

## SEMBLANZAS DE LOS PREMIOS NOBEL 2015

### EN FÍSICA

Los galardonados con el Premio Nobel en Física 2015 han sido el japonés Takaaki Kajita y el canadiense Arthur B. McDonald por “el descubrimiento de la oscilación de neutrinos, lo que muestra que estas partículas tienen masa”.

Takaaki Kajita nació en 1959 en Higashimatsuyama (Japón). Se doctoró en 1986 en la Universidad de Tokio. En la actualidad es Catedrático en esa misma Universidad y además dirige el Instituto de Investigación de Rayos Cósmicos.

Arthur B. McDonald Nació en 1943 en Sydney (Canadá). Se doctoró en 1969 en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena (Estados Unidos). Actualmente es Catedrático emérito de la Universidad Queen's en Kingston, Ontario y Director del Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO).

### ¿QUÉ SON LOS NEUTRINOS?

En 1914 J. Chadwick observó que la forma del espectro energético de los electrones emitidos en las desintegraciones beta<sup>1</sup> era continuo [1], este hecho contradecía las leyes de conservación de la energía y del momento. En 1930, W. Pauli propone en una carta enviada a la Sociedad de Física de Tubinga la existencia de partículas neutras en el núcleo a las que primeramente denominó “neutrones”, y que se emitirían junto con el electrón en los procesos beta, de tal forma que la suma de las energías de los tres cuerpos que intervienen en la desintegración, núcleo de retroceso, el denominado *neutrón* y electrón, permanecería constante y no se violaría la ley de conservación de la energía. Pauli también determinó que la nueva partícula tendría que tener espín  $\frac{1}{2}$  y su masa ser muy pequeña (menor que  $10^{-2}$  veces la masa del pro-

<sup>1</sup> En la desintegración beta,  $\beta$ , los núcleos radiactivos emiten electrones.



Los galardonados con el Premio Nobel en Física Takaaki Kajita (izquierda) y Arthur B. McDonald (derecha).

tón), pero no se atrevía a publicar sus ideas hasta que no hubiera evidencias experimentales de tal partícula [2].

También en los años 30 se descubrió que cuando se irradiaba con partículas alfa a algunos elementos ligeros se emitía una radiación consistente en partículas que no eran protones y que eran muy poco absorbidas por el plomo. En 1932 J. Chadwick, usando también la conservación del momento y de la energía, al analizar los resultados experimentales de la producción de núcleos de retroceso en nitrógeno e hidrógeno, llegó a la conclusión que esta radiación consistía en un flujo de partículas neutras cuya masa era similar a la del protón. A la nueva partícula se le denominó también neutrón. Pero estas partículas eran muy pesadas para ser la partícula que postuló Pauli.

Para diferenciar a las partículas postuladas por Pauli de los neutrones descubiertos por Chadwick, E. Fermi denominó a la partícula supuestamente emitida en las desintegraciones beta *neutrino*,  $\nu$ , y desarrolló toda una teoría del decaimiento beta basada en su existencia. Con el fin de explicar la desintegración beta, es decir la emisión de electrones o positrones<sup>2</sup> por los núcleos atómicos radiactivos, Fermi formuló en 1934 la primera teoría so-

<sup>2</sup> El positrón es la antipartícula del electrón. P. Dirac los predijo en 1928, basándose en el análisis de la ecuación mecánico-cuántico relativista para el electrón. Esta partícula fue detectada por primera vez en 1932 estudiando rayos cósmicos en una cámara de niebla.

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, h. Des. 1930  
Olariastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst  
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselstich" (1) der Statistik und den Energiestats  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
musste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedemfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, d.h. dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die  
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint  
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer  
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein  
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $M$  ist. Die Experimente  
verleihen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons  
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann  
 $M$  wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .

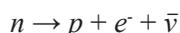
Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee  
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe  
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis  
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa  
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein  
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein  
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn  
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber mir war wagt,  
gemäss und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum  
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amte,  
Herrn Debye, beleuchtet, der mir nämlich in Brüssel gesagt hat:  
"O, daran soll man es besten gar nicht denken, sowie an die neuen  
Stauern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.  
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. Leider kann ich nicht  
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht  
vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unakademisch  
bin. Mit vielen Grüßen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer  
untertänigster Diener

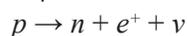
ges. W. Pauli

Figura 1. Carta enviada por W. Pauli a la reunión de la  
Sociedad de Física celebrada en Tübinga en 1930, donde se  
proponía por primera vez la existencia de una nueva partícula  
eléctricamente neutra.

bre la fuerza débil [3]. Todos los procesos en los que  
intervienen neutrinos se deben a interacciones débiles. Y  
aunque Pauli suponía que el neutrino y el electrón  
preexistían en el núcleo, Fermi al aplicar las ideas de la  
relatividad cuántica llegó a la conclusión acertada que  
tanto el neutrino como el electrón se crean en el mo-  
mento de la desintegración beta. Así interpretaba este  
tipo de desintegración como la transformación de un  
neutrón del núcleo en un protón emitiendo un electrón  
y un neutrino<sup>3</sup>. Según esto, las desintegraciones  $\beta^-$  son  
un proceso nuclear:



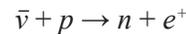
y las desintegraciones  $\beta^+$ :



Aunque la teoría de emisión beta estaba ya desarro-  
llada, el neutrino no se había detectado aún, debido a ser  
una escurridiza partícula, sin carga y supuestamente casi

<sup>3</sup> Realmente en la desintegración  $\beta^-$  lo que se emite es un anti-  
neutrino,  $\bar{\nu}$ .

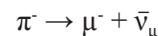
sin masa, que puede penetrar vastos espesores de mate-  
rial sin interacción. El camino libre medio de un neutri-  
no en el agua sería del orden de 10 veces la distancia  
entre la Tierra y el Sol. No es hasta 1956 [4] cuando F.  
Reines y C.L. Cowan tienen evidencias experimentales de  
la existencia de los neutrinos. Para realizar el experi-  
mento partieron de un alto flujo de neutrinos proceden-  
tes de un reactor nuclear, producidos en desintegracio-  
nes beta, que incidían sobre un blanco de  $\text{CdCl}_2$  y agua,  
se producían reacciones nucleares del tipo beta inversa:



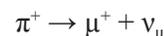
Y lo que se detectaba posteriormente eran los fotones  
producidos por la interacción de los positrones emitidos  
en el proceso. Aunque esta reacción tiene una sección  
eficaz bajísima,  $\sigma \approx 10^{-43} \text{ cm}^2$ , si se produce detección es  
debido al alto flujo de los neutrinos generados en el  
reactor nuclear.

## LEPTONES Y TIPOS DE NEUTRINOS

Los neutrinos pertenecen a una clase de partículas ele-  
mentales denominadas leptones. Los leptones son fer-  
miones de espín  $1/2$  que se pueden agrupar en tres fami-  
lias, cada una de las familias se compone de un leptón  
cargado y del neutrino correspondiente, los leptones  
cargados, por orden creciente de su masa, son el elec-  
trón, el muón,  $\mu$ , y el tauón,  $\tau$ , y los neutrinos asociados  
son el neutrino electrónico,  $\nu_e$ , el neutrino muónico,  $\nu_\mu$ ,  
y el neutrino tauónico,  $\nu_\tau$ . Todos ellos tienen sus corres-  
pondientes antipartículas y están sujetos a la interacción  
débil pero no a la interacción fuerte y los cargados ade-  
más sienten la interacción electromagnética. De lo ante-  
rior se desprende que hay tres tipos diferentes de neutri-  
nos, se dice que el neutrino tiene tres sabores<sup>4</sup> diferentes.  
En las desintegraciones beta se producen neutrinos elec-  
trónicos y en la desintegración de los piones<sup>5</sup>, tanto po-  
sitivos,  $\pi^+$ , como negativos,  $\pi^-$ , se emiten neutrinos muó-  
nicos:



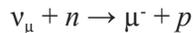
y



<sup>4</sup> El *sabor* es el nombre genérico de las cualidades distintivas,  
en este caso, de cada familia de leptones.

<sup>5</sup> El pión es el hadrón más ligero. Los hadrones son partículas  
subatómicas que están constituidas por quarks. Los piones  
son hadrones bosónicos compuestos de un quark y su anti-  
quark.

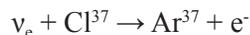
Se ha demostrado experimentalmente que los neutrinos de cada familia son diferentes, por ejemplo si se hace interaccionar neutrinos muónicos con neutrones siempre se produce la siguiente reacción:



pero nunca se producirían electrones, que si se originarían en el caso de que en la reacción la partícula incidente fuera un neutrino electrónico. Por lo cual se puede discriminar entre los distintos tipos de neutrinos por el tipo de reacción que inducen en su interacción con la materia.

### PROBLEMA DE LOS NEUTRINOS SOLARES Y DE LOS NEUTRINOS ATMOSFÉRICOS

En el interior del Sol se están produciendo continuamente reacciones termonucleares en las que se emiten neutrinos electrónicos. Aplicando modelos teóricos se podía calcular el número de neutrinos de esas características que deberían llegar a la Tierra procedentes del Sol. Para comprobar experimentalmente este resultado, un grupo de investigación dirigido R. Davis construyó en los años 60 el primer detector de neutrinos solares en el interior de una mina de oro, donde se introdujo una solución de 600 toneladas de cloro, ya que se pretendía detectar los neutrinos procedentes del Sol mediante la reacción beta inversa con el cloro:



pero sólo se midieron el 34% de los neutrinos que según los cálculos teóricos llegaban a la Tierra [5]. Distintos experimentos posteriores ofrecían similares resultados, se medían siempre menos neutrinos solares que los que se calculaba teóricamente. A esta discrepancia entre la teoría y el experimento se la denominó *problema de los neutrinos solares*.

Por otra parte, la Tierra está expuesta constantemente a un gran flujo de rayos cósmicos procedentes del espacio exterior. Las partículas que componen esta radiación cósmica interactúan con los núcleos atómicos de los elementos que componen la atmósfera y generan radiación secundaria, principalmente todo tipo de hadrones, entre ellos los piones que como se ha visto anteriormente al desintegrarse producen muones y sus correspondientes neutrinos muónicos. Un problema similar al de los neutrinos solares se planteaba con la medida de los neutrinos muónicos producidos en la atmósfera en estas interacciones. Además en este caso se ponía claramente en evidencia que el número de interacciones de

neutrinos muónicos detectados decrecía cuando los neutrinos tenían que recorrer más distancia entre la fuente y el detector. Uno de los experimentos que puso esto de manifiesto era el Kamiokande (Kamioka Nucleon Decay Experiment) situado en una mina de Japón, basado en la producción de radiación de Cerenkov<sup>6</sup> por los electrones acelerados al paso de los neutrinos. En este caso se midieron sólo un 60% [6] de los predichos teóricamente por lo que también se planteó el *problema de los neutrinos atmosféricos*.

### SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS: OSCILACIONES DE LOS NEUTRINOS

La respuesta a la diferencia entre los neutrinos medidos y los que se producirían, tanto en el caso solar como en el atmosférico, es que se han convertido en otro tipo de neutrinos. Es decir que los neutrinos “oscilan”, un neutrino de un determinado sabor leptónico (electrónico, muónico o tauónico) desde que se produce puede evolucionar transformándose en un neutrino de otro sabor y por lo tanto realizar diferentes interacciones en la materia. Esto explicaría que no se detectasen en la cantidad esperada. Para que esto pueda ocurrir la masa de los neutrinos debe ser diferente de cero, ya que según los cálculos de la mecánica cuántica elemental la probabilidad de que un neutrino oscile entre dos tipos de neutrinos depende de la diferencia entre sus respectivas masas, por lo que tampoco podría ocurrir si tuvieran la misma masa. Esta idea fue propuesta por V. Gribov y B. Pontecorvo en 1969 [7].

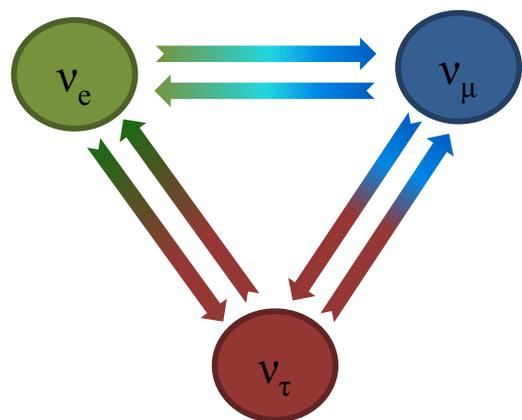


Figura 2. Representación de la oscilación de los neutrinos.

<sup>6</sup> La radiación de Cerenkov se produce cuando las partículas cargadas se mueven en un medio material a una velocidad mayor que la de la luz en ese medio material.

Aunque las oscilaciones de los neutrinos ofrecían una solución a los problemas de los neutrinos solares y atmosféricos, se requería la confirmación experimental.

El grupo de investigación de neutrinos atmosféricos, liderado por Takaaki Kajita, anunció en 1998 que el problema de los neutrinos atmosféricos estaba resuelto, confirmando la oscilación de los neutrinos. Esta conclusión se había puesto de manifiesto con los resultados obtenidos con una fuente artificial de neutrinos muónicos y el Super-Kamiokande [8], que permitía saber el instante preciso en que se producen los neutrinos y con la detección de ellos en dos lugares separados a una considerable distancia, comprobándose así que variaban de sabor en el trayecto. Este descubrimiento apareció incluso como una noticia en "The New York Times".

# The New York Times

Copyright © 1998 The New York Times NEW YORK, FRIDAY, JUNE 5, 1998 All Rights Reserved. No part of this publication may be reproduced without permission.

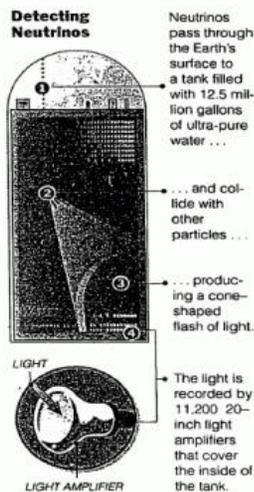
## Mass Found in Elusive Particle; Universe May Never Be the Same

### Discovery on Neutrino Rattles Basic Theory About All Matter

By MALCOLM W. BROWNE  
TAKAYAMA, Japan, Friday, June 5 — In what colleagues hailed as a historic landmark, 120 physicists from 23 research institutions in Japan and the United States announced today that they had found the existence of mass in a notoriously elusive subatomic particle called the neutrino.

The neutrino, a particle that carries no electric charge, is so light that it was assumed for many years to have no mass at all. After today's announcement, cosmologists will have to confront the possibility that a significant part of the mass of the universe might be in the form of neutrinos. The discovery will also compel scientists to revise a highly successful theory of the composition of matter, the Standard Model.

Word of the discovery had drawn some 300 physicists here to discuss neutrino research. Among other things, the finding of neutrino mass might affect theories about the formation and evolution of galaxies and the ultimate fate of the universe. If neutrinos have sufficient mass, their presence throughout the universe would increase the overall mass of the universe, possibly slowing its present expansion.



**And Detecting Their Mass**  
By analyzing the cones of light, physicists determine that some neutrinos have changed form on their journey. If they can change form, they must have mass.

Source: University of Hawaii

Figura 3. Portada del New York Times del 5 de junio de 1998.

Después de este éxito, era necesario comprobar si el déficit de neutrinos solares también podría ser explicado por las oscilaciones de los neutrinos. Para ello se instaló un nuevo experimento en una mina profunda de la localidad canadiense de Sudbury, llamado SNO (Sudbury

Neutrino Observatory), dirigido por Arthur B. McDonald, y en junio de 2001 se dio a conocer la primera evidencia experimental de que los neutrinos producidos en el interior del Sol cambiaban de sabor en su viaje del Sol a la Tierra [9, 10], en el experimento se observó que el 66% de los neutrinos emitidos por el Sol llegan como neutrinos muónicos y neutrinos tauónicos y que además la suma de todos los sabores de los neutrinos detectados confirmaba las predicciones teóricas de la cantidad de neutrinos emitidos por el Sol. La clave del éxito de SNO fue usar un detector con agua pesada. Cuando los neutrinos interactúan con los deuterones se pueden producir 2 protones, sólo en el caso del que el neutrino sea electrónico, o un protón y un neutrón para cualquier tipo de neutrinos. La relación entre el número de reacciones producidas de un tipo o de otro indica si hay transformaciones de los neutrinos electrónicos solares a otro tipo de neutrino.

Las oscilaciones de neutrinos son de gran interés tanto teórico como experimental, puesto que implican que el neutrino tiene masa no-nula, característica que no recoge el modelo estándar de la Física de Partículas.

## REFERENCIAS

- [1] J. Chadwick. Verh; Phys. Gesell. 16, 383 (1914).
- [2] L.M. Brown; Physics Today 31, nº9, 23 (1978).
- [3] E. Fermi; Z. Phys., 161 (1934).
- [4] F. Reines, C.L. Cowan; Phys. Rev. 112, 273 (1959).
- [5] R. Davis Jr, D.S. Harmer, K.C. Hoffman; Phys. Rev. Lett. 20, 1205 (1968).
- [6] K.S. Hirata et al.; Phys. Lett. B 280, 146 (1992).
- [7] V.N. Gribov, B. Pontecorvo; Phys. Lett. B 28, 493 (1969).
- [8] Y. Fukuda et al. (Super\_Kamiokande collaboration); Phys. Rev. Lett 81, 1562 (1998).
- [9] Q.R. Ahmad et al. (SNO Collaboration); Phys. Rev. Lett. 87, 071301 (2001).
- [10] Q.R. Ahmad et al. (SNO Collaboration); Phys. Rev. Lett. 89, 011301 (2002).

Amalia Williart Torres  
Dpto. de Física de los Materiales