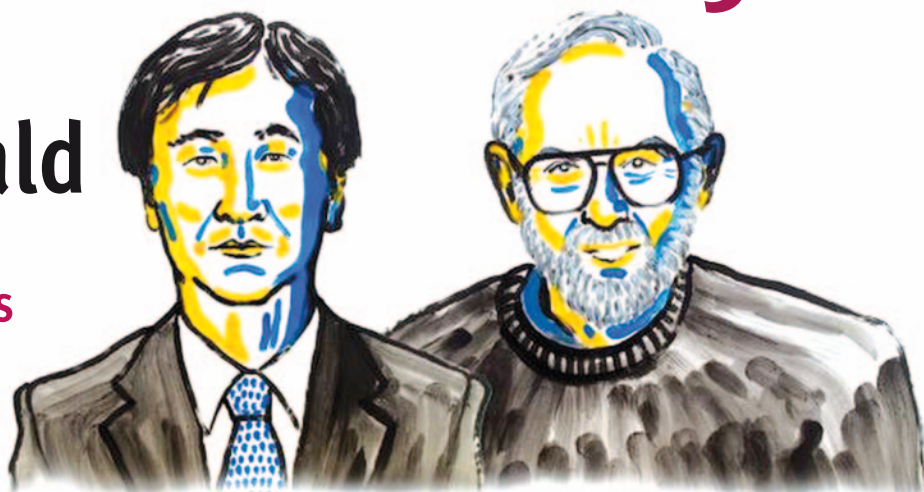


Premio Nobel de Física 2015

T. Kajita y
A. B. McDonald

El descubrimiento de las
oscilaciones de neutrinos

Juan José
Hernández Rey



Illustrations: Niklas Elmehed, Nobel Prize Medal: © © The Nobel Foundation, Photo: Lenn

El premio Nobel de Física 2015 ha sido concedido al físico japonés Takaaki Kajita, que fue líder del experimento SuperKamiokande, y al canadiense Arthur B. McDonald, líder del Sudbury Neutrino Observatory. Ambos experimentos mostraron que los neutrinos producidos en la atmósfera terrestre y en el núcleo del Sol, respectivamente, cambiaban de tipo (o “familia”) durante su trayecto a la superficie terrestre. La explicación más plausible era que se trataba de un fenómeno de oscilación cuántica y, por tanto, que los neutrinos debían de tener masa, contradiciendo lo que se había venido suponiendo hasta entonces.

Faltan neutrinos

A mediados de los años 60, Raymond Davis, un competente radioquímico del laboratorio de Brookhaven en Estados Unidos, estimulado por el físico teórico John Bahcall, llevó a cabo el que terminaría por convertirse en un famoso experimento, seminal, “el de la mina de Homestake”, que le reportaría a Davis el premio Nobel de Física en 2002. Su finalidad era detectar los neutrinos producidos en las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en el Sol. El experimento, localizado para reducir la radiación cósmica a casi 1.500 m de profundidad en la mina de Homestake (Dakota del Sur, EE. UU.), consistía en unos 400.000 litros de percloroetileno, en el que se detectaban los neutrinos gracias a su captura por parte de un isótopo del cloro, el ^{37}Cl (el percloroetileno es un líquido utilizado para la limpieza en seco: un chascarrillo que corrió entre los físicos de la especialidad es que las lavanderías de Dakota del Sur se quejaron al gobierno federal de la escasez del producto debido al experimento de Davis).

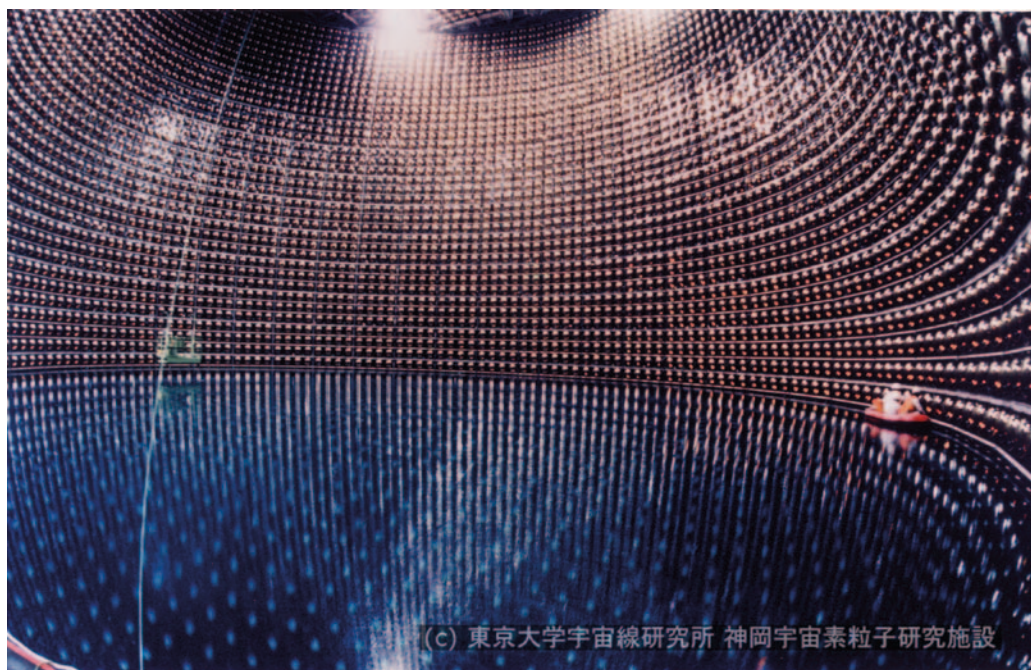
Sus primeros resultados, publicados en 1968, indicaban que el número de neutrinos detectados era aproximadamente un tercio de los esperados según los cálculos del propio John Bahcall. Nadie pareció particularmente sorprendido por esta discrepancia: el método experimental empleado era relativamente complejo y sometido a grandes incertidumbres. A modo de ejemplo, la propuesta de utilizar cloro para detectar neutrinos surgió del físico Bruno Pontecorvo, pero el que R. Davis se decidiera a utilizarlo para los neutrinos solares se

debió a que unos cálculos posteriores de John Bahcall mostraron que la probabilidad de captura de neutrinos por el ^{37}Cl era veinte veces mayor de lo estimado previamente. En el experimento se capturaba en promedio un neutrino cada dos días. Estos neutrinos se registraban contando los átomos de ^{37}Ar que se creaban, lo que da una idea de las dificultades e incertidumbres a las que tenía que hacer frente el experimento.

Por otro lado, el modelo del Sol no había sido comprobado experimentalmente con precisión, así que la discrepancia podía también deberse al conocimiento limitado que se tenía de los mecanismos de fusión termonuclear. Por ejemplo, como el umbral de energía a partir del cual el experimento detectaba los neutrinos era de 0,814 MeV, los neutrinos observados procedían principalmente de la reacción nuclear que da lugar a un isótopo del boro (^{10}B) y a su posterior desintegración. Esta reacción no es el proceso principal de producción de neutrinos en el Sol (representan poco más del uno por mil de todos los neutrinos generados) y además su probabilidad de ocurrencia depende como la potencia 25 (¡veinticinco!) de la temperatura del “horno solar”. Una ligera desviación en la temperatura con respecto a lo calculado por el modelo solar podía explicar fácilmente el déficit de neutrinos. La perseverancia de R. Davis en mostrar que la incertidumbre experimental en sus medidas estaba por debajo de la discrepancia observada y, por otro, la de John Bahcall en disipar cualquier duda sobre las predicciones del modelo solar convencieron a la comunidad científica de que efectivamente había una diferencia significativa, que acabó siendo conocida como “el problema de los neutrinos solares”. Los últimos resultados de Homestake fueron publicados en 1998, después de casi 25 años de tomas de datos y no dejaban lugar a dudas de que llegaban del Sol menos neutrinos de los esperados. Por otro lado, la heliosismología, el estudio de la propagación de las ondas en el Sol, parecía confirmar el modelo del Sol desarrollado y refinado por Bahcall y otros.

Se ahonda el misterio

Para poder detectar los neutrinos emitidos en la reacción principal en el Sol, que es la de fusión protón-protón, se lle-



Montaje de los fotomultiplicadores de SuperKamiokande en junio de 1995.

varon a cabo los experimentos Gallex y GNO en el laboratorio italiano del Gran Sasso y el experimento SAGE en el laboratorio ruso de Baksan. Estos experimentos utilizaban galio como blanco, cuya energía umbral de captura de neutrinos es de 0,233 MeV y, por tanto, es sensible a los neutrinos de la reacción principal, que llegan a tener una energía máxima de alrededor de 0,4 MeV. Ambos experimentos observaron de nuevo un déficit de neutrinos, en este caso en torno al 50 %. Los primeros resultados de SAGE fueron publicados en 1991 y los últimos en 2009. Los primeros de Gallex se publicaron en 1992, y los últimos en 1997, aunque el experimento continuó con su sucesor, GNO, que tomó datos hasta 2003. No es precisamente perseverancia lo que ha faltado en esta historia de los neutrinos desaparecidos.

Una de las características de los experimentos radioquímicos anteriores es que sólo pueden detectar neutrinos electrónicos. Los sucesos que se producen son “de corriente cargada”: el neutrino se convierte en su leptón cargado asociado (el neutrino electrónico en un electrón, el muónico, en un muón, etc.). Como quiera que la energía máxima de los neutrinos solares es menor que 20 MeV, los neutrinos muónicos y tauónicos, de producirse, no tendrían energía suficiente para crear un muón (que tiene una masa de 105 MeV) o un leptón tau (cuya masa es de 1.777 MeV) y, por tanto, no podrían ser detectados.

El experimento japonés Kamiokande fue diseñado originalmente para buscar la desintegración del protón, predicha por algunas teorías de Gran Unificación, y fue remodelado algún tiempo después para detectar neutrinos solares (empezó a hacerlo en 1986). El detector, situado a unos 1.000 metros de profundidad en la mina de Mozumi en Japón, era básicamente una vasija que contenía unas 700

toneladas de agua, monitorizadas por detectores muy sensibles a la luz llamados fotomultiplicadores. La reacción que este tipo de detector observa es la interacción de un neutrino con un electrón. La técnica de detección empleada, a saber la observación de la luz Cherenkov que produce el electrón al atravesar el agua, tiene la ventaja de que puede determinar, aunque con una incertidumbre relativamente alta, la dirección de llegada del neutrino a partir de la del electrón observado. El experimento, que proporcionó los primeros resultados en 1987, mostró efectivamente que

la señal procedía en su mayoría de la dirección del Sol (su líder, Masatoshi Koshiba, recibió el premio Nobel en 2002, junto con R. Davis). Aunque en este caso la interacción neutrino-electrón tiene lugar para los tres tipos de neutrinos, es preponderante para el neutrino electrónico (84 %). Posteriormente, el experimento sucesor, SuperKamiokande, que contiene 50.000 toneladas de agua, continuó la investigación a partir de 1996. En ambos detectores se observó de nuevo un déficit, esta vez de algo más de la mitad de los esperados. Debido a los umbrales relativamente altos de ambos experimentos (7 MeV para Kamiokande y 5 MeV para SuperKamiokande) sólo podían observar los neutrinos procedentes de la cadena de fusión que da lugar al ^8B .

Oscilaciones de neutrinos

Las propuestas para explicar el déficit de neutrinos fueron muy numerosas y variadas, muchas de ellas basadas en un funcionamiento del Sol distinto al que describía el modelo estándar solar (a modo de anécdota: Stephen Hawking propuso en 1971 que en el centro del Sol podría existir un pequeño agujero negro que modificase el número de neutrinos que se emitían). No obstante, ya desde el principio, una de las explicaciones que se manejaron fue la de que las familias de neutrinos se transformaban entre sí, y que esa “oscilación” daba lugar a un déficit aparente al ser detectados sólo los neutrinos de una sola de las familias.

En 1957, el prolífico físico B. Pontecorvo había sugerido que los neutrinos y anti-neutrinos podían oscilar entre sí, como se sabía que lo hacían los kaones neutros. Al poco tiempo de que se descubriese experimentalmente que los neutrinos asociados a las reacciones del electrón y del muón eran distintos (L. Lederman, M. Schwartz y J. Steinberger, 1962; premios Nobel en 1982), los físicos japone-

ses Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata desarrollaron el marco teórico de las oscilaciones entre dos familias de neutrinos, marco que fue sometido en 1967 a una ulterior elaboración por parte de B. Pontecorvo. En 1978, L. Wolfenstein señaló que la presencia de materia podía modificar sustancialmente las oscilaciones, efecto que fue desarrollado posteriormente por S. Mikheyev y A. Smirnov. De hecho, dadas las altas densidades de electrones en el Sol, este efecto resultaba particularmente importante para los neutrinos solares de más energía.

Para confirmar la hipótesis de que eran las oscilaciones las que estaban produciendo un déficit de neutrinos electrónicos era necesario poder medir el flujo total de neutrinos, y por tanto, el de las otras dos familias, los neutrinos muónicos y tauónicos.

El Observatorio de neutrinos de Sudbury (SNO)

En 1984, H. Chen, de la Universidad de California en Irvine, propone usar deuterio como blanco para detectar los neutrinos solares. Su ventaja frente al hidrógeno es que las tres familias de neutrinos interaccionan con la misma probabilidad en el deuterio a través de sucesos de “corriente neutra”, aquellos en que el neutrino sale inalterado de la interacción, es decir sin convertirse en su correspondiente leptón cargado. Lo hace disociando el núcleo de deuterio en un protón y un neutrón, lo que requiere una energía de poco más de 2 MeV. Por otro lado, los neutrinos electrónicos (y sólo ellos) pueden interaccionar con el neutrón del deuterio en un suceso de “corriente cargada”, en el que el neutrino se convierte en un electrón y el neutrón en un protón. Esta reacción puede medir el flujo de neutrinos electrónicos por separado. Finalmente, las tres familias pueden tener sucesos de interacción con los electrones de los átomos del agua, pero principalmente los neutrinos electrónicos. En resumen, gracias al deuterio se podía medir, por un lado, el flujo de los tres tipos de neutrinos juntos y por otro, el de los electrónicos por separado.

El Sudbury Neutrino Observatory, situado a 2.100 m de profundidad en la mina Creighton en Sudbury (Ontario, Canadá) empezó a tomar datos en 1999. Consistía en una vasija que contenía unas mil toneladas de agua pesada (es decir, con deuterio, en vez de hidrógeno) que era monitorizada por unos diez mil fotomultiplicadores. Desde el punto de vista experimental, una de las cuestiones más críticas era cómo detectar la interacción de corriente neutra en la que el protón y el neutrón del deuterio se disociaban. Esto fue posible gracias a la observación del neutrón liberado. En una primera etapa se llevó a cabo simplemente a través del proceso de captura del neutrón por parte del propio deuterio, que da lugar a un rayo gamma de algo más de 6 MeV. Sin embargo, este es un proceso poco eficiente y la energía liberada estaba apenas

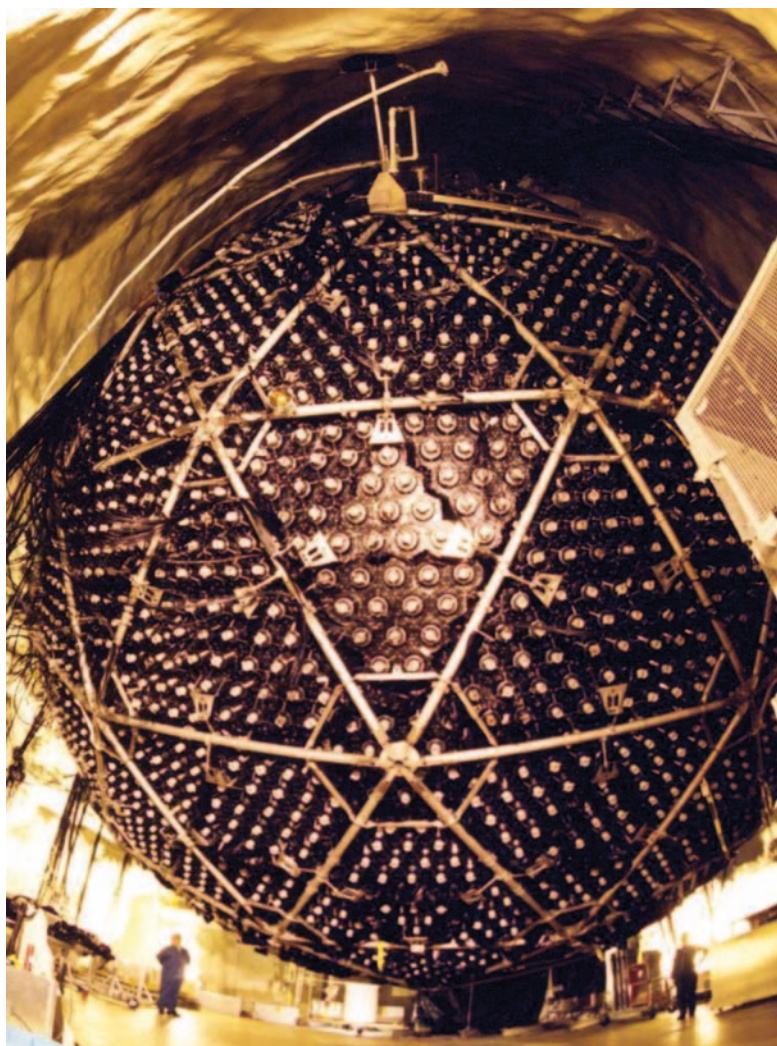
por encima del umbral de funcionamiento del detector, que era de 5 MeV. Así pues, en una segunda fase, se añadieron dos toneladas de sal común (ClNa), ya que la tasa de captura del neutrón en el cloro es mayor y el rango de energías del gamma liberado llega hasta los 8,6 MeV. Finalmente, en una tercera fase se retiró la sal y se instalaron contadores de neutrones que utilizaban helio-3.

Los resultados que la colaboración SNO fue proporcionando desde el año 2002 con los datos de las distintas fases eran coherentes entre sí y conclusivos: el número de sucesos de corriente neutra observados en los que, recordemos, se registran los tres tipos de neutrinos, coincidían con el flujo predicho por el modelo solar. Es decir, los neutrinos no desaparecían, se transformaban unos en otros. Aún más, el número de sucesos de corriente cargada que, como hemos dicho, son sólo producidos por neutrinos electrónicos, mostraban un déficit respecto al flujo total esperado. Los neutrinos electrónicos desaparecían, pero se convertían (oscilaban) en las otras dos familias.

Neutrinos atmosféricos, tu quoque?

La atmósfera está siendo continuamente bombardeada por rayos cósmicos, protones en su mayor parte y, en menor proporción, partículas alfa y nú-

Vista exterior de la estructura de soporte de los fotomultiplicadores de Sudbury Neutrino Observatory.



cleos más pesados. Cuando estas partículas interactúan con los núcleos de la atmósfera producen una cascada de hadrones (partículas sometidas a la interacción fuerte). En las desintegraciones de estos hadrones se producen neutrinos. La mayoría de estos neutrinos proceden de piones cargados, que se desintegran en un neutrino muónico y un muón, que a su vez se desintegra en un electrón, un neutrino electrónico y uno muónico. Por tanto, esta cadena de desintegración produce el doble de neutrinos muónicos que de electrónicos. Aunque esta relación cambia un poco al aumentar la energía de los neutrinos (porque entonces los piones interactúan antes de decaer y además los neutrinos pueden proceder también de la desintegración de kaones), lo cierto es que para un amplio rango de energías, desde el GeV a las decenas de GeV, esta relación es un factor 2 (las simulaciones detalladas muestran que es así con una precisión del 5 %). Varios experimentos habían dado indicaciones de que el valor observado se desviaba de ese valor esperado, pero fue SuperKamiokande quien reportó en 1998 de forma muy clara que ese cociente variaba dependiendo de la dirección de llegada de los neutrinos y de su energía. Este experimento observó que mientras que el número detectado de neutrinos electrónicos coincidía con los esperados, el de neutrinos muónicos se desviaba notablemente. A bajas energías, faltaban aproximadamente la mitad en todo el rango de ángulos de llegada. A altas energías, el número de los que procedían de arriba coincidía con las expectativas, pero de los que procedían de abajo faltaban la mitad. Esto sugería de forma clara que se estaban produciendo oscilaciones, porque eso es en líneas generales lo que uno esperaría de tal fenómeno. Efectivamente, las oscilaciones dependen del cociente entre la distancia recorrida y la energía del neutrino. Los neutrinos que proceden de la parte alta de la atmósfera recorren como máximo unos 15 kilómetros de distancia (el grosor de la atmósfera), mientras que los procedentes del otro lado de la Tierra pueden recorrer distancias de hasta 13.000 kilómetros (el diámetro de la Tierra). Todo parecía indicar, aunque SuperKamiokande no lo podía comprobar, que los neutrinos muónicos se estaban convirtiendo en tauónicos, puesto que por una parte llegaban menos muónicos de los esperados y por otra no había un incremento de los electrónicos. Era de nuevo un fenómeno de oscilación, como en el caso de los neutrinos solares.

Desde entonces, se han sucedido una larga serie de experimentos, usando tanto haces de neutrinos como neutrinos procedentes de reactores, que han medido los parámetros que determinan las oscilaciones de neutrinos, básicamente tres ángulos de mezcla y dos diferencias de las masas al cuadrado de los neutrinos (dejando a un lado las fases asociadas a una posible violación de la simetría CP). Es imposible describir aquí todo el ingente trabajo que se ha venido realizando tanto teórica como

experimentalmente desde entonces. Digamos a modo de resumen que la precisión con la que estos parámetros se han medido, aunque aún lejos de la correspondiente del sector de los quarks, está entre el 5 % y 10 % de error relativo, una verdadera hazaña teniendo en cuenta la dificultad experimental que entraña estudiar estas partículas. Algunos hitos recientes son la observación efectiva de la aparición de anti-neutrinos electrónicos en un haz de anti-neutrinos muónicos llevada a cabo por el experimento japonés T2K (en el que participan investigadores del IFIC de Valencia y del IFAE de Barcelona) y la medida del parámetro de mezcla θ_{13} , por parte, entre otros, del experimento Double-Chooz (en el que participan investigadores del CIEMAT de Madrid), y cuyo valor da esperanzas de poder medir en un futuro la violación de la simetría combinada CP en el sector leptónico.

Relevancia del descubrimiento

La oscilación entre tipos (familias o “sabores”) de neutrinos es un fenómeno cuántico que se debe a que los autoestados de masa no son los mismos que los que produce la interacción débil. Para que ocurra es necesario que al menos dos de los neutrinos sean masivos. A día de hoy desconocemos la masa de los neutrinos, aunque tenemos algunas cotas proporcionadas principalmente por medidas cosmológicas (muy dependientes de modelo) y por la desintegración beta del tritio. Ni siquiera sabemos el orden (o “jerarquía”) en la que se encuentran los autoestados (un asunto que, por cierto, tratará de dilucidar el experimento KM3NeT-ORCA en el que participan físicos del IFIC de Valencia).

El fenómeno de oscilación ya es conocido en otras partículas (los kaones neutros, los mesones con belleza), pero en el caso de los neutrinos toma una especial relevancia y sus implicaciones nos llevan a intuir que existe física más allá del Modelo Estándar. Efectivamente, el Modelo Estándar asume que los neutrinos no tienen masa. A la hora de extenderlo para incorporarla, se presenta la cuestión esencial de qué tipo de fermión es el neutrino. La “quiralidad” de los fermiones es una especie de “sentido de giro”. Para un fermión sin masa es equivalente al signo de la proyección de su espín sobre su dirección de movimiento y para uno masivo, está relacionada con su comportamiento bajo las transformaciones entre sistemas de referencia inerciales, según determina la relatividad especial. Por llamar de una forma simple a las dos posibles quiralidades, diremos que los fermiones pueden ser “zurdos” o “diestros”. La interacción débil sólo actúa sobre las componentes zurdas de los fermiones (y sobre las diestras de los antifermiones). Los leptones cargados (electrón, muón, tauón) son fermiones de Dirac: su quiralidad y su carga son dos variables independientes. Pero puede darse el caso de que ambas, quiralidad y carga, estén ligadas. En el Modelo Estándar, por ejemplo,

la relación entre la quiralidad y la “carga leptónica” de los neutrinos está fijada: los neutrinos son zurdos y los anti-neutrinos diestros, y no al revés. Como los neutrinos no tienen carga eléctrica, si son completamente neutros (no tienen siquiera carga leptónica o esta no se conserva), entonces pueden ser su propia antipartícula: decimos que se trata de un fermión de Majorana (si lo son o no, es lo que trata de dilucidar el experimento NEXT, liderado por físicos del IFIC de Valencia).

La masa de los fermiones es una especie de acoplo entre sus componentes quirales, como si surgiese de la interacción entre la parte zurda y la diestra de las partículas. Para los fermiones de Majorana una de las componentes quirales puede obtenerse a partir de la otra sin aumentar el número de grados de libertad. Pues bien, en ciertas condiciones, al mezclar masas de Dirac y de Majorana aparece una posible explicación natural de por qué los neutrinos son tan ligeros comparados con el resto de los fermiones conocidos: existirían neutrinos “diestros” muy masivos, cerca de la escala de energías de la Gran Unificación ($\sim 10^{15}$ GeV), que por un mecanismo llamado del balancín o del columpio (*seesaw*) han hecho descender las masas de los neutrinos conocidos muy por debajo de la escala a la que están el resto de fermiones. Además, este mecanismo podría explicar también el origen de la asimetría entre materia y anti-materia que observamos en el Universo: esos neutrinos diestros muy masivos se habrían desintegrado durante la evolución del universo violando la conservación del número leptónico, en un proceso que se ha dado en llamar leptogénesis. La violación del número leptónico acabaría transformándose posteriormente en una violación del número bariónico al enfriarse el Universo y producirse la transición de la fase electrodébil. Aunque todas estas hipótesis están por confirmar, lo cierto es que aparecen de una forma lo suficientemente natural como para prestarles seria atención.

En cuanto a los parámetros de la matriz de mezcla, hay que admitir que —al igual que en el sector de los quarks— el avance en la comprensión de los valores medidos experimentalmente ha sido más bien modesto. Ni siquiera entendemos hoy día el porqué de la existencia de tres familias (aunque debemos mencionar que en la teoría de cuerdas el número de familias o réplicas puede estar ligado a ciertas propiedades topológicas de los espacios que se obtienen al compactificar espacios de mayor dimensión).

Epílogo

El descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos y, por tanto, el hecho de que tengan masa parece estar requiriendo “nueva física”, abriendo posibilidades reales de poder extender el Modelo Estándar, así que el entusiasmo generado a raíz de su descubrimiento parece justificado. La pertinencia de otorgarle el premio Nobel a estos descubrimientos concita el acuerdo de los físicos de partículas, que lo consideran relevante y merecido. Que el liderazgo y la determinación de T. Kajita y A. B. McDonald fueron esenciales para su realización está fuera de toda duda.

Los descubrimientos relacionados con los neutrinos han acumulado ya un número nada despreciable de premios Nobel. Dada la importancia de las cuestiones que aún quedan por resolver en torno a los neutrinos y los esfuerzos teóricos y experimentales dedicados a ellos, esperamos que el premio otorgado en 2015 no sea el último relacionado con estas sorprendentes partículas.

Juan José Hernández Rey

Director del Instituto de Física
Corpuscular de Valencia (CSIC-
Universidad de Valencia), centro
de Excelencia Severo Ochoa



12th International Meeting on Thermodiffusion (IMT12)

Madrid, Spain

May 30th – June 3rd, 2016

<http://eventos.ucm.es/go/IMT12>