. Pero en este artículo no se pretende ser fiel a la historia, algunos de las propiedades del neutrino se conocen desde hace muy poco tiempo y sin embargo se mencionan aquí antes que otras ya conocidas desde hace muchos años. Uno de las constantes en dicha historia ha sido el intento de entender en detalle cómo se produce la energía en el Sol. Y en este aspecto algunos pasos fundamentales son sólo muy recientes, del siglo 21, del año 2003 en concreto.

La historia del neutrino comienza con una carta de un joven Wolfgang Pauli, fechada el 4 de diciembre de 1930 y dirigida a los asistentes a un congreso en Tubingen sobre radioactividad. En la carta se propone "un remedio desesperado" para explicar algunas propiedades no entendidas de la desintegración beta de ciertos núcleos. En la desintegración beta un núcleo con Z protones y N neutrones se desintegra emitiendo un electrón y convirtiéndose en un núcleo distinto, con

$Z - 1$ protones y $N + 1$ neutrones¹. En otras palabras, es como si un neutrón dentro del núcleo se transformase en un protón y un electrón.

Las propiedades aludidas eran dos. Los espines de los núcleos implicados y del electrón parecían contradecir el llamado teorema espín-estadística, que tiene que ver con cómo se agrupan partículas idénticas de espín fraccionario. Por otra parte la energía del electrón resultante fue medida con bastante precisión, encontrándose que no era siempre la misma, sino que tenía un espectro continuo, desde cero a un valor máximo. Este último hecho no es el esperado: si un núcleo se separa en dos cuerpos (un electrón y otro núcleo) estos se reparten la energía de acuerdo con sus masas y ésta será siempre la misma. Para explicar el espectro continuo algunos propusieron que quizás el principio de conservación de la energía no se cumplía en la desintegración beta. La explicación de Pauli para "salvar" el principio de conservación de la energía es (a posteriori) muy simple: además del electrón y el núcleo con $Z - 1$ protones se produce otra partícula, que no tiene carga eléctrica y es de espín 1/2. A esta partícula hipotética Pauli la llamó "neutrón", pero al año siguiente Chadwick descubrió un componente neutro en el núcleo al que llamó de la misma manera. Fue Fermi, tres años más tarde, quien introdujo el término neutrino para nombrar a la Partícula de Pauli.

Según Pauli lo que tenemos en la desintegración beta es que un neutrón dentro de un núcleo se transforma de la manera:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

donde $\bar{\nu}_e$ es el neutrino². Si el neutrino tiene espín 1/2 no hay ningún problema con el teorema de conexión espín-estadística y tampoco con la conservación de la energía, pues dependiendo de la orientación relativa de las tres partículas finales el electrón puede tener mayor o menor energía, la cual por lo tanto no será fija. La hipótesis es sencilla y resuelve dos problemas pero introduce otro que el propio Pauli reconocía: nadie había visto nunca a un neutrino. La carta continúa y

contiene algunas frases muy reveladoras de la personalidad de Pauli. En algún momento dice que efectivamente la hipótesis es arriesgada pero que "solamente ganan aquellos que apuestan" y que hay que discutir lo más posible "cualquier manera de salvarse". Y en la carta también ofrece una disculpa por no asistir al congreso de Tubingen: su presencia en Zurich era "indispensable" para asistir a un baile en la noche del 6 al 7 de diciembre.

A pesar de las dudas de su creador la hipótesis del neutrino fue tomada muy en serio por la comunidad científica y pocos años más tarde, en 1934, Fermi construyó una teoría de la desintegración beta, de hecho de las interacciones débiles, incorporando el concepto de neutrino. La teoría de Fermi tuvo un enorme éxito y sigue siendo válida, como una aproximación a otra teoría más general, la teoría Electro-Débil. Es conveniente en este momento describir como entendemos la interacción débil en la actualidad.

PARTÍCULAS ELEMENTALES E INTERACCIONES

En la actualidad creemos que la materia que llamamos ordinaria, o bariónica, está formada por partículas elementales (sin estructura) a las que llamamos partículas de materia, las cuales pueden interaccionar entre sí a través de cuatro interacciones fundamentales: gravitatoria, electromagnética, débil y fuerte. Las partículas de materia tienen todas espín 1/2. En las interacciones entre partículas unas ganan energía y momento y otras lo pierden. El intercambio de energía y momento tiene lugar también a través de otras partículas características de cada interacción, las partículas de interacción, las cuales tienen espín entero. La materia bariónica más común, de hecho casi toda la materia bariónica a nuestro alrededor, está hecha de 4 partículas: el quark *u*, el quark *d*, el *electrón* y el *neutrino electrónico* (Figura 2). El protón y el neutrón son partículas compuestas, el primero formado por dos quarks *u* y un quark *d* y el segundo formado

¹ En 1930 aún no se sabía de la existencia del neutrón, pero aquí hacemos uso de él en aras a una explicación concisa de la desintegración beta; como ya dijimos, no estamos siguiendo la historia cronológicamente.

² De hecho es un antineutrino, la distinción entre neutrino y antineutrino es la carga leptónica una cantidad que es 1 para el electrón y para el neutrino y -1 para las antipartículas correspondientes. En la desintegración beta se conserva esta cantidad y por lo tanto si tenemos un electrón tenemos que tener un antineutrón, para que la carga leptónica total del estado final sea cero, como en el estado inicial.

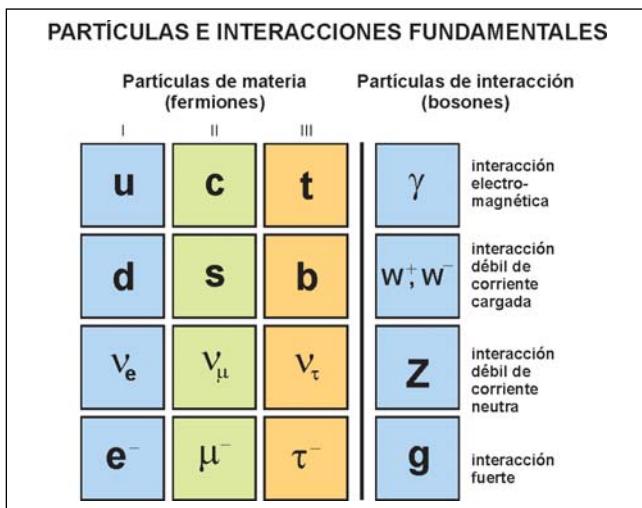


Figura 2. Existen 3 generaciones de partículas elementales (I, II, III en la figura), cada una formada por un par de quarks y un par de leptones. La primera generación está formada por el par de quarks (u, d) y por el par de leptones (electrón e^- , neutrino electrónico ν_e). Casi toda la materia ordinaria está formada por estas partículas. En las interacciones se intercambian partículas de interacción, todas ellas bosones de spin 1. El fotón γ interviene en la interacción electromagnética mientras que los bosones W^+ , W^- y Z son los responsables de la interacción débil. En la interacción fuerte intervienen 8 gluones g , los cuales se diferencian entre sí por las cargas de color.

por dos quarks d y un quark u . Para cada partícula, sea de materia o de interacción, existe una *antipartícula correspondiente*, con las mismas propiedades pero con las cargas opuestas. Por ejemplo cuando dos anti-quarks u se unen a un antiquark d se forma un *antiproton*. Al electrón con carga eléctrica positiva se le denomina *positrón* o *anti-electrón* y así con todas las partículas.

En la desintegración beta lo que ocurre en realidad es que un quark d de un neutrón se transforma en un quark u , emitiendo un electrón y un anti-neutrino electrónico. Como consecuencia el neutrón se convierte en protón (Figura 3a). El neutrino es emitido pero no forma parte del núcleo, sino que se crea en el momento de la desintegración³. La interacción que interviene es la interacción débil de corriente cargada, a la que se llama así debido a la partícula que se intercambia, una partícula de espín 1 y carga eléctrica +1 o -1 (en unidades de carga igual a la de un electrón), llamada W^+ o W^- . Una representación gráfica del proceso es la que se muestra en la figura 3a. A esta representación

gráfica de las interacciones se la denomina diagrama de Feynman. Los diagramas de Feynman son en realidad mucho más que una mera representación gráfica pues propiamente interpretados forman parte de una poderosa técnica de computación de la probabilidad de interacción basada en la teoría de perturbaciones. También existe un tipo de desintegración beta en la que un quark u se convierte en un quark d , emitiendo un positrón y un neutrino. A esta desintegración se la denomina β^+ y en este caso un protón se convierte en un neutrón (Figura 3b). El proceso solamente puede ocurrir para un protón dentro de un núcleo pues de lo contrario no se conservaría la energía (un protón libre tiene una masa menor que la suma de las de un neutrón y un positrón; cuando un protón está dentro de un núcleo, sin embargo, parte de la energía de ligadura puede convertirse en masa y la reacción puede ocurrir).

La teoría de Fermi da una descripción de la interacción que es esencialmente la misma que la moderna teoría de la interacción débil representada en estos diagramas, excepto que en lugar de introducir el concepto de intercambio de una partícula W, Fermi introdujo simplemente una constante (una interacción de contacto). La aproximación a las bajas energías de la desintegración beta y de las reacciones de fusión del sol es muy buena, debido a que la masa de la partícula W es muy grande.

La teoría de Fermi predecía la ocurrencia de otro tipo de interacciones, por ejemplo la llamada captura electrónica, en la que un electrón de un átomo puede interaccionar con un protón del núcleo, produciéndose un neutrino y un neutrón (Figura 4a). Este proceso fue observado por Alvarez en 1938. Nótese la similitud de los diagramas de la desintegración β^+ y de la captura electrónica. Un diagrama puede obtenerse a partir del otro mediante una transformación de una de las líneas externas del estado final al inicial, seguida de una inversión temporal de todo el proceso. Otro proceso predicho por la teoría de Fermi fue el de "desintegración beta inversa": un antineutrino puede chocar con un protón, produciendo un positrón y un neutrón (Figura 4b). Como puede apreciarse el diagrama de 4b también puede obtenerse a partir del 3b con una simple transformación.

³ En su original carta Pauli consideraba que los neutrinos estaban en el núcleo.

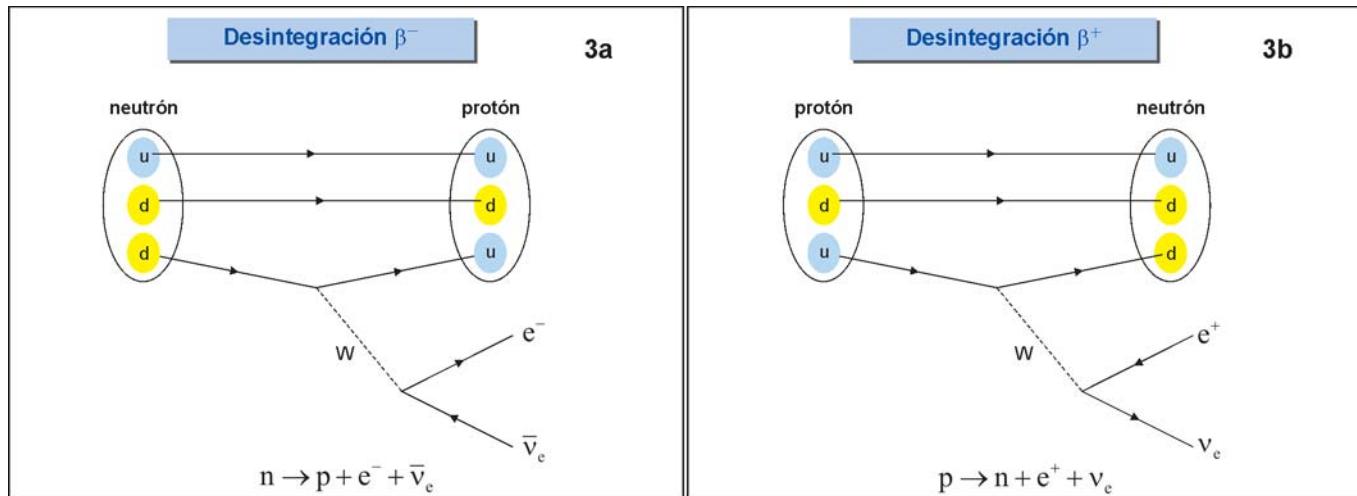


Figura 3. Diagramas de Feynman para las desintegraciones β^- y β^+ . En la primera un neutrón, dentro de un n\'ucleo, se transforma en un prot\'on, un electr\'on y un antineutrino el\'ectr\'onico. En el diagrama la direcci\'on del tiempo es de izquierda a derecha. Un quark d dentro del neutr\'on emite un W (la part\'icula mediadora de la interacci\'on d\'ebil de corriente cargada) con lo que se transforma en un quark u . El W se convierte en un electr\'on y un antineutrino. Las part\'iculas tienen una flecha en la direcci\'on del tiempo mientras que las antipart\'iculas la tienen en la direcci\'on contraria. La flecha es un convenio para indicar hacia donde fluyen las cargas (el\'ectrica y de otros tipos).

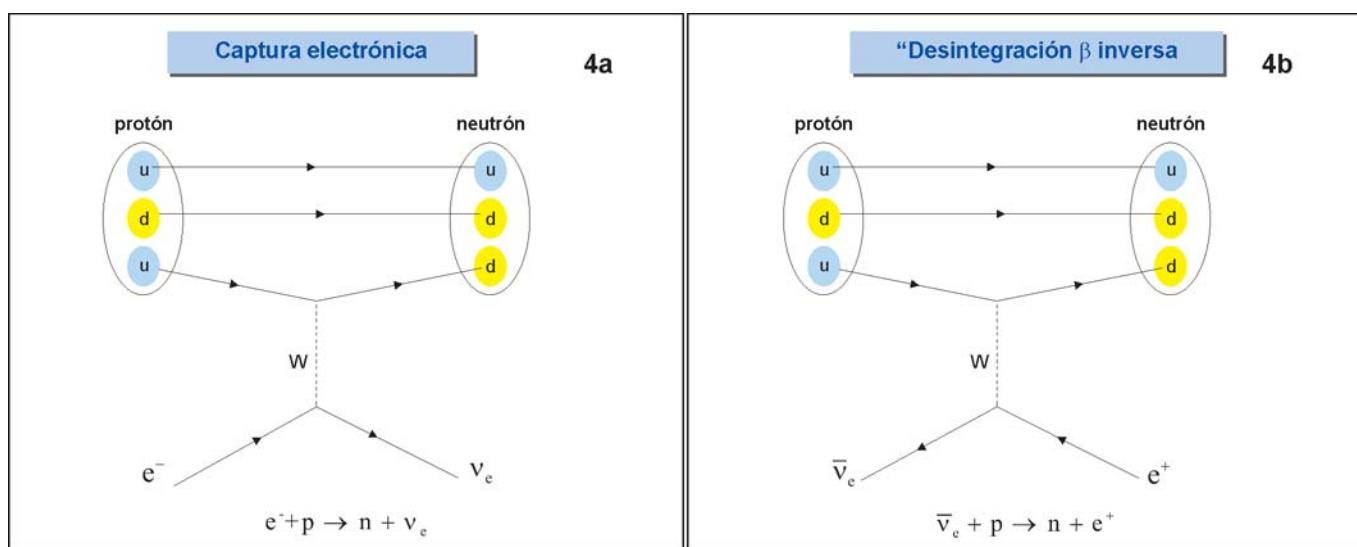


Figura 4. Los diagramas de Feynman para captura electrónica y desintegración beta inversa. Estos diagramas representan una interacción mientras que los de la figura 3 representan desintegraciones. La dinámica de los procesos sin embargo está íntimamente relacionadas, todos estos diagramas se pueden obtener unos de otros mediante simples manipulaciones de las líneas que representan las partículas.

LA DETECCIÓN DEL NEUTRINO

Poco tiempo después de que Fermi formulase su teoría, Bethe y Peierls se dieron cuenta de que quizás la interacción beta inversa podría servir para detectar neutrinos. Sin embargo el cálculo de la probabilidad de esta reacción utilizando la teoría de Fermi daba unos números nada esperanzadores. Y es que la interacción

débil es extremadamente débil (excepto para neutrinos de muy alta energía). Para un neutrino como los que nos llegan del sol o como los que se producen en la interacción beta podemos calcular su probabilidad de interacción al pasar por la materia. Una manera de ilustrar lo minúsculo de esta probabilidad es la siguiente. Imaginemos una pared de plomo de un cierto espesor. ¿Cuál debe ser dicho espesor para que un haz

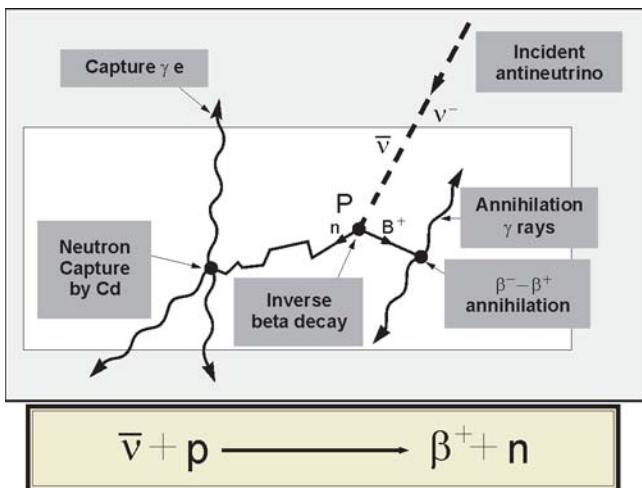


Figura 5. Esquema del método en que se basó la primera detección del neutrino por Reines, Cowan y colaboradores en el año 1956. El antineutrino produce un positrón (β^+) que rápidamente se aniquila con un electrón produciendo luz. Unos microsegundos más tarde el neutrón es capturado por un núcleo de Cadmio el cual, al de-exitarse, produce otro pulso de luz. (Este esquema fue mostrado por Herald W. Kruse, miembro del equipo que descubrió el neutrino, en la sesión inaugural de la conferencia Neutrino-06, celebrada el 14 de junio de 2006, el mismo día, cincuenta años más tarde, en que se anunció el descubrimiento del neutrino).

de neutrinos se atenúa al 50% al pasar por la pared? La respuesta es que la anchura de la pared debe ser de más de un año luz! Para una pared de plomo con un espesor de un año luz la probabilidad de que un neutrino interaccione dentro es del orden del 2%. El 98% de los neutrinos la atraviesan.

Vistos esos números podríamos concluir que el detectar neutrinos es prácticamente imposible, pero volvamos al ejemplo anterior. Si tuviésemos 10^{18} neutrinos y un detector con un espesor similar a 1 metro de plomo esperaríamos tener aproximadamente 2 interacciones en el mismo. Tal cantidad de neutrinos es muy grande pero la llegada de la era nuclear también nos trajo dos fuentes intensas de neutrinos: las bombas nucleares y los reactores nucleares. En la fisión del Urano se producen fragmentos que son ricos en neutrones y por lo tanto muy inestables por desintegración beta. Esto hace que acompañando a una explosión nuclear se produzca una gran cantidad de neutrinos en un tiempo muy corto después de la explosión. Pensando en este hecho dos físicos del Laboratorio de Los Alamos, Frederick Reines y Clyde Cowan, idearon un detector que se situaría dentro de un pozo cercano al punto de explosión de una bomba nuclear. Para evitar

las vibraciones el detector estaría colgado de un soporte del cual se desprendería en el momento de la explosión, de manera que en los segundos posteriores estaría en caída libre, detectando neutrinos. La ventaja es que los neutrinos llegarían de repente, dando una señal distintiva en el detector que podría distinguirse del inevitable ruido. El proyecto incluso llegó a ponerse en marcha, pero abandonaron la idea cuando se dieron cuenta de otro posible método.

En los reactores nucleares, por el mismo motivo que en las bombas, también se producen neutrinos. El problema aquí es que las interacciones que uno puede esperar en un detector son relativamente pocas, miles de veces menores que en una explosión, y en cualquier caso solamente llegan de una en una, de tarde en tarde, comparado con las muchas señales espúreas que uno puede esperar, inducidas por neutrones, radioactividad natural y artificial de otros tipos, ruido electrónico y otros múltiples problemas. Sin embargo Reines y Cowan encontraron como aislar una señal distintiva de la interacción del neutrino. La idea está ilustrada en la Fig. 5.

Cuando el neutrino interacciona produce el positrón que casi inmediatamente se aniquila con un electrón del medio. Esta anquilación produce dos rayos gamma que se mueven dentro de un tanque lleno de un líquido llamado centelleador. Este líquido hace las veces de blanco para los neutrinos y de detector de los mismos como vamos a ver. Estos líquidos son materiales orgánicos cuyas moléculas se excitan al paso de partículas cargadas o rayos gamma, emitiendo luz que puede detectarse en fotomultiplicadores u otros detectores de luz situados en las paredes del tanque. Los dos rayos gamma producen luz que se detecta como un pulso eléctrico en los fotomultiplicadores. El neutrón sin embargo se mueve en el líquido y colisiona con las moléculas del mismo, hasta que es capturado por un protón. Este proceso se hace muy eficiente cuando se añade Cadmio al líquido. La absorción del neutrón en el núcleo del Cadmio libera 9 MeV de energía en forma de rayos gamma que producen de nuevo luz. Lo que es distintivo de la reacción beta inversa es que los dos destellos de luz, el de la anquilación del positrón y el de la captura del neutrón, están separados por un tiempo característico, entre 10 y 30 microsegundos. La discriminación entre la señal del neutrino y otras señales es precisamente la "coinci-

dencia retardada" entre los dos pulsos de luz. El 14 de junio de 1956 Reines y Cowan decidieron anunciar los resultados del experimento en el que confirmaban la detección de la reacción de beta inversa causada por neutrinos al colocar el detector cerca de un reactor nuclear en Savannah River, en el estado sureño de Georgia en Estados Unidos. El primer anuncio fue un telegrama enviado a Pauli. Un cuarto de siglo más tarde, el remedio desesperado resultó ser correcto.

UN SEGUNDO NEUTRINO

En la época en la que Reines, Cowan y colaboradores realizaron su experimento ya se conocían muchas otras partículas, además de las que hemos mencionado hasta ahora. Una de ellas era el muón (μ), una partícula con propiedades muy similares al electrón pero de mayor masa, unas 200 veces mayor. El muón sin embargo no es una partícula estable, sino que se desintegra en un electrón y en partículas neutras, presumiblemente un neutrino y un antineutrino. De acuerdo con la teoría de Fermi el muón debería también desintegrarse (una vez cada 10.000 aproximadamente) en un electrón y en un rayo gamma, tal como calculó Feinberg en 1958. Sin embargo, ya en 1954 Lokanathan y Steinberger habían medido que ello ocurría como máximo una vez de cada 100.000. Una posible explicación, sugerida por Oneda y Pati era que el neutrino y antineutrino de la desintegración del muón fuesen de distinta naturaleza. ¿Qué quiere decir esto?

Recordemos que en la desintegración beta se producen antineutrinos junto con electrones, y cuando los antineutrinos interaccionan de nuevo producen positrones. Existe una partícula, el pión (π), que casi el 100% de las veces se desintegra en un muón y en un neutrino. Hay un pión positivo, π^+ , que se desintegra en μ^+ y neutrino y un π^- que lo hace en μ^- y un antineutrino. Si este antineutrino interacciona de nuevo con la materia ¿que ocurrirá? En 1959 Bruno Pontecorvo, un físico italiano emigrado a la Unión Soviética sugirió que se debería estudiar la interacción

con protones del neutrino producido con el muón, con el objetivo de comprobar si la reacción ocurría⁴. El como implementarlo se le ocurrió en 1960 a Mel Schwartz, físico de la Universidad de Columbia en N. York, al parecer en respuesta a una pregunta de T.D. Lee durante la hora del café, un viernes por la tarde en el Departamento de Física de Columbia⁵. Lo que Schwartz propuso fue un método para crear un haz de neutrinos de alta energía, método que desde entonces ha sido el utilizado en prácticamente todos los experimentos de neutrinos en aceleradores.

La idea es acelerar protones a muy alta energía y hacerlos chocar contra un blanco. En los choques se producen muchas partículas secundarias, sobre todo piones. Los piones se mueven fundamentalmente en la dirección del protón inicial y, si se les hace pasar por una zona en la que se haya hecho el vacío, se desintegran antes de interaccionar con la materia, produciendo muones y neutrinos que también se mueven predominantemente en la dirección del protón original. Los cálculos de Schwartz indicaban que era posible producir un haz intenso de neutrinos de esa manera. Muy rápidamente un equipo de 8 físicos entre los que estaban Lederman, Schwartz y Steinberger inició la tarea de construir un detector apropiado para detectar las interacciones de neutrinos y distinguir qué partícula se producía en la interacción. Para absorber los muones producidos junto con los neutrinos y evitar que llegasen al detector los experimentadores utilizaron el hierro proveniente del desguace de un destructor de la segunda guerra mundial. El detector era totalmente electrónico, una innovación importante para la época. Después de varios meses de toma de datos analizaron los resultados y en 1962 anunciaron los resultados: se encontraron unas dos docenas de sucesos atribuibles a interacciones de neutrinos en los que se producían muones y ninguno consistente con la producción de electrones.

El neutrino producido con el muon en la desintegración del pión tiene claramente una naturaleza muónica (produce muones cuando interacciona) a diferencia del producido junto con el electrón en la desintegración beta el cual al interaccionar siempre

⁴ Pontecorvo es quizás el físico que más ideas originales ha aportado a la física de neutrinos. No hay prácticamente ningún aspecto de la física de neutrinos al que no haya contribuido de manera crucial.

⁵ Conferencia de J. Steinberger en sesión inaugural del congreso Neutrino 06.

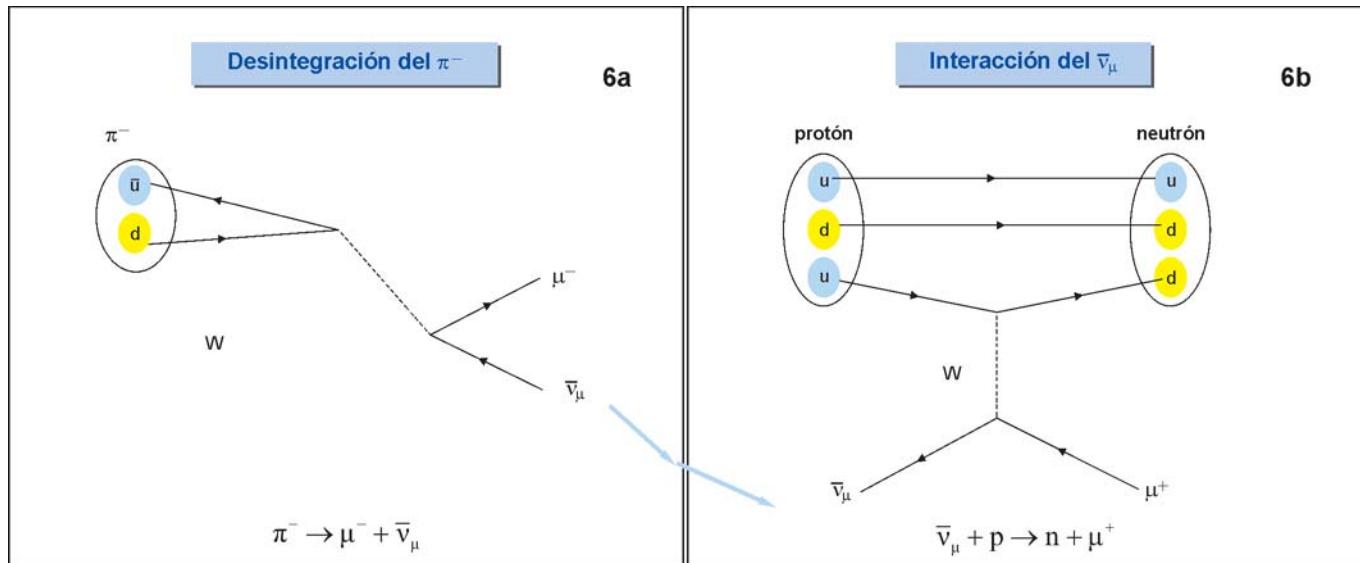


Figura 6. La figura 6a muestra el diagrama de desintegración de un π^- (partícula formada por un quark d y un anti-quark u. El anti-neutrino muónico producido, al interaccionar, produce siempre muones como se indica en 6b. Nótese la diferencia con el correspondiente diagrama para anti-neutrinos electrónicos (Fig. 4b) en el cual se producen positrones.

produce electrones. Este experimento muestra que hay dos familias distintas de leptones: el electrón y su neutrino (y las antipartículas correspondientes) y el muon y su neutrino (y las antipartículas correspondientes). El concepto está ilustrado de manera gráfica en la figura 6.

No es casualidad que justo entonces, en 1960, se inaugurase el acelerador AGS del Brookhaven National Laboratory, capaz de acelerar protones hasta energías de 33 GeV gracias a un nuevo principio de aceleración, el de gradiente alternado, inventado en Brookhaven por Courant, Livingston y Snyder. Los físicos de Columbia estaban particularmente interesados en las posibilidades de dicha máquina y la puesta en práctica de producir un haz de neutrinos fue inmediata.

Junto con estos avances experimentales en los neutrinos se produjo también un avance en la teoría de las interacciones débiles. Particularmente importante fue el descubrimiento de que la interacción débil no conservaba la paridad (un hecho sugerido por T.D.Lee y C.N.Yang y puesto de manifiesto por C.-S. Wu) y el descubrimiento, por Gell-Mann y Feynman e independientemente por Sudershan y Marshak, de que la estructura de la interacción tenía la forma V-A, la cual implica que la violación de la paridad es máxima.

Durante los años setenta y ochenta la física de neutrinos tuvo también avances muy importantes, en particular el descubrimiento de un nuevo tipo de interacción débil llamada de corriente neutra, en la que no se intercambia la carga eléctrica, es decir, un neutrino interacciona débilmente pero no se convierte en un lepton cargado (electrón o muón dependiendo de si es neutrino electrónico o muónico) pero continúa como tal neutrino, por ejemplo $\nu + p \rightarrow \nu + p$ o $\nu + n \rightarrow \nu + p + \pi^-$. También en los años 70 y 80 los neutrinos se utilizaron para explorar la estructura del protón y el neutrón, dando información sobre cómo los quarks están contenidos en esta partículas. En el año 1977 se descubrió, por Marti Perl y colaboradores, un nuevo lepton, llamado tau (τ). Las propiedades del tau pronto dejaron claro que se trataba de un lepton como los otros dos y que por lo tanto tendría asociado un neutrino, pero este no fue puesto de manifiesto experimentalmente hasta el año 1998.

¿Cuantas familias de leptones (y por consiguiente de neutrinos) hay en la naturaleza? La pregunta fue puesta a prueba durante los años 90 en los experimentos realizados en el CERN y en el Stanford Linear Accelerator. La respuesta no es 100% segura pues podrían existir neutrinos con propiedades muy distintas a los conocidos. Pero si los neutrinos son como los conocidos, es decir, tienen una masa nula (o muy pequeña) e interactúan con las interacciones cono-

cidas, los resultados obtenidos en los experimentos mencionados indican que existen tres y solamente tres familias de neutrinos. El número que se obtiene, de una manera indirecta y bastante compleja experimentalmente es 2.993. El acuerdo no puede ser mejor. El número de familias de neutrinos también tiene implicaciones cosmológicas pues la evolución de la temperatura en el universo muy primitivo depende de dicho número. Y la evolución de la temperatura también afecta al cociente entre neutrones y protones en la época de la nucleosíntesis primordial y por lo tanto a la abundancia relativa de elementos primordiales, la medida de la cual indica también que el número de familias de neutrinos es menor de 4.

A VUELTAS CON LOS NEUTRINOS SOLARES Y SU DETECCIÓN

Pero la historia del neutrino ha tenido recientemente otro gran hito. Aunque no lo hemos mencionado aún, la masa de los neutrinos se supo desde casi el principio que era muy pequeña. De hecho nunca se ha podido medir, hasta hace muy poco solamente se conocían cotas superiores. Cuando se construyó el modelo estándar se supuso que la masa era cero, en cierto modo porque no había ninguna razón para suponer lo contrario. Pero desde el año 1998 sabemos que no es cero, aunque si muy pequeña. La implicaciones pueden ser profundas, es todavía muy pronto para saber hasta qué punto. Lo que sí está claro es que la masa de los neutrinos es extremadamente pequeña comparada con la de las demás partículas elementales, es decir los otros leptones cargados y los quarks. Esta historia, la de la masa, de hecho también comenzó en los años 60, tratando de estudiar los neutrinos solares.

Antes hemos visto que el sol emite 3.8×10^{26} W. También hemos visto que dicha energía venía de la ecuación (2), la cual nos dice que cada vez que producimos 26.1 MeV también producimos 2 neutrinos. Esto quiere decir que en el Sol se producen

$$N_{\nu_e} = 2 \times 3.8 \times 10^{26} \text{ W} / (26.1 \text{ MeV}) = 1.8 \times 10^{38} \nu_e / \text{s.}$$

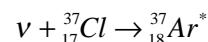
Estos neutrinos salen en todas las direcciones. Si construimos una esfera imaginaria alrededor del sol con un radio de 150 millones de km (la distancia entre el sol y la tierra) y calculamos cuantos salen por unidad de superficie y por segundo, tendremos los que llegan a la

tierra por unidad de superficie y por segundo. Dicho número es

$$6.4 \times 10^{10} \nu_e / (\text{cm}^2 \text{s}).$$

Con tantos neutrinos quizás no sea descabellado tratar de observar en un detector apropiado si alguno interacciona. El estudio es importante por muchos motivos, uno de ellos es que, a diferencia de los fotones, que se absorben y reemiten durante miles de años tal como hemos ya mencionado, los neutrinos se producen en el interior del sol, salen a la superficie en dos segundos y en ocho minutos llegan a nuestro detector donde una pequeñísima parte de los mismos interacciona. Los neutrinos nos permiten estudiar lo que ocurre en el interior del sol, en tiempo real.

En el año 1964 Raymond Davis Jr. y John Bahcall propusieron un experimento para detectar los neutrinos solares que Davis pronto puso en práctica. El método era indirecto y se basaba en la reacción beta inversa mediante la cual un neutrino, colisionando con un núcleo de Cloro, lo convierte en un isótopo de Argón que es ligeramente radioactivo, en concreto



El detector consistía en un tanque de 600 toneladas de un líquido rico en Cloro, en concreto percloroetileno, un líquido utilizado en la limpieza en seco. Los neutrinos que llegan del sol e interaccionan producen Argón-37 radioactivo que se va acumulando en el líquido. Una vez al mes se extraía el líquido y se medía la radioactividad del mismo, la cual daba una medida del número de interacciones. Esta medida es extremadamente difícil. En primer lugar está el posible ruido proveniente de otras causas, por ejemplo de los rayos cósmicos que también pueden inducir radioactividad en el líquido. Para minimizar este ruido el detector se situó en una antigua mina de oro en el estado de Dakota del Sur, a gran profundidad. Y en cualquier caso la señal es extremadamente pequeña, en promedio solamente se producían unos dos átomos de Argón-37 por día, los cuales tenían que ser detectados en 600 toneladas de líquido! A pesar de las dificultades el experimento produjo los primeros resultados en 1968, en los que se encontró efectivamente una señal atribuida a los neutrinos solares. Pero el número de neutrinos que se detectaban era solamente la mitad de los que uno esperaba a partir del cálculo de los que se producían en el Sol.

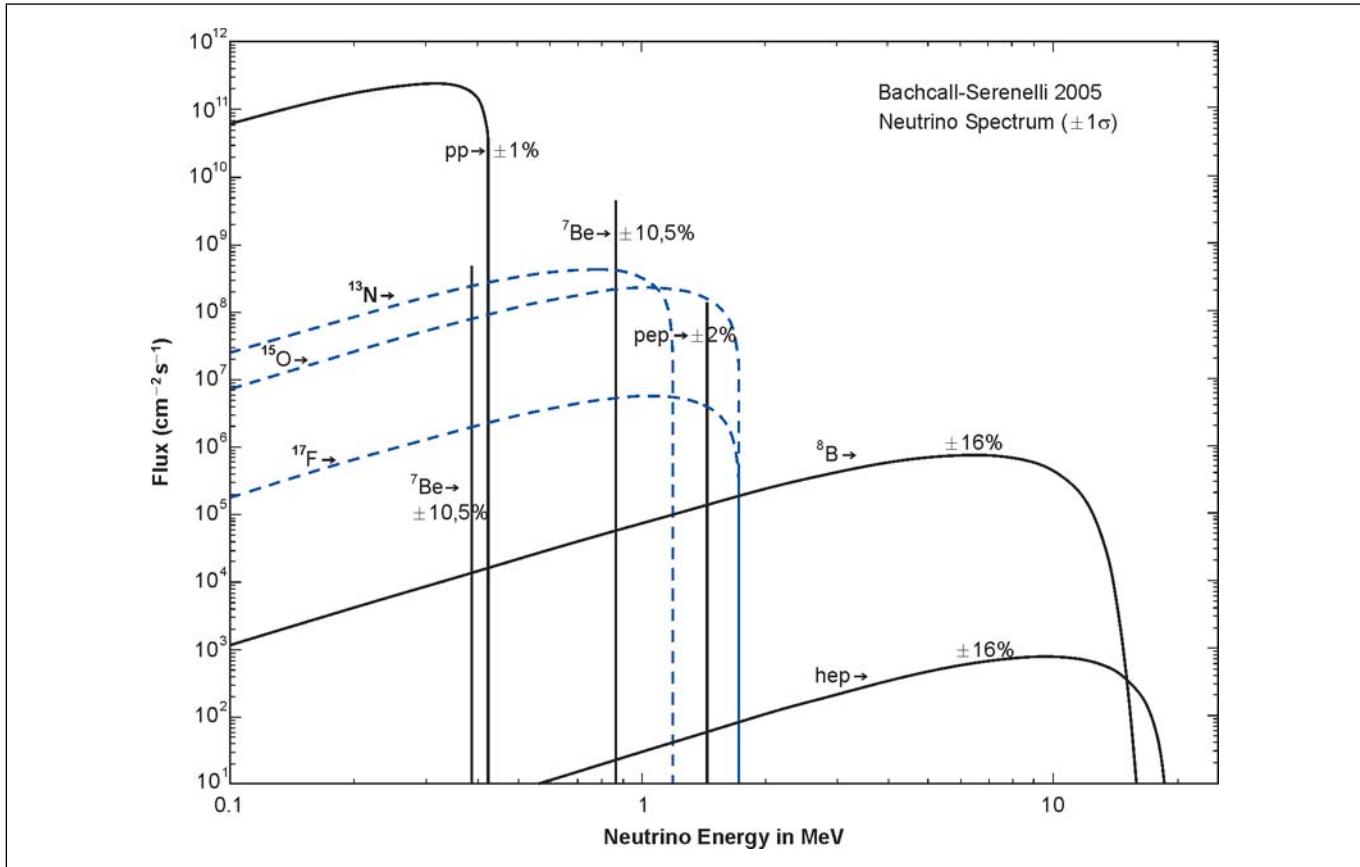


Figura 7. El espectro energético de los neutrinos producidos por diferentes reacciones de fusión en el Sol. Los estudiados en detalle son solamente los neutrinos de mayor energía, por encima de unos 5 MeV.

El cálculo de los neutrinos que se producen en el Sol también es complicado, en particular la probabilidad de que se produzcan algunas reacciones depende en una manera extremadamente sensible de la temperatura. Durante muchos años se ha ido construyendo un modelo detallado de cómo se producen las reacciones de fusión en el sol, al cual se conoce como Modelo Solar Estándar, debido en gran medida al trabajo infatigable de John Bahcall y colaboradores. El modelo predice no solamente el número de neutrinos sino también su espectro, para cada una de las reacciones de fusión que ocurren en el sol (Figura 7). La publicación del experimento de Davis y el cálculo de John Bahcall fueron publicados en sendos artículos del mismo número de *Physical Review Letters* en 1968.

El que el número de neutrinos medidos fuese solamente la mitad de los esperados no fue tomado demasiado en serio. (El propio John Bahcall ha admitido que a él le pareció un gran triunfo que los resultados y el cálculo estuviesen de acuerdo salvo en

un factor 2!). Pero el experimento fue repetido por otros, utilizando no solamente Cloro sino también Galio. El modelo solar también fue refinado, introduciendo datos experimentales de muchos tipos (en particular de sismicidad solar). Siempre se encontraban menos neutrinos de los esperados.

En los años 90 entró en funcionamiento otro tipo de detectores, en concreto basados en el efecto Cherenkov en agua. El efecto Cherenkov ocurre cuando una partícula se mueve en un medio a más velocidad que la de la luz en dicho medio, es decir, a velocidad superior a c/n donde n es el índice de refracción del medio y c la velocidad de la luz en el vacío. Si esto ocurre la partícula radia energía en forma de luz la cual se emite en un cono con eje la dirección de la partícula y a un ángulo θ característico dado por $\cos \theta = 1/(\beta n)$, donde $\beta = v/c$ es la velocidad v de la partícula en unidades de c . La frecuencia de esta luz está en la zona visible del espectro, desplazada hacia el azul (a ella se debe el color azulado de las piscinas donde se almacenan

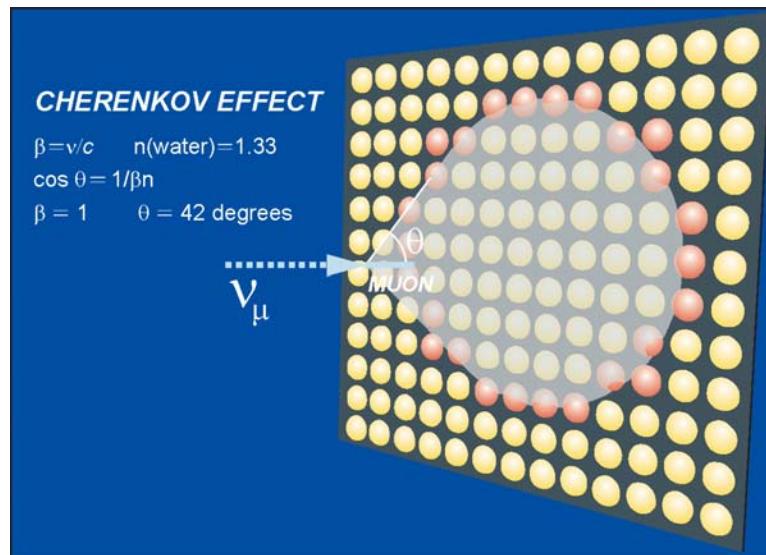


Figura 8. Ilustración del efecto Cherenkov en agua. Una partícula cargada representada por la traza azul con la etiqueta muon, recorre una cierta distancia en agua. La luz Cherenkov emitida a lo largo de la trayectoria crea un cono de luz que se proyecta como un círculo (o elipse) en las paredes del detector donde es detectada por sensores de luz (fotomultiplicadores).

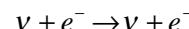
algunos de los residuos radioactivos de las centrales nucleares).

Los detectores de este tipo detectan el paso de partículas cargadas que se producen en el líquido como consecuencia de una interacción del neutrino. Típicamente lo que se ve es un anillo de luz, correspondiente a la emisión de luz Cherenkov por el segmento de la trayectoria de la partícula en el líquido (Figura 8).

El mayor detector construido hasta ahora es el detector Super-Kamiokande, así llamado por estar situado en la mina de Kamioka bajo los Alpes japoneses en la parte occidental de Japón. Este detector es una versión mayor de otro, llamado Kamiokande, que estaba situado en la misma mina y que fue el primero en detectar neutrinos solares por este método. Super-Kamiokande consiste en un tanque cilíndrico enorme, de unos 40 metros de diámetro y otros tantos de altura (Figura 9). El tanque está dividido en dos regiones ópticamente separadas. La región interna tiene un diámetro de unos 34m y una altura de unos 36m y contiene 32000 toneladas de agua monitorizada por 11146 fotomultiplicadores, cada uno con un diámetro de 50cm. La región externa está monitorizada por 1885 fotomultiplicadores de unos 30cm de diámetro. La parte externa se utiliza para eliminar las partículas que entran en el detector desde fuera (y

que podrían confundirse con las originadas por un neutrino interaccionando en la parte interna).

En el caso de los neutrinos solares lo que se mide es el electrón producido en la reacción



es decir, el neutrino que llega del sol choca elásticamente (tanto a través de la corriente neutra como de la cargada) con un electrón del agua poniéndolo en

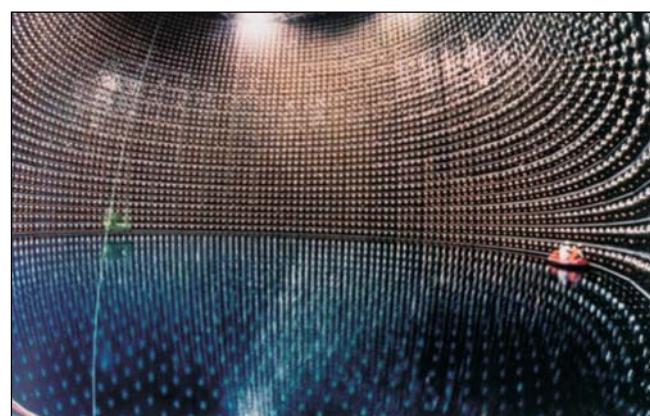


Figura 9. Fotografía del detector Super-Kamiokande cuando estaba siendo llenado de agua. El diámetro del tanque es de 40m y su altura de 49m. En la barca pueden apreciarse tres personas inspeccionando la colocación de los fotomultiplicadores, 11146 en total. Al otro lado de la "pared" hay otros fotomultiplicadores de menor diámetro (1885) los cuales monitorizan otros volumen de agua que se extiende dos metros más alrededor de todo el tanque.

movimiento relativista y haciendo que emita luz Cherenkov. La energía del electrón y su dirección, que son las cantidades medidas, están correlacionadas con las correspondientes cantidades del neutrino. Los resultados de Kamiokande, medidos de nuevo con mayor precisión por Super-Kamiokande, también indicaban que del sol parecían llegar menos neutrinos de los esperados.

En el experimento se mide además la dirección del electrón saliente que está correlacionada con la del neutrino y, efectivamente, se observa que los neutrinos

detectados vienen de la dirección del sol en ese momento (tanto de día como de noche, el sol no se pone para los neutrinos).

NEUTRINOS ATMOSFÉRICOS Y OSCILACIONES DE NEUTRINOS

En los años 90 la discrepancia entre experimentos y teoría relativos a los neutrinos solares tenía solamente tres salidas posibles: o bien los experimentos estaban equivocados, o bien lo estaba la teoría, o algo no

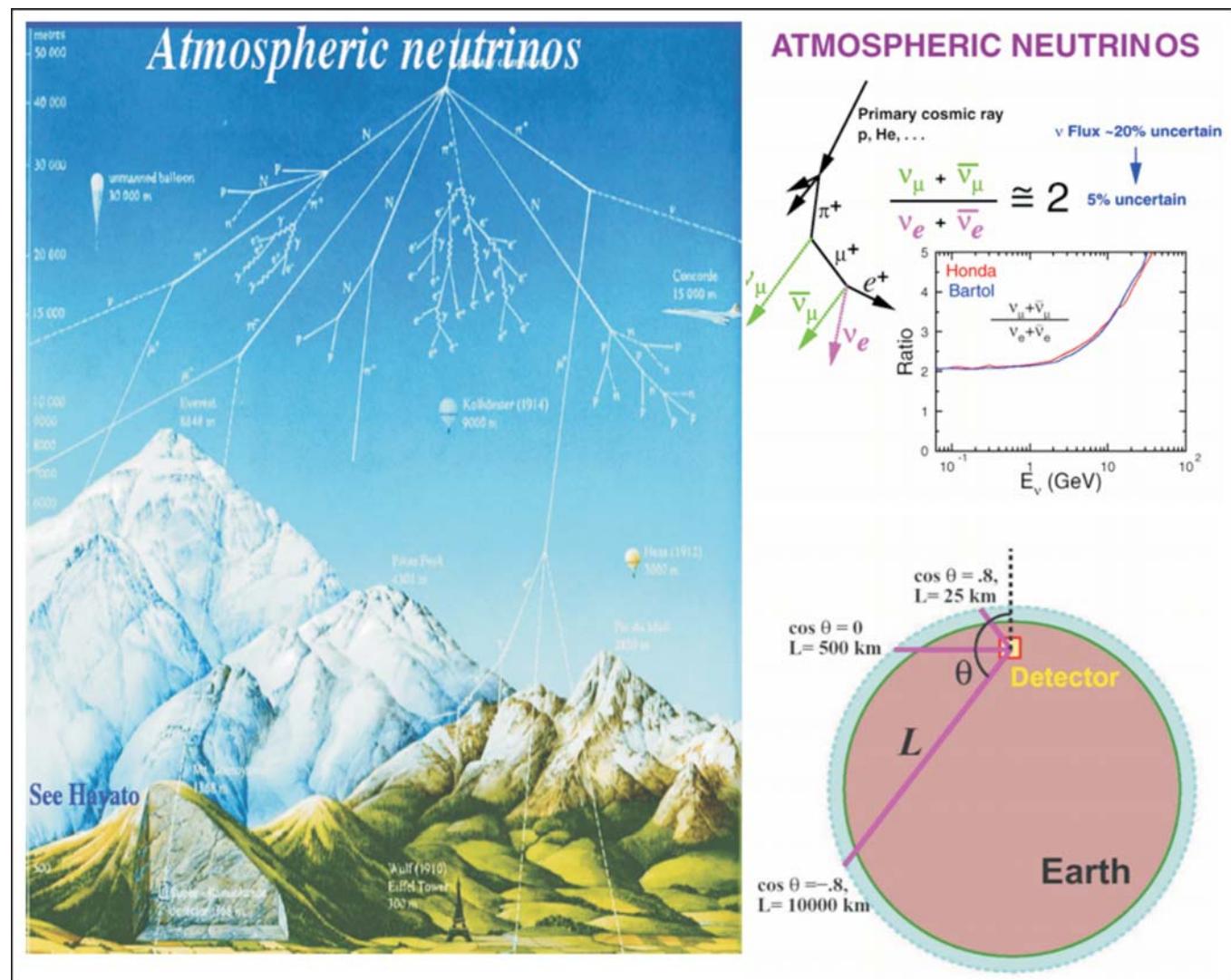


Figura 10. Esquema de la producción de neutrinos atmosféricos como consecuencia de la colisión de los rayos cósmicos en la atmósfera. El cociente entre neutrinos muónicos y electrónicos producidos es dos y crece con la energía debido a que, al aumentar esta, los muones llegan al suelo sin producir neutrinos y por lo tanto en estos casos no se producen neutrinos electrónicos. La figura con el detector ilustra la relación entre la distancia entre el punto de producción del neutrino y el detector y el ángulo de cenit con que llega el neutrino al mismo.

estándar estaba ocurriendo con los neutrinos. Explicaciones posibles con esta última hipótesis abundaban en la literatura científica, pero dada la dificultad de los experimentos y del cálculo del flujo solar también cabía la posibilidad de que ambos estuviesen equivocados (en direcciones contrarias).

Sin embargo hay otras fuentes naturales de neutrinos distintas del sol. En particular los neutrinos también se producen en la atmósfera terrestre por efecto de los rayos cósmicos. Y el detector Super-Kamiokande, con su enorme masa, podía ser capaz de medirlos con precisión. La radiación cósmica primaria consiste en partículas cargadas de alta energía provenientes del espacio. Aproximadamente el 85% de los rayos cósmicos primarios son protones, el 12% partículas alfa (núcleos de helio) y el resto electrones y otros núcleos más pesados. Al entrar en la atmósfera colisionan con los núcleos de oxígeno y nitrógeno produciendo partículas secundarias, en su mayoría piones, los cuales se desintegran muy rápidamente en un muón y en un neutrino muónico. Los muones se desintegran a su vez produciendo, como hemos visto antes, un electrón, un neutrino electrónico y otro muónico (Figura 10). De hecho algunos de los muones, sobre todo los de mayor energía, son también capaces de llegar a la superficie de la tierra antes de desintegrarse con un flujo de aproximadamente $100/(m^2 s)$ a nivel del mar. El cociente entre neutrinos muónicos y neutrinos electrónicos que llegan al suelo debe ser aproximadamente 2. El detector Super-Kamiokande midió esta cantidad encontrando que el cociente no era 2 sino cercano a 1. Además Super-Kamiokande puede medir la dirección de la que viene el muón o electrón. Esta dirección está relacionada con la distancia entre la fuente y el detector (Figura 10). Los que llegan de arriba se producen a unos 20 km, en la alta atmósfera situada sobre el detector. Pero los que vienen de abajo, después de haber atravesado toda la tierra, son neutrinos que se han producido en la atmósfera de las antípodas, a casi 13,000 km de distancia.

Lo más significativo de los resultados de Super-Kamiokande fue precisamente la dependencia en la distancia del cociente entre lo esperado (a partir de los cálculos) y lo medido. El resultado está ilustrado en la figura 11. Los neutrinos muónicos que llegan de lejos del detector son menos de los esperados y la discrepancia aumenta con la distancia. Sin embargo los neu-

trinos electrónicos que llegan al detector concuerdan bastante bien con los esperados. Es como si los neutrinos muónicos "se perdiesen" antes de llegar al detector. (Nota. El efecto no se debe a la absorción por la tierra, la cual está tenida en cuenta en el cálculo y es en todo caso muy pequeña; como hemos visto antes los neutrinos atraviesan la tierra entera fácilmente).

¿Qué está ocurriendo? Los neutrinos solares (electrónicos) "se pierden" en su camino del sol a la tierra y los neutrinos atmosféricos muónicos "se pierden" en su camino a través de la tierra pero no los atmosféricos de tipo electrónico. La solución a este rompecabezas es un efecto cuántico que puede ocurrir solamente si los neutrinos tienen masa y "se mezclan" en la manera que vamos a describir. Al fenómeno se le conoce como *oscilaciones de neutrinos* y había sido considerado muchas veces como una posible explicación del problema de los neutrinos solares, pero sin demasiada credibilidad. De hecho en 1995, en un experimento en el laboratorio de Los Alamos, esta vez con un haz de antineutrinos muónicos producidos por un acelerador, también se habían obtenido unos resultados que indicaban oscilaciones, aunque estos resultados fueron muy cuestionados en su día y aún lo siguen siendo hoy. Pero los resultados de Super-Kamiokande sobre neutrinos atmosféricos dejaban poco lugar a dudas. La evidencia de oscilaciones era bastante clara como para que de repente se convirtiese en algo aceptable.

Hemos hablado de tres clases de neutrinos: electrónicos, muónicos y tauónicos. A estas tres clases podemos considerarlas como tres estados distintos de una misma "entidad", el neutrino. Por definición estos tres estados son los estados que intervienen en la corriente débil cargada, en la que cada neutrino se transforma en el leptón cargado correspondiente o viceversa. Para poder considerar a estas tres partículas como tres estados de un mismo sistema tiene que haber algún tipo de interacción que los haga pasar de un estado a otro. Lo que vamos a ver es que, si los neutrinos tienen masa, dicha transición es posible.

Supongamos que los neutrinos tengan masa y supongamos que hay tres estados de masa (a priori no sabemos si esto es así o no, no hay ninguna razón conocida que nos permita afirmarlo o negarlo, una manifestación más de que no entendemos en profundidad lo que es la masa de una partícula). Llamemos

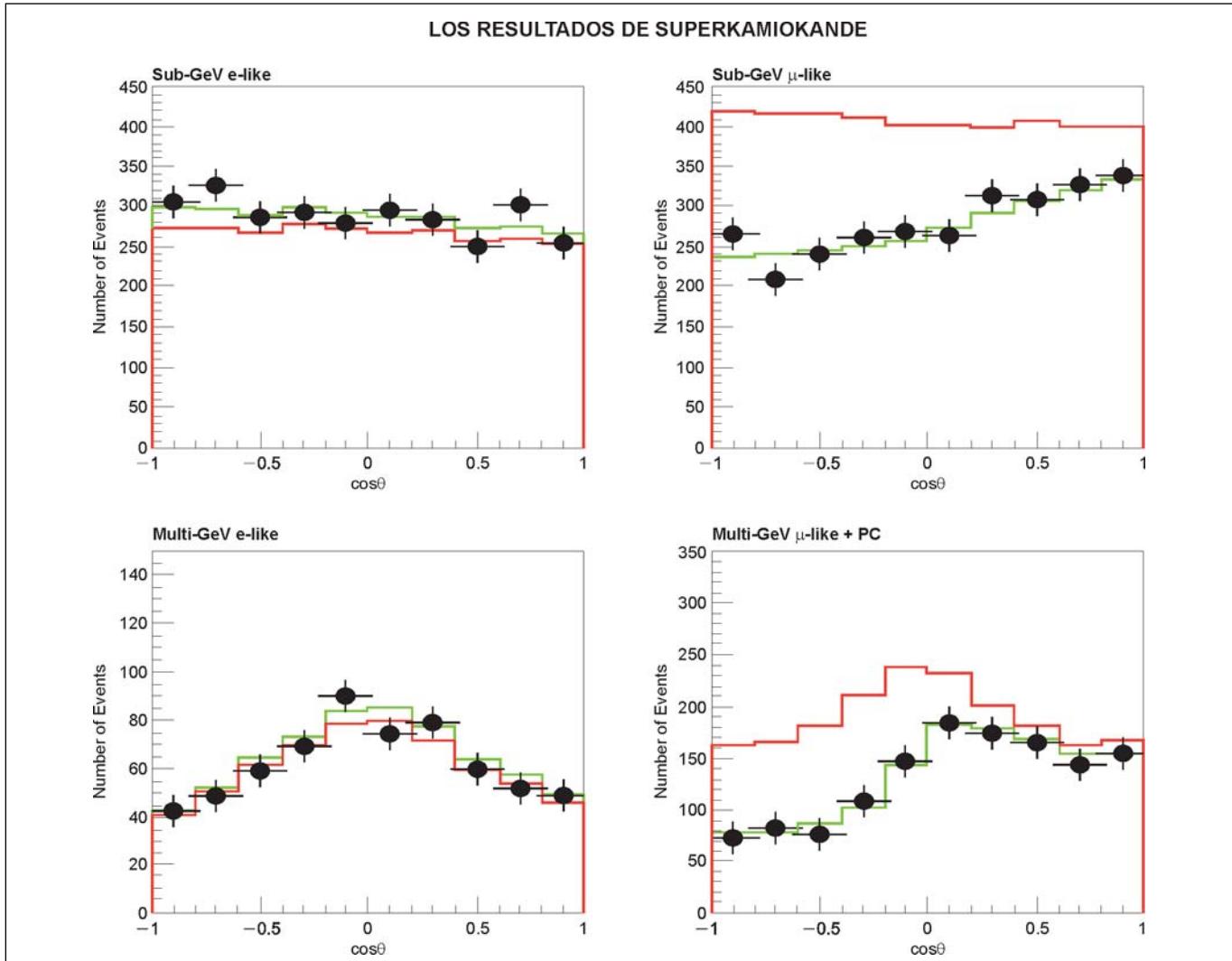


Figura 11. La dependencia en el número de neutrinos registrados en Super-Kamiokande del tipo electrónico y del tipo muónico como función del ángulo cenital. $\cos\theta=1$ significa ángulo cenital cero, es decir los sucesos que llegan al detector desde arriba, producidos en la atmósfera a unos 20 km de altura. $\cos\theta=-1$ corresponde a los que llegan al detector desde muy lejos, producidos en la atmósfera de las antípodas. Los neutrinos electrónicos son los esperados (línea roja), pero hay un claro déficit en los neutrinos muónicos que crece con la distancia.

v_1 , v_2 y v_3 a los tres estados de masa. Estos tres estados no tienen por qué coincidir con los estados de interacción débil. La explicación más plausible para la masa de las partículas es que esta se debe a la interacción de las mismas con un campo que ocupa todo el espacio, el campo de Higgs. Las partículas que interactúan con el campo del Higgs que da origen a la masa son tres estados que no son estados puros de la interacción débil sino una superposición cuántica de los mismos. El fenómeno ocurre de hecho en el caso de los quarks y es conocido allí desde los años 60. Lo que acabamos de decir puede expresarse de forma matemática diciendo que los estados débiles y los

estados de masa están relacionados de tal manera que un estado de la interacción débil, $|v_\alpha\rangle$, puede escribirse como una superposición cuántica de los estados de masa $|v_i\rangle$ de la forma

$$|v_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |v_j\rangle$$

En forma matricial podemos escribir

$$\begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \end{pmatrix} = U_{MNSP} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$$

donde la matriz U se la conoce como la matriz de Maki-Nagakawa-Sakata-Pontecorvo. Con tres neutrinos de interacción débil y tres neutrinos de masa la matriz U es una matriz unitaria 3×3 que depende por lo tanto de 4 parámetros independientes.

¿Qué son las oscilaciones?. Supongamos que un neutrino de una determinada clase se produce en un determinado lugar A y en un tiempo t. Por ejemplo un neutrino electrónico que se produce en el sol. Ese neutrino es una superposición cuántica de los tres estados de masa v_1 , v_2 y v_3 dada por la matriz MNSP los cuales se producen con la misma energía. Para simplificar el álgebra supongamos solamente dos estados de interacción débil (e y μ) y dos estados de masa (1 y 2). En $t=0$ tendremos

$$\begin{aligned} |v_e(t=0)\rangle &= \cos\vartheta |v_1\rangle + \sin\vartheta |v_2\rangle \\ |v_\mu(t=0)\rangle &= -\sin\vartheta |v_1\rangle + \cos\vartheta |v_2\rangle \end{aligned}$$

donde θ es el único parámetro de la matriz (ortogonal) de mezcla 2×2 .

Cuando el neutrino se desplaza libremente de un lugar a otro, cada estado de masa adquiere una fase distinta que en el sistema del laboratorio vendrá dada por $-i(E_i t - p_i L)$, donde el subíndice i indica el estado de masa y L el desplazamiento que será aproximadamente igual para los dos neutrinos. En nuestro caso tendremos $E_1 = E_2 = E$ y podemos expandir los momentos de manera que

$$p_i c = \sqrt{E^2 - m_i^2 c^4} \approx E - \frac{m_i^2 c^4}{2E}$$

Cuando el neutrino llega a otro punto B un tiempo más tarde (la diferencia de tiempo será aproximadamente L/c , donde L es la distancia entre A y B y c la velocidad de la luz, ya que los neutrinos se desplazan a una velocidad muy cercana a c al ser su masa muy pequeña comparada con su energía) y vuelve a interaccionar, la mezcla original habrá cambiado, de manera que existe una probabilidad no nula de que el neutrino interaccione como un neutrino de otro tipo distinto al inicial (v_μ en nuestro caso). Esta probabilidad viene dada por

$$P(v_e \rightarrow v_\mu) = |\langle v_\mu | v_e(t=0) \rangle|^2$$

En el caso de dos familias esta probabilidad es simplemente

$$P(v_e \rightarrow v_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{21}^2 \left[(eV/c)^2 \right] \frac{L [km]}{E [GeV]} \right)$$

donde $m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ es la diferencia de los cuadrados de las masas de los dos estados 2 y 1, y las cantidades están medidas en las unidades indicadas en los corchetes. La palabra oscilación viene de la dependencia como un seno al cuadrado de la probabilidad en el cociente L/E. Cuando tenemos tres familias el cálculo es el mismo pero hay más términos en la probabilidad ya que en ese caso tendremos dos diferencias de masas al cuadrado y cuatro parámetros de mezcla.

En el caso del Sol el neutrino electrónico se convierte en neutrino muónico o tauónico. Para interaccionar a través de la corriente cargada un neutrino muónico tiene que producir un muón y uno tauónico tiene que producir un tau. Pero las masas del muón y del tau son aproximadamente $105 \text{ MeV}/c^2$ y $3780 \text{ MeV}/c^2$, es decir, bastante mayores que la energía de los neutrinos solares que es típicamente menor de 15 MeV (Figura 7). Por lo tanto los neutrinos que han oscilado (estrictamente, la fracción de la mezcla cuántica de tipo v_μ o v_τ) no interaccionan a través de la corriente cargada y por lo tanto no los detectamos. De ahí que veamos un déficit.

La explicación para los neutrinos atmosféricos es similar. Lo que creemos que ocurre es que para las energías y distancias típicas de los neutrinos atmosféricos (que por cierto cubren un rango muy grande) la oscilación es de v_μ a v_τ . En este caso los v_τ si que interaccionan en Super-Kamiokande pero el τ se desintegra casi inmediatamente de manera mayoritaria bien en un electrón, y dos neutrinos, o en un muón y dos neutrinos o en varios piones. En los dos primeros casos no hay manera de diferenciar la interacción de la de un neutrino electrónico o muónico, respectivamente, y en el tercer caso hay varios anillos de luz en el detector con lo cual es complicado identificar al suceso como debido a un v_τ . De ahí que veamos los resultados como una "pérdida" de neutrinos muónicos que aumenta con la distancia debido a la dependencia en L/E de la probabilidad de oscilación y al valor de Δm_{32}^2 .

La oscilación de los neutrinos solares es un poco más complicada que la descrita aquí. Y es que el fenómeno de oscilación puede aumentar de forma muy pro-

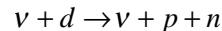
nunciada cuando la propagación de los neutrinos se produce en un medio denso, tal como el centro del sol. Ello es debido a que, además de la fase debida a las distintas masas de los neutrinos, los neutrinos pueden interaccionar con el medio por medio de la corriente neutra y las interacciones en las que los neutrinos salgan hacia adelante no son distinguibles de la no interacción. Ello introduce una fase adicional en la amplitud de propagación que es la misma para el neutrino muónico y tauónico, pero para el electrónico es ligeramente distinta debido a que un neutrino electrónico puede interaccionar también a través de la corriente cargada y producir la reacción $\nu + e \rightarrow \nu + e$. Esta fase adicional interfiere con la otra fase debida a las diferencias de masa y puede dar lugar a un efecto resonante, conocido como el efecto MSW (de Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein). De hecho, la oscilación de los neutrinos solares observada hasta ahora (los neutrinos solares de mayor energía dentro del espectro solar) la oscilación es resonante y un neutrino electrónico producido en el núcleo solar se convierte antes de dejar el sol en el estado de masa ν_2 . Una vez que sale del sol este estado no oscila, pues es un autoestado de masa, y se propaga como tal hasta la tierra.

LA PRUEBA DEFINITIVA DE LAS OSCILACIONES

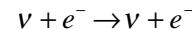
El que los neutrinos solares oscilen es muy interesante pero al mismo tiempo es un problema si lo que queremos es utilizar neutrinos para estudiar como funciona el sol, que era la motivación inicial de Davis y Bahcall. ¿Cómo podemos estar seguros que lo que observamos son oscilaciones y no que el sol produzca menos neutrinos de los esperados? La solución sería realizar un experimento capaz de detectar *todos* los tipos de neutrinos, no solamente los electrónicos sino también los muónicos o tauónicos en los que hayan oscilado. Este experimento ha sido realizado y se le conoce como SNO (Sudbury Neutrino Observatory).

SNO está situado en una mina de níquel en Sudbury, Ontario, Canadá. Consiste en un gran recipiente esférico lleno de agua pesada, de una kilotonelada. El recipiente está suspendido en un contenedor acrílico dentro de unas 8000 toneladas de agua ultrapura. El agua pesada pertenece al gobierno canadiense que la cedió prestada a los científicos para

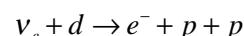
realizar el experimento. La molécula de agua pesada consiste en dos átomos de deuterio y uno de hidrógeno. Lo que hace único al experimento es que el deuterio se disocia fácilmente en neutrón y protón, ya que es el núcleo con menor energía de ligadura, 2.2 MeV. Cuando un neutrino de cualquier tipo tiene una energía superior a esta puede interaccionar con el deuterio liberando un protón y un neutrón. La interacción (de corriente neutra) es



El problema está en detectar la reacción. Para los neutrinos solares el protón apenas se mueve y esencialmente no deja señal, lo que se detecta es el neutrón. En una primera fase de SNO el neutrón se detectaba cuando era capturado por un núcleo de deuterio que se des-excita rápidamente produciendo un rayo gamma de 6,25 MeV. En una segunda fase del experimento se añadieron dos toneladas de cloruro de sodio al agua pesada con lo que el neutrón también es capturado por el núcleo de Cl dando lugar a una cascada de rayos gamma. Con la sal se aumenta la eficiencia de capturar neutrones en un factor tres. Hay que destacar que para ser capaces de discernir por encima del ruido de fondo un solo neutrón es necesario mantener todos los elementos del detector enormemente puros, al límite de lo técnicamente posible. SNO, además de esta reacción, también mide la reacción



(la misma medida por Super-Kamiokande) la cual también ocurre para los tres tipos de neutrinos (a través de la corriente neutra) pero es mucho más probable para los de tipo electrónico para los que también ocurre a través de la corriente cargada. Además de estas reacciones SNO también detecta la reacción de corriente cargada



que solamente ocurre para neutrinos electrónicos.

La medida de estas tres reacciones simultáneamente debe permitirnos medir las interacciones de todos los tipos de neutrinos que nos vengan del sol, bien los originales electrónicos o bien los que "han oscilado" a neutrinos de los otros dos tipos. Los resultados de SNO, anunciados en el año 2003, están en la figura 12.

En ella se muestra el flujo de neutrinos del tipo ν_μ o ν_τ como función de los de tipo ν_e inferido de las

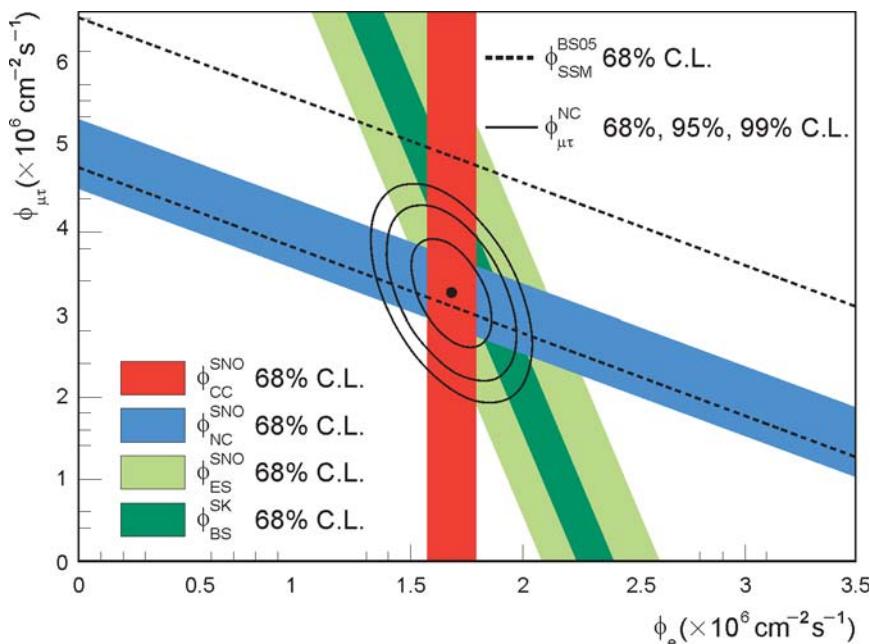


Figura 12. El flujo de neutrinos muónicos o tauónicos frente al flujo de neutrinos electrónicos inferidos a partir de las medidas del detector SNO. Las tres bandas corresponden a las cantidades que se deducen de medir los flujos de las reacciones indicadas en la figura y en el texto.

medidas. Vemos que hay tres bandas cada una correspondiendo a la medida de una de las tres reacciones mencionadas. Las tres bandas se cruzan en un punto dando una solución consistente. A partir de estas medidas podemos calcular cual es el flujo total de neutrinos provenientes del Sol. El resultado obtenido es que el flujo total de neutrinos que vienen del sol es

$$\phi_{SNO} = 5.09^{+0.44+0.46}_{-0.43-0.43} \times 10^6 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s}),$$

mientras que los esperados a partir del Modelo Solar Estándar son

$$\phi_{SNO} = 5.05^{+1.01}_{-0.81} \times 10^6 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$$

Algo que comenzó como un problema en el año 1964 acabó finalmente entendiéndose 40 años más tarde. La historia es también un ejemplo de honradez científica. Los resultados y la teoría no concordaban pero los principales protagonistas (R. Davis y J. Bacall) siempre mantuvieron sus resultados que eran esencialmente correctos.

NEUTRINOS DEL COSMOS

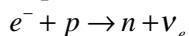
El sol y todas las estrellas producen como hemos visto ingentes cantidades de neutrinos. Pero hay otras situaciones en el cosmos donde los neutrinos se pro-

ducen en grandes, grandísimas cantidades, podríamos decir que son los protagonistas. La situación más dramática de la que estemos seguros son las explosiones de las Supernovas.

Las supernovas son grandes explosiones que ocurren en la etapa final de la vida de estrellas masivas, con una masa unas ocho veces la del sol o mayores. Para entender el proceso pensemos en la que ocurre en el sol. Llegará un momento en que todo el hidrógeno (todos los protones libres) del núcleo del sol (donde la temperatura es lo suficientemente grande para mantener las reacciones nucleares de fusión) se habrá agotado. Lo que ocurre entonces es que la producción de calor cesa y la estrella se contrae. Pero ello hace crecer la temperatura que llegará a ser suficientemente alta como para que comience la fusión del Helio, en concreto dos núcleos de Helio-4 se fusionan produciendo Berilio-8 y liberando energía. Cuando esto ocurre la temperatura crece de nuevo y la estrella se expande, se convierte en una gigante roja. Llega un momento en que el Helio se agota con lo que empieza la fusión del Berilio y el proceso continúa produciéndose elementos más y más pesados hasta que en la parte interna de la estrella se produce hierro. El hierro es el más estable de todos los núcleos, por lo que cualquier proceso nuclear en el que interviene absorbe

energía, en lugar de producirla. Ello hace que una vez que todos los elementos existentes en el núcleo de la estrella lleguen a convertirse en hierro la producción de energía cesa. Llegado ese momento el núcleo de la estrella empieza a contraerse con lo que la temperatura aumenta. Cuando los fotones térmicos llegan a tener una energía superior a 0.5 MeV son capaces de disociar el núcleo del Hierro, lo cual requiere energía. Esto hace que la estrella continúe contrayéndose.

Al aumentar la densidad los electrones libres presentes forman un gas de Fermi, un estado en el que todos los estados posibles de energía y momento se van llenando como consecuencia del principio de exclusión de Pauli. Llega un momento en que los electrones adquieren la energía suficiente para que tenga lugar la reacción de captura electrónica



en la cual el neutrino también se lleva energía. Al mismo tiempo la estrella comienza a neutronizarse, los protones libres van desapareciendo y se convierten en neutrones. El proceso de enfriamiento (debido a los neutrinos que se llevan la energía) y la consiguiente contracción del núcleo se producen de manera rapidísima. El núcleo de la estrella pasa de tener un diámetro de unos 10000 km a un diámetro de unos 50 km en un tiempo de 1 segundo! Pero la contracción no continua indefinidamente debido a que los neutrones forman ahora un gas de Fermi degenerado (todos los estados de menor energía y momento están ocupados) con lo que algunos neutrones tienen que tener un momento muy grande, lo cual causa una presión (presión de Fermi) que es capaz de detener la implosión.

Lo que ocurre a continuación depende de la masa de la estrella de neutrones. Si la masa es tal que la gravedad supera a la presión de Fermi y a la de las fuerzas nucleares (a este límite de la masa se le denomina el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff) la contracción domina y se forma un agujero negro. Si es menor que este límite el núcleo rebota. Los neutrinos que han ido emitiéndose se encuentran con la materia del resto de la estrella que está cayendo hacia el centro y, debido a la altísima densidad, son absorbidos eficientemente, lo cual hace que se forme un "frente de choque" que llega a pararse antes de explotar hacia afuera en una explosión gigantesca en la que se libera una energía del orden de 10^{53} ergios, el 99% de la cual

está en forma de neutrinos. Es en esta etapa, una vez que se produce la explosión, cuando la estrella se convierte en Supernova y durante la cual emite más luz que el resto de la galaxia que la contiene. Como acabamos de ver la energía asociada a esa luz es del orden del 1% comparada con la de los neutrinos emitidos.

Hasta el año 1987 la descripción anterior era pura teoría. Pero en 1987 se produjo una explosión de una supernova en un galaxia satélite de la nuestra, la conocida como Gran Nublo de Magallanes (a 170,000 años luz de distancia de la Tierra), visible a simple vista en el hemisferio Sur. Por primera (y única) vez se detectaron neutrinos procedentes de una tal explosión, simultáneamente en tres detectores situados en Japón (el detector Kamiokande), Rusia (Baksan) y Estados Unidos (el detector IMB, situado en una mina de sal) (Figura 13).

Los tres detectores registraron una cantidad de neutrinos muy por encima de la normal en la misma ventana de tiempo, dentro de los errores. Estos registros continúan siendo los únicos que tenemos de neutrinos más allá del Sol. Los restos de esta supernova han sido fotografiados por el telescopio Hubble y hoy aparece como una nebulosa de dos anillos. Una cosa que sabemos de esta supernova es que en su lugar no hay un pulsar. Los pulsares son producidos por la rotación rápida de la estrella de neutrones que queda tras la explosión. El que no exista un pulsar en el lugar de la 1987A puede ser indicativo de que se haya producido un agujero negro.

Si se produjese una explosión de una Supernova en la actualidad sería posible registrar una cantidad muy importante de neutrinos en Super-Kamiokande y en otros detectores. El registro detallado, en particular de la distribución temporal con la que llegan, podría arrojar mucha luz sobre varios aspectos de la explosión que no están del todo entendidos. Sabemos que en promedio se produce una explosión en nuestra galaxia cada 50 años y la última de la que tenemos un registro histórico es del año 1604.

Otro aspecto importante de la explosión es que durante la misma se producen elementos más pesados que el hierro, se cree que el 50% de todos estos elementos en el universo se ha producido durante la

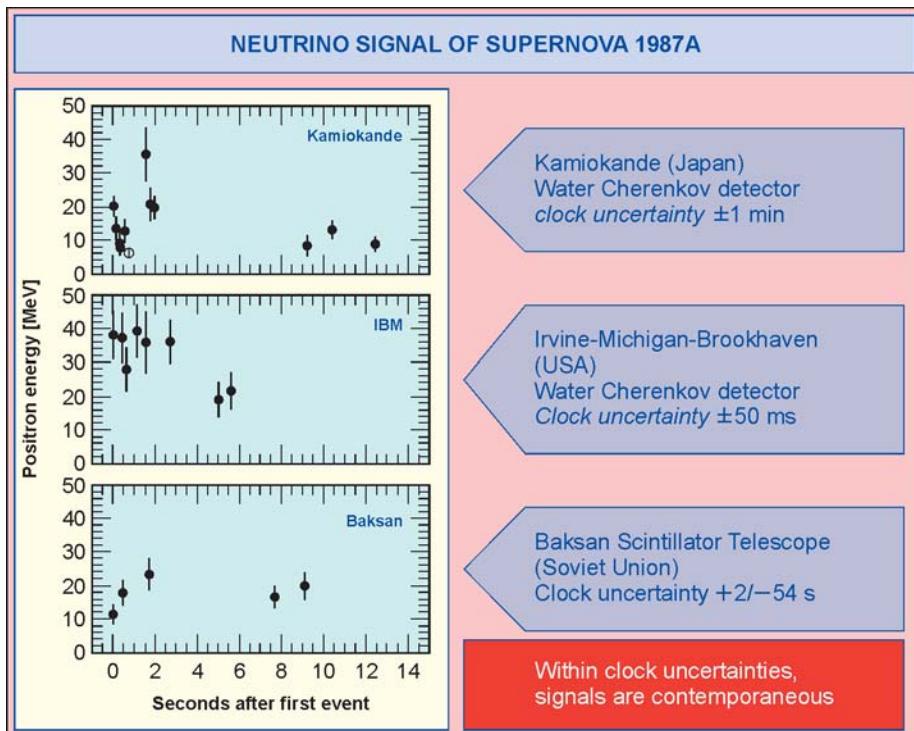


Figura 13. Los registros de tiempo de interacciones de neutrinos producidos en tres detectores, en Japón, Estados Unidos y Unión Soviética. Esta detección simultánea, dentro de los errores, coincidió con la explosión de la Supernova 1987A. La frecuencia de sucesos que estas interacciones representan está muy por encima del nivel normal de registros de neutrinos debidos a otras causas.

explosión de supernovas. En este sentido, al liberar energía en la fisión del Urano, estamos deshaciendo un proceso que se produjo durante una supernova. La fuente de la energía nuclear es la energía producida en la explosión de una supernova, "almacenada" como energía de enlace en el núcleo del Urano.

OTRAS FUENTES DE NEUTRINOS CÓSMICOS

Las supernovas son fuentes intensas de neutrinos pero es muy posible que en el cosmos haya otras fuentes también muy intensas. Sabemos que existen rayos cósmicos con energías que llegan hasta por encima de 10^{20} eV, aunque no sabemos de donde vienen, y también sabemos que hay fuentes identificadas de rayos gamma con energías de cientos de miles de GeV, mucho mayores que la energía que se puede obtener en la tierra con aceleradores de partículas. El mecanismo por el cual se producen partículas a estas altísimas energías no está del todo entendido. Los rayos gamma pueden producirse por fenómenos electromagnéticos, por ejemplo mediante

el efecto Compton inverso, en el cual un electrón de muy alta energía colisiona con un fotón ambiental transfiriéndole parte de esa energía. Pero otro mecanismo posible es que los fotones vengan de desintegración de piones neutros. En este último caso también deberían producirse piones cargados los cuales, como hemos visto, se desintegran en neutrinos muónicos y en muones. En este último caso las mismas fuentes que producen fotones (rayos gamma) deberían de producir neutrinos.

Un mecanismo que produce neutrinos con seguridad es la interacción de estos rayos cósmicos ultra-energéticos con el fondo cósmico de microondas. Estas colisiones tienen que dar origen a un fondo difuso de neutrinos que hasta ahora no han podido ser detectados (los detectores aún no tienen la sensibilidad necesaria). Otro fondo difuso es el acumulado debido a las explosiones de Supernovas en el pasado, en todo el universo. De nuevo los niveles esperados están por debajo de las posibilidades actuales. Y un tercer fondo difuso, quizás el más interesante de todos, es el que nos ha quedado del big bang, cuando el universo se hizo transparente a los neutrinos, unos dos segundos

después de la singularidad inicial. Al igual que los fotones, los neutrinos presentes en ese momento han ido enfriándose por la expansión del universo y en la actualidad su distribución de frecuencias debería ser la de un cuerpo negro con una temperatura equivalente a 1.9 grados kelvin. El número de neutrinos debería ser de unos 110 de cada especie por centímetro cúbico en todo el universo. Pero nadie sabe como se podrían detectar estos neutrinos.

En la actualidad la única esperanza de detectar neutrinos cósmicos se centra en los de muy altas energías ya que la probabilidad de interacción de los neutrinos crece linealmente (hasta muy altas energías) con la energía, y por otra parte es técnicamente más fácil detectarlos, simplemente porque las señales que dejarían serían más fáciles de separar del ruido que la de neutrinos de baja energía. Con este objetivo, la detección de neutrinos de muy alta energía de posibles fuentes cósmicas, se está construyendo un detector utilizando el hielo polar, bajo el polo Sur, como material detector. Este hielo es muy transparente y la idea es de nuevo detectar la luz Cherenkov causada por las partículas cargadas producidas en la interacción de neutrinos mediante dispositivos de detección de luz enterrados en el hielo. A este proyecto se le denomina

ICE CUBE y está actualmente en fase de construcción, esperándose que esté completo en el año 2012. El objetivo es instrumentar un kilómetro cúbico de hielo. Un proyecto similar, esta vez en las profundidades del Mediterráneo, está también en fase de estudio en Europa.

En este artículo solamente hemos tratado algunos aspectos de la física de neutrinos. Esta partícula ha sido y sigue siendo una fuente inagotable de nuevas ideas en física fundamental, que seguramente ni el propio Pauli hubiera podido imaginar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Una fuente inmensa sobre neutrinos, particularmente solares, es la página de John Bahcall en Princeton <http://www.sns.ias.edu/~jnb/> la cual contiene materiales y bibliografía del autor, fallecido en 2005.
2. Otra fuente bibliográfica muy completa sobre el neutrino es la mantenida por Carlo Giunti y Marco Laveder en Torino, titulada "Neutrino Unbound" <http://www.nu.to.infn.it/>. En ella hay un sinfín de enlaces a todo lo relacionado con el neutrino.