



# Los neutrinos y sus metamorfosis

## El premio Nobel de Física 2015

**Rafael Bachiller**

Observatorio Astronómico Nacional (Madrid)

**Manuel Alonso**

IES Leonardo da Vinci (Alicante)

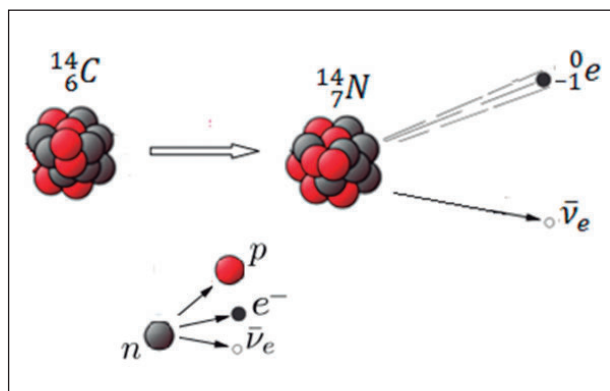
El Premio Nobel de Física 2015 se otorgó a Takaaki Kajita y a Arthur B. McDonald «por el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos, que muestran que los neutrinos tienen masa». Tras este galardón se encuentra la resolución de un enigma fascinante: los neutrinos solares capturados en la Tierra eran sólo un tercio de los que predecía la teoría. Los experimentos de Kajita y McDonald mostraron que los neutrinos cambian de «personalidad» y que, al tener en cuenta sus tres identidades posibles, los datos experimentales sí cuadran con las predicciones teóricas. Este descubrimiento tiene una implicación importante para la física de partículas: **contrariamente a lo que se pensó durante varias décadas, los neutrinos han de tener masa.**

#### PALABRAS CLAVE

- OSCILACIONES DE NEUTRINOS
- CIENCIAS DE LA TIERRA
- CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA
- NOBEL DE FÍSICA

Los primeros indicios de la existencia de los neutrinos aparecieron en 1914, cuando Chadwick (1891-1974) comprobó que el espectro energético de emisión de la radiación beta ( $\beta$ ) es continuo. Esto revela que los electrones emitidos en este proceso abarcan un amplio rango de energías, y resultó inconsistente con la teoría, ya que, si los estados nucleares inicial y final de la radiación  $\beta$  tienen energías bien definidas, todos los electrones deberían ser emitidos con una energía determinada. Por ello, a menos que se cuestionara la conservación de la energía, cabía suponer que en el proceso se estaría emitiendo una segunda partícula desconocida, pendiente de detectar. Así, la energía disponible en la desintegración se podría repartir de manera asimétrica entre las dos partículas, permitiendo un amplio abanico de valores para la energía de los electrones.

En 1930 Pauli (1900-1958) ofreció una posible solución al problema, con la hipótesis de que en el núcleo atómico existiesen partículas neutras.



**Imagen 1.** Ejemplo de desintegración  $\beta$ : el núcleo de carbono C-14 emite un electrón ( $\beta^-$ ) y un antineutrino, transformándose en N-14. En el núcleo madre un neutrón se había transformado en un protón, más un electrón ( $\beta^-$ ) y un antineutrino

Poco después Fermi (1901-1954) partió de esta hipótesis para plantear que en la desintegración  $\beta$  un neutrón se transforma en un protón, emitiéndose un electrón y un neutrino. La emisión del electrón era precisa para conservar la carga y la del neutrino para conservar el momento angular y la energía (imagen 1).

## PONTECORVO: UN GENIO ENTRE LA FÍSICA Y EL ESPIONAJE

No se puede hablar de los neutrinos sin recordar a un personaje que parece extraído de una novela de espías: Bruno Pontecorvo (1913-1993). Nació en una familia italiana judía, destacó en los estudios de ciencias y con sólo 18 años fue admitido en el tercer año de Físicas en la Universidad de Roma La Sapienza. En 1936 fue a París a trabajar en el laboratorio de Irène y Frédéric Joliot-Curie sobre los efectos de las colisiones de los neutrones con protones. Pero debido a las leyes raciales impuestas en Italia por el régimen fascista, no pudo regresar a su país, y, cuando los nazis entraron en París, viajó con su familia a Oklahoma (EE.UU.), donde había encontrado trabajo en una compañía de petróleo.

A pesar de sus conocimientos en física nuclear y de su cercanía a Fermi, quizá debido a sus simpatías con los comunistas labradas en su estancia en París, Pontecorvo no fue solicitado para participar en el Proyecto Manhattan en el que EE.UU. se puso a construir una bomba atómica. En 1943 se trasladó a Canadá, recibió la nacionalidad británica en 1948, y fue invitado por Cockcroft para trabajar en un proyecto británico de bomba. En 1950 ganó la cátedra de Física en la Universidad de Liverpool, a la que debía incorporarse en enero de 1951.

## No se puede hablar de los neutrinos sin recordar a Pontecorvo, un personaje que parece extraído de una novela de espías



Pero el 31 de agosto de 1950, estando de vacaciones en Italia, Pontecorvo y su familia desaparecieron sin dejar rastro. Se supo después que habían volado a Estocolmo. Y que, al día siguiente de llegar a Suecia, habían sido ayudados por agentes soviéticos para entrar en la Unión Soviética desde Finlandia (imagen 2).

La desaparición de Pontecorvo preocupó a los servicios de inteligencia británicos y estadounidenses, que temían que pudiera pasar informa-



**Imagen 2.** Bruno Pontecorvo en Moscú en la década de 1950

ción atómica secreta a la Unión Soviética. Sin embargo, había tenido poco acceso a información reservada y nunca se le acusó de espionaje.

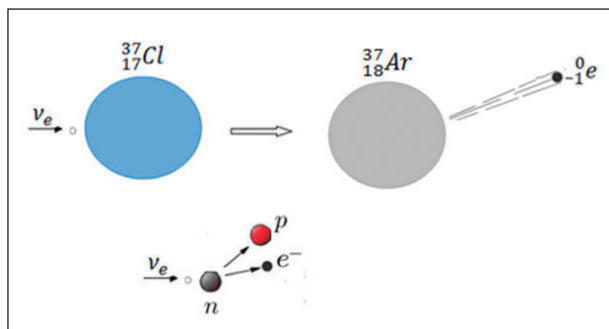
En la Unión Soviética fue acogido con honores y recibió privilegios reservados a la *nomenklatura*. Cambió su nombre por el de Bruno Maksimovich Pontekorvo, y trabajó allí hasta su muerte, en lo que hoy es el Instituto Conjunto de Investigación Nuclear de Dubna.

Murió en 1993 y, cumpliendo sus últimas voluntades, la mitad de sus cenizas están enterradas en Dubna y la otra mitad en el Cementerio Protestante de Roma.

## El descubrimiento experimental del neutrino

Pontecorvo realizó contribuciones decisivas sobre los neutrinos. En 1946 planteó que se podrían detectar teniendo en cuenta que, cuando un neutrino interactúa con un núcleo e induce en él la transformación de un neutrón en un protón más un electrón, cambia su naturaleza química. Sabía que en estos procesos sería muy difícil detectar a los electrones emergentes, pero, en cambio, previó que sí se podría mostrar esa transmutación química. Propuso utilizar cloro, que puede absorber un neutrino y transformarse en argón, un gas inerte y radiactivo, pero con un período de desintegración de 35 días, que facilita su detección (imagen 3, en la página siguiente).

El físico estadounidense Davis (1914-2006) recogió la idea de Pontecorvo. Junto al reactor de su laboratorio, en Brookhaven (Nueva York), instaló un tanque con 4.000 litros de tetracloruro de carbono, y detectó qué parte del cloro se transformaba en argón. Comprobó que la cantidad



**Imagen 3.** El cloro (Cl-37) puede absorber un neutrino transformándose en argón (Ar-37) y emitiendo un electrón. En el núcleo madre, el neutrón que absorbe el neutrino se transforma en un protón (que queda en el núcleo) y un electrón que se emite



**Imagen 4.** Reines y Cowan controlando su experimento en Hanford en 1953

de argón obtenida era independiente de que el reactor estuviese encendido o apagado y concluyó que ese argón era generado por efecto de los rayos cósmicos.

Davis insistió con un reactor más potente en Savannah River (Carolina del Sur) y un detector enterrado a varios metros de profundidad para apantallarlos de la radiación cósmica. Pero tampoco obtuvo resultados positivos. Entonces no podía imaginar que sus experimentos no tenían éxito porque las partículas que se producían en los reactores no eran neutrinos, sino antineutrinos. Y las leyes de conservación de las partículas elementales impiden que los antineutrinos transformen el cloro en argón.

En 1952 Reines (1918-1998) y Cowan (1919-1954) usaron otra fuente de neutrinos: la planta

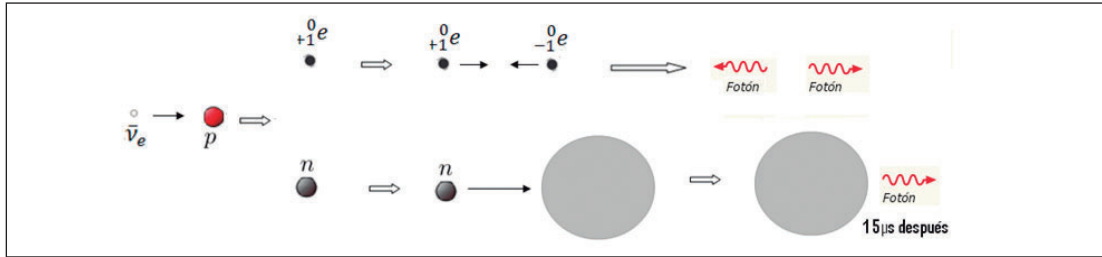
nuclear de Hanford, en Washington (imagen 4). Realizaron un experimento en 1953, que tampoco fue determinante, y lo mejoraron en 1956 cerca de la planta nuclear de Savannah River, la misma que había usado Davis. Allí utilizaron un blanco de 400 litros de una mezcla de agua y cloruro de cadmio. El antineutrino que emerge del reactor nuclear interactúa con el blanco y se emite un positrón y un neutrón. El positrón se aniquila con un electrón del material produciendo fotones simultáneos, mientras que el neutrón marcha lentamente hasta que es capturado por un núcleo de cadmio y produce más fotones unos 15µs después (imagen 5). Consiguieron detectar todos los fotones y medir los 15µs de intervalo entre unos y otros. El neutrino estaba ahí.

■

**El antineutrino que emerge del reactor nuclear interactúa con el blanco y se emite un positrón y un neutrón**

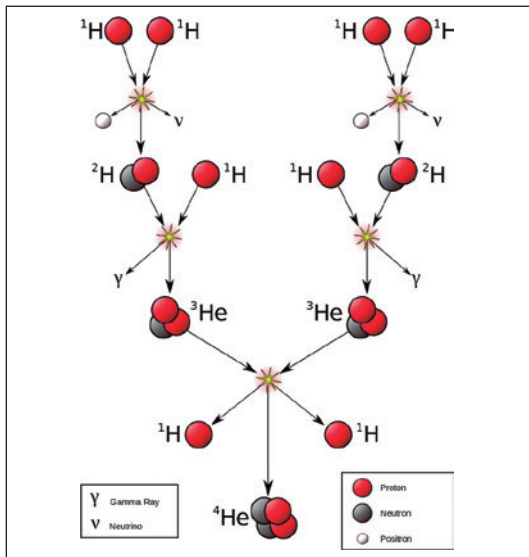
## LA DETECCIÓN DE LOS NEUTRINOS SOLARES

En 1920 Eddington (1882-1994) supo que el secreto que proporciona al Sol su energía se encuentra en el defecto de masa que resulta en la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno para producir uno de helio (esta pequeña diferencia de masa equivale a una gran cantidad de energía, de acuerdo



**Imagen 5.** Experimento de Reines y Cowan. Cuando un antineutrino interacta con un protón del blanco (cloruro de cadmio), da lugar a un positrón más un neutrón. El positrón se aniquila con un electrón del material produciendo fotones. 15 $\mu$ s después el neutrón es absorbido por el cadmio, que se excita y emite nuevos fotones

con la ecuación de Einstein:  $E=mc^2$ ). Veinte años después Bethe (1906-2005) describió los dos procesos fundamentales de producción de helio que ocurren en el interior del Sol: el ciclo carbón-nitrógeno-oxígeno (CNO) y la cadena protón-protón (pp), cuyo resultado neto es la producción de un átomo de helio-4 a partir de 4 protones generando positrones, fotones y neutrinos (imagen 6). Los positrones se aniquilan rápidamente con electrones del plasma solar produciendo más fotones. Todos los fotones generados en estos pro-



**Imagen 6.** La cadena protón-protón

cesos sufren múltiples absorciones y reemisiones, y su energía va disminuyendo en su viaje hacia la superficie solar, donde emergen como luz visible tras 200.000 años. Mientras tanto, los neutrinos no interactúan con la materia que encuentran a su paso y alcanzan la superficie del Sol en apenas dos segundos.

Fue nuevamente Davis quien, utilizando el mismo tanque de cloro con el que unos años antes había intentado detectar los neutrinos procedentes de un reactor nuclear, se dispuso a atrapar los producidos en el centro del Sol. Sin embargo sus primeros experimentos fracasaron.

Era preciso calcular con sumo cuidado el número de neutrinos teniendo en cuenta todos los procesos nucleares posibles, lo que realizó el astrofísico teórico Bahcall (1934-2005). Davis y Bahcall idearon el Experimento Homestake, donde se instaló un enorme tanque de 400.000 litros de cloro a 1.600 metros de profundidad en una mina en Dakota del Sur. De los 66.000 millones de neu-

■  
**Fue Davis quién se dispuso  
 a atrapar los neutrinos  
 producidos en el centro del Sol**



**Imagen 7.** Davis y Bahcall junto al tanque de cloro en Homestake, Dakota del Sur, en 1967

trinos que atraviesan cada centímetro cuadrado de la Tierra por segundo, Bahcall estimó que este equipo experimental podría detectar 10 neutrinos por semana (imagen 7).

En 1968 Davis anunció las primeras detecciones de neutrinos solares. Estaban claramente ahí, pero el número que se obtenía era tan sólo un tercio del teórico que había calculado Bahcall. Durante los años siguientes Bahcall se esforzó por afinar sus cálculos y Davis por perfeccionar el montaje experimental, pero a principios de la década de 1970 las nuevas medidas confirmaron la discrepancia.

En la década de los noventa se desarrollaron otros experimentos más potentes, como el proyecto europeo GALLEX, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia) y el proyecto soviético-norteamericano SAGE, en el Cáucaso. Confirmaron «el problema de los neutrinos solares», que persistió casi hasta el fin del milenio.

■

**Pontecorvo propuso la existencia de neutrinos electrónicos y neutrinos muónicos**

## LA MÚLTIPLE PERSONALIDAD DEL NEUTRINO

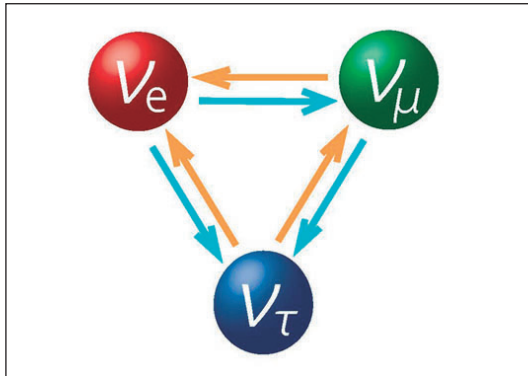
La clave para solucionar el problema de los neutrinos solares la había avanzado el genial Pontecorvo en un artículo publicado en la *Revista Soviética de Física* en 1959, donde planteó que los neutrinos podían aparecer en distintas clases, atendiendo a una nueva propiedad, que llamó *sabor*. Propuso la existencia de neutrinos electrónicos (asociados al electrón) y neutrinos muónicos (asociados al muon). Esta hipótesis significaba que el neutrino guardaba memoria de su origen. Si había surgido junto a un electrón, en posteriores interacciones con la materia sólo podía dar lugar a electrones (nunca muones).

Pontecorvo también ideó un experimento para demostrar su teoría, que fue llevado a cabo por los físicos Lederman, Schwartz y Steinberger en 1960, con un nuevo acelerador que acababa de construirse en Brookhaven. Un haz de protones acelerados con 15 GeV de energía incidía sobre núcleos de berilio produciendo una enorme cantidad de piones que se desintegraban en muones y neutrinos. Se observó que estos neutrinos, al incidir sobre una gran masa (10 toneladas) de aluminio, sólo producían muones, lo que confirmó que tenían el sabor muónico.

Hoy sabemos que existen neutrinos con tres sabores: electrónicos  $\nu_e$ , muónicos  $\nu_\mu$  y tauónicos  $\nu_\tau$ , que se corresponden con los otros tres tipos de leptones: el electrón, el muón y el tau (imagen 8).

## LAS METAMORFOSIS DEL NEUTRINO

Poco después de que se demostrase la existencia de los diferentes sabores de neutrinos, Pontecorvo especuló con la idea de que además pudiesen transformarse de un tipo en otro. El



**Imagen 8.** Los tres tipos de neutrinos pueden cambiar su *sabor*

problema de los neutrinos solares todavía no se había planteado y esta idea era un mero ejercicio académico.

Pero cuando Davis y Bahcall realizaron su experimento, Pontecorvo retomó su idea y publicó en 1969 (junto con Gribov) un artículo en el que demostró que la mecánica cuántica permitía la transformación de sabores de los neutrinos. Esto ofrecía una posible solución al desconcertante problema del déficit de neutrinos, que podría explicarse si los neutrinos electrónicos producidos en el Sol cambiaban de sabor en su viaje a la Tierra y nuestro detector aquí tan sólo era sensible a un sabor, dejando sin medir los otros dos.

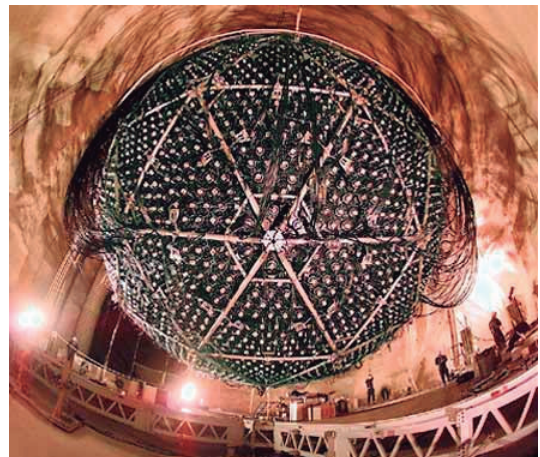
Pontecorvo también planteó que cada neutrino de sabor bien definido podía representarse por una onda que era superposición de estados de masa diferente, lo que lleva implícito que los neutrinos tengan masa. Durante la propagación de los neutrinos se producen interferencias entre esas ondas, que modifican la probabilidad de detectarlos con un sabor u otro. Esta probabilidad de detectar uno u otro sabor oscila durante el viaje del neutrino y el fenómeno se conoce como «oscilaciones de neutrinos».

La detección experimental de las oscilaciones de los neutrinos no se pudo realizar hasta finales del siglo xx, cuando estuvieron operativos dos grandes observatorios construidos expresamente para ello: Super-Kamiokande (Super-K) en Japón y el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO) en Canadá.

## EL NOBEL DE FÍSICA 2015

El observatorio Super-K está a 1.000 m bajo tierra en la mina de Mozumi, en la ciudad de Hida. El detector es un tanque de 50.000 toneladas de agua pura rodeado por cerca de 11.000 tubos fotomultiplicadores. Su estructura cilíndrica tiene 40 m de alto y 40 m de ancho. Kajita, junto con la Colaboración Super-K, anunció la primera evidencia de oscilaciones de neutrinos en 1998.

El SNO está a 2 km bajo el suelo en Sudbury y su detector está en el fondo de una antigua mina (imagen 9). Los datos obtenidos por el SNO fueron publicados por un equipo de investigadores, dirigidos por McDonald, el 18 de junio de



**Imagen 9.** El observatorio de neutrinos de Sudbury

## Kajita, junto con la Colaboración Super-K, anunció la primera evidencia de oscilaciones de neutrinos en 1998



2001. También mostraron de manera inequívoca las oscilaciones de los neutrinos y permitieron calcular tanto el flujo total de neutrinos solares (de los tres tipos) como la proporción correspondiente a los neutrinos electrónicos, confirmando en septiembre de 2003 que constituyen una tercera parte del total de los neutrinos que llegan del Sol.

Es este gran logro científico y tecnológico el que se viene a premiar con el Premio Nobel 2015.

### PERSPECTIVAS

Actualmente funcionan tres grandes observatorios de neutrinos: ANTARES en el mar Mediterráneo, BAIKAL en el lago Baikal (Rusia) y IceCube en la Antártida (véase la imagen que encabeza el artículo). IceCube tiene en la profundidad del hielo antártico (entre 1.450 y 2.450 metros) millares de fotomultiplicadores, que se despliegan en «cuerdas» de sesenta módulos cada una, dentro de hoyos fundidos en el hielo por medio de un taladro de agua caliente (véase la imagen que encabeza el artículo).

Con las medidas de IceCube de neutrinos muy energéticos procedentes de más allá del Sistema Solar y la detección de la Supernova 1987<sup>a</sup>, que se realizó con Super-K, los observatorios de neutrinos se revelan como una herramienta importante para el estudio del universo, que

ayudará a explorar los procesos astrofísicos más violentos, como los asociados a su propio origen, el Big Bang.

Europa está planificando la construcción del Telescopio de Neutrinos del Kilómetro Cúbico (KM3NeT) en el fondo del Mediterráneo, con tres enormes detectores que se emplazarán cerca de las costas de Toulon (Francia), Capo Passero (Italia) y Pylos (Grecia). Situados en hemisferios diferentes, KM3NeT y IceCube tendrán una visión completa de la bóveda celeste y formarán un observatorio de neutrinos global, capaz de enfrentarse a los múltiples enigmas que aún plantean las partículas más esquivas del universo. ◀

### Direcciones de contacto

**Rafael Bachiller García**

Observatorio Astronómico Nacional (Madrid)

*rbachiller@oan.es*

**Manuel Alonso Sánchez**

IES Leonardo da Vinci (Alicante)

*manuelalonso@inicia.es*

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, en julio de 2016 y aceptado en octubre de 2016 para su publicación.