

Neutrinos: medio siglo de sorpresas

José Bernabeu, Enrique Fernández

1. Introducción

Los neutrinos han vuelto a ser foco de intensa atención en los últimos años, concretamente desde que en 1998 el experimento SuperKamiokande (SK) de Japón presentara evidencia de oscilaciones (sección 5) en neutrinos atmosféricos (sección 6). Los resultados de SK reavivaron el interés en los experimentos de neutrinos solares cuyos datos mostraban de diversas maneras que el flujo detectado de neutrinos procedente del sol era inferior al esperado a partir del Modelo Solar Estándar (secciones 4 y 7). A partir de entonces el progreso ha sido espectacular. El experimento SuperKamiokande aumentó notablemente su estadística, confirmando claramente el efecto, también observado por otros experimentos menos sensibles. El detector SuperKamiokande es también capaz de detectar los neutrinos solares en una parte de su espectro de energía, medidas que confirmaron la anomalía en el flujo de los mismos. Además SK mide la dirección de los neutrinos, lo cual permitió comprobar que realmente venían del Sol. En la primavera del 2002 el experimento SNO, en Canadá, ha presentado resultados que explican de manera definitiva el problema del déficit de neutrinos solares en términos de oscilaciones entre las distintas especies de neutrinos (sección 7). Más recientemente aún, el experimento KamLAND, situado en la misma mina japonesa que SK, ha comprobado, a partir de antineutrinos procedentes de varios reactores nucleares en Japón, que las oscilaciones de neutrinos necesarias para explicar el problema solar dan cuenta también de sus resultados.

Y en su veredicto anual la Academia sueca también ha querido hacerse eco de estos descubrimientos, premiando a los pioneros en las observaciones de neutrinos procedentes del espacio, cuyo trabajo ha hecho posible en gran medida los avances anteriores [1].

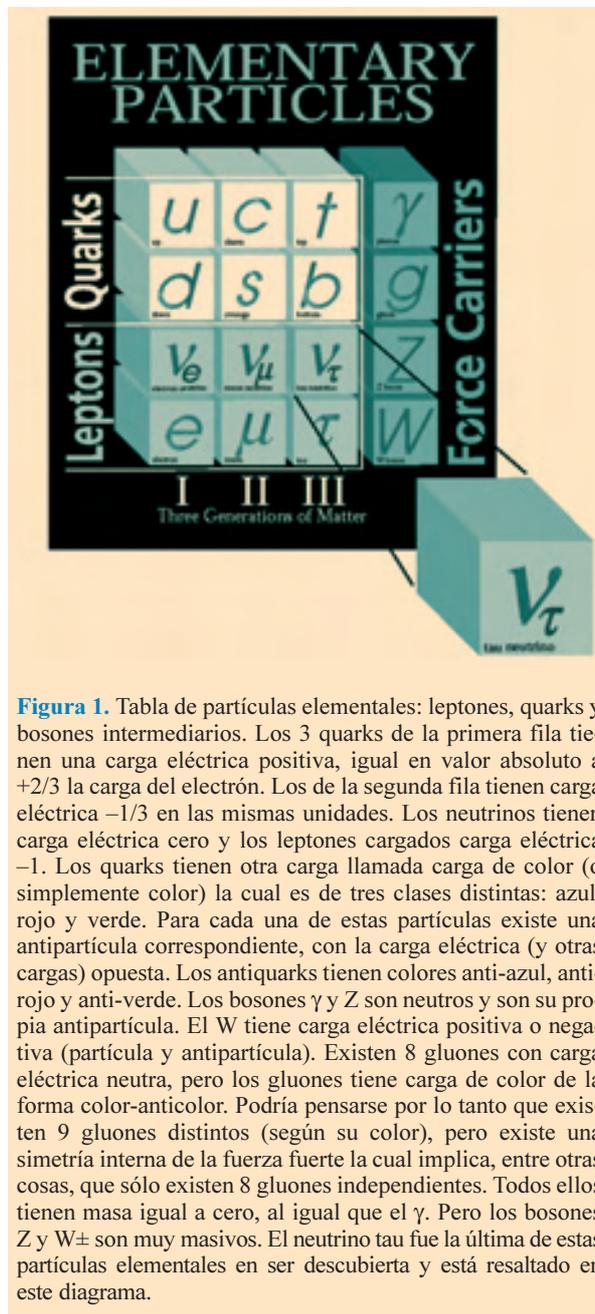


Figura 1. Tabla de partículas elementales: leptones, quarks y bosones intermedarios. Los 3 quarks de la primera fila tienen una carga eléctrica positiva, igual en valor absoluto a $+2/3$ la carga del electrón. Los de la segunda fila tienen carga eléctrica $-1/3$ en las mismas unidades. Los neutrinos tienen carga eléctrica cero y los leptones cargados carga eléctrica -1 . Los quarks tienen otra carga llamada carga de color (o simplemente color) la cual es de tres clases distintas: azul, rojo y verde. Para cada una de estas partículas existe una antipartícula correspondiente, con la carga eléctrica (y otras cargas) opuesta. Los antiquarks tienen colores anti-azul, anti-rojo y anti-verde. Los bosones γ y Z son neutros y son su propia antipartícula. El W tiene carga eléctrica positiva o negativa (partícula y antipartícula). Existen 8 gluones con carga eléctrica neutra, pero los gluones tienen carga de color de la forma color-anticolor. Podría pensarse por lo tanto que existen 9 gluones distintos (según su color), pero existe una simetría interna de la fuerza fuerte la cual implica, entre otras cosas, que sólo existen 8 gluones independientes. Todos ellos tienen masa igual a cero, al igual que el γ . Pero los bosones Z y W^{\pm} son muy masivos. El neutrino tau fue la última de estas partículas elementales en ser descubierta y está resaltado en este diagrama.

La confirmación de que los neutrinos oscilan entre las distintas especies es un fenómeno mecano-cuántico que requiere que los neutrinos tengan masa y se mezclen, algo no contemplado en el Modelo Estándar (sección 2) de las partículas elementales, el cual debe por lo tanto ser modificado. Finalmente, y quizás ello sea lo más importante, el que los neutrinos tengan masa puede ser la primera ventana a nueva física más allá del Modelo. De ahí el enorme interés que estos datos han generado.

En realidad los neutrinos han estado siempre de actualidad desde que fueron propuestos por Pauli en 1931. Y es que los neutrinos juegan un papel muy importante en muchos campos de la física nuclear y de partículas, así como en astrofísica y cosmología. Los neutrinos intervienen en fenómenos que ocurren desde la escala de Planck, 10^{-33} cm, a la escala del universo visible, 10^{28} cm. Mencionamos brevemente a continuación varios temas donde los neutrinos juegan un papel esencial, y en secciones posteriores desarrollamos con más detalle algunos de ellos.

Los neutrinos fueron instrumentales para establecer la teoría de Fermi de las interacciones débiles, así como la violación de la simetría de paridad entre la derecha y la izquierda. Las colisiones de neutrinos de alta energía sobre protones, junto a las reacciones iniciadas por elec-

trones y muones, han permitido establecer la existencia y propiedades de los quarks y han ayudado a formular la teoría que describe las interacciones fuertes entre quarks y gluones, la Cromodinámica Cuántica (QCD). Con neutrinos chocando sobre materia se descubrió en el CERN una nueva interacción débil, la llamada "corriente neutra" en la cual no hay intercambio de carga entre las partículas participantes en la interacción. Este ingrediente ha resultado ser fundamental para llegar a la teoría de unificación de las interacciones débiles y electromagnéticas, la "Teoría Electrodébil", recién

temente sometida a un escrutinio de extraordinaria precisión mediante el estudio detallado de las propiedades de los bosones vectoriales Z y W^\pm mediadores de las interacciones débiles [2].

Mediante los neutrinos exploramos el interior del Sol y no sólo su superficie [3], como es el caso con la luz y otras radiaciones electromagnéticas estudiadas en los observatorios astronómicos convencionales. Con la detección, en 1987, de neutrinos provenientes de la explosión de la SuperNova SN1987A se ha inaugurado lo que podríamos denominar astrofísica de neutrinos. Los detectores actualmente existentes podrían estudiar con bastante detalle los neutrinos producidos en explosiones de supernovas en nuestra galaxia lo cual permitiría estudiar aspectos no bien conocidos sobre la dinámica del colapso estelar y la consiguiente explosión. En la actualidad se preparan experimentos que permitirán observar y estudiar los neutrinos producidos en fenómenos astrofísicos de altas energías (sección 8).

La estructura a gran escala del Universo depende de la materia oscura que contiene, a la que contribuyen en una pequeña proporción los neutrinos con masa de la radiación de fondo del Universo. Los neutrinos también juegan un papel principal en la nucleosíntesis, desde la primordial poco después del "Big Bang", en la que se produjeron los núcleos más ligeros, a la estelar, en la que se producen núcleos hasta el hierro, a la de supernovas, en cuya explosión se producen los núcleos más pesados.

El fenómeno de la bariogénesis en el universo, por el que un universo simétrico entre materia y antimateria evolucionó al universo con sólo materia, fué probablemente debido a la leptogénesis, en la que las propiedades del neutrino aparecen como un ingrediente esencial.

El que los neutrinos tengan tanta importancia en una tal variedad de fenómenos se debe en gran medida a que solamente interactúan por medio de la interacción débil, cuyas propiedades conocemos con gran precisión. Ello contrasta con la falta de conocimiento de las propiedades intrínsecas del neutrino. No conocemos cuales son las masas de los neutrinos ni como se mezclan entre sí las distintas especies. Y, lo que es aún más sorprendente, no sabemos el tipo de partícula elemental que es, en particular si el neutrino es su propia antipartícula (neutrino de Majorana) o si el neutrino y el antineutrino son partículas distintas (neutrino de Dirac), tal como se supone en el Modelo Estándar.

Muchos aspectos interesantes de la historia del neutrino están descritos en los excelentes artículos de F.J. Yndurain [1] y A. Morales [3,4] publicados en esta Revista. A ellos referimos al lector.

2. El neutrino y el Modelo Estándar

Cuando hoy en día hablamos de las partículas elementales, tanto del neutrino como de otras, tenemos un contexto en el que hacerlo. Y es que durante el siglo XX se produjo un cambio profundo en nuestra concepción de la estructura última de la materia llagándose en los años 70 a lo que podríamos calificar como una síntesis, a la cual se denomina el Modelo Estándar (al que llamaremos SM). Según este modelo toda la materia está formada por unos pocos constituyentes elementales, o partículas elementales, todos de spin $1/2$, o fermiones. Estas partículas interactúan entre sí por medio de cuatro fuerzas distintas: gravitatoria, electro-

magnética, débil y fuerte. Sin entrar en disquisiciones más profundas debemos puntualizar que elemental quiere decir aquí sin estructura aparente. Por otra parte, por interacción entendemos cualquier proceso que cambie o bien la naturaleza de las partículas o bien su estado de movimiento. Por ejemplo veremos más adelante que hay partículas elementales que se desintegran en otras. El proceso que da lugar a este fenómeno es una interacción.

Las partículas elementales se clasifican en dos grupos dependiendo de si interactúan o no de manera fuerte: los leptones, que no interactúan fuertemente, y los quarks, que si lo hacen. Existen 6 leptones y 6 quarks (Fig. 1). La clasificación dentro de cada grupo tiene que ver con la carga eléctrica y con la interacción débil. Tres de los leptones tienen carga eléctrica -1 , son el electrón, el muón y el tau. Los otros tres leptones tienen carga eléctrica cero, son el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tau (o tauónico). La asociación entre neutrinos y leptones cargados, evidente en su nombre, tiene que ver con la interacción débil. En la interacción débil cargada un leptón cargado se transforma en su neutrino correspondiente, o viceversa, tal como veremos más abajo. Las propiedades de cada par (leptón cargado-neutrino correspondiente) son idénticas para los tres pares, excepto en lo referente a las masas de las partículas. A cada uno de estos pares se le denomina "familia", o "generación".

Asimismo existen tres quarks con carga eléctrica $-1/3$, a los que se denomina d , s , b (del inglés, down, strange, bottom) y tres quarks con carga eléctrica $+2/3$, a los que se denomina u , c , t (del inglés up, charm, top). Estos quarks nunca aparecen libres sino en estados ligados, formando partículas conocidas de manera genérica como hadrones. El protón y el neutrón de los núcleos atómicos son ejemplos de hadrones. El protón está formado por dos quarks u y uno d mientras que el neutrón lo está por dos quarks d y uno u . Los quarks también se agrupan en tres pares o familias (u , d), (c , s), (t , b), idénticos en sus propiedades, excepto en la masa.

El que las partículas de materia sean las que son es algo no explicado a priori por el Modelo Estándar, sino un hecho experimental que se incorpora en el mismo. El Modelo tampoco explica la clasificación en familias, y este es uno de los problemas abiertos mas importantes en física de partículas [5]. La explicación debe venir de nuevas teorías que vayan más allá del Modelo.

El SM sí que explica las interacciones entre las partículas, excepto la interacción gravitatoria. Sin embargo la extrapolación a las escalas de distancia y energía de las partículas elementales de lo que sabemos de la interacción gravitatoria a escala macroscópica, nos dice que esta es despreciable frente a las otras interacciones y puede por lo tanto ser ignorada. El SM es pues una teoría de las interacciones electromagnética, débil y fuerte, que vienen formuladas en el único lenguaje apropiado (que conozcamos) a dichas escalas: el de la mecánica cuántica relativista o teoría cuántica de campos. Las interacciones electromagnética y débil están unificadas por la Teoría Electrodébil y la interacción fuerte está descrita por la llamada Cromodinámica Cuántica (o QCD, las siglas en inglés de Quantum Chromo Dynamics). Ambas están basadas en un mismo principio dinámico, el de la invariancia gauge local, lo cual permite esperar que algún día se lleguen a explicar las dos de una manera unificada.

La Teoría Electrodébil fue desarrollada en los años 60 y 70, incorporando, reinterpretao y unificando la antigua

teoría cuántica de las interacciones electromagnéticas, llamada Electrodinámica Cuántica (o QED, las siglas en inglés de Quantum Electro Dynamics), desarrollada durante los años 30 y 40, y la teoría de Fermi de las interacciones débiles, la cual fue propuesta en los años 30 y tuvo gran éxito, aunque era incompleta por varios motivos. La Teoría Electrodébil nos da una descripción unificada de las interacciones electromagnética y débil en una teoría cuántica de campos coherente y es sin duda uno de los grandes logros de la física del siglo XX. Por su desarrollo, Glashow, Weinberg y Salam recibieron el premio Nobel en 1979. La prueba de la coherencia de dicha teoría, a nivel cuántico, también valió el premio Nobel a t'Hooft y Veltman en 1999 [6]. La teoría ha sido verificada con precisión en el acelerador LEP del CERN, cuyo programa ha finalizado recientemente [2].

En una teoría cuántica de campos la interacción entre dos partículas se describe como el intercambio entre las mismas de otra partícula. Esto no es de extrañar si consideramos que cuando dos partículas chocan una pierde momento-energía y otra lo gana. De acuerdo con la mecánica cuántica el intercambio de momento-energía no puede ser continuo sino discreto. Por otra parte, según la teoría especial de la relatividad, una acción a distancia no puede ser instantánea. Estas dos características, desplazamiento no instantáneo de un cuanto de energía, corresponden a la idea que tenemos de partícula. Por motivos más técnicos las partículas intercambiadas en una interacción son partículas de spin 1, o bosones vectoriales. En la interacción electromagnética se intercambian fotones, en la débil intervienen tres partículas con masa, el bosón Z, eléctricamente neutro, y los bosones cargados W^+ y W^- . En la interacción fuerte intervienen 8 partículas sin carga y sin masa, llamadas gluones (Fig. 1). Los gluones tienen otras cargas, llamadas cargas de color o simplemente color.

Otro hecho que ocurre en una Teoría Cuántica de Campos es que para cada partícula existe una antipartícula con exactamente la misma masa pero con todas las cargas opuestas. Para todas las partículas mencionadas existe en efecto la antipartícula correspondiente, lo cual ha sido verificado experimentalmente. Una partícula neutra puede ser su propia antipartícula. Esto es lo que ocurre con el fotón y con el Z.

2. Interacciones y cargas

Los distintos tipos de interacciones están asociados a distintos tipos de cargas. Dos partículas interactúan de manera electromagnética, es decir pueden intercambiar fotones (o “acoplarse” al fotón como se dice en el argot de la física) si tienen carga eléctrica. De manera análoga, para que dos partículas interactúen fuertemente deben tener “carga de color” (de la cual existen 3 variedades distintas, con dos “signos” distintos, llamados color y anticolor). En el caso de la interacción débil existen dos tipos de cargas que intervienen y por lo tanto dos tipos distintos de interacción débil, llamadas carga isotópica débil, I_3^W , e hipercarga débil, Y_W . La primera está asociada a la interacción débil cargada, mediada por los bosones W^\pm , mientras la segunda lo está a una interacción débil neutra. Lo que ocurre es que estas dos cargas y la carga eléctrica no son independientes sino que están ligadas entre sí por la relación

$$Q = I_3^W + Y_W/2$$

Esta relación es crucial en la descripción unificada de las interacciones electromagnética y débil, pero profundizar en este tema nos llevaría lejos del propósito de este artículo.

Para simplificar fijémonos solamente en la interacción débil cargada, mediada por los bosones W^\pm . En una interacción de este tipo un leptón de un determinado sabor (electrón, muón o tau) se transforma en el neutrino correspondiente emitiendo un W^- (o viceversa, emitiendo un W^+). Lo mismo ocurre con las antipartículas correspondientes (cambiando el signo de la carga del W en cada caso). Evidentemente la carga eléctrica del leptón cambia (se la lleva el W) y lo mismo ocurre con la carga de isospín débil. Cada par $(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$, forma lo que se denomina un doblete de isospín débil, siendo el valor de esta cantidad $-1/2$ para los leptones cargados negativamente y $+1/2$ para los neutrinos. La Fig. 2.a ilustra este hecho general en el proceso concreto de la desintegración de un muón,

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

En esta interacción (desintegración), el μ^- se transforma en el otro miembro de su doblete, el ν_μ , emitiendo un W^- . El W^- se lleva la carga del μ^- y cambia la tercera componente del isospín débil de $-1/2$ a $+1/2$. El W^- a su vez se transforma en un e^- (carga negativa) y un $\bar{\nu}_e$, de manera que la tercera componente de isospín débil en este segundo vértice es también -1 .

Con la Teoría Electrodébil es posible calcular el proceso anterior (es decir, calcular la vida media del muón) y muchísimos otros con gran precisión. Se trata de una verdadera teoría, consistente y predictiva. Existen sin embargo dos complicaciones que queremos recalcar. La primera tiene que ver con la masa de las partículas. La existencia del isospín débil está relacionada con una simetría interna de la fuerza débil, según la cual los bosones intermedios, y todas las partículas que intervienen en la interacción, deberían de tener masa nula, algo que experimentalmente no ocurre. La simetría parece no ser exacta, está rota. Lo que se cree es que, en efecto, la simetría de la interacción es exacta, pero los estados, tanto los bosones como las demás partículas, adquieren masa por una ruptura de la simetría, algo similar a lo que ocurre en un material ferromagnético, en el que el estado de menor energía es aquel en que los espines de todos los átomos están alineados en una misma dirección, a pesar de que no haya ninguna dirección preferida en la interacción electromagnética misma. Cuando las partículas adquieren masa por este mecanismo (llamado “mecanismo de Higgs”) los miembros de los tres dobletes de isospin débil, con un valor determinado del mismo, se mezclan para formar estados de masa determinados. Si los neutrinos tienen masa, como parece ser el caso, habría tres estados de masa, a los que podríamos llamar ν_1, ν_2 y ν_3 , cada uno de los cuales será una superposición cuántica de los estados ν_e, ν_μ y ν_τ que intervienen en la interacción débil. De la misma manera podríamos hacer con los leptones cargados, pero como la interacción débil cargada siempre conecta un leptón cargado y uno neutro, es suficiente con poner la mezcla o bien en los neutrinos o bien en los leptones. La convención es hacerlo en los neutrinos, como lo hemos hecho aquí. Esta mezcla la podemos expresar de la manera siguiente:

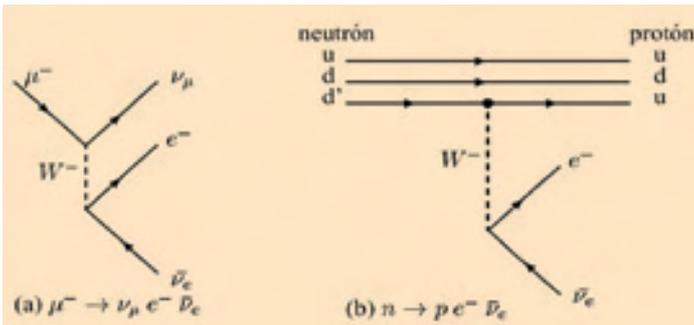


Figura 2. **2.a** Diagrama de una interacción débil cargada con neutrinos, la desintegración del muón. El muón se transforma en su correspondiente neutrino, emitiendo un W^- . El W^- interactúa con un electrón y un antineutrino electrónico. **2.b** Diagrama de la desintegración beta de un neutrón. El quark d' de un neutrón se transforma en el otro miembro de su doblete de isospín débil, u . El que la transición sea de la parte d' del quark d , y no del quark d , se manifiesta en la probabilidad de esta transición. El W^- producido en este proceso se convierte, como en el proceso 2.a, en un electrón y un antineutrino electrónico.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{1e} & V_{1\mu} & V_{1\tau} \\ V_{2e} & V_{2\mu} & V_{2\tau} \\ V_{3e} & V_{3\mu} & V_{3\tau} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

A la matriz de mezcla se la conoce como matriz de Maki-Nagakawa-Sakata (o matriz MNS).

La segunda complicación tiene que ver con una propiedad muy peculiar de la interacción débil, llamada “quiralidad” (la raíz de esta palabra es la misma que la de quironancia, es decir mano). El W solamente interactúa con la parte levógira de las partículas, o la parte dextrógira de las antipartículas. La parte levógira o dextrógira es un tecnicismo que tiene que ver con la descripción del estado cuántico de la partícula, lo que en mecánica cuántica ordinaria se denomina la “función de onda” y en teoría cuántica de campos un “spinor”. Cada estado (de un leptón cargado o de un neutrino) puede ser descompuesto en una parte levógira y otra dextrógira. Solamente la primera interviene en la interacción débil cargada. Los dobletes de isospín débil lo son de las partes levóginas (o dextróginas para antipartículas). Las partes dextróginas no intervienen en la interacción débil y son singletes de isospín débil ($I^W_3 = 0$). Si una partícula tiene masa nula, como se creía era el caso para los neutrinos, su estado puede ser puramente levógira o dextrógira. De ahí que en el Modelo Estándar nunca se considerasen los neutrinos dextróginos o los antineutrinos levóginos. Si estos estados existiesen tendrían una peculiaridad. Como puede fácilmente comprobarse, un neutrino dextrógira, singlete de isospín, es decir, con $I^W_3 = 0$, y con carga $Q = 0$, también tiene hipercarga débil igual a cero, $Y^W = 0$. Estas partículas no interactuarían ni fuerte, ni electromagnética ni débilmente. Se les denomina “neutrinos estériles”, y en la actualidad su existencia no está excluida totalmente, aunque los datos experimentales no favorecen esta hipótesis.

Las interacciones débiles entre quarks son similares a las de los leptones. En los quarks el fenómeno de mezcla es bien conocido desde los años sesenta.

Los dobletes de isospín débil (que son los que intervienen en la interacción) son los estados (levóginos) (u, d'), (c, s') y (t, b'), donde los estados d' , s' y b' son superposiciones específicas de los estados de masa d, s y b . Es decir,

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

A esta matriz se la conoce como matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (o matriz CKM).

Los quarks constituyentes de las partículas como el protón, el neutrón o los piones que observamos en el laboratorio con masas y vidas medias definidas son estados de masa definida. En una interacción débil cargada el quark u se transforma en el estado d' , que es una superposición cuántica de los quarks d, s y b (o viceversa), el quark c se transforma en s' y el t en b' . El ejemplo prototípico de interacción débil en la que intervienen quarks es la desintegración beta nuclear. La desintegración β^- ocurre cuando un quark la componente d' del quark d de un neutrón nuclear se transforma en un quark u (Fig. 2.b), emitiendo un W^- , el cual se transforma a su vez (tal como ocurre en la desintegración del muón) en un electrón y un antineutrino electrónico. Lo que observamos en el laboratorio es que un neutrón (constituido por dos quarks d y un quark u , se transforma en un protón (constituido por dos quarks u y uno d (este fue el proceso que llevó a Pauli a introducir la hipótesis de existencia del neutrino [1,3]). El que la transformación sea del d' a u (y no del d al u) se manifiesta en que la probabilidad de que la reacción ocurra es un 4% menor de lo que uno esperaría utilizando como medida de la intensidad de la interacción débil la extraída de la vida media del muón.

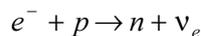
Lo que ocurre en los leptones es ligeramente distinto. Los neutrinos son observados experimentalmente en interacciones débiles, y cuando vemos por ejemplo que un neutrino produce un electrón al interactuar, podemos estar seguros de que dichas partículas forman un doblete de isospín débil. El estado del neutrino así producido es el ν_e . Para tener acceso directo a los estados de masa del neutrino se necesitan medidas de energía con una resolución suficiente. Ese es el objetivo en la medida de la región más alta del espectro de electrones en la desintegración beta del Tritio: ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_i$.

3. Fuentes de neutrinos

Ya hemos visto que en la desintegración beta de los núcleos se producen neutrinos, y que estos son de tipo electrónico. Esto hace que los reactores nucleares sean fuentes de neutrinos, de hecho fuentes intensas, dado la gran producción de núcleos inestables producidos en la fisión nuclear. Los aceleradores de partículas son otra fuente importante, en particular de neutrinos muónicos. Los haces se producen haciendo colisionar protones contra un blanco, colisión en la que se producen partículas llamadas piones. Los piones cargados se focalizan con un campo magnético antes de su desintegración en un muón y un neutrino muónico. El neutrino se produce fundamentalmente en la dirección en la que se mueve el pión, con lo cual se logra tener un haz de neutrinos. Experimentos con haces de neutrinos han hecho posible, entre otras cosas, estudiar la estructura de otras partícu-

las, tales como el protón y el neutrón, constituidos por quarks.

Las fuentes anteriores pueden ser calificadas de “artificiales”. Pero los neutrinos se producen también en grandes cantidades de forma natural. En particular el Sol, y cualquier estrella en general, es una fuente copiosa de neutrinos, producidos no en la fisión sino en la fusión nuclear de núcleos ligeros en núcleos más pesados, hasta el hierro. Más adelante (secciones 4,7) volvemos sobre el tema de los neutrinos solares. Otra fuente intensa de neutrinos son las explosiones de las supernovas. Las supernovas ocurren en la etapa final de la vida de estrellas masivas. Las reacciones de fusión de la estrella continúan hasta que en la parte más interna, donde tienen lugar, se produce hierro. El núcleo de hierro es el más estable de todos, 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. En este momento el núcleo colapsa gravitacionalmente de manera muy rápida y se produce copiosamente la reacción llamada de captura electrónica



La estrella se “neutroniza” convirtiéndose los protones en neutrones. Los neutrones son fermiones y por lo tanto obedecen el principio de exclusión de Pauli, lo que hace que llegue un momento en que el gas de neutrones producido no puede comprimirse más. La implosión se detiene y rebota, produciéndose una explosión. La estrella se convierte en una supernova y llega a brillar, durante algún tiempo, más que el resto de la galaxia que la contiene. En la explosión los neutrinos juegan un papel esencial y se calcula que la energía producida en forma de neutrinos es 100 veces mayor que la producida en forma de fotones. En 1987 se produjo una explosión de una supernova en la galaxia cercana a la nuestra llamada Gran Nube de Magallanes (a 170,000 años luz de distancia de la Tierra) y por primera (y única) vez se detectaron neutrinos procedentes de una tal explosión, simultáneamente en tres detectores situados en Japón, Rusia y Estados Unidos. Uno de los premiados con el Nobel del 2002, Masatoshi Koshiba, lo ha sido por la observación de dichos neutrinos [1].

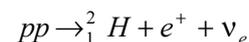
Otra fuente de neutrinos son los que se producen en la atmósfera terrestre, en la colisión de los rayos cósmicos primarios con los núcleos de oxígeno y nitrógeno. La radiación cósmica consiste en partículas cargadas de alta energía provenientes del espacio. Aproximadamente el 85% de los rayos cósmicos primarios son protones, el 12% partículas α (núcleos de helio) y el resto electrones y otros núcleos más pesados. En el choque con la atmósfera se producen partículas secundarias, en su mayoría los mencionados piones, los cuales se desintegran muy rápidamente en μ y ν_{μ} . Los muones se desintegran en su mayoría antes de viajar una gran distancia, produciendo como hemos visto un electrón, un neutrino electrónico y otro muónico. De hecho algunos de los muones, sobre todo los de mayor energía, son también capaces de llegar a la superficie de la tierra, produciendo un flujo de aproximadamente $100/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ (sección 6).

Todas las fuentes anteriores de neutrinos han sido experimentalmente comprobadas. Pero en realidad los neutrinos están presentes en todo el universo y son de hecho las parti-

culas más abundantes del mismo, con excepción de los fotones. En un tiempo muy cercano al Big Bang el universo consistía en un gas de partículas (quarks, leptones, bosones) en equilibrio térmico. Al ir expandiéndose la densidad, y consecuentemente la probabilidad de colisión entre las partículas, fueron disminuyendo. Poco más de un segundo después del Big-Bang el recorrido libre medio de los neutrinos se hizo mayor que las dimensiones del propio universo, o lo que es lo mismo, los neutrinos se “desacoplaron” del resto de la radiación, con lo que dejaron de estar en equilibrio térmico. Esta radiación fue “enfriándose” en proporción al tamaño del universo (en realidad la longitud de onda asociada a dichos neutrinos ha ido aumentando, de la misma manera que el propio universo), y hoy consiste en neutrinos a una temperatura de unos dos grados por encima del cero absoluto y con una densidad de unos 120 de cada especie (neutrinos más antineutrinos) por centímetro cúbico. El mismo proceso tuvo lugar con los fotones, pero 300.000 años más tarde, al formarse hidrógeno atómico en un universo más enfriado. Dichos fotones, con una temperatura hoy de 2.7 grados, constituyen la radiación cósmica de fondo, descubierta en 1964 por Penzias y Wilson (por lo que recibieron el Premio Nobel de Física de 1978). La detección de los neutrinos del fondo cósmico sería de enorme importancia en cosmología, pero hoy día nadie ha sido capaz de idear un experimento para hacerlo.

4. Un problema histórico: la anomalía de los Neutrinos Solares

Como ya hemos mencionado el Sol, como todas las estrellas visibles en su período de vida ordinario, brilla como consecuencia de la energía liberada en las reacciones de fusión nuclear que se producen en su interior. Como las otras estrellas el Sol se formó a partir de una nube de hidrógeno y helio primordiales (producidos durante el Big-Bang) cuya densidad y temperatura fueron aumentando poco a poco debido al efecto de la gravedad. (Esta nube inicial ya estaba ligeramente “contaminada” por elementos más pesados, procesados en estrellas anteriores y en anteriores explosiones de supernovas; de ellos está formada en su mayoría la Tierra, y nosotros mismos). Si la masa de gas es lo suficientemente grande, la presión de la gravedad llega a aumentar la temperatura de manera que los núcleos de hidrógeno (protones) tienen la energía suficiente para producir la reacción de fusión nuclear

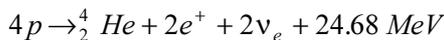


En esta reacción se libera energía lo cual hace que la temperatura aumente aun más y el número de reacciones aumente consecuentemente. Eventualmente se llega a un estado de equilibrio hidrostático y térmico en el que la estrella produce energía de una forma constante.

La reacción anterior no es la única que produce neutrinos. Otras reacciones de fusión producen ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^8_5\text{B}$, y otros núcleos junto con neutrinos de diversas energías. Referimos al lector a [3] para una exposición detallada de dichas reacciones, resumidas en la Fig. 3. Estas reacciones llevan produciéndose durante cuatro mil millones de años y continuarán al mismo ritmo durante otro tiempo similar,

hasta que ya no quede más hidrógeno en el núcleo del Sol. En ese momento el núcleo de la estrella volverá a contraerse y la temperatura y densidad aumentarán, de manera que el ${}^4_2\text{He}$ sea capaz de fusionarse, produciendo carbono. El ciclo continuará hasta agotarse el He, comenzando un nuevo ciclo, etc., hasta que se van formando elementos más y más pesados en el núcleo de la estrella, hasta el hierro, que es el más estable de todos. En el caso del Sol, su masa no es suficiente para terminar como una Supernova y, cuando se acabe su combustible nuclear evolucionará a una gigante roja que abarcará todo el sistema solar. Si la masa es suficientemente grande la estrella puede terminar como una Supernova, tal como se apuntó antes.

Desde un punto de vista energético todas estas cadenas de reacciones se reducen a



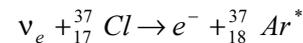
Además de la energía de 24.68 MeV emitida directamente, los positrones terminan aniquilándose con electrones lo cual contribuye otros 2.04 MeV a la producción energética, a la que hay que substrair la energía cinética que llevan los neutrinos (0.62 MeV). El resultado neto que queremos destacar es que el sol produce neutrinos, a la razón de dos neutrinos por cada 26.1 MeV de energía. Esta energía se radia por el sol en todas direcciones y es la fuente última de nuestra existencia. La cantidad total de energía que nos llega del sol es una constante muy bien medida, llamada Constante Solar, cuyo valor es $3.846 \times 10^{26} \text{ W}$. A partir de ella, y de los números anteriores, es muy fácil estimar el número de neutrinos que nos llegan (el cálculo se deja como ejercicio para

el lector interesado). El resultado es que el flujo de neutrinos procedentes del sol esperados en la superficie de la tierra es de

$$6.5 \times 10^{10} \nu_e / (\text{cm}^2\text{s}).$$

El cálculo anterior es una buena aproximación al número total de neutrinos que se emiten por todas las reacciones anteriores, los cuales se producen con un espectro característico en cada una de ellas. El cálculo detallado del flujo requiere conocer muchos parámetros solares, tales como temperatura, densidades, etc. El Modelo Solar Estándar es un modelo desarrollado durante varios años, principalmente por John Bacall y colaboradores, que han ido incorporando los muchos estudios que se han realizado sobre el sol. El resultado teórico del cálculo del flujo se presenta en la Fig. 4, en unidades de flujo arbitrarias, como función de la energía del neutrino.

La detección de los neutrinos provenientes del Sol como un medio de estudio del interior del mismo fue sugerida originalmente por Pontecorvo y puesta en práctica, hace unos 30 años, por Raymond Davis Jr. y colaboradores. El detector utilizado consistía en un enorme tanque (600 toneladas) lleno de un compuesto rico en cloro, situado en una antigua mina de oro, la mina de Homestake, en el estado norteamericano de Dakota del Sur, a 1350m de profundidad. La localización subterránea es necesaria para proteger al detector de la radiación cósmica. La detección del neutrino se realiza mediante la reacción nuclear inversa de la desintegración Beta



El umbral de energía del ν_e para esta reacción es de 0.814 MeV. El Ar producido es radiactivo (de ahí la notación Ar^*) y puede detectarse mediante métodos radioquímicos. El procedimiento consiste en extraer parte del líquido periódicamente y medir su actividad. Con ello puede estimarse el número de neutrinos que han interactuado en el tanque durante un cierto periodo de tiempo. El experimento es extremadamente difícil. Baste decir que, en promedio, se produce una interacción de neutrinos en todas las 600 toneladas del tanque cada dos días. A pesar de la dificultad, el experimento ha sido capaz de medir durante muchos años el flujo de neutrinos, encontrando que el número de neutrinos detectados es aproximadamente la tercera parte del esperado. R. Davis es también uno de los premiados con el Nobel del 2002 por este trabajo pionero.

A la discrepancia entre el flujo medido y calculado se le dio el nombre de “el déficit de neutrinos solares” o la anomalía de los neutrinos solares. En realidad las discrepancias con el modelo solar eran más complicadas que lo explicado hasta ahora. Otros experimentos sobre neutrinos solares, en Italia, Rusia y Japón, también fueron capaces de medir el flujo de neutrinos solares, para valores distintos de la energía. Un estudio simultáneo de todos los resultados llevaba a la conclusión de que los neutrinos procedentes de la reacción donde se produce Li no se detectaban en absoluto, pero sí los producidos en la desintegración beta del B . Pero para producir B es necesario producir antes Li , más que “anomalía”, se trataba de “anomalías” (sección 7).

Todos los experimentos anteriores son extremadamente difíciles, así como lo es el cálculo del flujo. Además no todos los experimentos estaban de acuerdo y alguno encontró

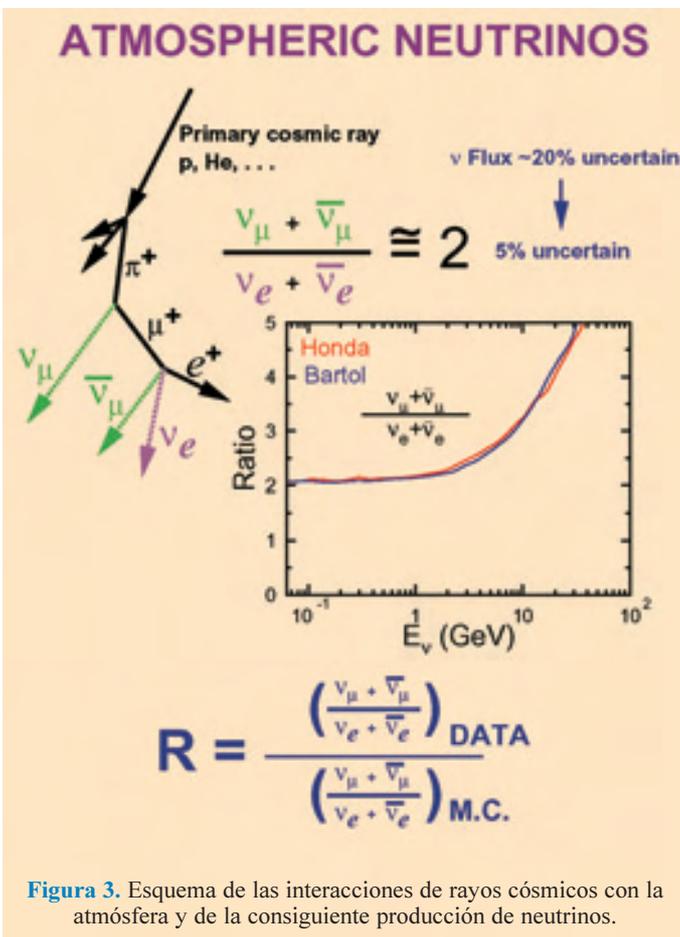


Figura 3. Esquema de las interacciones de rayos cósmicos con la atmósfera y de la consiguiente producción de neutrinos.

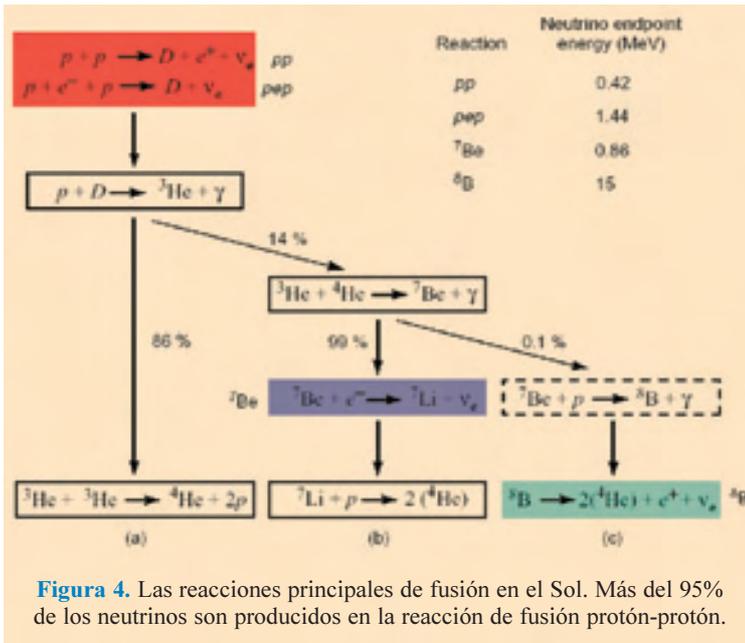


Figura 4. Las reacciones principales de fusión en el Sol. Más del 95% de los neutrinos son producidos en la reacción de fusión protón-protón.

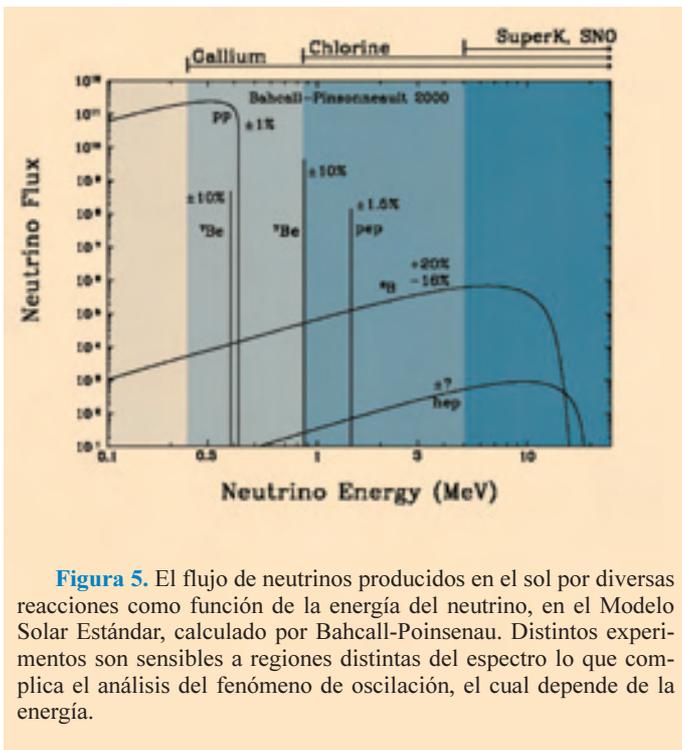


Figura 5. El flujo de neutrinos producidos en el sol por diversas reacciones como función de la energía del neutrino, en el Modelo Solar Estándar, calculado por Bahcall-Poinsenau. Distintos experimentos son sensibles a regiones distintas del espectro lo que complica el análisis del fenómeno de oscilación, el cual depende de la energía.

incluso que no existía un déficit en los neutrinos procedentes del sol. La interpretación de los resultados en términos de oscilaciones resultaba sugestiva, pero las dudas sobre las anomalías solares persistían en la comunidad científica. En realidad la primera evidencia clara de oscilaciones vino de los neutrinos atmosféricos y no ha sido hasta el año pasado que todas las dudas sobre los resultados solares se han disipado y ha quedado establecida la validez del Modelo Solar Estándar.

Para poder entender la interpretación de los resultados necesitamos un mínimo de formalismo para describir las oscilaciones.

5. Oscilaciones de neutrinos

Antes hemos visto que los estados del neutrino con masas bien definidas son estados ν_1, ν_2, ν_3 que no coinciden con los estados débiles ν_e, ν_μ, ν_τ . Los estados débiles intervienen en las interacciones (bien en las que los neutrinos se producen o bien en las que los neutrinos se convierten en el correspondiente leptón cargado). Sin embargo son los estados de masa los que mantienen su identidad estacionaria, cuando los neutrinos se propagan con el tiempo.

Supongamos que en un experimento se producen neutrinos en un punto $x=0$. Estos neutrinos, producidos en un proceso débil, serán de un sabor bien definido. Por ejemplo en el sol los neutrinos que se producen son ν_e . ¿Qué ocurre cuando el neutrino viaja hacia la tierra, donde quizás será detectado? Según hemos visto el neutrino de tipo e es una superposición cuántica de tres estados de masa ν_1, ν_2, ν_3 , dada por la matriz de mezcla. Estos estados de masa se propagan libremente desde el sol a la tierra. Cada estado de masa se propaga como una onda plana, con una fase dada por $e^{-iE_i t}$ donde t es el tiempo y E_i la energía del estado de masa ν_i . Si las masas son distintas estas fases se hacen distintas, por lo que la mezcla varía como función del tiempo. Cuando el neutrino interactúa en la tierra lo hace de nuevo por medio de la interacción débil, pero la probabilidad de que la mezcla se proyecte de nuevo en el estado ν_e no será 1, de hecho podría ocurrir que el neutrino interactuase como ν_μ o ν_τ !. Como vamos a ver la probabilidad de encontrar el neutrino en el estado ν_e varía de forma periódica y de ahí el nombre de oscilación. (Esta descripción es apropiada cuando los neutrinos se propagan libremente en el vacío, como es el caso entre la Superficie del Sol y la Tierra. Sin embargo, en ocasiones, como es el caso entre el núcleo del Sol donde se producen y su superficie, los neutrinos interactúan con la materia. Este efecto interfiere coherentemente con la propagación, modificando la fase generada en su movimiento. No obstante, el argumento esencial de la oscilación, la interferencia entre estados de masa distinta, es el mismo que el dado aquí).

Veamos lo anterior para el caso simple en que tenemos no tres sino dos familias de neutrinos. Llamaremos a los estados débiles ν y ν' y a los estados de masa ν_1 y ν_2 . En ese caso, la matriz V es real y ortogonal y depende solamente de un parámetro θ

$$\begin{pmatrix} \nu \\ \nu' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Si en $t = 0$ producimos un estado, digamos ν , podremos escribir

$$\nu(t = 0) = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

Al cabo de un cierto tiempo t tendremos

$$\nu(t) = \cos\theta e^{-iE_1 t/\hbar} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-iE_2 t/\hbar} |\nu_2\rangle$$

donde suponemos que los estados ν_1 y ν_2 se propagan como partículas libres, con energías E_1 y E_2 , respectivamente. Para

energías altamente relativistas podemos hacer la aproximación

$$E_i = (pc^2 + m_i c^4)^{1/2} \sim pc + \frac{m_i^2 c^3}{2p}$$

Con un poco de álgebra es fácil ver que la probabilidad de encontrar un neutrino ν' a una distancia L del punto de producción (suponemos que se mueve a la velocidad de la luz, es decir que $L = ct$), cuando en $t=0$ tenemos un estado puro ν , es

$$P(\nu \rightarrow \nu') = |\langle \nu' | \nu(t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{c^3 \Delta m^2 L}{\hbar 4E_\nu} \right)$$

donde Δm^2 es el cuadrado de la diferencia de masas entre los dos estados de masa ν_1 y ν_2 . De ahí el nombre de oscilaciones que se da a este fenómeno cuyo origen es enteramente mecano-cuántico, como pone de manifiesto el factor c^3/\hbar . Las oscilaciones de neutrinos sondan, como puede verse, masas y mezclas. La longitud de oscilación viene dada por $(E/\Delta m^2)$.

En algunos experimentos la cantidad que se mide no es la probabilidad de aparición sino la de supervivencia $P(\nu \rightarrow \nu)$. Para el caso de sólo dos familias

$$P(\nu \rightarrow \nu) = 1 - P(\nu \rightarrow \nu')$$

La dependencia oscilante en Δm^2 de las ecuaciones anteriores hace que el método de oscilaciones sea el más sensible para explorar valores muy bajos de las masas de los neutrinos. Expresando Δm^2 en eV^2/c^4 , E en $MeV(GeV)$ y L en $m(Km)$, la ecuación de la oscilación se escribe

$$P(\nu \rightarrow \nu') = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right)$$

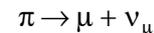
En un experimento determinado se controla la distancia L y la energía E de los neutrinos. Los resultados suelen representarse en un plano $(\sin^2(2\theta) - \Delta m^2)$. Un resultado positivo se traduce en un dominio de valores posibles en ese plano. Por el contrario, si no hay señal de oscilación, aparecerá todo un dominio de valores (correlacionados) en ese plano que están descartados. La fórmula anterior permite decir, para neutrinos de una cierta energía E , cuál es la distancia óptima L de observación si queremos ser sensibles a un valor determinado de Δm^2 . Por otra parte, el fenómeno de oscilaciones presenta una dependencia característica en L/E , que en principio es observable y permitiría excluir otro tipo de interpretaciones para el resultado de un experimento en que se observe un cambio de sabor de los neutrinos desde su producción hasta su observación.

Para concluir esta Sección, enfatizemos que el fenómeno cuántico de las oscilaciones de neutrinos presenta como condición necesaria y suficiente que (1) existan al menos dos neutrinos con masa definida no degenerada, es decir, con Δm^2 no nula, y (2) los estados de masa no sean los que intervienen en las interacciones débiles, es decir, que exista una mezcla no nula entre unos y otros ($\theta \neq 0$).

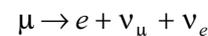
6. La primera indicación clara de la existencia de oscilaciones: el experimento SuperKamiokande de neutrinos atmosféricos

Tal como hemos dicho antes los rayos cósmicos primarios colisionan con los núcleos de la atmósfera produciendo partículas secundarias las cuales son en su mayoría piones (también se producen kaones y otros hadrones). La desintegración de los piones (y de los kaones) cargados, produce un flujo de neutrinos, casi todos de tipo muónico, tal como se indica en la Fig. 5.

Los neutrinos tienen energías que varían desde unos 100 MeV a varios GeV . Su frecuencia de interacción es del orden de 100/año para una masa del blanco del orden de 1 kilotonelada. Los muones producidos en la desintegración del pión

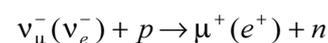
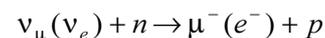


se desintegran a su vez produciendo dos neutrinos, uno de tipo electrónico y otro de tipo muónico,



(no estamos distinguiendo entre neutrinos y antineutrinos). Es decir, mientras que un neutrino electrónico se produce sólo de la desintegración del muón, los neutrinos muónicos se producen tanto en la desintegración de los piones como de los muones. Por lo tanto el cociente entre los flujos de ν_μ y ν_e en la superficie de la Tierra deberá ser 2, suponiendo que tanto el pión como el muón se desintegran en la atmósfera y el detector no distingue entre neutrinos y antineutrinos. Esa es la situación realista para neutrinos con energías menores que unos 3 GeV . A energías mayores, el fenómeno de dilatación temporal relativista para los muones es tan acentuado que muchos de ellos no llegan a desintegrarse antes de alcanzar la superficie de la tierra (estos son los que nos llegan como rayos cósmicos secundarios). En este caso el cociente entre los flujos de neutrinos muónicos y electrónicos aumenta, ya que los últimos no llegan a producirse. Los cálculos teóricos de los flujos de neutrinos atmosféricos tienen una incertidumbre del orden de 30%, pero la incertidumbre en la predicción del cociente entre los muónicos y electrónicos es mucho menor, del orden de 5%.

Los experimentos subterráneos han medido los flujos de neutrinos atmosféricos detectando las reacciones quasi-elásticas en núcleos



El resultado de estas medidas es que el cociente entre la relación ν_μ/ν_e medida y la predicha es del orden de 0.6, en vez de la unidad. Este problema ha estado acompañando a los físicos de partículas durante más de una década. Una interpretación posible es que los neutrinos de tipo muónico oscilan de manera que, cuando interactúan, lo hacen como neutrinos de otra especie (presumiblemente tauónicos, cuyas detecciones en el detector no se identifican como tales).

Pero hay otra medida que es mucho más sensible a la oscilación. La distancia L recorrida por los neutrinos atmosféricos desde el punto de su producción al detector varía enormemente con el ángulo de zénit con el que entran

en el mismo: desde unos 20 Km, para los que se producen en la atmósfera, “encima” del detector, hasta más de 12000 Km para los que se producen en la atmósfera de las antípodas del detector, los cuales atraviesan toda la tierra y entran en el detector desde “abajo”.

Si el detector es capaz de medir la dirección del neutrino, y por lo tanto el ángulo de zénit, es posible estimar la distancia recorrida por los neutrinos desde su punto de producción hasta el detector (Fig. 6). Fue esta una de las varias claves del éxito del detector SuperKamiokande. El detector consiste en un tanque enorme de agua muy pura con una capacidad de 50 kilotoneladas, de las que 32 se usan como detector propiamente dicho. En las paredes del tanque están instalados un total de 11146 fotomultiplicadores (con una cobertura geométrica del 40% del área) [7], que son capaces de detectar la luz Cherenkov producida por partículas cargadas que se mueven en el agua a más velocidad que la de la luz en el agua. En las reacciones quasielásticas anteriores lo que se produce es un electrón o un muón de alta energía, que se mueve en el agua a velocidades ultrarelativistas. El análisis de la luz detectada por los fotomultiplicadores permite distinguir entre electrones y muones, así como medir la dirección del movimiento de los mismos (Fig. 7). La dirección del neutrino está muy correlacionada con la del muón o electrón, tanto más cuanto más alta es la energía del mismo. De esta manera, el ángulo de zénit (o lo que es lo mismo L) se determina de manera más precisa cuanto mayor es la energía del neutrino.

Las medidas de las distribuciones de sucesos en función del ángulo del zénit son un camino extraordinariamente sensible para investigar oscilaciones de neutrinos con energías y distancias variables, sin tener necesidad de comparar con la relación de flujos predicha teóricamente. Este método fue el seguido por el detector SuperKamiokande en 1998. El resultado puede verse en la Fig. 8, en la que se muestra el número de sucesos medido como función del ángulo de zénit para neutrinos electrónicos y muónicos con energías del neutrino superiores al GeV. En las mismas figuras pueden verse las

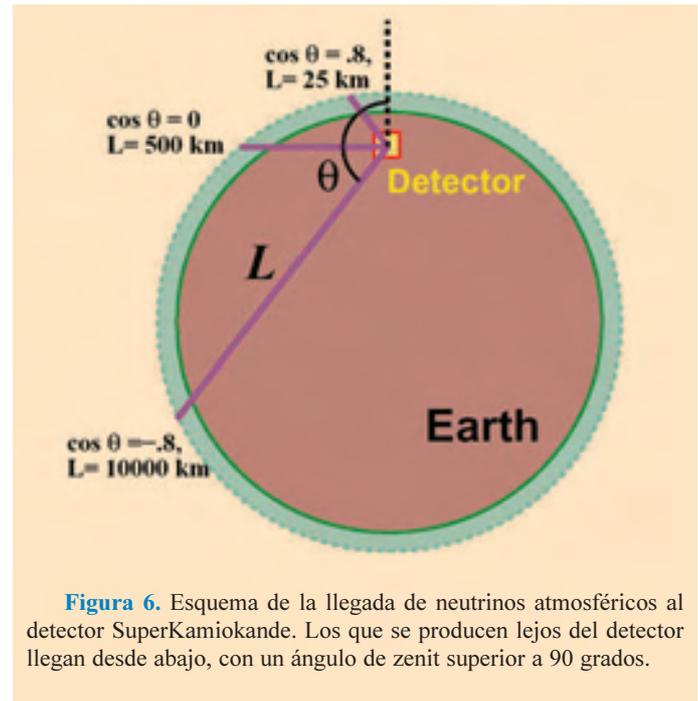


Figura 6. Esquema de la llegada de neutrinos atmosféricos al detector SuperKamiokande. Los que se producen lejos del detector llegan desde abajo, con un ángulo de zénit superior a 90 grados.

curvas que uno esperaría. Puede apreciarse que para los neutrinos de tipo electrónico no existe ninguna discrepancia. Sin embargo para los neutrinos de tipo muónico se ve que llegan muchos menos de los esperados, siendo el efecto tanto más acusado cuanto mayor es la distancia entre el punto de producción del neutrino y el detector.

Estas medidas de SK fueron la primera indicación clara de oscilaciones de neutrinos. La única interpretación de estos datos que ha resultado ser consistente es que los neutrinos muónicos se transforman en otra clase de neutrinos antes de llegar al detector, cuando se producen a distancias grandes. Los mismos datos nos indican que los neutrinos muónicos se transforman mayoritariamente en neutrinos distintos del electrónico, al menos para las distancias y energías que intervienen en estas medidas. Análisis posteriores, en los que no entramos, han llevado a que la interpretación más plausible es que los neutrinos muónicos oscilan a neutrinos tauónicos, de modo que la diferencia de masas relevante y la mezcla correspondiente valen

$$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} eV^2; \quad \tan^2 \theta = 1$$

Esa mezcla máxima entre dos especies de neutrinos causó una gran sorpresa ya que en el caso de las mezclas entre quarks, conocida desde hace tiempo, los parámetros de mezcla son siempre pequeños.

La oscilación de los neutrinos atmosféricos está siendo verificada por un experimento que también tiene lugar en Japón, llamado K2K. El experimento consiste en enviar un haz de neutrinos, preparado con un acelerador en el laboratorio KEK, en Tsukuba, al norte de Tokio, al detector

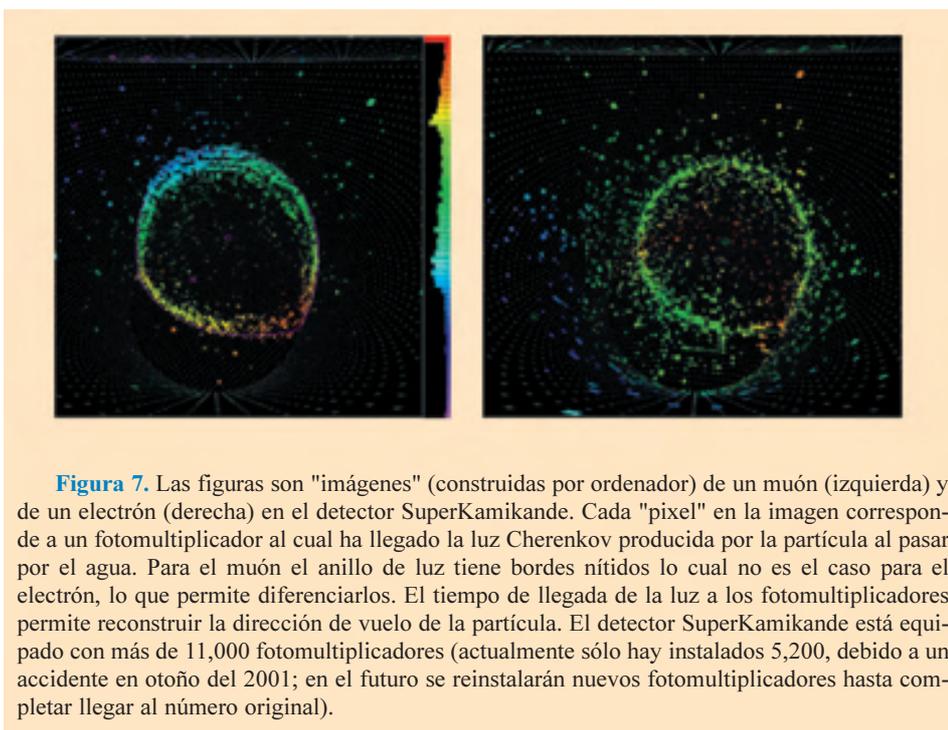


Figura 7. Las figuras son "imágenes" (construidas por ordenador) de un muón (izquierda) y de un electrón (derecha) en el detector SuperKamiokande. Cada "pixel" en la imagen corresponde a un fotomultiplicador al cual ha llegado la luz Cherenkov producida por la partícula al pasar por el agua. Para el muón el anillo de luz tiene bordes nítidos lo cual no es el caso para el electrón, lo que permite diferenciarlos. El tiempo de llegada de la luz a los fotomultiplicadores permite reconstruir la dirección de vuelo de la partícula. El detector SuperKamiokande está equipado con más de 11,000 fotomultiplicadores (actualmente sólo hay instalados 5,200, debido a un accidente en otoño del 2001; en el futuro se reinstalarán nuevos fotomultiplicadores hasta completar llegar al número original).

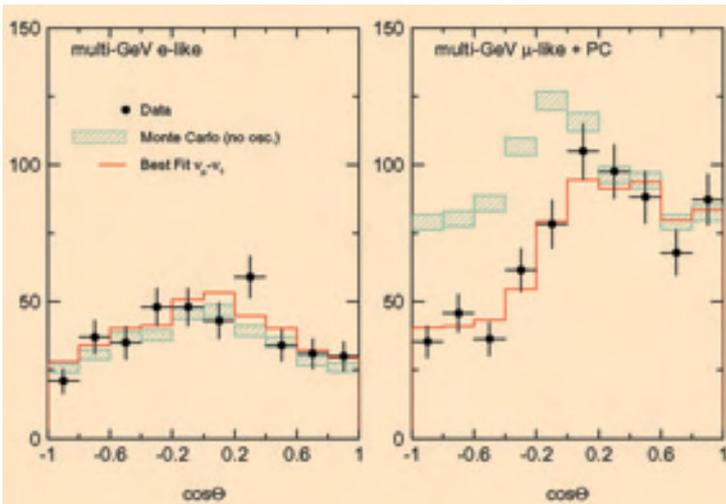


Figura 8. El número de interacciones de neutrinos electrónicos (izquierda) y muónicos (derecha) registrados en SuperKamiokande como función del ángulo de zenit. $\cos \theta = 1$ corresponde a neutrinos que inciden desde arriba en el detector (producidos cerca del mismo), mientras que $\cos \theta = -1$ corresponde a neutrinos producidos en las antípodas. Los cuadros (llamados Monte Carlo) corresponden a una simulación del número esperado en ausencia de oscilación, mientras que la línea continua nos da el número esperado con oscilación. Puede verse como esta curva se ajusta muy bien a los datos.



Figura 9. Esquema del experimento K2K en Japón. En él se envía un haz de neutrinos muónicos desde un acelerador, donde son producidos, al detector SuperKamiokande, situado a 250 Km de distancia. Este experimento está actualmente en marcha.

SuperKamiokande, situado a 250 Km. de distancia (Fig. 9). A estos experimentos, que utilizan la curvatura de la Tierra para detectar los neutrinos a larga distancia se les llama de “Long-Base-Line”, y K2K es el primero de ellos. El flujo de neutrinos detectados en SuperKamiokande se compara con el flujo medido en un detector cercano, en el propio laboratorio KEK. Los primeros resultados, obtenidos antes del accidente de SuperKamiokande [7], encontraron que en efecto no todos llegaban hasta SK, siendo el número de los que se “perdían” compatible con los parámetros de oscilación obtenidos a partir de los neutrinos atmosféricos. Este experimento ha comenzado a tomar datos de nuevo en enero de 2003.

7. La solución al Problema de Neutrinos Solares

Los experimentos que han estudiado los Neutrinos Solares hasta esta fecha son

- *El experimento de Homestake.*

Este experimento pionero ha sido discutido en la Sección 5. La detección de los neutrinos es indirecta y se realiza por métodos radioquímicos. El promedio sobre más de 20 años de toma de datos indica que la frecuencia de capturas viene dada por

$$R_{\text{exp}}(^{37}\text{Cl}) = 2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$$

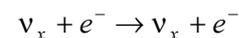
mientras que la frecuencia predicha es

$$R_{\text{teor}}(^{37}\text{Cl}) = 7.7 \pm 1.1 \text{ SNU}$$

Las unidades SNU (Standard Neutrino Unit) se refieren a la captura de neutrinos por el Cloro, 1 SNU es igual a 1 captura por segundo en una masa de 10^{36} núcleos.

- *SuperKamiokande*

Este es un experimento en tiempo real, utilizando el detector SuperKamiokande en Japón, descrito en la sección anterior. Los neutrinos solares se detectan cuando tiene lugar la dispersión elástica



donde x es predominantemente e ya que las interacciones para $x = \mu$ y $x = \tau$ están suprimidas por un factor de 1/6 aproximadamente. El umbral en la energía del neutrino para que resulte detectable es de alrededor de 5 MeV, por lo que este detector sólo es sensible a neutrinos provenientes de la desintegración del Boro en el Sol.

El electrón producido en la reacción también emite radiación Cherenkov, por lo que es posible detectarlo por el mismo método descrito anteriormente. Su dirección está correlacionada (aunque menos que en el caso atmosférico, al tener los neutrinos mucha menor energía) con la dirección del neutrino incidente. Esta propiedad fue utilizada por SuperKamiokande para demostrar el origen solar de los neutrinos.

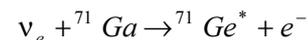
La relación entre el flujo de neutrinos detectado en SK y el predicho por el Modelo Solar Estándar tiene un valor de

$$0.45 \pm 0.02$$

claramente por debajo de la unidad.

- *Los experimentos de Galio*

Dos experimentos, GALLEX (situado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso en Italia) y SAGE (Situado en un túnel en Baksan, en Rusia) han medido la frecuencia de captura de neutrinos en la reacción



que tiene un umbral para la energía del neutrino de 0.23 MeV. Esta reacción se detecta también por métodos radioquímicos. La característica más importante de este método es su sensibilidad a los neutrinos pp del Sol, es decir, los de la reacción primaria y dominante (sección 4). GALLEX usa 30.3 toneladas de Ga disuelto en HCl . SAGE usa 57 toneladas de Ga metálico. La frecuencia promedio de capturas entre los dos experimentos es

$$R_{\text{exp}}(^{71}\text{Ga}) = 74 \pm 5 \text{ SNU},$$

mientras la predicción del Modelo Solar Estándar es

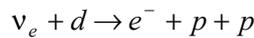
$$R_{teor} ({}^{71}Ga) = 129 \pm 8 SNU,$$

La discrepancia entre el flujo de neutrinos solares detectados en estos tres experimentos y el flujo predicho por el modelo del Sol constituyó históricamente el “Problema de Neutrinos Solares”. Como hemos visto, los factores de discrepancia son distintos en los tres experimentos. Debemos recordar que los tres experimentos exploran el flujo de neutrinos solares a distintas energías.

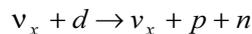
- *El experimento de SNO*

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury, en Canada, está instalado en una mina muy profunda (2 Km) cerca de Sudbury, Ontario. El detector contiene 1 Kilotonelada de agua pesada de alta pureza, rodeada por 8 Kilotoneladas de agua ultra-pura que se utiliza como blindaje (ver fig. pág. 23).

En agua pesada, la reacción de detección por interacciones débiles cargadas es



donde d es un deuterón (núcleo de deuterio, formado por un estado ligado neutrón-protón) y cuyo umbral de energía del neutrino es de 5 MeV. El experimento también mide la dirección del neutrino, aunque no con buena precisión. La característica principal de SNO es su capacidad para detectar neutrinos utilizando las interacciones débiles neutras



que tiene la misma sección eficaz para las tres especies de neutrinos ($x = e, \mu, \tau$) y, por tanto, no los distingue. El umbral de esta reacción es de 2.22 MeV, la energía de enlace del deuterón. Con esta detección se mide por lo tanto el flujo total de neutrinos procedentes de la desintegración de 8B del Sol, independientemente de su posible conversión entre las distintas especies de neutrinos. Una diferencia significativa entre los flujos de neutrinos medidos por las dos reacciones es una prueba inequívoca de las oscilaciones de neutrinos. Así pues, se trata de medir la relación

$$\frac{\text{Corrientes Cargadas}}{\text{Corrientes Neutras}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau}$$

El resultado, presentado por SNO en la primavera de 2002, fue

$$\text{Flujo CC}(\nu_e) = 1.76 \pm 0.11 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Flujo CN}(\nu_x) = 5.09 \pm 0.64 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

De ahí se puede extraer que hay un flujo de aparición de neutrinos ν_μ y ν_τ , no producidos en el Sol, con valor

$$\text{Flujo}(\nu_\mu, \nu_\tau) = 3.41 \pm 0.66 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Esto constituye una prueba contundente, por muchas desviaciones estándar, del cambio de sabor de los neutrinos en su viaje desde el Sol a la Tierra!

Se pueden contemplar dos resultados muy importantes: a) Que el valor de Flujo de corrientes neutras ν_x está de acuerdo con el flujo predicho por el Modelo Solar, es decir, que J. Bahcall, padre del Modelo Solar Estándar, tenía razón; b) Que el flujo detectado de neutrinos electrónicos es del orden de 1/3 del total, es decir, que R. Davis también tenía razón. Que el resultado de SK sea del orden de 1/2 se entiende por una pequeña contribución de ν_μ, ν_τ en el método de detección en ese experimento. El “problema” de las discrepancias de 26 años de observaciones y cálculos quedaba así brillantemente resuelto.

Un análisis de oscilaciones de neutrinos, global para todos los experimentos discutidos en esta Sección, indica que hay una oscilación entre ν_e y una combinación de $\nu_\mu - \nu_\tau$, descrita por los parámetros [8]

$$\Delta m^2 = 8 \times 10^{-5} eV^2$$

y una mezcla que, aunque grande, no es la máxima. La oscilación observada aquí es distinta de la observada mediante neutrinos atmosféricos.

En Diciembre de 2002, el experimento KamLAND, situado en la misma mina que el experimento SuperKamikande, ha detectado los antineutrinos procedentes de varios reactores nucleares en Japón, situados a un promedio de distancia de unos 180 Km. El flujo detectado es menor que el esperado, lo cual se interpreta como una oscilación de dichos antineutrinos. Los parámetros de oscilación que pueden extraerse de estos datos son los mismos que se obtienen de los neutrinos solares, y los resultados de KamLAND son, en efecto, totalmente compatibles con los de los experimentos solares. Un nuevo experimento en el laboratorio del Gran Sasso, BOREXINO, comenzará pronto a tomar datos, con el principal objetivo de detectar neutrinos solares provenientes del Be . Este experimento también será una nueva prueba sobre la validez de la oscilación de los neutrinos solares.

8. Perspectivas futuras en física de neutrinos

Desde el anuncio de la señal de oscilación en neutrinos atmosféricos, realizada por la colaboración SuperKamio-kande en 1988, hasta hoy, el progreso en los experimentos y en el entendimiento de toda la fenomenología de las oscilaciones ha sido ciertamente impresionante. Hemos visto que hay evidencia convincente y consistente de oscilaciones de neutrinos a partir de los datos experimentales de neutrinos atmosféricos y solares. En una primera aproximación, las dos oscilaciones corresponden a dos fenómenos distintos: los resultados atmosféricos están asociados a una oscilación entre el neutrino muónico y el tauónico; los resultados solares a una oscilación entre el neutrino electrónico y una combinación de los otros dos.

El análisis de los datos solares y atmosféricos indica que existen tres estados de masa, dos de los cuales tienen masas muy cercanas entre sí, separadas de una tercera masa (Fig. 10). Esta pauta en las masas hace que las oscilaciones que ocurren en los neutrinos solares y atmosféricos nos den información acerca de esencialmente un solo ángulo de mezcla, que es distinto en uno y otro caso. Los valores de estos dos ángulos de mezcla son cercanos a los máximos posibles. Para describir la situación más general entre tres especies de neutrinos se necesitan, sin embargo, tres ángulos de mezcla,

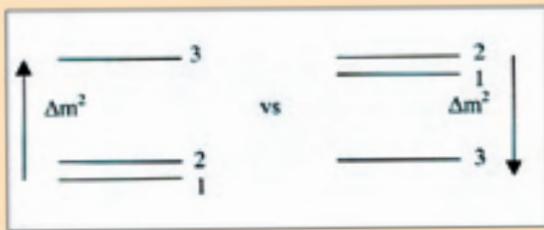


Figura 10. Esquema de las pautas posibles de las masas de los neutrinos que se deducen de los datos. Los datos actuales no pueden discernir entre las dos posibilidades.

pudiéndose asociar el tercero al acoplamiento entre las dos situaciones, atmosféricos y solares. Si este acoplamiento no fuese nulo, entonces se podría manifestar además una violación de la simetría entre materia y antimateria para los leptones. Tal asimetría permitiría entender la razón de que el Universo actual, evolucionado y frío, sólo contenga materia y no materia y antimateria de manera simétrica. Está claro que la determinación del tercer ángulo de mezcla, y la de la fase que caracterizaría la violación de la simetría entre neutrinos y antineutrinos, son los objetivos más importantes de un programa futuro de experimentos de neutrinos. Otra cuestión de gran relevancia, no conocida hasta ahora, es la pauta de las masas, entre las dos posibles representadas esquemáticamente en la Fig. 10. Todas estas medidas podrían arrojar alguna luz sobre lo que es hoy día quizá el primer problema de la física de partículas: el origen de la masa [9].

Una manera de medir el tercer ángulo de mezcla es a través de la oscilación de neutrinos muónicos a neutrinos electrónicos. Con este objetivo existen proyectos de Long-Base-Line tanto en Japón como en EE.UU. En Japón el proyecto en estudio consiste en enviar un haz muy intenso de neutrinos muónicos desde un acelerador de protones, en construcción en Tokai (al norte de Tokyo), hasta el detector SuperKamiokande, situado a unos 300 km de distancia. En EE.UU. el proyecto en preparación, llamado NUMI, consiste en enviar un haz desde el laboratorio Fermi National Accelerator Laboratory, situado cerca de Chicago, a un detector situado en una antigua mina de hierro en el estado de Minnesota, a unos 730 km de distancia. En Europa también existe un proyecto de Long Base-Line en preparación, en el que se enviará un haz de neutrinos desde el CERN, en Ginebra, hasta el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, situado, curiosamente, también a unos 730 km del CERN. El haz está optimizado para tratar de observar neutrinos tauónicos en los detectores que se instalarán en el Gran Sasso, los cuales se producen casi con total certeza en la oscilación de los neutrinos muónicos.

Un proyecto mucho más ambicioso que los anteriores es el de la llamada Neutrino Factory, que por ahora está en fase conceptual. En la Neutrino Factory se acelerarían muones, los cuales, al desintegrarse en una zona recta, producirían un haz de neutrinos que puede llegar a ser muy intenso. La carga del muón determina si se trata de neutrinos muónicos/antineutrinos electrónicos (μ^-) o viceversa (μ^+).

Pero quizás la frontera de la física de neutrinos esté en la posibilidad de observar fuentes cósmicas. Tal como decíamos al comienzo de este artículo, las estrellas y las explosiones de supernovas son fuentes muy copiosas. Sin embar-

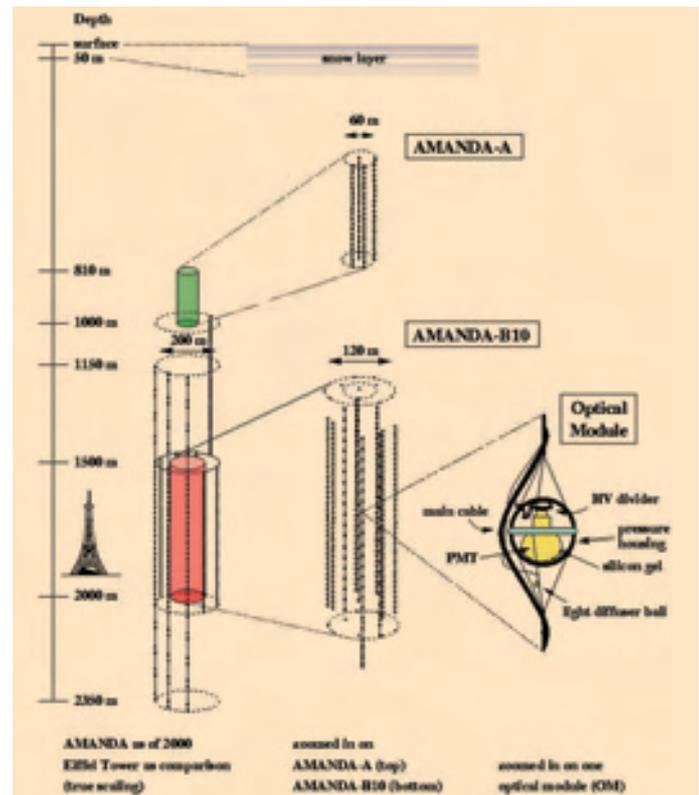


Figura 11. Esquema del detector AMANDA en la Antártica. Este detector consiste en varias columnas de fotomultiplicadores colocados a gran profundidad en el hielo de la Antártica, justo en el Polo Sur geográfico. El hielo tiene allí una profundidad de casi tres kilómetros y es muy transparente a la luz Cherenkov producida por partículas cargadas que atraviesan el hielo.

go, dada la pequeñísima probabilidad de interaccionar que tienen los neutrinos, especialmente los de muy baja energía, la única observación de neutrinos procedentes de fuera del sistema solar realizada hasta ahora ha sido la de los de la Supernova 1987A. No es realista, al menos por ahora, la detección de neutrinos procedentes de otras supernovae de fuera de nuestra galaxia y sus satélites. Sabemos sin embargo que a la Tierra llegan partículas de altísima energía procedentes del cosmos, los rayos cósmicos. ¿De donde vienen?, ¿qué mecanismos los acelera?. La respuesta puede estar en la observación de neutrinos de muy alta energía, los cuales pueden producirse en los mismos procesos que producen los rayos cósmicos, o en las colisiones de estos con otra materia o radiación. A diferencia de los rayos cósmicos cargados, los neutrinos apuntan a la fuente que los produjo y, a diferencia de la luz u otra radiación electromagnética, los neutrinos no son absorbidos por la materia interestelar o intergaláctica entre la fuente y nosotros, excepto a altísimas energías del orden de los EeV .

En la actualidad hay un proyecto en marcha con el objetivo de observar neutrinos cósmicos de muy alta energía. El proyecto utiliza el hielo de la Antártida a gran profundidad como blanco de los neutrinos (Fig. 11). El hielo es extremadamente transparente, siendo la longitud de atenuación de la luz, en la zona visible, de unos 100 metros. Cuando un neutrino de muy alta energía interacciona en el hielo, produce partículas cargadas también muy energéticas, las cuales se

mueven en el hielo a velocidad mayor que la de la luz en el mismo. Ello da origen al fenómeno de producción de luz Cherenkov, gran parte de la cual está en el rango visible. La idea es detectar esta luz en fotodetectores situados en el hielo. La gran transparencia del mismo hace que la densidad de fotodetectores pueda ser pequeña, con lo cual es posible instrumentar un gran volumen de hielo. Los fotodetectores miden el tiempo de llegada de la luz y su intensidad con lo que es posible estimar la dirección de llegada del neutrino y su energía. El proyecto en marcha tiene por objetivo el instrumentar 1 km³ de hielo, y recibe el nombre, muy apropiado, de Ice Cube. Este experimento es la continuación de otro, llamado AMANDA, que ya ha demostrado que el método funciona, mediante la detección clara de neutrinos atmosféricos. El proyecto Ice Cube ha sido aprobado en el 2001 por la National Science Foundation de EE.UU.

En la misma línea existen varios proyectos para realizar el mismo tipo de experimentos, pero utilizando no el hielo de la Antártida sino el agua del mar (o de un lago) a gran profundidad. El agua profunda también tiene las propiedades ópticas apropiadas para este tipo de experimentos (de hecho quizás mejores que las del hielo). Un proyecto en marcha está teniendo lugar en el Lago Baikal, en Siberia. Este lago es muy profundo y durante el invierno su superficie está helada, por lo que puede ser utilizada como plataforma desde la cual se introducen en el agua fotomultiplicadores. En este experimento ha sido también posible observar neutrinos atmosféricos.

En el Mediterráneo existen dos proyectos, uno llamado ANTARES, cerca de Toulon, Francia, y otro llamado NESTOR, cerca de Pylos en Grecia. Estos proyectos tienen como objetivo, en los próximos dos o tres años, el instrumentar la décima parte de un km³, como paso previo a un detector futuro, con un volumen que también será del orden del km³. Tanto Ice Cube como los detectores en el agua tienen que restringir sus observaciones a neutrinos que proceden de "abajo" (excepto para altísimas energías), para no confundir las señales con las producidas por los rayos cósmicos, algunos de los cuales penetran hasta zonas muy profundas. Por ello se requieren detectores en el Hemisferio Norte para mirar hacia al centro de nuestra galaxia, algo que no es posible con el detector en el Polo Sur (esto es lo opuesto a lo que ocurre con los observatorios astronómicos). Quizás una de las posibilidades más intrigantes de estos detectores sea la de descubrir fuentes "ocultas". En estas fuentes hipotéticas la

densidad de materia sería tan alta que solamente los neutrinos escaparían en cantidades suficientes. De hecho en el Sol sucede un fenómeno parecido. La luz que vemos no es la producida en el núcleo, sino en la superficie. La energía que se produce en las reacciones de fusión antes mencionadas tarda en promedio un millón de años en llegar a la superficie. Sin embargo los neutrinos que vemos sí que han sido producidos en el núcleo, 8 minutos y medio antes de ser detectados en la Tierra. Sorprendentes los neutrinos!

9. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Manuel Aguilar-Benítez, a Francisco J. Yndurain y al Consejo Editorial de la Revista la invitación para escribir este artículo. El trabajo de J.B. ha sido financiado con el Proyecto FPA-2002-00612, el de E.F. con el proyecto FPA-2001-C03-01.

Referencias

- [1] F.J. YNDURAIN, *Revista Española de Física*, **16** (5), 2002.
- [2] M. AGUILAR-BENÍTEZ, E. FERNÁNDEZ, A. FERRER, *Revista Española de Física*, **15** (5), 2001 y **5** (1), 1991.
- [3] A. MORALES, *Revista Española de Física*, **9** (1), 1995.
- [4] A. MORALES, *Revista Española de Física*, **9** (4), 1995.
- [5] La existencia de varias familias de partículas, con las mismas propiedades excepto la masa, es un problema no entendido, que ha preocupado a los físicos desde el descubrimiento del muón en los años treinta. Ello ha quedado reflejado en la famosa pregunta de I. Rabi referente al muón: "¿quién ha pedido eso?". El problema es hoy más acuciante que nunca.
- [6] F. J. YNDURAIN, *Revista Española de Física*, **13** (5), 1999.
- [7] En noviembre del 2001, cuando estaba siendo llenado de agua después de una operación de mantenimiento, se produjo un accidente en el detector SuperKamiokande, y todos los fotomultiplicadores por debajo del nivel del agua en aquel momento se rompieron. Los fotomultiplicadores que no se rompieron, menos de la mitad, fueron redistribuidos en la superficie y el detector comenzó de nuevo a tomar datos en diciembre de 2002.
- [8] J. BAHCALL, C.M. GONZÁLEZ-GARCÍA Y C. PEÑA-GARAY, *JHEP* **07**,054 (2002).
- [9] J. BERNABEU, "Neutrino Overview", *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **114**, 125 (2003).

Jose Bernabeu

está en el Departamento de Física Teórica de la Universidad de Valencia y en el Instituto de Física Corpuscular

Enrique Fernández

está en el Departamento de Física de la Univ. Autónoma de Barcelona y en el Inst. de Física de Altas Energías de Barcelona

Prismas Casa de las Ciencias a la divulgación 2003

Bases de la convocatoria:

Premios:

Se concederán los "Prismas de Bronce" a los mejores trabajos de divulgación científica en las modalidades de multimedia, libros editados, textos inéditos y artículos periodísticos. Los premios en las cuatro modalidades tienen las dotaciones y están sujetos a las condiciones que se especifican en cada caso.

Contenido y presentación de los trabajos

Los trabajos presentados versarán sobre cualquier tema en relación con las ciencias físicas y naturales, tanto en sus aspectos generales, como en cualquiera de sus ramas o aplicaciones prácticas, incluyendo biografías de científicos e historia de la ciencia, que contribuyan a la mejor comprensión de las ideas, actitudes y procesos científicos. Cada trabajo irá acompañado de una ficha de participación debidamente cubierta y firmada. Serán enviados a:

Casa de las Ciencias

Parque de Santa Margarita, s/n. 15005 La Coruña. España.

Para más información:

Teléfono: 34-981- 189 846. Telefax: 34- 981-277 277

Internet: <http://www.casaciencias.org/premios> Correo electrónico: premios@casaciencias.org