

LOS CAMALEONES DEL ESPACIO

Resolvieron el puzzle de los neutrinos y abrieron un nuevo campo en la física de partículas. **Takaaki Kajita** y **Arthur B. MacDonald** fueron científicos clave en dos importantes grupos de investigación ligados al **Superkamionkade** y al **Sudbury Neutrino Observatory** donde descubrieron que los neutrinos podían sufrir una verdadera metamorfosis.

La caza tuvo lugar en gigantescas instalaciones situadas en las profundidades de la Tierra donde miles de ojos artificiales esperaban descubrir los secretos de los neutrinos. En 1998 **Takaaki Kajita** presentó el descubrimiento de que los neutrinos parecen sufrir una metamorfosis: cambian de identidad durante su camino en el detector **Super-Kamiokande** en Japón. Los neutrinos capturados allí se crean en las reacciones entre los rayos cósmicos y la atmósfera de la Tierra.

Mientras tanto, en el otro lado del mundo, los científicos del **Sudbury Neutrino Observatory (SNO)** en Canadá, estaban estudiando neutrinos procedentes del sol. En 2001, el grupo de investigación dirigido por **Arthur B. McDonald** demostró que esos neutrinos, también, cambian de identidad.

Ambos experimentos han llevado a un nuevo descubrimiento: las oscilaciones de los neutrinos. Una conclusión de gran alcance derivada de estos experimentos es que el neutrino, durante mucho tiempo considerado como una partícula sin masa, tiene masa. Esto es de gran importancia para la física de partículas y para nuestra comprensión del universo.



¿Se intercambian las identidades los neutrinos electrónicos, mu y tau?

Héroes a su pesar

Vivimos en un mundo lleno de neutrinos. Miles de miles de millones de neutrinos atraviesan nuestro cuerpo cada segundo. No podemos verlos ni sentirlos. Viajan a través del espacio casi a la velocidad de la luz y casi nunca interactúan con la materia. ¿De dónde vienen?

Algunos fueron creados ya en el Big Bang, otros se crean continuamente en diversos procesos en el espacio y en la Tierra: en la explosión de supernovas (la forma en la que mueren las estrellas masivas), en las reacciones que tienen lugar en los reactores nucleares, o cuando en la naturaleza tienen lugar procesos de desintegración radiactiva. Incluso dentro de nuestros cuerpos un promedio de 5000 neutrinos por segundo son liberados cuando se desintegra un isótopo de potasio. La mayoría de los que llegan a la Tierra se originan en las reacciones nucleares en el interior del Sol. Si exceptuamos los fotones (las partículas de luz) los neutrinos son las partículas más abundantes del universo.

Durante mucho tiempo, sin embargo, su existencia no era segura. Fue propuesta por el austriaco Wolfgang Pauli (laureado de premio Nobel en 1945) en un intento para explicar la conservación de la energía en la desintegración beta, una de las formas de decaimiento radiactivo de los núcleos atómicos. En diciembre de 1930, Pauli escribió una carta a sus colegas, a los que se dirigía como "queridos señores y señoras radiactivos". En esta carta sugiere que parte de la energía se la llevaría una partícula eléctricamente neutra, sensible a la interacción débil y muy ligera. Incluso para Pauli se hacía muy difícil creer en la existencia de esta partícula: *"he hecho algo terrible, he postulado una partícula que no puede ser detectada"*.

Pronto el italiano Enrico Fermi (Premio Nobel en 1938) elaboró una elegante teoría que incluía la ligerísima partícula neutra de Pauli, conocida a partir de entonces como neutrino. Nadie podía predecir que esta pequeña partícula revolucionaría, tanto la física de partículas como la cosmología.

Haría falta un cuarto de siglo para que el neutrino fuera descubierto. La oportunidad surgió en la década de 1950, cuando comenzaron a aparecer en los reactores nucleares que se habían empezado a construir. En junio de 1956, dos físicos estadounidenses, Frederick Reines (Premio Nobel en 1995) y Clyde Cowan, enviaron un telegrama a Wolfgang Pauli: los neutrinos habían dejado huellas en su detector. El descubrimiento mostró que el fantasmal neutrino o Poltergeist, como había sido llamado, era una partícula real.

Un trío peculiar

El Nobel de Física de este año premia un descubrimiento que resuelve problemas muy antiguos sobre los neutrinos. Desde la década de 1960, los científicos habían calculado teóricamente el número de neutrinos creados en las reacciones nucleares que hacen brillar el Sol, pero al contar los que llegaban a la Tierra faltaban hasta dos tercios de la cantidad calculada. ¿Dónde estaban?

¿Había algo incorrecto en los cálculos teóricos de cómo se producen los neutrinos en el Sol?

Una posibilidad para resolver el rompecabezas de los neutrinos solares era suponer que los neutrinos cambiaran de identidad. De acuerdo con el Modelo Estándar de la física de partículas hay tres tipos de neutrinos: neutrinos electrónicos, neutrinos muónicos y neutrinos tau. Cada uno van asociado a una partícula con carga: el electrón y sus dos homólogos mucho más pesados y de vida corta, el muón y el tau. El Sol sólo produce neutrinos electrónicos, pero si se transformaran en neutrinos mu o tau en su camino hacia la Tierra, podría explicarse el defecto de neutrinos que llegan hasta nosotros.

Cazando neutrinos bajo tierra

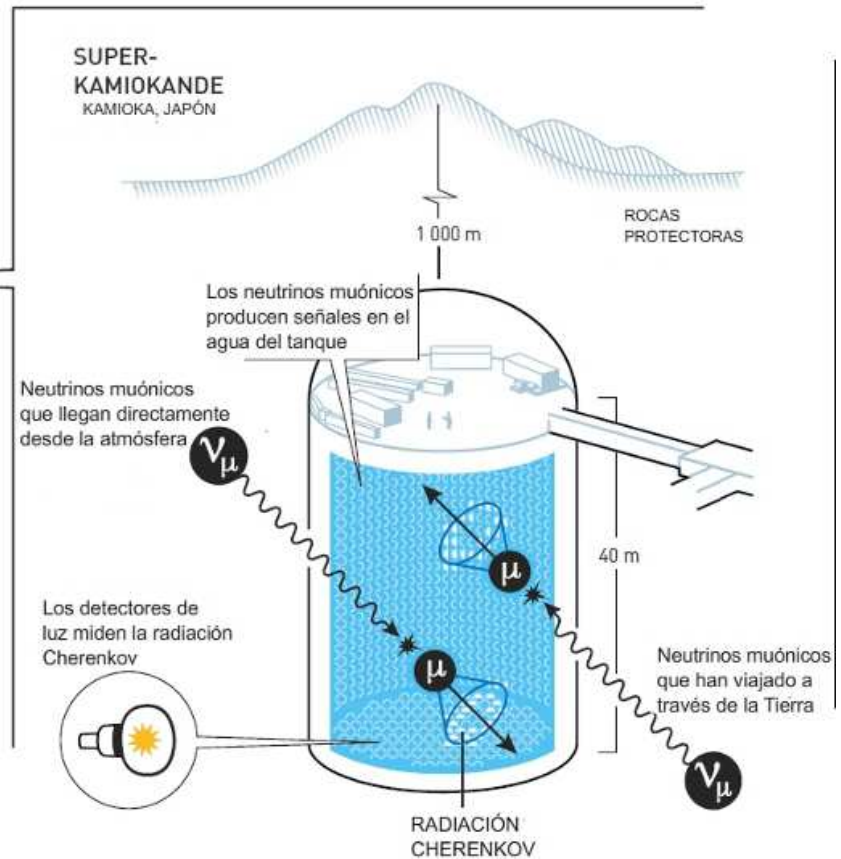
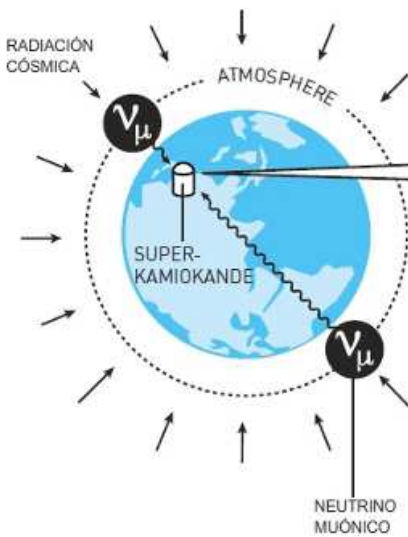
Las especulaciones sobre el cambio de identidad del neutrino no fueron confirmadas hasta que instalaciones más grandes y más sofisticadas fueron puestas en funcionamiento. Día y noche los neutrinos fueron cazados en colosales detectores construidos en profundos subterráneos con el fin de protegerlos del ruido procedente de la radiación cósmica del espacio y de la de procesos radiactivos espontáneos. Sin embargo, es muy difícil separar las verdaderas señales de neutrinos de los miles de millones de falsas señales. Incluso el aire de las minas y el material del detector contienen trazas de elementos que se desintegran e interfieren en las mediciones.

El Super-Kamiokande, situado en una antigua mina de zinc, 250 kilómetros al noroeste de Tokio, comenzó a ser operativo en 1996, mientras que el Observatorio de Neutrinos de Sudbury, construido en una mina de níquel en Ontario, comenzó las observaciones en 1999. Juntos revelaron el carácter camaleónico del neutrino, el descubrimiento que es recompensado con el Premio Nobel de Física de este año.

El Super-Kamiokande es un detector gigantesco construido 1000 metros bajo la superficie de la tierra. Consiste en un tanque, de 40 metros de altura y 40 m de anchura, lleno con 50 000 toneladas de agua. El agua es tan pura que los haces de luz pueden viajar 70 metros antes de que su intensidad se reduzca a la mitad, mientras que en una piscina ordinaria, eso sucede al cabo de pocos metros. Más de 11 000 detectores de luz se sitúan en la parte superior del tanque, en sus laterales y en el fondo, con el fin de descubrir, ampliar y medir destellos de luz muy débiles en el agua ultra pura.

La gran mayoría de los neutrinos atraviesa el tanque sin dificultades, pero de vez en cuando, un neutrino choca con un núcleo atómico o un electrón del agua. En estas colisiones se crean partículas cargadas: muones a partir de neutrinos mu. Alrededor de las partículas cargadas, se generan tenues destellos de luz azul. Es lo que se conoce con el nombre de radiación Cherenkov, que aparece cuando una partícula viaja más rápido que la velocidad de la luz en ese medio. Esto no está en contradicción a la teoría de Einstein de la relatividad, que afirma que nada puede moverse más rápido que la luz en el vacío. La velocidad de la luz en el agua es un 75% de su velocidad en el vacío, pudiendo ser "superada" por la de las partículas cargadas. La forma y la intensidad de la radiación Cherenkov revela el tipo de neutrino es y de donde viene.

NEUTRINOS PROCEDENTES DE LA RADIACIÓN CÓSMICA



Dibujo 1

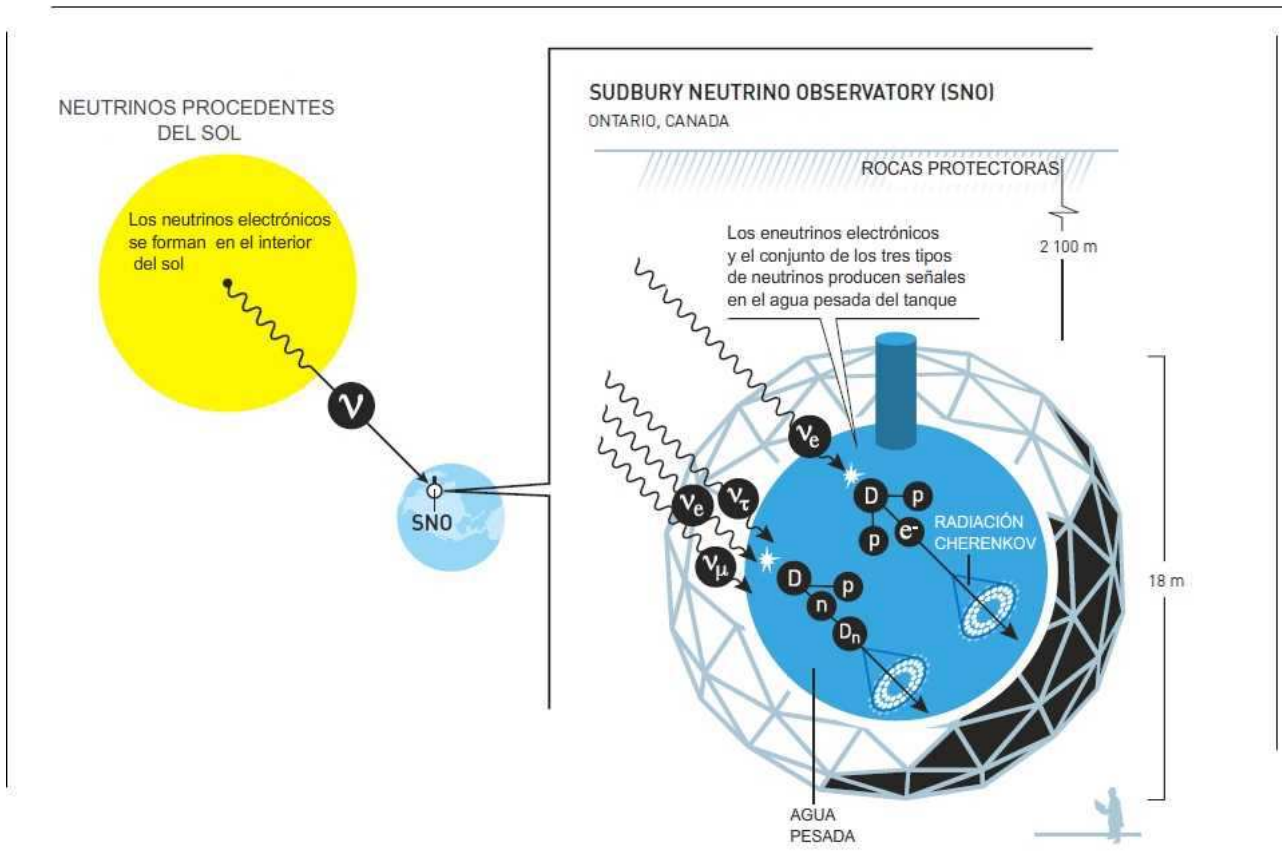
El Super-Kamiokande detecta neutrinos formados en la atmósfera. Cuando un neutrino choca con una molécula de agua del tanque se crean partículas con carga eléctrica (muones). Esto genera radiación Cherenkov que es medida por los sensores de luz. La forma y la intensidad de la radiación Cherenkov revela el tipo de neutrino que la causó y de dónde vino. Los neutrinos muónicos que llegaron a Super Kamiokande desde arriba eran más numerosos que los que llegaron al tanque atravesando el planeta. Esto indica que los neutrinos muónicos que viajaron más tiempo tuvieron tiempo para cambiar de identidad en su camino.

Una solución al enigma

Durante sus dos primeros años de funcionamiento, Super-Kamiokande registró alrededor de 5000 señales de neutrinos. Esto es un número bastante mayor que el detectado en experimentos anteriores, pero bastante menor del que los científicos habían calculado que serían creados por la radiación cósmica. Los rayos cósmicos llegan desde de todas las direcciones del espacio y cuando chocan a muy altas velocidades con las moléculas de la atmósfera terrestre se producen chorros de neutrinos.

Super Kamionkande captó neutrinos muónicos provenientes de la atmósfera, que llegaba al detector directamente desde arriba, así como otros que llegaban al detector desde abajo después de haber atravesado todo el planeta. Debería de haber igual número de neutrinos procedentes de las dos direcciones; la Tierra no constituye ningún obstáculo considerable para ellos. Pero los neutrinos muónicos que llegaban directamente al Super-Kamiokande procedentes de la atmósfera eran más numerosos que los que había sido registrados después de atravesar la Tierra.

Esto indica que los neutrinos muónicos cuyo viaje tenía una duración mayor (los que atravesaban el planeta), tenían tiempo suficiente para que su identidad cambiara, lo que no sucedía con los neutrinos procedentes de la atmósfera situada encima del detector, cuyo recorrido era de solo unas decenas de kilómetros. Para que el número de neutrinos procedentes de diferentes direcciones estuviera de acuerdo con las predicciones teóricas, los neutrinos muónicos deberían de haberse metamorfoseado en el tercer tipo, neutrinos tau, no detectables.



Dibujo 2

El Observatorio del Neutrinos de Sudbury detecta neutrinos procedentes del sol, donde se producen sólo neutrinos electrónicos. Las reacciones entre los neutrinos y el agua pesada en el tanque permite detectar los neutrinos electrónicos y los tres tipos de neutrinos combinados. Se descubrió que el número de neutrinos electrónicos era menor de lo predicho, mientras que el número total de los tres tipos de neutrinos combinados respondía a lo predicho. La conclusión fue que algunos de los neutrinos electrónicos se habían transformado en otro tipo de neutrinos.

Una pieza decisiva del rompecabezas fue aportada por el Observatorio de Neutrinos de Sudbury, SNO, que medía los neutrinos provenientes del sol, donde los procesos nucleares sólo dan lugar a neutrinos electrónicos. Dos kilómetros por debajo de la superficie terrestre los neutrinos electrónicos fueron detectados por 9500 detectores de luz en un tanque lleno con 1000 toneladas de agua pesada, que se diferencia del agua ordinaria en lugar de átomos de hidrógeno, un isótopo, el deuterio, que tiene un neutrón más en su núcleo.

El núcleo de deuterio ofrece posibilidades adicionales para los neutrinos que llegan al detector. En algunas reacciones solo es posible detectar los neutrinos electrónicos, mientras que otras permitieron a los científicos medir la cantidad total de neutrinos, sin distinguir unos de otros.

Se descubrió que el número de neutrinos electrónicos era menor de lo predicho. De los sesenta mil millones de neutrinos por centímetro cuadrado que cada segundo llegan a la tierra procedentes del Sol, el observatorio detectó unos tres diarios durante sus dos primeros años de operación. Esto se correspondía con solo un tercio del número esperado. Dos tercios habían desaparecido. Sin embargo, la suma, si se cuentan los tres tipos, se correspondía con el número esperado de neutrinos. La conclusión fue que los neutrinos electrónicos habían cambiado su identidad en el camino.

Metamorfosis en el mundo cuántico

Los dos experimentos confirmaron la sospecha de que los neutrinos pueden cambiar de una identidad a otra. El descubrimiento ha estimulado muchos nuevos experimentos y ha obligado a los físicos de partículas a pensar de forma distinta..

Ambos experimentos han dado lugar a una conclusión innovadora: la metamorfosis del neutrino requiere que tenga masa. De otra forma no podrían cambiar. ¿Cómo se produce esa metamorfosis?

Es necesario recurrir a la Física Cuántica para explicarlo. En el mundo cuántico partícula y onda son aspectos diferentes de un mismo estado físico. Una partícula con cierta energía puede ser descrita como una onda con una frecuencia determinada. En física cuántica, el neutrino electrónico, múonico y el tau son descritos como estados superpuestos.

Cuando las ondas están en fase no es posible distinguir los diferentes estados del neutrino. Pero cuando los neutrinos viajan a través del espacio las ondas se desfazan. A lo largo del camino la superposición de los tres estados es diferente. La superposición en un lugar determinado nos da la probabilidad de qué tipo de neutrino puede encontrarse allí. Las probabilidades varían de un lugar a otro, oscilan, y los neutrinos aparecen en sus distintas identidades.

Este comportamiento peculiar es debido a las diferencias en las masas de los diferentes neutrinos. Los experimentos indican que estas diferencias son muy pequeñas. También se estima que la masa de los neutrinos sea muy pequeña, aunque nunca se ha medido directamente. Sin embargo, puesto que los neutrinos existen en cantidades enormemente grandes en el universo, la suma de sus masas, aunque sea muy pequeña, se convierte en significativa. El peso total de los neutrinos se estima que pueda ser aproximadamente igual al peso de todas las estrellas visibles en el universo.

Una puerta a la nueva física

El descubrimiento de la masa del neutrino ha sido fundamental para la física de partículas. El Modelo Estándar de la materia había resistido, durante veinte años, todos los desafíos experimentales. Sin embargo, el modelo predice que los neutrinos no tienen masa. Así, los experimentos han revelado la primera grieta en el modelo estándar, demostrando que no puede ser la teoría que explique el comportamiento de las partículas fundamentales.

Varias preguntas clave sobre la naturaleza de los neutrinos necesitan ser respondidas antes de que nuevas teorías, más allá del modelo estándar, pueden ser completamente desarrolladas. ¿Cuáles son las masas de los neutrinos? ¿Por qué son tan ligeros? ¿Hay más tipos de los tres conocidos actualmente? ¿Son los neutrinos sus propias antipartículas? ¿Por qué son tan diferentes de otras partículas elementales?

El descubrimiento que es premiado con el Nobel de Física de este año ha producido ideas cruciales en el mundo casi desconocido de los neutrinos. Los experimentos continúan y existe una intensa actividad alrededor del mundo para capturar neutrinos y examinar sus propiedades. Se espera que nuevos descubrimientos de los secretos celosamente guardados por los neutrinos cambien nuestra comprensión de la historia, estructura y destino del universo.

Enlaces y lecturas

Información adicional sobre los premios de este año, incluyendo un fondo científico en inglés, está disponible en el sitio web de la Real Academia sueca de Ciencias, en <http://kva.se> y en <http://nobelprize.org>. Allí y en el de <http://kvatv.se>, puede ver videos de las conferencias de prensa, las conferencias Nobel y mucho más. Información sobre exposiciones y actividades relacionadas con los premios Nobel están disponibles en www.nobelmuseum.se.

Libros

Jayawardhana, R. (2013) *Neutrino hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux

Close, F. (2010) *Neutrino*, Oxford University Press *Popular science articles*

Hulth, P.O. (2005) High Energy Neutrinos from the Cosmos,
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/hulth/

Bahcall, J.N. (2004) Solving the Mystery of the Missing Neutrinos,
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/bahcall/

McDonald, A. B., Klein, J. R. och Wark, D. L. (2003) Solving the Solar Neutrino Problem, *Scientific American*, Vol. 288, Nr 4, April

Kearns, E., Kajita, T. och Totsuka, Y. (1999) Detecting Massive Neutrinos, *Scientific American*, Vol. 281, Nr 2, August *Links*

Super-Kamiokande Official Homepage: www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html

Sudbury Neutrino Observatory Homepage: sno.phy.queensu.ca