

NEUTRINOS

HISTORIA

El problema
de los neutrinos
solares

FÍSICA FUNDAMENTAL

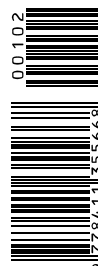
Partículas
mutantes

COSMOLOGÍA

Los neutrinos
y el universo

NUEVA FÍSICA

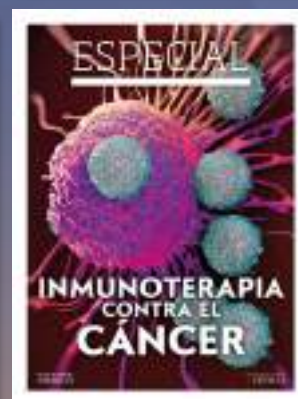
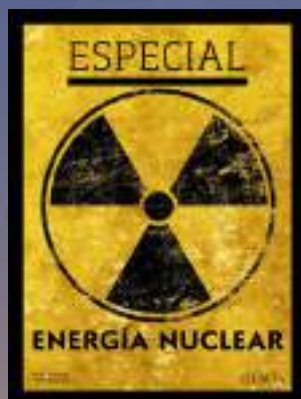
¿Existen
los neutrinos
estériles?



ESPECIAL

MONOGRÁFICOS DIGITALES

Descubre los monográficos digitales que reúnen nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial



Una hipótesis fecunda

«He hecho algo terrible: he postulado una partícula que no se puede detectar»

Tales palabras se le atribuyen a Wolfgang Pauli tras haber propuesto la existencia del neutrino. En una carta enviada el 4 de diciembre de 1930 a varios colegas de profesión, el físico austríaco exponía «una solución desesperada» para sortear la preocupante violación de la conservación de la energía que parecían exhibir algunas desintegraciones radiactivas. Para Pauli, dicha ley podía salvarse suponiendo que los núcleos atómicos emitían una partícula neutra mucho más ligera que el protón. Esa partícula portaría la energía que parecía desaparecer por arte de magia en las desintegraciones y, al no tener carga eléctrica, habría pasado inadvertida en los experimentos. «Admito que tal vez mi solución pueda parecer a priori poco probable», confesaba. «Pero quien no arriesga no gana.»

La idea fue bien acogida por Enrico Fermi, quien haciendo uso del sufijo italiano para los diminutivos bautizó la hipotética partícula como *neutrino*, en alusión a su pequeñísima masa. Gracias a él, Fermi logró formular la primera teoría de la interacción débil, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. El físico envió su idea a la prestigiosa revista *Nature*, que, sin embargo, la rechazó por contener «especulaciones demasiado alejadas de la realidad para ser del interés del lector».

En los 90 años transcurridos desde que Pauli postulase su existencia (pág. 4), los neutrinos han dejado de ser aquella desesperada hipótesis alejada de la realidad para convertirse en una pieza clave en la comprensión del universo. A través de algunos de los mejores artículos publicados en *Investigación y Ciencia* a lo largo de los últimos 35 años, varios de ellos firmados por premios nobel, el presente monográfico revive algunos de los hitos que han marcado la fascinante historia de esta partícula (págs. 12-49) y muestra su papel protagonista en la investigación actual en física de partículas (págs. 50-79), astrofísica y cosmología (págs. 80-96).

Aunque no fueran tan indetectables como insinuaba Pauli, los neutrinos no son fáciles de observar. Hubo de pasar un

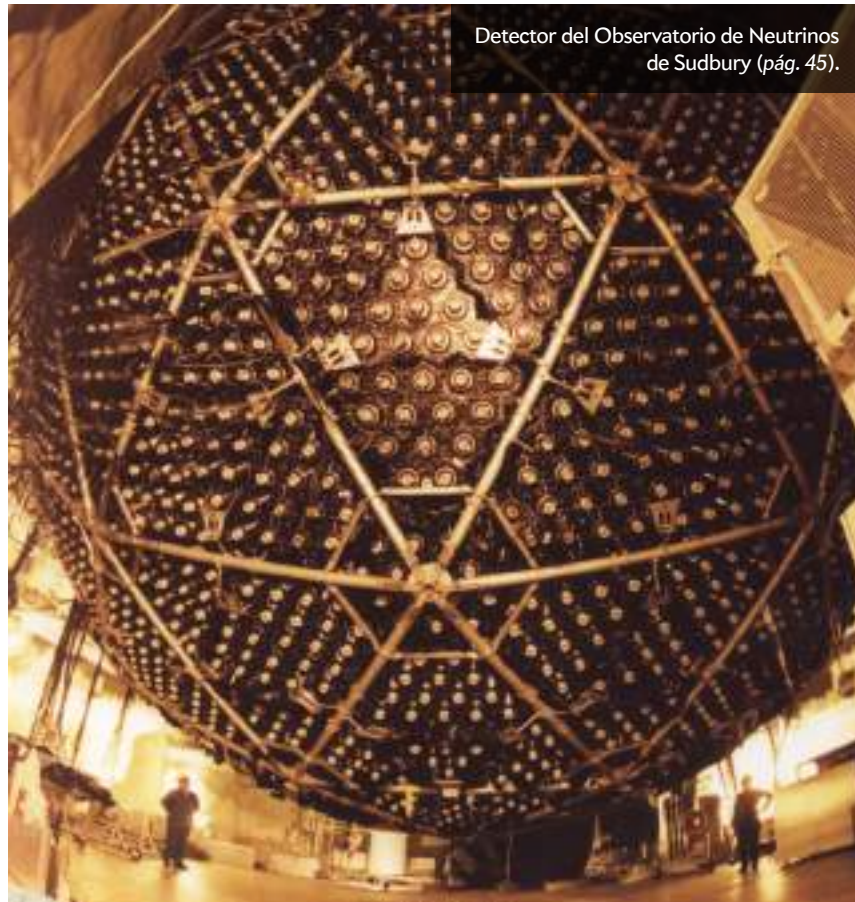
cuarto de siglo hasta que Clyde Cowan, Frederick Reines y sus colaboradores confirmaran su existencia. El neutrino se reveló esencial para entender las reacciones nucleares, el funcionamiento de las estrellas y la existencia de elementos químicos en el universo. A finales de los años sesenta, sin embargo, algo empezó a fallar. La cantidad de neutrinos procedentes del Sol que detectaban los experimentos era muy inferior a la que predecían los modelos solares. Tras un rompecabezas que se prolongó tres décadas, la solución llegó con uno de los descubrimientos más sobresalientes de la física de partículas moderna: el hallazgo de que los neutrinos de un tipo podían transformarse espontáneamente en neutrinos de otro.

La historia de estos acontecimientos se asemeja en ocasiones a un buen relato de

suspense y constituye un magnífico ejemplo de cómo funciona la ciencia. Buena parte de ella quedó recogida en los artículos que en su día publicaron en *Investigación y Ciencia* algunos de sus protagonistas (como Hans Bethe, John Bahcall, Takaaki Kajita y Arthur McDonald, entre otros) y que componen la primera parte de este monográfico.

Lejos de solucionar un problema y cerrar una puerta para siempre, la historia de esta partícula continúa escribiéndose hoy. El hallazgo de las oscilaciones de neutrinos reveló que el modelo estándar de la física de partículas aún tenía toda una región por explorar: la que dicta con detalle cómo se producen esas transformaciones. Su estudio es hoy un campo vibrante y que cuenta con probabilidades reales de deparar sorpresas en un futuro cercano. Sus perspectivas en física de partículas y su potencial para explorar el cosmos completan este número.

—La redacción



Detector del Observatorio de Neutrinos de Sudbury (pág. 45).

SUSCRÍBETE A LA REVISTA TEMAS

Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
~~27,60 €~~ 22 € por un año (4 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Selecciones temáticas
de nuestros
mejores artículos



www.investigacionyciencia.es/suscripciones
Teléfono +34 935 952 368

Los monográficos de
**INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA**



Neutrinos

1 Presentación: Una hipótesis fecunda

La redacción

4 Introducción: Un abanico de partículas

Jeremy Bernstein

HISTORIA DE UN PROBLEMA

14 Así explota una supernova

Hans A. Bethe y Gerald Brown

24 El problema de los neutrinos solares

John N. Bahcall

34 Detección de la masa de los neutrinos

Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoichi Totsuka

42 La resolución del problema de los neutrinos solares

Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark

PARTÍCULAS MUTANTES

52 Mensajeros fantasmales de nueva física

Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod

58 Un secreto escrito en el cielo

Sudeep Das y Tristan L. Smith

60 El enigma de los neutrinos

Clara Moskowitz

68 Neutrinos ocultos

William Charles Louis y Richard G. Van de Water

76 ¿Producen los reactores nucleares neutrinos estériles?

Alejandro Algora y José Luis Tañá

LOS NEUTRINOS Y EL COSMOS

82 IceCube: Astrofísica desde el hielo

Carlos Pérez de los Heros

92 El papel de los neutrinos en la evolución del universo

Licia Verde

94 ¿Por qué hay materia en el universo?

Silvia Pascoli y Jessica Turner



EN PORTADA

En los 90 años transcurridos desde que Wolfgang Pauli postulara su existencia, los neutrinos han pasado de ser una aventurada hipótesis a convertirse en una herramienta fundamental para entender la física nuclear, la evolución de las estrellas y el origen de los elementos químicos. Hoy las incógnitas que siguen encerrando constituyen un fecundo campo de investigación en física de partículas, astrofísica y cosmología. Ilustración: Getty Images/Dr_Microbe/iStock

Un abanico de partículas

¿Qué argumentos teóricos llevan a predecir la existencia de una partícula subatómica?

Jeremy Bernstein

LA FÍSICA TEÓRICA EN EL SIGLO XX SE HA CARACTERIZADO por la detección de partículas cuya existencia había sido predicha con anterioridad; en ocasiones, con décadas de antelación. También nos hemos encontrado con toda suerte de partículas que nadie esperaba. En esta ocasión, sin embargo, nuestro interés se centrará en cinco partículas pertenecientes al primer grupo. En orden de modernidad creciente, nos referimos al neutrino, el mesón pi, el antiprotón, los quarks y, por último, el bosón de Higgs.

Comencemos por el neutrino.

El 4 de diciembre de 1930, Wolfgang Pauli envió una carta a un grupo de físicos que asistían a un simposio en Tubinga. Tras dirigirse a ellos como «queridas damas y caballeros radiactivos», Pauli se disculpaba por no acudir a la conferencia. Bailarín y algo mujeriego, se justificó alegando que un baile le reclamaba en Zúrich. La carta constituye uno de los documentos más sorprendentes de la física del siglo xx.

A Pauli le preocupaba cierta anomalía observada en la desintegración beta. Años antes, el físico neozelandés Ernest Rutherford había llevado a cabo un extenso estudio sobre la radiactividad. Había identificado tres tipos de desintegraciones, a las que denominó alfa, beta y gamma. Algunos núcleos pesados, como los de plutonio, se desintegraban emitiendo una partícula alfa, o un núcleo de helio. Otros desprendían rayos gamma, o cuantos muy energéticos del campo electromagnético. Por último, había núcleos que producían una partícula beta: un electrón. Estos mostraban un comportamiento extraño.

La forma más obvia de imaginar el proceso consistía en suponer que un núcleo padre se transmutaba en un núcleo hijo y un electrón. Por tanto, como consecuencia de las leyes de conservación de la energía y el momento, todos los electrones

emitidos de esa manera debían poseer la misma energía. Los datos experimentales, sin embargo, revelaban todo un abanico de energías. Tal era el rompecabezas que Niels Bohr llegó a proponer que la energía y el momento no se conservaban en la desintegración beta. Pauli, en cambio, opinaba que semejante propuesta carecía de sentido, por lo que propuso una explicación alternativa: sugirió que en la desintegración beta participaba una partícula invisible, la cual se llevaría parte de la energía y el momento. Esa partícula debía ser eléctricamente neutra y tenía que interaccionar muy débilmente con las demás. De esta manera, desaparecería de la escena sin dejar rastro.

Ignoro por completo cómo asimilaron las damas y los caballeros radiactivos semejante propuesta. Tampoco queda claro hasta qué punto el propio Pauli se la tomaba en serio, pues nunca llegó a publicarla. Pero Enrico Fermi, en Roma, sí le dio crédito. Ello le permitió formular la primera teoría sobre la desintegración beta. Pauli había denominado «neutrón» a la nueva partícula. En 1932, sin embargo, James Chadwick descubrió lo que hoy conocemos con ese nombre: el componente neutro de los núcleos atómicos. Además, en italiano *neutrone* significa «el gran neutro». Pero la nueva partícula, si existía,



WOLFGANG PAULI Y NIELS BOHR observan divertidos una peonza en la inauguración de un instituto de física en la ciudad sueca de Lund. El juguete se comportaba de manera distinta a la mayoría de las peonzas: giraba primero en un sentido y después en el opuesto. Años antes, Pauli había postulado la existencia de una nueva partícula elemental: el neutrino.

debía poseer una masa extremadamente pequeña. Así que Fermi decidió llamarla *neutrino*; es decir, «el pequeño neutro». El nombre cuajó.

La primera vez que tuve noticia del neutrino, allá por los años cincuenta, su papel en la física nuclear resultaba incómodo, como el pariente loco de la familia al que todos desean ocultar. Esta circunstancia cambió con los reactores nucleares que Fermi construyó durante la guerra. Un reactor opera como una fábrica de elementos fisibles que se desintegran emitiendo partículas beta, por lo que generan ingentes cantidades de neutrinos. En 1956, los físicos Clyde Cowan y Fred Reines, que por aquel entonces trabajaban en Los Álamos, detectaron un flujo de más de 10 billones de neutrinos por segundo y centímetro cuadrado en las inmediaciones de la central nuclear de Savannah River, en Carolina del Sur. Podemos imaginar lo que debió sentir Pauli. Hoy los experimentos con neutrinos son moneda común. Sabemos que existen tres tipos distintos y que poseen una masa diminuta, lo que implica que se mueven a velocidades muy cercanas a la de la luz. Cierta experiencia reciente (en su momento muy debatido y ahora ya refutado) pareció indicar que se movían ligeramente más deprisa que la luz, algo que hubiese

contravenido la teoría de la relatividad de Einstein. «Queridas damas y caballeros radiactivos», en efecto.

EL MESÓN PI

En 1909, Ernest Rutherford y dos de sus estudiantes descubrieron en Manchester el núcleo atómico, la parte del átomo en la que se concentra la mayor parte de su masa. Ello suscitó preguntas sobre la composición de esos núcleos y qué era lo que mantenía unidos a sus componentes. Dado que, en condiciones normales, los átomos carecen de carga eléctrica neta, el núcleo debía contener cargas positivas. Los electrones, dotados de carga negativa, se hallaban distribuidos por todo el átomo, por lo que su carga había de compensarse con las cargas positivas del núcleo. Pero estas, a las que se dio en llamar protones, no podían ser el final de la historia. Para explicar la masa de los átomos hacían falta también objetos neutros. Rutherford propuso la razonable sugerencia de que quizás el núcleo contuviese protones y electrones. Pero, en 1930, Pauli y otros investigadores demostraron que esa idea no se ajustaba a los datos espectroscópicos. El misterio quedó resuelto en 1932, cuando Chadwick descubrió el neutrón. Pero entonces, ¿qué mantenía unido al núcleo?

El tamaño de un núcleo atómico es decenas de miles de veces menor que la distancia que lo separa de los electrones más cercanos. Los electrones se ocupan de la química, mientras que el núcleo desempeña la función de un simple espectador. Esta configuración nos indica que la fuerza atractiva entre protones y electrones se deja sentir a muy largas distancias. Pero esa misma fuerza hace que dos protones se repelan, por lo que, si no hubiese una interacción que la contrarrestase, el núcleo se disgregaría. Dicha interacción debía ser mucho más intensa que la fuerza electromagnética, pero de corto alcance. A estas preguntas se enfrentaban los físicos cuando apareció en escena Hideki Yukawa.

Yukawa nació en Tokio en 1907. Su padre enseñaba geología en la Universidad Imperial de Tokio, donde Yukawa estudió y obtuvo el grado de doctor en 1929, justo cuando Japón entraba en depresión. Trabajó como ayudante de un profesor de física teórica sin recibir por ello paga alguna, mientras continuó viviendo en casa de sus padres. El acceso a las publicaciones académicas le permitía seguir el rápido desarrollo de la teoría cuántica. En 1932, Werner Heisenberg publicó tres artículos sobre las fuerzas nucleares. Como Chadwick, Heisenberg creía que el neutrón era en realidad una partícula compuesta por otras; en concreto, por un protón y un electrón ligados. Eso implicaba que el núcleo atómico contenía electrones. Yukawa, en cambio, pensaba que los neutrones eran partículas elementales, no formadas por otras. Sobre esta idea basó su teoría de las interacciones nucleares.

La descripción más clara de su teoría nos llega de la mano de los diagramas que Richard Feynman habría de concebir años más tarde. Examinemos primero el caso de dos electrones en interacción. La imagen que la electrodinámica cuántica nos brinda de este proceso se corresponde con dos electrones que intercambian un fotón «virtual», una palabra que quiere dar a entender que no podemos detectarlo de manera directa. Las matemáticas que describen dicho intercambio de fotones dan como resultado la misma fuerza repulsiva que, ya en el siglo xviii, postulase el físico francés Charles-Augustin de Coulomb: su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia que media entre los objetos. Ello se debe a que la partícula transmisora, el fotón, carece de masa.

Pero la fuerza electromagnética no puede mantener el núcleo unido. Por varias razones: primero, porque es demasiado débil; y segundo, porque provoca que dos protones se repelan. Por tanto, Yukawa cambió el fotón por lo que él denominó «un cuanto pesado». Su teoría permitía elegir la intensidad del acoplamiento entre dicho cuanto pesado y los protones, por lo que Yukawa escogió un valor adecuado para que la atracción resultante venciese a la repulsión electromagnética. También la masa del cuanto pesado podía elegirse con libertad. Según las leyes de la mecánica cuántica, cuanto mayor es la masa de la partícula que media una interacción, menor alcance tiene esta. Yukawa conocía el tamaño del núcleo atómico, lo que le permitió deducir que la masa del cuanto intermediario debía

ascender a unas 200 veces la del electrón. En 1934 escribió un artículo en un perfecto inglés que, un año después, vio la luz en una revista académica japonesa de prestigio. Su publicación pasó completamente inadvertida.

El cuanto pesado de Yukawa fue detectado en 1947 en los rayos cósmicos. Con el tiempo, acabó recibiendo el nombre de mesón pi. Existían tres variedades: una neutra, una con carga positiva y otra con carga negativa. Con buena aproximación, su masa se correspondía con la predicha por Yukawa. Las versiones dotadas de carga se desintegraban con rapidez en neutrinos y «mesones mu», como se llamaba entonces a los muones (partículas similares al electrón, pero de mayor masa). En 1949, Yukawa se convirtió en el primer japonés galardonado con el premio Nobel. Edward Teller, físico nuclear no precisamente conocido por su habilidad para el verso humorístico, resumió su sorpresa ante el descubrimiento en los siguientes ripios:

*Hay mesones pi y hay mesones mu.
Los primeros nos sirven como pegamento nuclear.
Hay mesones tau, o eso sospechamos,
y otros muchos que aún no detectamos.
¿Puedes verlos, acaso?
Bueno, apenas de refilón,
porque su vida es breve
y su alcance, escaso.
La masa puede ser poca y puede ser mucha.
Podemos hallar una carga positiva o una negativa.
Y algunos jamás se mostrarán en una placa,
pues su carga es cero, aunque grande es su masa.
¿Cómo? ¿Ninguna carga en absoluto?
No, ninguna en absoluto.
O, si Blackett está en lo cierto,
es tremendamente pequeña.*

EL ANTIPROTÓN

En 1928, Paul Dirac escribió una ecuación para el electrón que conjugaba la teoría cuántica con la relatividad especial de Einstein. Hay quien afirma que se trata de la ecuación más hermosa de la física. Si bien quizá no haga falta llegar tan lejos, la expresión sí muestra una gran belleza:

$$(i\hbar\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} - mc) \psi(x^\mu) = 0.$$

Dirac convino de inmediato en que su ecuación sufría ciertos problemas. Para cada valor del momento del electrón existían cuatro soluciones, pero solo dos de ellas tenían sentido: las otras asignaban al electrón una energía negativa, algo absurdo. Durante un par de años, esto condujo a una situación que Pauli calificó de «física a la desesperada». Si el electrón poseía carga negativa y quedaba representado por las dos soluciones de energía positiva, entonces las otras dos debían corresponderse con una partícula idéntica al electrón, pero de carga opuesta. En ese momento nació la física de la antimateria. Por aquella época, sin embargo, nadie había observado ningún antielectrón.

EN SÍNTESIS

En numerosas ocasiones, los físicos han predicho la existencia de una partícula subatómica mucho tiempo antes de que esta fuese observada en los experimentos.

Los argumentos para ello han sido de lo más variados: desde la conservación del momento, como fue el caso del neutrino, hasta las propiedades de algunos espacios algebraicos.

Tales razonamientos siguen guiando la física de partículas actual. Conocerlos aporta una herramienta clave para entender la historia y los principios que rigen la disciplina.



EL FÍSICO JAPONÉS HIDEKI YUKAWA elaboró una teoría de las interacciones nucleares que predecía la existencia de un mesón que, con una masa intermedia entre la del protón y la del electrón, mantenía unido al núcleo atómico. La teoría se vio respaldada por los experimentos cuando se detectaron mesones pi en los rayos cósmicos.

Eso cambió en 1933, cuando Carl Anderson, del Instituto de Tecnología de California, detectó uno en los rayos cósmicos. La nueva partícula acabó recibiendo el nombre de positrón.

Una vez que se descubrió el positrón, los físicos comenzaron a tomar en serio la antimateria: toda partícula debía tener su correspondiente antipartícula. En algunos casos, como el del fotón o el del mesón pi neutro, partícula y antipartícula son idénticas. Los neutrinos no poseen carga, pero a día de hoy continúa siendo una incógnita si coinciden o no con su antipartícula. Lo que sí queda fuera de toda duda es que, si una partícula tiene carga e , su antipartícula ha de tener carga $-e$. Además, ambas deben tener exactamente la misma masa. En particular, el protón cuenta con una masa unas 2000 veces mayor que la del electrón y una carga igual a e . Por tanto, debía existir un antiprotón con la misma masa y con carga $-e$. ¿Cómo encontrarlo?

Los rayos cósmicos no ofrecían demasiadas posibilidades, ya que los antiprotones se aniquilan al entrar en contacto con la materia ordinaria y solo se observan los desechos de la desintegración. Hacía falta un acelerador con la potencia necesaria para crear un antiprotón. La idea consistía en acelerar un haz de protones a velocidades muy elevadas y luego estrellarlo contra un blanco; por ejemplo, hidrógeno líquido, un elemento cuyo núcleo consta solo de un protón. En la colisión se producirían antiprotones. Pero ¿cuánta energía necesitaría el acelerador?

Aquí empezaban las complicaciones. Al principio tenemos dos protones, uno en el haz y otro en el blanco, de manera que la carga total asciende a dos unidades positivas. Deseamos crear un antiprotón, que posee una unidad de carga negativa. Dado que la carga total se conserva a lo largo del proceso, necesitamos que en el estado final haya tres protones y un antiprotón. Si llamamos p^c al antiprotón y p al protón, la reacción en la que estamos interesados viene dada por $p + p \rightarrow p + p + p + p^c$. No existe proceso más sencillo que ese. Pero ¿a cuánto debía ascender la energía mínima del protón del haz inicial? Un cálculo sencillo nos revela que esta debe equivaler a unas seis veces la masa del protón. Cuando se realizó esta estimación, no había acelerador en el mundo capaz de alcanzar semejante energía.

Hacia finales de los años cuarenta comenzaron los planes para construir dicha máquina en la Universidad de California en Berkeley. Allí trabajaba Ernest Lawrence, el inventor del ciclotrón. Además de un físico excelente, Lawrence gozaba del talento necesario para recaudar la cantidad de dinero que requería un acelerador de ese calado, al que se llamó Bevatrón, un nombre inspirado en la energía que se pretendía alcanzar. La empresa dio sus frutos. En 1955, un grupo de físicos experimentales anunció el descubrimiento del antiprotón. No creo que el acontecimiento causase verdadera sorpresa a nadie, pero marcó el nacimiento de una buena cantidad de literatura fantástica dedicada a la antimateria.

En 1956, aquellos sucesos fueron narrados con gran detalle en *The New Yorker* en un poema firmado por H. P. F. Supe que las iniciales se referían a Harold Furth, físico y compañero mío en Harvard, donde escribía para la revista humorística universitaria *The Lampoon*. Bajo el título *Los peligros de la vida moderna*, su poema decía así:

*Mucho más allá de la tropostata
hay una región estelar y austera,
donde, en una veta de antimateria,
vivía el doctor Edward Anti-Teller.
Muy alejado de los orígenes de la Fusión,
vivía anónimo y tranquilo,
con todos sus antifamiliares y amigos,
y con macasares en sus sillas.
Una mañana, holgazaneando en el mar,
avistó un platillo de monstruoso contorno
que portaba tres letras: A. E. C.
y desde el que se alzó un visitante de la Tierra.
Entonces, gritando con regocijo sobre las arenas,
se encontraron dos seres que, a su extraña manera,
eran tan iguales como dos lentejas.
Sus manos derechas se estrecharon
y el resto fueron rayos gamma.*

Desconozco dónde se encuentra la «tropostata», pero donde sin duda puede hallarse una gran cantidad de antiprotones es en el cinturón interior de Van Allen. Los cinturones de Van Allen son regiones anulares que rodean nuestro planeta y en las que las partículas quedan retenidas por efecto del campo magnético terrestre. El cinturón interior se extiende entre unos 1000 y 10.000 kilómetros por encima de la superficie de la Tierra. Algunos protones de energía muy elevada permanecen atrapados allí, donde producen antiprotones mediante procesos muy similares a los que se llevaron a cabo en el Bevatrón. Por fortuna, no hay tantos como para que supongan una amenaza para los viajes espaciales.

EL QUARK

*Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark.
And sure any he has it's all beside the mark.
(James Joyce, *Finnegans Wake*)*

En marzo de 1963 asistí a una conferencia de Murray Gell-Mann en la Universidad de Columbia. En ella, el físico expuso una teoría que había concebido para clasificar partículas elementales. No sin cierto humor, su método se denominaba *camino óctuple*. De acuerdo con la doctrina budista, para llegar al nirvana debe seguirse el «noble camino óctuple», que invita a observar un discurso correcto, una intención correcta y una meditación correcta. El camino propuesto por Gell-Mann para alcanzar el fin del sufrimiento consistía, en cambio, en un modelo para clasificar una desconcertante cantidad de partículas que nadie había predicho ni entendía. El número ocho desempeñaba en él un papel esencial. A pesar de sus aparentes diferencias, las partículas parecían poder clasificarse en «multipletes»: conjuntos de partículas con características predecibles. Uno de los primeros que se identificaron fue un octuplete (también llamado «octeto») que incluía, entre otros, los mesones π .

En el seminario, Robert Serber, un físico de la Universidad de Columbia tan brillante como reservado, formuló una pregunta. Había estudiado el trabajo de Gell-Mann y se había apercibido de que el multiplete más sencillo que podía construirse era uno que contenía solo tres partículas. ¿Había considerado Gell-Mann tal posibilidad? Sí, pero le había llevado a un callejón sin salida. Gell-Mann comentó algo sobre el tema y, más tarde, se unió a algunos de nosotros en un restaurante chino. Allí tuvo lugar una frenética discusión.

Imaginemos que tal triplete existiera, se dijo en la conversación. La idea entonces consistiría en usar esas tres partículas a modo de ladrillos para construir todas las demás. Eso ya se había intentado con anterioridad. Fermi, entre otros, había imaginado que los mesones π se componían de protones, neutrones y sus correspondientes antipartículas. El mesón π con carga negativa estaría formado por un neutrón y un antiprotón. Pero, cuando empezaron a descubrirse todas aquellas partículas nuevas, quedó claro que había que generalizar la idea.

El japonés Soichi Sakata había propuesto un modelo en el que todas las partículas se hallaban compuestas por otras tres que él creía más elementales: el protón, el neutrón y el Λ^0 (lambda cero), una nueva partícula que había sido descubierta poco antes. Aunque todas las partículas conocidas podían construirse a partir de esas tres, el modelo de Sakata no resultaba demasiado convincente. No solo no explicaba por qué esas tres partículas eran más elementales que el resto, sino que predecía otras que no habían sido observadas jamás. Por último, tampoco se mostraba compatible con el camino óctuple, que tan bien parecía funcionar. Así pues, Gell-Mann se vio obligado a empezar de cero.

No había ninguna razón para que el triplete del camino óctuple tuviese que estar compuesto por partículas ya conocidas. De hecho, el modelo de Sakata parecía insinuar que era mejor no ir en esa dirección. Así que Gell-Mann introdujo tres partículas hipotéticas nuevas a las que llamó *arriba*, *abajo* y *extraño*; o u , d y s , respectivamente (sus iniciales en inglés). Ahora ya podía empezar a construir las partículas conocidas. El protón, por ejemplo, constaría de la combinación uud ; el neutrón sería udd , y la partícula Λ^0 , uds . Pero entonces surgía un problema: ¿qué carga eléctrica poseían las nuevas partículas? Hasta ese momento,

todas las cargas observadas en la naturaleza se correspondían con un múltiplo entero de la del electrón. Si a este se le asigna carga -1 , al protón le corresponde el valor $+1$. Si aplicamos dicha regla a los ladrillos u , d y s con el objeto de reproducir las cargas de las demás partículas, nos veremos en un callejón sin salida. Imaginemos que a la partícula u le asignamos una unidad de carga. Para obtener la carga del protón (uud), la partícula d debería poseer entonces una unidad de carga negativa. Pero, en tal caso, el neutrón (udd) tendría también carga negativa. Resulta imposible cuadrar las cuentas si nos empeñamos en manejar múltiplos enteros de la carga del electrón. ¿Qué hacer?

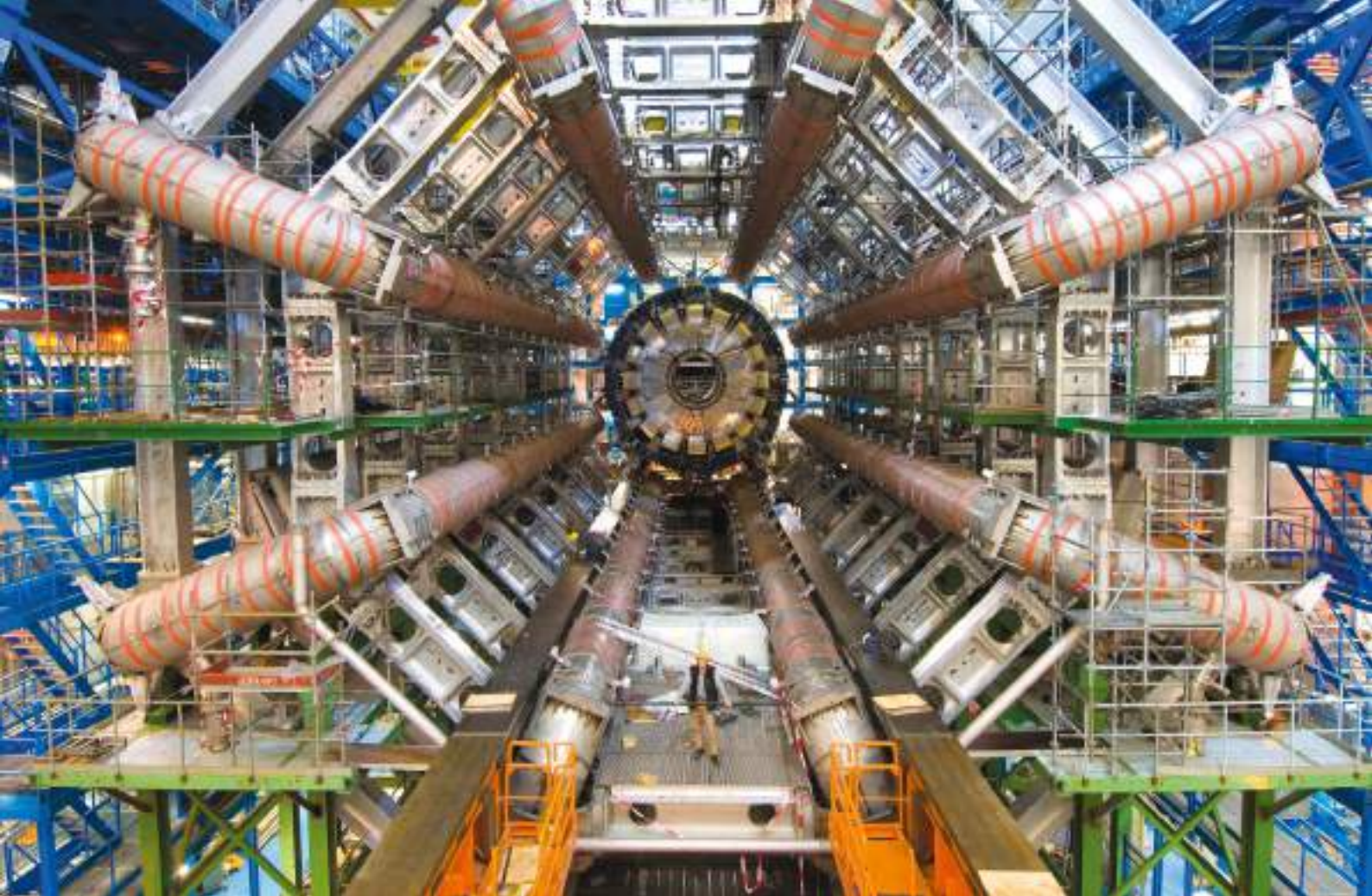
Gell-Mann intentó algo que solo podía tratarse de una locura o de una genialidad: asignar cargas fraccionarias. La partícula u quedaba así con carga $+2/3$, mientras que a d y s les adjudicó el valor $-1/3$. El modelo funcionaba, pero a costa de introducir un tipo de partículas que nunca nadie había observado. ¿Dónde estaban? Deberían verse como el Sol en un cielo despejado. La búsqueda comenzó de inmediato.

Mientras, Gell-Mann decidió darles nombre. Cuando había comenzado a pensar en las nuevas partículas, le había venido a la cabeza un sonido relacionado con una de sus aficiones, la ornitología: algo así como *cuac*. Pero Gell-Mann siempre había mostrado un gran interés por la lingüística y los juegos de palabras como los que llenan *Finnegans Wake*, de James Joyce. Un día, al hojear el libro, dio con la frase «¡Tres quarks para Muster Mark!». Ello le bastó para decidirse a fijar en *quark* la grafía del nuevo vocablo. Había nacido un nuevo término (con independencia de la palabra alemana *Quark*, que designa un tipo de queso fresco).

Muy pronto quedó patente que los quarks libres no se observarían jamás. Haciendo de la necesidad virtud, se inventó una dinámica que confinaba los quarks en el interior de las partículas. Según esta idea, los quarks intercambiarían *gluones* (de la voz inglesa *glue*, «pegamento»). Pero la dinámica de los gluones exhibía una característica muy peculiar. Antes mencionamos que la intensidad de las fuerzas decrece con la distancia. Los gluones, sin embargo, se rigen por el principio opuesto. Podemos pensar en una goma elástica: la fuerza que tira de sus extremos aumenta cuanto más la estiramos. Por supuesto, llega un momento en el que la goma se rompe. Pero con los quarks no ocurre así: la fuerza entre ellos simplemente crece con la distancia de separación. Por tanto, permanecerán siempre prisioneros en sus celdas, las partículas.

Para algunos, semejante propiedad suscitaba una pregunta: ¿hasta qué punto podemos decir que los quarks existen? Cuando la oí por primera vez, recordé las discusiones de finales del siglo XIX y principios del XX acerca de si los átomos existían realmente. Por aquel entonces aún no se habían observado. Einstein, lúcido testigo de la época, lo explicó así: hay dos tipos de átomos, el del físico y el del químico. Este último es un símbolo visual. Podemos dibujar un diagrama de la molécula de agua sin conocer la masa ni el tamaño de los átomos de hidrógeno u oxígeno. Pero los físicos sí desean saber el valor preciso de esas masas y tamaños. Un químico argumentaría que los átomos existen, mientras que un físico podría expresar sus reservas. Pero con los quarks la situación es mucho más peliaguda, pues, en estado libre, resultan inobservables por cuestión de principio.

En 1960 se construyó un nuevo acelerador, el Colisionador Lineal de Stanford. Al contrario que en los ciclotrones, donde las partículas viajan en círculos, la nueva máquina aceleraba electrones a una energía muy elevada a lo largo de un camino recto de dos kilómetros y los hacía colisionar contra un blanco



EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES (LHC) del CERN, en Ginebra, no es solo el acelerador de partículas más potente que existe, sino también el mayor experimento físico jamás construido. Con él los físicos intentan estudiar las condiciones a las que se encontraba la materia poco después de la gran explosión. Para ello hacen colisionar haces de partículas subatómicas llamadas hadrones (ya se trate de protones o de núcleos atómicos pesados) a energías muy elevadas.

de protones. La mayoría de los físicos pensaban que los electrones atravesarían los protones sin más. Pero no sucedió así. Los resultados mostraban que los electrones se topaban con objetos duros en el interior del protón. Aún más: esos objetos poseían las cargas fraccionarias asignadas a los quarks. A partir de entonces, argumentar que los quarks no existían se volvió mucho más complicado.

Sería una negligencia no resumir lo que ocurrió tras ese descubrimiento. Hoy sabemos que hay seis tipos de quarks. Además de los anteriores, existen las variedades *encanto*, *fondo* y *cima*; o *c*, *b* y *t*. Todos poseen cargas fraccionarias, y sus masas abarcan desde una pequeña fracción de la masa del protón hasta unas 200 veces ese valor. Pero la situación resulta algo más compleja. Las leyes de la mecánica cuántica imponen que una partícula no puede contener dos quarks idénticos, lo cual se debe al principio de exclusión de Pauli. El protón contiene dos quarks *u*; sin embargo, el problema se evita porque cada uno de ellos puede adoptar un estado con distinto momento angular. Pero en 1964 se descubrió en el Acelerador Nacional de Brookhaven una partícula llamada Ω^- (omega menos). El camino óctuple de Gell-Mann había predicho su existencia, pues era la pieza que faltaba en un decuplete. Sin embargo, se componía de tres quarks *s*, algo que el principio de exclusión de Pauli ya no permitía.

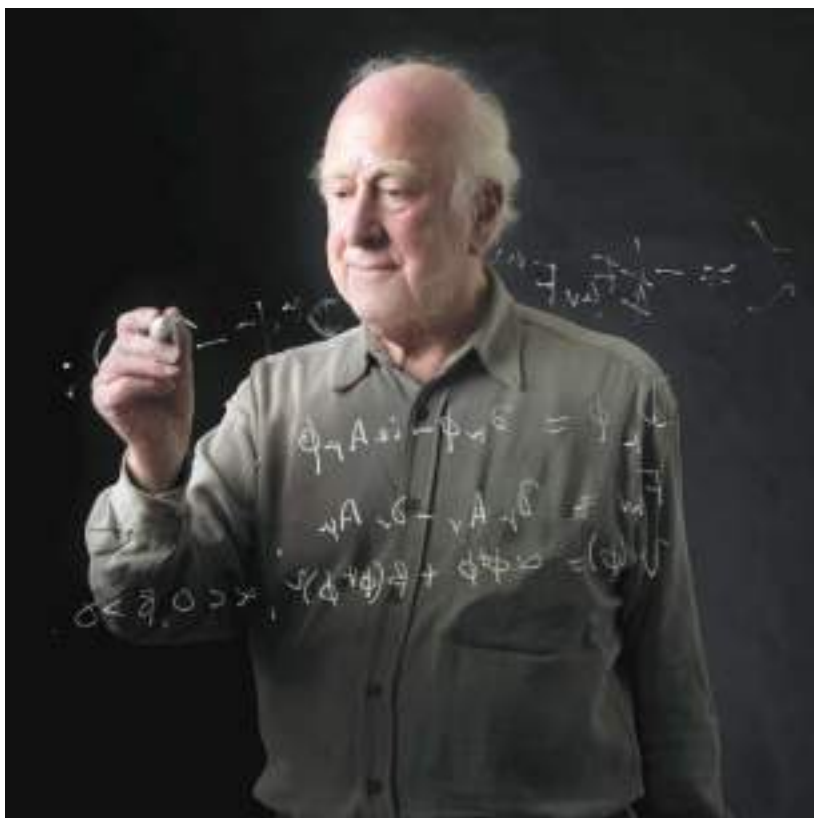
Para obtener distintos tipos de quarks, los teóricos inventaron una nueva propiedad denominada «color». Aquí la pala-

bra no sirve más que como metáfora para indicar cierto rasgo que permite distinguir unos quarks de otros. La elección de los colores suele reflejar la nacionalidad del físico que habla de ellos. A algunos estadounidenses les gusta usar el rojo, el azul y el blanco. Por tanto, cuando decimos que la partícula Ω^- se encuentra formada por tres quarks *s*, se entiende que cada uno de ellos posee un color distinto. Si usted cree que todo lo anterior resulta complicado, debería echar un vistazo a la lista de partículas conocidas. Que todas ellas se hallen compuestas por una cantidad tan limitada de objetos con apenas unas pocas propiedades constituye un hecho realmente destacable.

EL BOSÓN DE HIGGS

Desde el principio estuvo claro que el camino óctuple aparecía como consecuencia de una simetría aproximada. Ello quedaba patente por la masa de las partículas. Los mesones π formaban parte de un octuplete junto a los mesones *K*, pero la masa de los segundos superaba en unas tres veces a la de los primeros. De tratarse de una simetría exacta, todas las partículas pertenecientes a un mismo octuplete poseerían la misma masa. De hecho, si nos fijamos en las propiedades de estas partículas, no resulta nada evidente que guarden relación alguna entre sí. Ello dificultó enormemente la búsqueda de la simetría que las unificaba.

El tipo de ruptura de simetría presente en el camino óctuple es tan antiguo como la propia mecánica cuántica. Fue consi-



PETER HIGGS, físico teórico de la Universidad de Edimburgo, predijo la existencia de la partícula que hoy conocemos como bosón de Higgs. Esta partícula y el campo asociado permiten entender por qué las partículas elementales tienen masa.

derado por vez primera por el matemático Hermann Weyl y el físico Eugene Wigner, quien lo aplicó a los espectros atómicos. En el átomo, los electrones se mueven en «órbitas» alrededor del núcleo. La cuantización de esas órbitas supuso la culminación de un gran trabajo por parte de Niels Bohr. Los electrones tienden a situarse en la órbita de menor energía, o estado fundamental. Pero, si la energía térmica o un impulso eléctrico excita el átomo, los electrones saltan a órbitas más energéticas. Cuando la perturbación cesa, regresan a las órbitas originales y, en el proceso, emiten radiación. Esta produce los característicos espectros atómicos. El espectro de un átomo viene a ser como su huella dactilar, por lo que siempre nos revela de qué elemento se trata. Gracias a ello sabemos, por ejemplo, que la atmósfera del Sol contiene helio.

Las líneas de un espectro atómico reflejan las distintas simetrías que exhiben las órbitas de los electrones. Sin embargo, cuando colocamos un átomo en un campo magnético, algunas simetrías pueden perderse. Como consecuencia, lo que antes aparecía como una sola línea se divide en un grupo de ellas. Resulta posible calcular el número y la intensidad de dichas divisiones, pues quedan determinadas por la simetría que ha desaparecido. Este tipo de ruptura de simetría, considerado por Wigner y Weyl, es el que tiene lugar en el camino óctuple. Aparece una perturbación que rompe la simetría, de manera que surgen diferencias entre las masas de los componentes de un multiplete. Si efectuamos los cálculos con cuidado, obtendremos que dichas variaciones entre las masas se encuentran relacionadas. Dicho resultado coincide con los datos experimentales, lo cual aumenta nuestra confianza en el modelo.

Supe de la ruptura de simetría descrita por Wigner y Weyl en los años sesenta, en mis cursos de mecánica cuántica. Pero en 1961, Yoichiro Nambu y su estudiante Giovanni Jona-Lasinio publicaron dos artículos que lo cambiaron todo: introdujeron un tipo totalmente nuevo de ruptura de simetría. En el discurso que Nambu pronunció al recoger el Nobel en 2008, propuso el siguiente ejemplo: «Consideremos una barra elástica en posición vertical. Esta posee una simetría frente a rotaciones, ya que presenta el mismo aspecto sea cual sea la dirección horizontal desde la que miremos. Pero, si aplicamos presión y la barra se combe, lo hará en una dirección determinada y la simetría desaparecerá. En principio, la flexión podía haberse producido en cualquier dirección, pues todas eran equivalentes. Pero no apreciaremos ese hecho hasta que no repitamos el experimento varias veces».

Otro ejemplo consiste en tomar la misma barra y colocarla de pie en el suelo. La mecánica cuántica nos dice que nunca adoptará una posición perfectamente vertical: siempre existirá una indeterminación mínima en el ángulo que forme con el suelo. En algún momento caerá. Puede hacerlo en cualquier dirección, pero, una vez que eso ocurra, la simetría original habrá desaparecido. De forma más abstracta, diremos que una ecuación puede exhibir ciertas simetrías, pero sus soluciones no están

obligadas a respetarla. Este fenómeno se denomina ruptura espontánea de simetría, para distinguirla de la ruptura de simetría descrita por Wigner y Weyl, en la que simplemente se agrega un término que no respeta la simetría a las ecuaciones. Aquí no añadimos nada.

Las ideas de Nambu permean numerosas áreas de la física. Además de la teoría de las partículas fundamentales, las aplicó a los imanes, los cristales y los superconductores. Pero fue al estudiar uno de sus modelos de física de partículas cuando se topó con una sorpresa. Hacia los años veinte del siglo xx, el físico indio Satyendra Nath Bose introdujo un tipo de estadística que debían obedecer algunas partículas, como los mesones pi y K. Bose aplicó sus ideas a los fotones y envió el artículo a Einstein, quien sugirió algunas correcciones y consiguió que se publicase. En honor a Bose, las partículas que obedecen esta estadística se denominan hoy bosones. La otra clase de partículas, entre las que se cuentan el electrón, el protón y el neutrino, reciben el nombre de fermiones, por Fermi.

La sorpresa con la que se encontró Nambu resultó ser un bosón de masa nula. En aquel momento se sabía que los fotones carecían de masa. Y se pensaba que también los neutrinos tenían masa nula (una suposición que años más tarde se demostraría falsa). Sin embargo, no se conocía, ni entonces ni ahora, ningún bosón del tipo predicho por Nambu. Al principio se pensó que quizá todo se debiese a un artificio de su modelo. Pero, en 1961, el físico británico Jeffrey Goldstone halló en otro modelo la misma clase de partículas, hoy conocidas como bosones de Nambu-Goldstone. Todo el mundo comenzó a pensar que dichos bosones constituían una plaga ubicua en todo proceso de rup-

tura espontánea de simetría. De ser así, el fenómeno carecería de relevancia en la física de partículas elementales.

El gran avance llegó en 1964 de la mano de Walter Gilbert, profesor de biofísica en Harvard, cofundador de la empresa de biotecnología Biogen y ganador en 1980 del premio Nobel de química. Los argumentos de Nambu y Goldstone eran correctos, pero no lo suficientemente generales. Gilbert analizó las premisas de sus trabajos y se percató de que el electromagnetismo no las satisfacía. Aquello supuso una auténtica liberación para los físicos teóricos. El primero en explotarla por completo, al menos sobre el papel, fue el físico británico Peter Higgs. Este consideró un modelo que describía la interacción entre un fotón de masa nula y otros bosones. La teoría presentaba cierta simetría. Esta se rompía de manera espontánea y, entonces, ocurría el milagro: el fotón se volvía masivo y aparecía un bosón *con* masa, hoy universalmente conocido como bosón de Higgs. Hay que ver los detalles matemáticos para creerlo.

El primero en aplicar esas ideas con éxito fue Steven Weinberg. Para explicar sus logros, hemos de retroceder algo en el tiempo. Desde un punto de vista muy general, en la naturaleza existen cuatro fuerzas fundamentales. La interacción fuerte mantiene a los quarks confinados en partículas como el protón mediante el intercambio de gluones. La siguiente en intensidad es el electromagnetismo, en el que partículas dotadas de carga eléctrica intercambian fotones. Pospondremos la discusión sobre las interacciones débiles (las siguientes en intensidad) para mencionar la más débil de todas: la gravedad. En este caso se intercambian gravitones, los cuales jamás han sido observados. Puede parecer paradójico que la gravedad aparezca como la fuerza menos intensa de todas, ya que nosotros la experimentamos de manera constante. Pero ello se debe a que ejerce solo efectos atractivos, por lo que siempre se suman. Gracias a ello, la Tierra nos mantiene con los pies en el suelo.

Las interacciones débiles causan, entre otros fenómenos, la desintegración beta. Fermi intentó basarse en el electromagnetismo para modelizarla, pero introdujo una modificación de gran calado: las partículas transmisoras de su teoría poseían, de manera efectiva, una masa infinita. Ello implicaba que la fuerza presentaba un alcance nulo, por lo que, para interaccionar, las partículas debían superponerse. La teoría parecía funcionar bien, pero desentonaba con el resto de las interacciones, en las que las partículas mediadoras tenían masas razonables. De modo que se propusieron nuevas partículas que mediasen en la interacción débil. Su masa debía ser muy elevada, pero finita. Había tres: dos con carga eléctrica, denominadas bosones *W* por *weak* («débil» en inglés) y una neutra, a la que se llamó bosón *Z* por razones menos claras. Ambas clases de partículas fueron detectadas en 1983 y su masa resultó ser unas 90 veces la del protón. Los físicos ya habían supuesto que existirían y habían elaborado teorías sobre ellas con las que llevaban trabajando años. Sin embargo, aquellos modelos adolecían de un problema: predecían resultados infinitos que no se dejaban tratar con las técnicas de renormalización, las mismas que permitían eliminar los infinitos en electrodinámica cuántica. La situación era desesperante hasta que llegó Weinberg.

La teoría de las interacciones electrodébiles de Weinberg empieza con una situación simétrica en la que ni los fotones ni los bosones que median las interacciones débiles tienen masa. Estos interaccionan con otros bosones, de manera análoga a como sucedía en el modelo de Higgs. Entonces, la simetría se rompe espontáneamente y el milagro sucede de nuevo: los bosones que median las interacciones débiles adquieren masa, el bosón

de Higgs también, pero el fotón no. Además, los infinitos se vuelven tratables. Todo encaja como las piezas de un reloj suizo, pero deja abierta una cuestión: ¿dónde está el bosón de Higgs?

Nunca la física ha invertido tanto tiempo y dinero en una cacería similar. Hemos emprendido un largo viaje desde los tiempos de Rutherford, que descubrió el núcleo atómico con un experimento que cabía en una mesa de laboratorio. Tres gigantescos aceleradores han participado en la búsqueda, dos de ellos en el CERN. El más antiguo de ellos, el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP), ha sido desmantelado. Nos enseñó que, en caso de existir, el bosón de Higgs debía tener una masa 120 veces mayor que la del protón. Sin embargo, no halló pruebas de su existencia. Los experimentos del Tevatrón del Fermilab, cerca de Chicago, también clausurado, mejoraron esa cota en unos tantos por ciento. Los teóricos han presentado argumentos convincentes sobre el valor máximo permitido para la masa del bosón de Higgs. Las posibilidades que quedan se encuentran al alcance del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el flamante acelerador actual del CERN.

Si el LHC confirma la existencia del bosón de Higgs, marcará el punto final de un largo capítulo de la física teórica. La historia me recuerda a la de un compañero francés. Cierta parámetro había sido bautizado con su nombre, por lo que aparecía con bastante frecuencia en las discusiones sobre las interacciones débiles. Al final, el parámetro fue medido y el modelo confirmado en los experimentos. Sin embargo, cuando fui a felicitarle, lo hallé entristecido porque ya no se hablaría más de su parámetro. Si el bosón de Higgs no apareciese, la situación se tornaría muy interesante, puesto que nos veríamos ante imperiosa necesidad de inventar nueva física.

No creo que demasiados colegas de profesión coincidan conmigo en este último punto. Me recuerda a la historia de Einstein cuando recibió el telegrama en el que se le comunicó que acababan de medir la curvatura de la luz al pasar cerca del Sol, tal y como predecía su teoría de la relatividad general. Lleno de alegría, se lo mostró a Ilse Rosenthal-Schneider, una de sus estudiantes. Ella le preguntó cuál habría sido su reacción si la confirmación de la teoría no hubiera llegado. «*Da könnt' mir halt der lieber Gott leid tun. Die Theorie stimmt doch*», contestó Einstein: «Habría sentido lástima por nuestro querido Dios. La teoría es correcta a pesar de todo».

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, septiembre de 2012

Este artículo fue escrito cuatro meses antes de que el CERN anunciase el descubrimiento del bosón de Higgs.

© American Scientist Magazine

EL AUTOR

Jeremy Bernstein es profesor emérito de física del Instituto de Tecnología Stevens, en Nueva Jersey.

PARA SABER MÁS

La cebolla cósmica: Los quarks y la naturaleza del universo. Frank E. Close. Editorial Crítica, 1988.

Quantum Leaps. J. Bernstein. Harvard University Press, 2009.

Neutrino. Frank E. Close. Oxford University Press, 2010.

The infinity puzzle: Quantum field theory and the hunt for an orderly universe. Frank E. Close. Basic Books, Nueva York, 2011.

The quantum story: A history in 40 moments. J. E. Baggot. Oxford University Press, Nueva York, 2011.



Historia de un problema



La energía de las estrellas proviene de las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en su interior. Tales reacciones emiten ingentes cantidades de neutrinos.

HISTORIA DE UN PROBLEMA

Así explota una supernova

Cuando una estrella agota su combustible nuclear, su parte central se contrae en milisegundos y el «rebote» subsiguiente origina una onda que arrastra consigo la mayor parte de la materia estelar

Hans A. Bethe y Gerald Brown

LA MUERTE DE UNA GRAN ESTRELLA ES UN SUCESO BRUSCO y violento. La estrella evoluciona pacíficamente durante millones de años, pasando por diversas fases de desarrollo. Pero, cuando consume su combustible nuclear, se contrae bajo su propio peso en menos de un segundo. Los sucesos más importantes de la fase de colapso transcurren en milisegundos. Lo que sigue es una supernova: una explosión prodigiosa, más potente que todas las que se hayan producido desde la gran explosión original con que comenzó nuestro universo.

Una sola estrella en explosión puede fulgurar con más brillo que una galaxia entera, compuesta por miles de millones de soles. En el curso de meses, emite tanta luz como el Sol durante mil millones de años. Además, la luz y otras formas de radiación electromagnética tan solo representan una pequeña porción de la energía total de la supernova. La energía cinética de la materia en explosión es diez veces mayor. Y más energía todavía —tal vez 100 veces más que la asociada a la emisión electromagnética— transportan las partículas sin masa llamadas neutrinos, emitidos en su mayoría en un destello que dura alrededor de

un segundo. Cuando termina la explosión, la mayor parte de la masa de la estrella se ha repartido por el espacio, y del núcleo central solo quedan oscuras y densas cenizas. En algunos casos, estas pueden acabar convertidas en un agujero negro.

En líneas generales, esta descripción de una supernova podría haberse dado hace treinta años. Pero la sucesión pormenorizada de lo que acontece en una estrella moribunda no se conoce con seguridad ni siquiera hoy. El nudo de la cuestión es el siguiente: si la supernova comienza con un colapso, o implosión, ¿cómo puede acabar expulsando la mayor parte de la masa de la estrella? Tiene que haber algún momento en que la caída de la materia estelar se detenga y luego se invierta. La implosión debe transformarse en explosión.

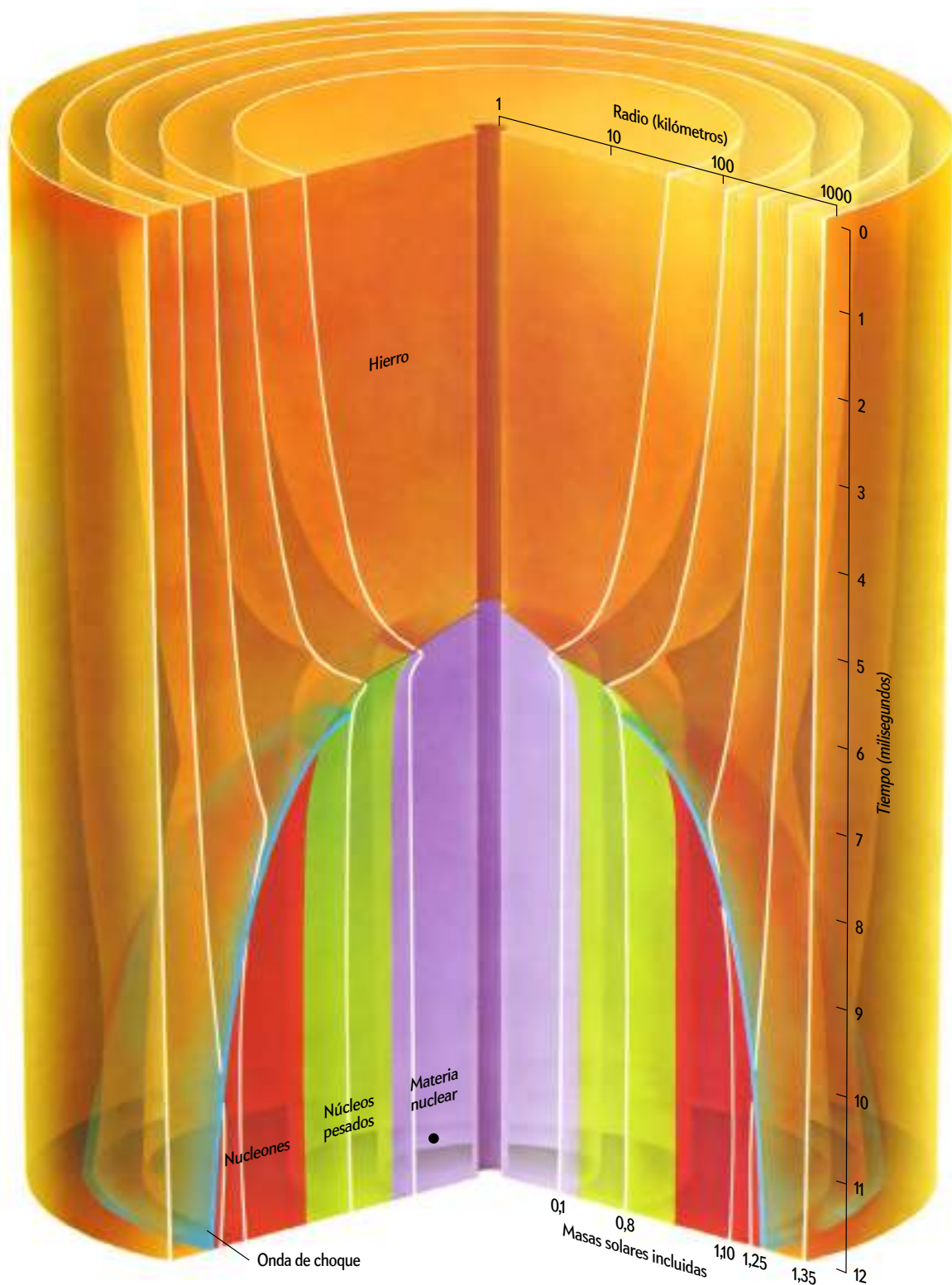
Gracias a la combinación de simulaciones por ordenador y análisis teóricos, estamos comenzando a divisar un marco coherente de los mecanismos que rigen las explosiones de supernova. El suceso clave por el que la implosión se transforma en explosión parece ser la formación de una onda de choque que se propagaría hacia fuera, a una velocidad 30.000 kilómetros por segundo o más.

EN SÍNTESIS

Las explosiones de supernova de tipo II se producen cuando una estrella de gran masa agota su combustible nuclear. Al cesar la producción de energía, la masa de la estrella comienza a caer hacia el centro del astro a enormes velocidades.

La pregunta es qué fenómeno convierte esa implosión en una violenta explosión. La razón es la compresión extrema del núcleo estelar: una vez que su densidad supera la de un núcleo atómico, se distiende tal y como lo haría una bola de goma.

Eso genera una potente onda de choque que se propaga hacia el exterior a decenas de miles de kilómetros por segundo, lo que desgarrará la estrella y expulsa sus capas al espacio. En todo el proceso, los neutrinos desempeñan un papel fundamental.



EL COLAPSO Y LA DISTENSIÓN son los sucesos que desencadenan la explosión de una supernova. Este esquema muestra el núcleo de una estrella de gran masa a su paso por el momento de «máximo estrujamiento», aquel en que la parte central alcanza su mayor densidad. Cada superficie representa una capa de materia cuya posición radial se ha seguido a lo largo de un período de 12 milisegundos. La masa total comprendida dentro de la superficie no cambia cuando la capa se contrae o se expande. Inicialmente el núcleo es de hierro, pero la extrema compresión del colapso transformará su parte más interna en una especie de núcleo atómico gigante. Una capa formada por varios núcleos pesados, hierro incluido, rodea a esa región. En el momento de máximo estrujamiento, la contracción se detiene de golpe, lo que da origen a una onda de choque (*línea azul*) que se propaga hacia fuera a 30.000 kilómetros por segundo o más. En la estela de esa onda de choque, los núcleos atómicos se disocian en nucleones individuales.

DEL HIDRÓGENO AL HIERRO

Las supernovas son sucesos raros. En nuestra propia galaxia no se han registrado más que tres durante los últimos mil años. La más brillante, documentada por astrónomos chinos en el año 1054, originó la capa de gas en expansión conocida como nebulosa del Cangrejo. Si solamente pudiéramos observar sucesos tan cercanos, poco sabríamos sobre ellas. Pero, gracias a su extraordinaria luminosidad, se detectan incluso en galaxias lejanas. Cada año, los astrónomos descubren en torno a una decena.

Las primeras observaciones sistemáticas de supernovas distantes fueron realizadas por Fritz Zwicky en los años treinta. Aproximadamente la mitad de las que estudió se ajustaban a un patrón bastante regular: su luminosidad aumentaba constantemente durante unas tres semanas, y disminuía después poco a poco durante unos seis meses o más. A las explosiones de esta clase las llamó de tipo I. A las restantes, más variadas, las dividió en cuatro grupos, aunque hoy se conocen colectivamente como de tipo II. Se cree que los acontecimientos que conducen a la explosión en uno y otro caso son muy diferentes. Aquí nos ocuparemos principalmente de las segundas.

Los aspectos básicos de la teoría de explosiones de supernova se los debemos a Fred Hoyle. Su teoría se vería desarrollada más tarde en un artículo fundamental publicado en 1957 por E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge, William A. Fowler y el propio Hoyle. En él proponían que, cuando una estrella de gran masa llega al final de su vida, el núcleo estelar colapsa por efecto de su propia gravedad. La energía liberada en el colapso expelle la mayor parte de la masa de la estrella, lo que lanza al espacio interestelar los elementos químicos formados en el curso

de su evolución. El núcleo contraído deja un denso remanente; con frecuencia, una estrella de neutrones.

La supernova es el resultado, infrecuente y espectacular, de las reacciones de fusión nuclear que jalonan la vida de una estrella. El calor desprendido por la fusión genera presión, la cual contrarresta la atracción gravitatoria que, de otro modo, provocaría el colapso del astro. La primera serie de reacciones produce el efecto neto de fusionar cuatro átomos de hidrógeno en uno de helio. Dicho proceso desprende energía; la masa del átomo de helio es ligeramente inferior a la de los cuatro átomos de hidrógeno, por lo que la energía equivalente al exceso de masa acaba emitiéndose en forma de calor.

El proceso continúa en el núcleo de la estrella hasta que el hidrógeno contenido allí se agota. Cuando eso ocurre, el núcleo se contrae, puesto que la gravedad ya no se ve contrarrestada por la producción de energía. Como resultado, el núcleo y la materia que lo rodea se calientan. La fusión del hidrógeno comienza entonces en las capas circundantes. Mientras tanto, el núcleo se ha calentado lo suficiente para iniciar otras reacciones de fusión: consume helio para formar carbono, y carbono para formar neón, oxígeno y, finalmente, silicio. De nuevo, cada una de estas reacciones libera energía. Un último ciclo de fusión combina los núcleos de silicio para formar hierro; en concreto, el isótopo corriente del hierro ^{56}Fe , constituido por 26 protones y 30 neutrones. El hierro marca el final de los procesos de fusión espontánea. El núcleo atómico de ^{56}Fe es el más fuertemente ligado de todos, por lo que toda fusión posterior absorbería energía en lugar de liberarla.

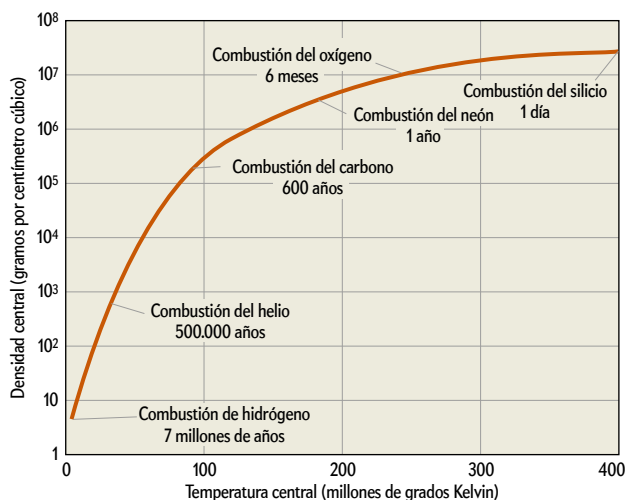
En esta fase de su existencia, la estrella adquiere una estructura que recuerda a las capas de una cebolla. El núcleo de hierro y otros elementos se encuentra rodeado por una capa de silicio y azufre, a la que siguen otras de oxígeno, carbono y helio. La capa más externa de todas está constituida principalmente por hidrógeno.

Solo las estrellas de mayor masa llegan a la fase final, caracterizada por la existencia de un núcleo de hierro. Las estrellas semejantes al Sol no pasan de la combustión del helio, mientras que las aún menores se detendrán en la fusión del hidrógeno. Las estrellas de mayor tamaño también agotan su combustible mucho antes: aunque comienzan su vida con una mayor cantidad de él, las altas presiones y temperaturas que reinan en su interior hacen que este se consuma con rapidez. De esta manera, mientras que una estrella como el Sol puede vivir unos 10.000 millones de años, otra diez veces más masiva completará su evolución mil veces más rápido. Pero, con independencia de lo que dure el proceso, la provisión de combustible en el núcleo siempre acaba agotándose. En ese momento, la producción de calor en el núcleo toca a su fin y la estrella debe contraerse.

EL LÍMITE DE CHANDRASEKHAR

Cuando termina la fusión en una estrella pequeña, esta se contrae lentamente hasta convertirse en una enana blanca: una estrella consumida que solo emite un débil resplandor de radiación. Si se encuentra aislada, la enana blanca permanecerá en ese estado indefinidamente, enfriándose de modo gradual pero experimentando pocos cambios. ¿Qué es lo que impide que la estrella se contraiga más? La respuesta la dio en la década de 1930 Subrahmanyan Chandrasekhar.

Cuando la materia ordinaria se comprime, su densidad aumenta a medida que se reduce el espacio vacío entre los átomos. En el núcleo de una enana blanca, sin embargo, ese proceso ha llegado a su límite: los electrones de los átomos se hallan tan



LA EVOLUCIÓN DE UNA ESTRELLA DE GRAN MASA es un proceso que se acelera continuamente hacia una mayor temperatura y densidad del núcleo. Durante la mayor parte de la vida de la estrella, la fuente primaria de energía es la fusión del hidrógeno para formar helio. Cuando se agota el hidrógeno del núcleo, este se contrae, se calienta y se inicia la fusión del helio para producir carbono. El ciclo se repite después, a un ritmo cada vez más rápido, por medio de la combustión del carbono, neón, oxígeno y silicio. La fusión del silicio genera un núcleo de hierro, pero a partir de aquí ya no puede extraerse más energía por medio de reacciones nucleares. Eso provoca que el núcleo no pueda resistir el colapso gravitatorio, lo que acabará provocando la explosión de supernova. La secuencia representada aquí corresponde a una estrella de 25 masas solares.

fuertemente apretados unos contra otros que oponen resistencia a toda compresión ulterior.

Chandrasekhar demostró que existía un límite para la presión que podía soportar la repulsión mutua entre electrones. A medida que la estrella se contrae, la energía gravitatoria aumenta, pero también lo hace la energía de los electrones, lo que eleva la presión. Si la contracción llega lo suficientemente lejos, tanto la energía gravitatoria como la de los electrones se hacen inversamente proporcionales al radio de la estrella. Que exista o no algún radio para el cual las dos fuerzas se equilibren dependerá de la masa del astro. El equilibrio solo es posible si dicha masa es inferior a cierto valor crítico, conocido como masa de Chandrasekhar. Pero, si se supera dicho límite, la estrella colapsará.

El valor de la masa de Chandrasekhar depende de la proporción entre electrones y nucleones (protones y neutrones): cuanto mayor sea la fracción de electrones, tanto mayor será la presión que estos pueden ejercer y, por ende, mayor será la masa de Chandrasekhar. En las estrellas pequeñas, cuya cadena de reacciones de fusión se detiene en el carbono, esa proporción vale aproximadamente 1/2, y la masa de Chandrasekhar asciende a 1,44 masas solares. Esa es la máxima masa que puede alcanzar una enana blanca estable.

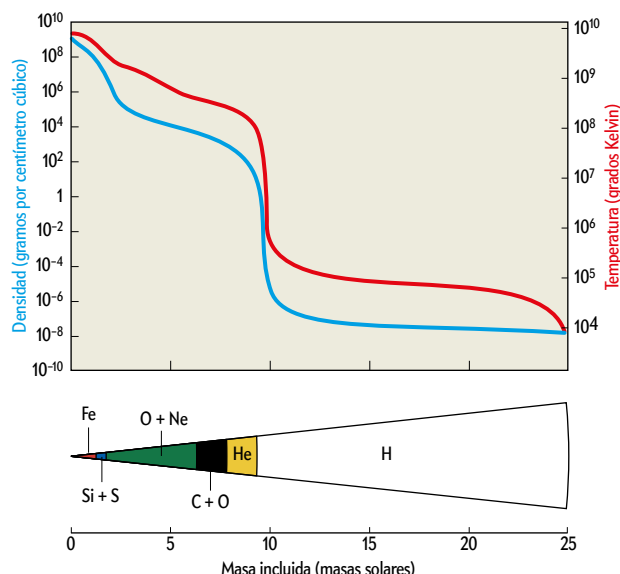
Una enana blanca que tenga una masa inferior al límite de Chandrasekhar puede permanecer estable indefinidamente. Sin embargo, estas son las estrellas que creemos que originan las supernovas de tipo I. ¿Cómo puede suceder esto? La clave reside en que las enanas blancas que explotan en forma de supernovas no son estrellas solitarias, sino miembros de sistemas binarios. En tal caso, el intenso campo gravitatorio de la enana blanca arranca materia de la estrella compañera, la cual cae poco a poco sobre la superficie de la enana blanca y aumenta la masa del núcleo de carbono y oxígeno. Al final, el carbono central se enciende y genera una onda que se propaga hacia fuera, lo que destruye la estrella.

La idea de que la combustión explosiva del carbono desencadenaba las supernovas de tipo I fue propuesta en 1960 por Hoyle y Fowler. Desde entonces, los astrofísicos han elaborado modelos más detallados, en particular Icko Iben Jr. y sus colaboradores. Otros cálculos realizados por Ken'ichi Nomoto y sus colegas sugieren que, en realidad, la combustión no es explosiva. La onda de reacciones de fusión se propagaría como la combustión de una mecha, no como la explosión de un petardo. Es decir, se trataría de una deflagración, no de una detonación.

Pero aun cuando la combustión sea menos violenta que una detonación, la enana blanca queda completamente destruida. La energía inicial que mantiene unida la estrella asciende a unos 10^{50} ergios, pero la liberada por la combustión es 20 veces mayor. Eso basta para explicar la velocidad de 10.000 kilómetros por segundo de los restos de la supernova. En el curso de la deflagración, las reacciones nucleares generan una masa solar del isótopo inestable de níquel ^{56}Ni , el cual se desintegra en ^{56}Co y después en ^{56}Fe a lo largo de un período de meses. El ritmo al que se libera energía durante la desintegración radiactiva es el idóneo para explicar la atenuación gradual de luz que experimentan las supernovas de tipo I.

COLAPSO DEL NÚCLEO ESTELAR

Por su parte, las supernovas de tipo II se producen en estrellas de masa mucho mayor; probablmenete, en aquellas de más de ocho masas solares. Para reconstruir la historia de estas supernovas, lo mejor es comenzar por el momento en que el silicio



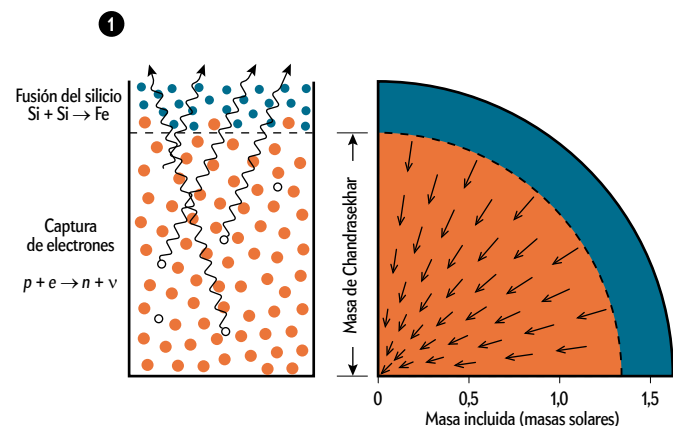
LA ESTRUCTURA EN CAPAS es característica de una estrella de gran masa al final de su evolución, antes del colapso gravitatorio. El núcleo de hierro queda envuelto por capas de silicio, azufre, oxígeno, neón, carbono y helio, rodeadas a su vez por una tenue capa de hidrógeno. La temperatura y la densidad decrecen continuamente hasta caer de forma brusca al llegar a la envoltura de hidrógeno. La fusión nuclear se ha detenido en el núcleo, pero sigue en las fronteras entre capas.

empieza a fusionarse para formar hierro. En ese punto la estrella ya ha pasado por las fases de combustión del hidrógeno, helio, neón, carbono y oxígeno, y presenta la estructura en capas de cebolla a la que aludíamos anteriormente. Aunque ha tardado millones de años en alcanzar esa fase, los sucesos posteriores se desarrollarán con mucha mayor rapidez.

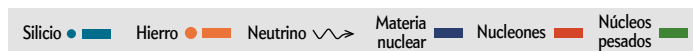
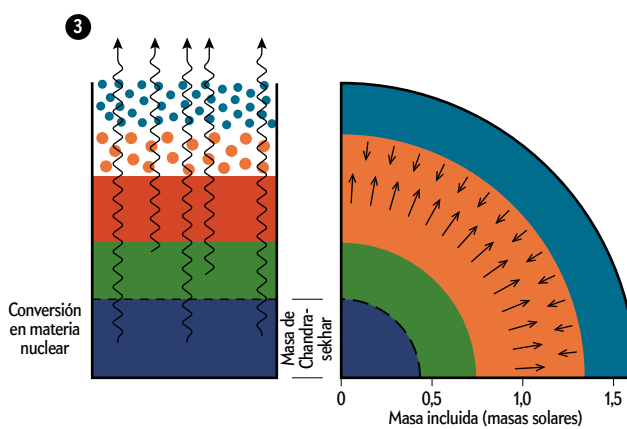
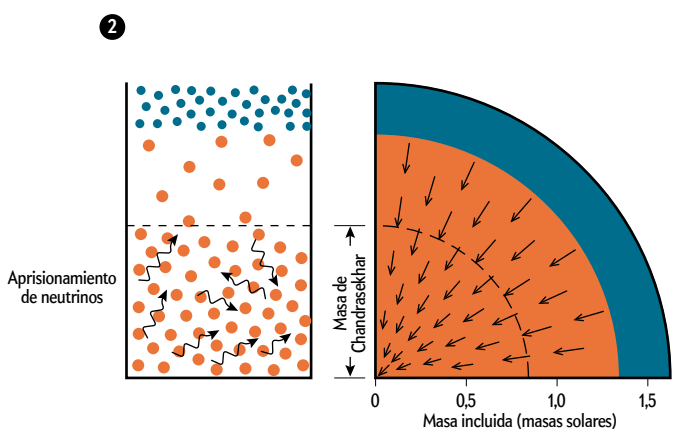
Cuando se inicia esta última reacción de fusión, en el centro del astro comienza a formarse un núcleo compuesto de hierro y otros elementos, el cual se encuentra rodeado por una capa de silicio. La fusión continúa en la frontera que separa el núcleo de hierro y la capa de silicio, añadiendo continuamente masa al núcleo. En el interior de este, sin embargo, ya no se produce energía por reacciones nucleares: es una esfera inerte sometida a una enorme presión. Se encuentra por tanto en la misma situación que una enana blanca: resistirá la contracción gracias a la presión electrónica, restringida a su vez por el límite de Chandrasekhar.

Una vez que comienza la fusión del silicio, el proceso se desarrolla a una velocidad vertiginosa y la masa del núcleo alcanza el límite de Chandrasekhar en apenas un día. Antes dijimos que, para una enana blanca, el límite de Chandrasekhar ascendía a 1,44 masas solares. Para el núcleo de hierro de una estrella masiva, el valor puede ser algo distinto, pero probablemente se encuentre entre 1,2 y 1,5 masas solares.

Alcanzada la masa de Chandrasekhar, los acontecimientos se suceden todavía más rápido. El núcleo, que tardó un día en formarse, colapsará ahora en menos de un segundo. Llegados aquí los análisis teóricos se tornan mucho más complejos, por lo que resulta necesario recurrir a las simulaciones por ordenador. Al respecto, cabe destacar los programas diseñados por W. David Arnett y por el grupo dirigido por Thomas A. Weaver y Stanford Woosley. Podemos decir que estos investigadores son los «que-



EL COLAPSO DEL NÚCLEO ESTELAR comienza cuando la masa del núcleo de hierro supera el límite de Chandrasekhar, comprendido entre 1,2 y 1,5 masas solares. En ese momento, la presión de los electrones ya no puede resistir la contracción gravitatoria. Al principio del colapso **1**, el movimiento hacia dentro se acelera por la captura de electrones, el proceso por el que un protón y un electrón se convierten en un neutrón y un neutrino. Esa pérdida de electrones reduce la presión electrónica y, con ello, la masa de Chandrasekhar. Cuando la densidad llega a 4×10^{11} gramos por centímetro cúbico, la materia se torna opaca a los neutrinos **2**, los cuales quedan aprisionados en el núcleo. En esta fase, la masa de Chandrasekhar es inferior a una masa solar y su significado también ha cambiado: ahora es la máxima masa que puede colapsar como un todo unitario. Terminado el colapso **3**, la parte central del núcleo homogéneo se ha convertido en materia nuclear. Esta se ha comprimido más allá de su densidad de equilibrio, por lo que se distiende lanzando una potente onda de choque. A medida que esta se propaga a través del núcleo estelar externo, los núcleos atómicos de hierro se «evaporan».



madores» de estrellas; nosotros y nuestros colegas teóricos, los «usuarios» de sus cálculos.

Las simulaciones proporcionan un perfil del núcleo de la estrella antes de que estalle como supernova: nos indican su composición, densidad y temperatura en función del radio. El análisis posterior consiste en aplicar los familiares principios de la termodinámica, las mismas leyes que describen fenómenos terrestres tan comunes como el funcionamiento de una máquina de vapor o la circulación de la atmósfera.

ACELERACIÓN DEL COLAPSO

Merece la pena seguir con cierto detalle las fases iniciales de la implosión del núcleo. Una primera observación es que la compresión eleva su temperatura, por lo que cabría esperar que eso aumentara la presión y retardase el colapso. Sin embargo, el calentamiento produce el efecto contrario.

La presión de un sistema depende de dos factores: el número de partículas y su energía media. En el centro de la estrella, a la presión contribuyen los núcleos atómicos y los electrones, si bien la aportación de estos últimos es mucho mayor. Cuando la parte central de la estrella se calienta, una pequeña fracción de los núcleos atómicos de hierro se disocia en núcleos menores, lo que aumenta el número de partículas nucleares y eleva la contribución de estas a la presión. Pero, al mismo tiempo, la

disociación de esos núcleos de hierro absorbe energía (dado que su formación desprende energía, para romperlos habremos de aportar una cantidad de energía equivalente). Esta procede de los electrones, por lo que la presión ejercida por ellos disminuye. Esa pérdida de presión electrónica supera la ganancia de presión nuclear. El resultado neto es la aceleración del colapso.

Contra lo que pudiera parecer, la implosión de una estrella no es ningún proceso caótico, sino ordenado. De hecho, todo el proceso de evolución estelar conduce a un estado de mayor orden, o de menor entropía. Es fácil ver por qué. En una estrella de hidrógeno, cada nucleón puede moverse con total libertad. Pero, en un núcleo estelar de hierro, los componentes son átomos formados por 56 nucleones unidos entre sí, por lo que han de moverse al unísono. Al principio, la entropía por nucleón, expresada en unidades de la constante de Boltzmann, se acerca a 15. Pero, en el núcleo de una estrella que está a punto de estallar como supernova, no llega a 1. A lo largo de la evolución estelar, esa diferencia de entropía se ha ido con la radiación electromagnética. Al final del proceso, la entropía escapa también en forma de neutrinos.

La baja entropía del núcleo de la estrella se mantiene durante todo el colapso. Las reacciones nucleares cambian continuamente las especies de núcleos atómicos presentes, lo que

podría hacernos pensar que tendría que provocar un aumento de entropía. Sin embargo, las reacciones se desarrollan con tal rapidez que el equilibrio se mantiene siempre. El colapso apenas dura unos milisegundos, pero la escala de tiempo de las reacciones nucleares es de entre 10^{-15} y 10^{-23} segundos, por lo que toda desviación del equilibrio se corrige de inmediato.

Hay otro efecto que, en el pasado, se pensaba que aumentaría la entropía, aunque hoy creemos que lo más probable es que la reduzca. La alta densidad del núcleo estelar en colapso favorece la reacción conocida como captura de electrones. En esta, un protón y un electrón se unen para dar lugar a un neutrón y un neutrino. Este último escapa de la estrella, llevando consigo energía y entropía y enfriando el sistema, del mismo modo en que un cuerpo se enfría cuando de él se evapora agua. En el caso de la estrella y los neutrinos, hay una serie de complicaciones que no nos permiten determinar con certeza cuál es su efecto sobre la entropía. Pero, en cualquier caso, la pérdida de electrones reduce la presión electrónica y hace que la implosión se acelere aún más.

La primera fase del colapso de una supernova llega a su fin cuando la densidad del núcleo estelar alcanza el valor de 4×10^{11} gramos por centímetro cúbico. Esta no es, en modo alguno, la densidad máxima, puesto que el núcleo continúa contrayéndose. Pero sí marca un cambio fundamental en sus propiedades físicas: a esta densidad, la materia se hace opaca a los neutrinos, un fenómeno cuya importancia pusieron de manifiesto T. J. Mazurek y Katsushiko Sato.

NEUTRINOS ATRAPADOS

El neutrino es una partícula reservada que solo muy rara vez interacciona con la materia. La mayoría de los neutrinos que inciden sobre la Tierra, por ejemplo, la atraviesan sin chocar ni una sola vez contra otra partícula. Sin embargo, cuando la densidad de materia excede los 400.000 millones de gramos por centímetro cúbico, las partículas se hallan tan juntas unas a otras que incluso un neutrino interaccionará con alguna de ellas. Como resultado, los neutrinos emitidos en el núcleo en colapso de una estrella quedan atrapados allí. La trampa no es permanente: una vez dispersado, absorbido y reemitido varias veces, el neutrino escapará tarde o temprano. Pero el proceso es más largo que las restantes fases del colapso. Ese aprisionamiento de los neutrinos significa que no hay energía que pueda escapar del núcleo de la estrella.

El proceso de captura de electrones en la fase temprana del colapso no solo reduce la presión electrónica, sino que disminuye también la proporción de electrones frente a nucleones, el cociente que determina la masa de Chandrasekhar. En el núcleo típico de una presupernova, la relación entre electrones y nucleones se halla entre 0,42 y 0,46, pero en la fase de aprisionamiento de neutrinos baja hasta 0,39. Esta proporción implica un límite de Chandrasekhar de 0,88 masas solares, considerablemente menor que los valores iniciales de entre 1,2 y 1,5.

En este momento, el papel que desempeña la masa de Chandrasekhar en el análisis de la supernova también cambia. Al comienzo, era la mayor masa capaz de mantenerse estable por la presión de los electrones. Ahora, se convierte en la mayor masa que puede colapsar en bloque. Las distintas regiones de esta parte del núcleo pueden comunicarse entre sí mediante ondas sonoras y de presión, de modo que cualquier variación local de densidad se disipará de inmediato. Como resultado, la parte interna del núcleo estelar colapsa de manera homogénea, toda de una pieza y manteniendo su forma.

La teoría del colapso homogéneo fue avanzada por Peter Goldreich y Steven Weber y desarrollada posteriormente por Amos Yahil y James M. Lattimer. La onda de choque que expulsa las capas exteriores de la estrella se forma en el borde del núcleo homogéneo. Sin embargo, antes de dar una explicación de este proceso, debemos continuar con la secuencia de fenómenos que se suceden en el propio núcleo.

El trabajo de Chandrasekhar mostró que la presión de los electrones no puede salvar del colapso al núcleo de una estrella de gran tamaño. La única forma de detener la contracción sería apelar a la resistencia de los nucleones. Pero, en el núcleo de la presupernova, la presión de los nucleones es una fracción minúscula de la que ejercen los electrones. Incluso para una densidad de 4×10^{11} gramos por centímetro cúbico, cuando comienzan a quedar aprisionados los neutrinos, la presión de los nucleones es insignificante. La razón estriba en la baja entropía del sistema. A una temperatura dada, la presión es proporcional al número de partículas por unidad de volumen, con independencia del tamaño de dichas partículas. Un núcleo atómico de hierro, con 56 nucleones, contribuye a la presión lo mismo que un protón aislado. Si se disociasen los núcleos atómicos de la parte central de la estrella, la presión podría bastar para detener la contracción. Sin embargo, eso no puede ocurrir, ya que la entropía es demasiado baja. Una supernova cuyo núcleo estuviera formado por protones y neutrones independientes tendría una entropía de entre 5 y 8 unidades de Boltzmann por nucleón. No obstante, el verdadero valor de esa entropía es inferior a 1.

La situación no cambia, y el colapso no sufre impedimento, hasta que la densidad de la parte central del núcleo alcanza los $2,7 \times 10^{14}$ gramos por centímetro cúbico. Esa densidad es la que alcanza la materia en el interior de un núcleo atómico. Y, en efecto, los nucleones de la parte central de la estrella se hallan tan juntos que puede decirse que forman un núcleo atómico gigante. Una cucharadita de esa materia tendría la misma masa que todos los edificios de una gran urbe.

La materia nuclear es altamente incompresible. Como consecuencia, una vez que la parte central de la estrella alcanza la densidad de un núcleo atómico, aparece una enorme resistencia a cualquier compresión ulterior. Dicha resistencia constituye la fuente primaria de las ondas de choque que convertirán el colapso estelar en una espectacular explosión.

UN NÚCLEO ATÓMICO GIGANTE

Dentro de la parte del núcleo estelar que sufre el colapso homogéneo, la velocidad de la materia que cae hacia el interior es directamente proporcional a su distancia al centro (es precisamente esta propiedad la que determina que el colapso sea homogéneo). La densidad, por otra parte, decrece con la distancia al centro, y en consecuencia lo hace también la velocidad del sonido. El radio en que la velocidad del sonido iguala a la velocidad de caída se conoce como «punto sónico», e indica el borde del núcleo homogéneo. Una perturbación que se produzca en su interior no puede ejercer influencia más allá de ese radio. En el punto sónico, las ondas sonoras se mueven hacia fuera a la velocidad del sonido, medida según el sistema de coordenadas de la materia que cae. Ahora bien, esta materia se mueve hacia el interior a la misma velocidad, por lo que las ondas se hallan en reposo con respecto al centro de la estrella.

Cuando la parte central del núcleo estelar alcanza la densidad de un núcleo atómico, el colapso se detiene de golpe. Esto da origen a ondas sonoras que se propagan hacia fuera, un proceso similar a las vibraciones que experimenta el mango de

un martillo cuando golpea un yunque. Las ondas se frenan a medida que salen a través del núcleo homogéneo: ello se debe a que la velocidad local del sonido disminuye y, además, a que se propagan «corriente arriba», contra un flujo de materia que se hace cada vez más rápido. En el punto sónico se detienen completamente. Mientras tanto, sobre la dura esfera de materia nuclear central sigue cayendo más y más materia, lo que genera más ondas. En una fracción de milisegundo, las ondas se reúnen en el punto sónico, provocando allí un aumento de presión. Ese cambio brusco de presión frena la materia que cae a través del punto sónico y crea una discontinuidad en la velocidad. Tales variaciones discontinuas de velocidad constituyen una onda de choque.

En la superficie de la esfera dura de la parte central de la estrella, la materia que cae se detiene, aunque no instantáneamente. La compresibilidad de la materia nuclear es baja, pero no nula, por lo que la transferencia de momento lleva el colapso más allá del punto de equilibrio, comprimiendo el núcleo central de la estrella hasta una densidad superior incluso a la de un núcleo atómico. Llamamos a este punto el instante de «máximo estrujamiento». La mayoría de las simulaciones informáticas sugieren que la máxima densidad alcanzada viene a ser un 50 por ciento mayor que la densidad de equilibrio de un núcleo atómico. Tras ello, la esfera de materia nuclear se recupera, como si se tratara de una pelota de goma que hubiéramos comprimido. La recuperación desencadena más ondas sonoras, que se unen a la creciente onda de choque en el punto sónico.

Una onda de choque difiere de una onda sonora en dos aspectos. Primero, la onda sonora no produce cambios permanentes en el medio por el que se propaga; pasada la onda, la materia recupera su estado anterior. En cambio, el paso de una onda de choque induce grandes modificaciones en la densidad, la presión y la entropía. Segundo, la onda sonora se mueve —por definición— a la velocidad del sonido, mientras que la de choque lo hace más deprisa, a una velocidad determinada por la energía de la onda. De aquí que, una vez que la discontinuidad

de presión en el punto sónico ha crecido hasta convertirse en una onda de choque, esta ya no permanece retenida en el mismo lugar por la materia que cae. Puede continuar avanzando hacia fuera, a través de las sucesivas capas de la estrella. Según las simulaciones por ordenador, lo hace a una velocidad de entre 30.000 y 50.000 kilómetros por segundo.

EL CAMPO DE MINAS

Hasta esta fase de la evolución de la supernova todos los cálculos concuerdan en lo esencial. Sin embargo, no podemos decir lo mismo de lo que sucede a continuación. En la más sencilla de las hipótesis, propuesta por nosotros, la onda de choque avanza velozmente hacia fuera, llega a la superficie del núcleo de hierro en una fracción de segundo y continúa después a través de las sucesivas capas de la estrella. Tras algunos días, alcanza la superficie y todo estalla en forma de una violenta explosión. Toda la materia de la estrella que se encuentra más allá de cierto radio —el punto de bifurcación— se expulsa hacia fuera. Lo que queda dentro del radio de bifurcación se condensa en una estrella de neutrones.

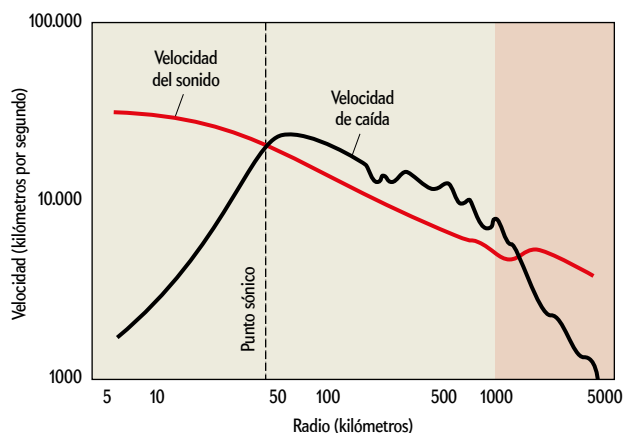
Sin embargo, las simulaciones efectuadas en 1974 por Weaver y Woosley no concuerdan con este esquema. En ellas, la onda se propaga hacia fuera hasta una distancia de entre 100 y 200 kilómetros del centro de la estrella. Pero entonces se atasca y permanece más o menos en la misma posición, mientras la materia continúa cayendo a través de ella. La razón principal de este estancamiento es que la onda de choque disocia los núcleos atómicos y los convierte en nucleones. Aunque este proceso aumenta el número de partículas, con lo que sería de esperar que la presión aumentara, consume también una gran cantidad de energía. El resultado neto es que tanto la temperatura como la presión se reducen notablemente.

La fragmentación de los núcleos contribuye también de otra manera a la disipación de energía: genera protones libres, los cuales capturan electrones con facilidad. Los neutrinos emitidos en el proceso pueden escapar, llevando consigo parte de la energía de la estrella. Este escape es posible porque la onda de choque ha alcanzado la materia cuya densidad está por debajo del valor crítico de aprisionamiento de neutrinos. Y los neutrinos que habían quedado atrapados tras la onda de choque escapan también, llevándose más energía. Debido a todas las amenazas que esconde para la onda de choque la región de la estrella comprendida entre los 100 y los 200 kilómetros del centro, hemos dado en llamarla «campo de minas».

EXPLOSIÓN ESTELAR

Nos gustaría poder decir que hemos encontrado un mecanismo único capaz de explicar la propagación de la onda de choque a través del campo de minas en todas las supernovas de tipo II, pero eso no sería cierto. En cambio, sí podemos ofrecer un conjunto de explicaciones plausibles, cada una de las cuales parece poder aplicarse a las estrellas de un dominio particular de masas.

Conviene empezar por las estrellas de entre 12 y 18 masas solares. En este caso, los modelos más recientes elaborados por Weaver y Woosley difieren de los obtenidos un decenio antes. La diferencia más importante es que el núcleo de hierro es menor de lo que indicaban las estimaciones previas: alrededor de 1,35 masas solares. El núcleo homogéneo, en cuya superficie se forma la onda de choque, engloba 0,8 masas solares de esta materia, dejando 0,55 masas solares de hierro fuera del punto sónico. Dado que disociar los núcleos de hierro es lo más cos-



EL PUNTO SÓNICO marca el borde del núcleo homogéneo. En ese radio, la velocidad del sonido iguala la velocidad de la materia que cae. Una onda sonora que se encuentre en el punto sónico avanza hacia fuera a la velocidad del sonido con respecto a la materia a través de la que pasa; pero, dado que esa materia está cayendo hacia el interior a la misma velocidad, la onda no se mueve con respecto al centro de la estrella. Como consecuencia, las perturbaciones producidas dentro del núcleo no pueden propagarse al exterior.

toso en términos energéticos, al reducirse la cantidad de este elemento se facilita el escape de la onda de choque.

Jerry Cooperstein y Edward A. Baron han simulado con éxito explosiones de supernova a partir de los modelos de Weaver y Woosley. El primer requisito, conjeturado por Sidney H. Kahana, es que el núcleo homogéneo esté muy comprimido, a fin de que pueda reaccionar vigorosamente y crear una intensa onda de choque. Dos factores contribuyen a obtener este resultado en las simulaciones. Primero, el uso de la relatividad general en vez de la teoría de la gravedad de Newton. El segundo es la hipótesis de que la materia nuclear es mucho más compresible de lo que habíamos supuesto hasta ahora.

Los primeros resultados de Baron mostraban que una estrella de 12 masas solares explotaría si la compresibilidad de la materia nuclear fuese 1,5 veces mayor que el valor comúnmente aceptado. Aunque esto parecía bastante arbitrario, uno de nosotros (Brown) examinó después el problema mediante un complejo método teórico para analizar la materia nuclear. El resultado fue que la interpretación más coherente de los datos experimentales implicaba una compresibilidad 2,5 veces mayor que la aceptada. Después supimos que, en 1982, Andrew D. Jackson, E. Krotschek, D. E. Meltzer y R. A. Smith ya habían llegado a la misma conclusión por otro método, aunque nadie había reparado en la importancia que tenía su trabajo para el problema de las supernovas. En nuestra opinión, este nuevo valor de la compresibilidad nuclear es bastante fiable.

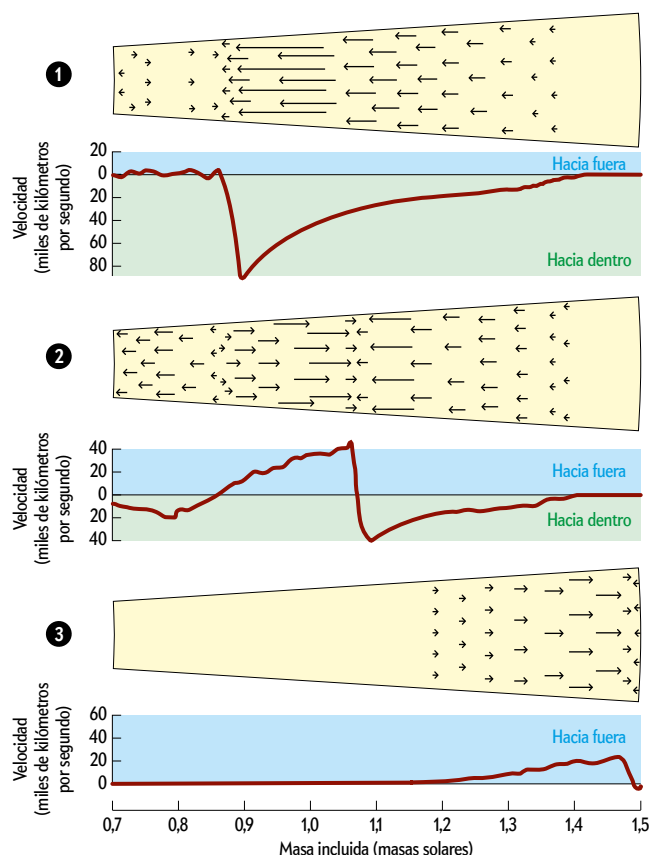
CALENTAMIENTO POR NEUTRINOS

El mecanismo descrito por Baron, Cooperstein y Kahana parece poder aplicarse a estrellas de hasta 18 masas solares. Sin embargo, en el caso de estrellas mayores, incluso la potente onda de choque que aparece en las simulaciones se vería frenada en cuanto «pisara» el campo de minas. Una estrella de 25 masas solares contiene unas dos masas solares de hierro en su centro. La onda de choque debe penetrar, pues, 1,2 masas solares de hierro en lugar de 0,55, y carece de la energía suficiente para disociar tal cantidad de este elemento.

Una explicación plausible de lo que podría ocurrir en esas enormes estrellas parece haberse deducido recientemente del trabajo de James R. Wilson, quien ha realizado una gran cantidad de simulaciones numéricas de explosiones de supernova. Durante algún tiempo se pensó que, cuando fallaba la onda de choque, toda la masa de la estrella podía caer de nuevo al núcleo, el cual evolucionaría hasta transformarse en un agujero negro. Este es todavía uno de sus posibles destinos. Sin embargo, al dejar correr sus simulaciones durante más tiempo, Wilson observó un nuevo fenómeno.

En el núcleo de una estrella en colapso, la onda de choque solo tarda unos diez milisegundos en llegar al campo de minas y detenerse. La simulación de este suceso, incluso con el ordenador más rápido, dura como mínimo una hora. Pero Wilson dejó que sus cálculos continuaran durante un tiempo cien veces más largo a fin de recrear un segundo de tiempo del proceso de colapso de una supernova. En casi todos los casos halló que, con el tiempo, la onda de choque se regeneraba.

Esta regeneración se debe al calentamiento por neutrinos. El núcleo interior de la estrella es un copioso emisor de neutrinos, ya que en él se produce incesantemente la captura de electrones a medida que la materia se comprime hasta la densidad nuclear. Adam S. Burrows, Latimer y Mazurek han demostrado que la mitad de los electrones que hay dentro del núcleo homogéneo se capturan en menos de medio segundo, mientras que



UNA ONDA DE CHOQUE puede moverse más deprisa que el sonido y, por tanto, transportar la energía y la cantidad de movimiento de la distensión más allá del punto sónico. Justo antes de la distensión ①, el núcleo interno ha alcanzado la densidad de la materia nuclear y ha cesado su contracción, pero la materia que lo rodea está a punto de caer sobre él a velocidades de hasta 90.000 kilómetros por segundo. Dos milisegundos más tarde ②, el núcleo se ha contraído todavía más, pero al mismo tiempo mucha de la materia que caía ha rebotado, lo que genera la onda de choque. Después de 20 milisegundos ③, la onda de choque ha llegado al borde del núcleo. Este mecanismo de explosión de supernova, en el que la onda de choque logra irrumpir fuera del núcleo, parece aplicable a estrellas de entre 12 y 18 masas solares.

los neutrinos emitidos se llevan consigo aproximadamente la mitad de la energía gravitatoria liberada por el colapso, unos 10^{53} ergios. En las profundidades del núcleo, los neutrinos chocan frecuentemente con otras partículas. Más arriba dijimos que están aprisionados, en el sentido de que no pueden escapar durante el tiempo necesario para el colapso homogéneo. Pero, con el tiempo, se filtran hacia arriba y alcanzan estratos de menor densidad, donde pueden moverse libremente.

En el radio donde la onda de choque queda frenada, solo un neutrino de cada mil tiene cierta probabilidad de chocar con una partícula de materia. Ahora bien, esos choques aportan una importante cantidad de energía. La mayor parte de esta se consume en la disociación de núcleos atómicos, proceso que produce el estancamiento de la onda de choque. Sin embargo, ahora la energía de los neutrinos calienta la materia y, por tanto, eleva rápidamente la presión. Hemos llamado a este período,

en el que la onda de choque se detiene y se regenera después debido al calentamiento provocado por los neutrinos, la «pausa de descanso».

El calentamiento por neutrinos presenta su máxima eficacia a un radio de unos 150 kilómetros, donde la probabilidad de absorción de los mismos no es demasiado baja, ni la temperatura es lo suficientemente alta para que la propia materia se convierta en un apreciable emisor de ellos. Medio segundo después, la presión en ese radio ha adquirido un valor capaz de detener la caída de la materia situada por encima y comenzar a empujarla hacia fuera. De aquí que los 150 kilómetros se conviertan en el radio de bifurcación. La materia encerrada en ese perímetro acaba cayendo en el núcleo; la materia fuera de él, 20 masas solares o más, es expulsada.

ESTRELLAS MENORES

Falta por considerar el grupo de estrellas que tienen entre 8 y 11 masas solares, las más pequeñas capaces de experimentar una explosión de supernova de tipo II. Weaver y Woosley propusieron en 1980 que las estrellas de este grupo formaban una clase separada, en la que el mecanismo de supernova difería bastante del que acontece en las estrellas más masivas.

Según cálculos realizados por Nomoto, Weaver y Woosley, en la fase de presupernova de estas estrellas más ligeras, el núcleo no alcanza la temperatura necesaria para formar hierro. En su lugar, la fusión termina con una mezcla de elementos entre el silicio y el oxígeno. La producción de energía se detiene entonces y, como la masa del núcleo es mayor que la de Chandrasekhar, este colapsa. La onda de choque originada por el colapso puede ver favorecida su propagación por dos circunstancias. En primer lugar, la ruptura de núcleos atómicos de oxígeno o de silicio resta a la onda de choque menos energía que la que absorbería la disociación de núcleos de hierro. En segundo lugar, mucho más allá, aunque sin salirse del interior estelar, la densidad cae bruscamente (se divide por unos diez mil millones) en la frontera entre las capas de carbono y las de helio. La onda de

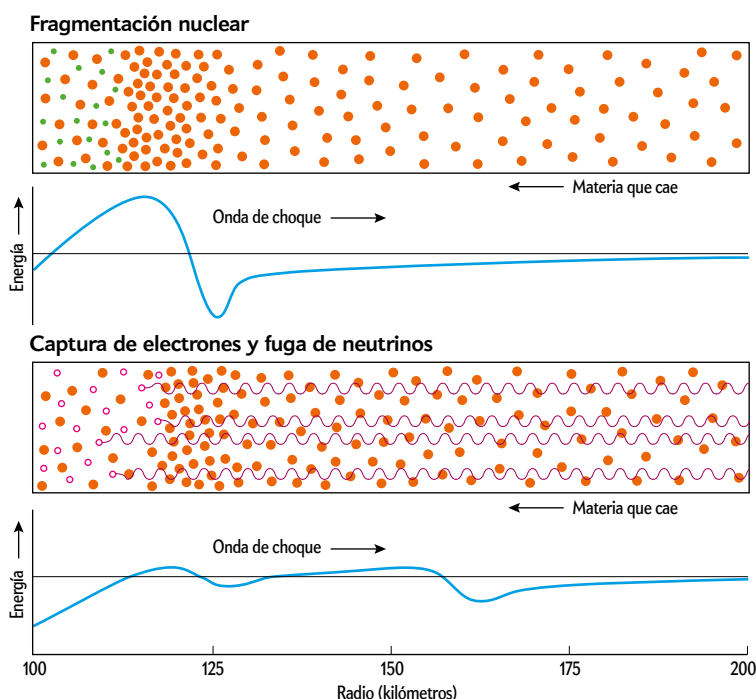
choque avanza mucho mejor cuando tiene que atravesar materia de menor densidad.

Para una estrella de 9 masas solares, Nomoto halló que el núcleo, en la fase de presupernova, estaba constituido por oxígeno, neón y magnesio y tenía una masa de 1,35 masas solares. Nomoto y Wolfgang Hillebrandt prosiguieron investigando la evolución posterior. En su opinión, la explosión se propaga fácilmente a través de él, ayudada por la combustión de núcleos de oxígeno y liberando una cantidad de energía considerable.

Dos intentos recientes de reproducir los resultados de Nomoto y de Hillebrandt han fracasado, por lo que el estatus de su modelo sigue sin estar claro. En nuestra opinión, la mayor compresibilidad de la materia nuclear asumida por Baron, Cooperstein y Kahana podría resultar útil. Por supuesto, es posible que estas estrellas de menor masa no exploten como supernovas. Pero, por otra parte, hay razones, basadas en las medidas de la abundancia de diversas especies nucleares, para creer que la nebulosa del Cangrejo se formó a partir de la explosión de una estrella de unas 9 masas solares.

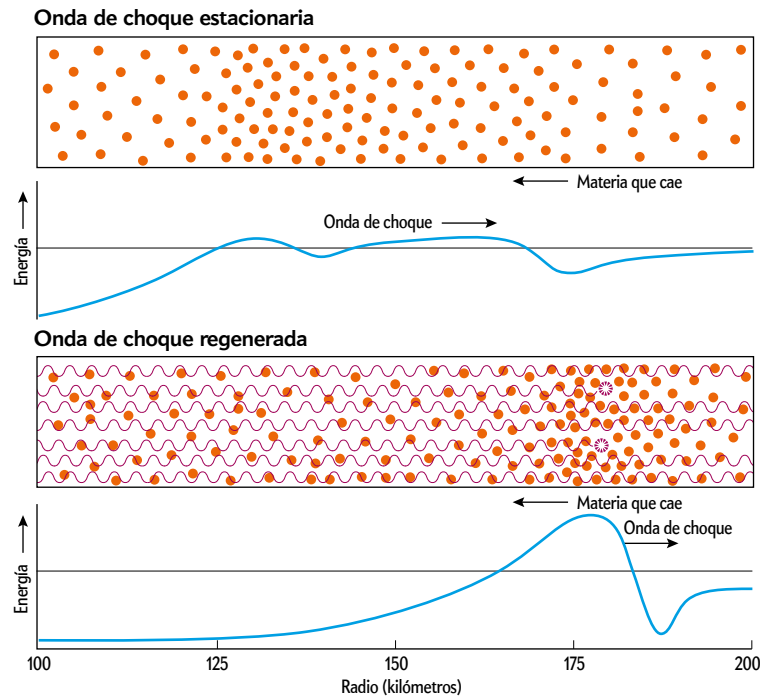
EL DESTINO DEL NÚCLEO

Después de que se hayan expulsado las capas exteriores de la estrella, queda por decidir el destino del núcleo. Del mismo modo que la gravedad supera la presión electrónica cuando la masa excede el límite de Chandrasekhar, ni siquiera la materia nuclear resistirá la compresión si la gravedad es lo bastante intensa. Para una estrella de neutrones fría (aquella que no tiene otra fuente de presión compensadora que la repulsión entre nucleones), la masa límite se cree cercana a las 1,8 masas solares. El remanente compacto formado por la explosión de las estrellas de menor masa se encuentra por debajo de ese límite, por lo que creemos que tales astros dejan tras de sí una estrella de neutrones estable. En el caso de estrellas mayores, la cuestión no está clara. Según los cálculos de Wilson, cualquier estrella de más de unas 20 masas solares dejará un remanente compacto de más de dos masas solares. Parece por tanto que este podría



LA ONDA DE CHOQUE PARECE ESTANCARSE en estrellas de más de 18 masas solares. Son varios los procesos que extraen energía de la onda. El más importante es la fragmentación nuclear: la energía de la onda de choque se disipa a medida que disocia los núcleos atómicos de hierro, lo que disminuye la temperatura y la presión. Los protones liberados por esa fragmentación pueden además capturar electrones, lo que reduce la presión aún más. Una vez que la onda penetra en una región de densidad inferior a 10^{11} gramos por centímetro cúbico, comienzan a filtrarse los neutrinos, lo que resta más energía. Como resultado, la onda de choque puede frenarse hasta alcanzar la velocidad de la materia que cae, en cuyo caso no avanzará más. Debido a los obstáculos que supone para la onda de choque, esta región, situada entre los 100 y los 200 kilómetros del centro de la estrella, se conoce con el nombre de «campo de minas».

LA ONDA DE CHOQUE PUEDE REGENERARSE en las estrellas de mayor masa gracias al fenómeno conocido como calentamiento por neutrinos. Estos proceden del núcleo colapsado, el cual radia en forma de neutrinos una energía equivalente al diez por ciento de su masa. Solo una pequeña fracción de ellos se absorberá, pero el flujo es tan intenso que eso basta para disociar los núcleos atómicos de hierro. En los instantes previos, esa ruptura de núcleos de hierro había extraído energía de la onda de choque. Pero, dado que ahora dicho proceso está causado por los neutrinos, ya no resta la energía a la onda.



convertirse en un agujero negro, una región del espacio donde la materia se ha comprimido hasta una densidad infinita.

Pero aun cuando el remanente compacto acabe degenerando en un agujero negro, comienza como estrella de neutrones caliente. La temperatura central tras la explosión es de unos 100.000 millones de grados, lo que genera una presión térmica suficiente para mantener la estrella, aunque esta supere las 1,8 masas solares. Esa materia nuclear caliente se enfría después por la emisión de neutrinos. La energía que estos llevan consigo es más de cien veces mayor que la emitida en la propia explosión: unos 3×10^{53} ergios, el equivalente al 10 por ciento de la masa de la estrella de neutrones.

¿DETECCIÓN DE NEUTRINOS?

La detección de los neutrinos emitidos durante una explosión de supernova y el posterior enfriamiento de la estrella de neutrones nos ayudaría a entender mejor qué sucede en estos espectaculares acontecimientos. Los neutrinos se originan en el núcleo de la estrella y atraviesan casi incólumes las capas exteriores; portan, pues, información de las condiciones allí reinantes. La radiación electromagnética, por otra parte, se difunde lentamente a través de las capas de materia y revela lo que está sucediendo en la superficie. Hoy en día contamos con detectores de neutrinos instalados en minas y túneles, donde se encuentran protegidos del ruido de fondo que producen los rayos cósmicos.

Otra comprobación experimental sobre la validez de los modelos de supernova se apoya en la abundancia relativa de elementos químicos del universo. Las supernovas constituyen quizá la fuente principal de todos los elementos más pesados que el carbono, de modo que el espectro de elementos liberado en las explosiones simuladas debería concordar con las abundancias relativas observadas. Muchos intentos de reproducir dichas abundancias han fracasado. Pero, hace poco, Weaver y Woosley han efectuado cálculos que concuerdan sorprendentemente bien con las observaciones. A partir del modelo de Wilson para la explosión de una estrella de 25 masas solares, sus predicciones

para la gran mayoría de los elementos e isótopos entre el carbono y el hierro se ajustan estrechamente a las medidas.

El estudio de las supernovas se ha beneficiado de una estrecha interacción entre los cálculos teóricos y las simulaciones informáticas. Las primeras especulaciones sobre los mecanismos que gobiernan las explosiones de supernova se propusieron hace decenios, pero no pudieron elaborarse en detalle hasta que los ordenadores necesarios para efectuar simulaciones numéricas estuvieron a punto. Los resultados de los cálculos, por otro lado, no pueden comprenderse si no es en el contexto de un modelo analítico. En el futuro, esta colaboración debería permitirnos progresar desde una idea general de esos principios y mecanismos hasta la predicción detallada de las observaciones astronómicas.

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, julio de 1985

LOS AUTORES

Hans A. Bethe (1906-2005) fue catedrático de física de la Universidad Cornell. Destacado físico nuclear, realizó también importantes contribuciones a la astrofísica. En 1967 fue galardonado con el premio Nobel por sus aportaciones a la teoría de la nucleosíntesis estelar. **Gerald Brown** (1926-2013) fue catedrático en Stony Brook. Destacó por sus trabajos en física nuclear y en la modelización de los procesos que tienen lugar en las estrellas compactas.

PARA SABER MÁS

Supernovae: A survey of current research. M. J. Rees y R. J. Stoneham. D. Reidel Publishing Co., 1982.
Supernova theory. G. E. Brown, H. A. Bethe y Gordon Baym en *Nuclear Physics A*, vol. 375, n.º 3, págs. 481-532, febrero de 1982.
Supernovae. Part I: The events. Virginia Trimble en *Reviews of Modern Physics*, vol. 54, n.º 4, págs. 1183-1224, octubre de 1982.
Supernovae. Part II: The aftermath. Virginia Trimble en *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, n.º 2, págs. 511-563, abril de 1983.

HISTORIA DE UN PROBLEMA

El problema de los neutrinos solares

Observaciones tenaces y pacientes indican que el Sol no emite estas esquivas partículas en la cuantía predicha por las teorías. Esa discrepancia pone en cuestión las explicaciones aceptadas de la física y de la luminosidad solar

John N. Bahcall

ADEMÁS DE LUZ Y CALOR, EL SOL RADIA GRANDES CANTIDADES de neutrinos: esquivas partículas subatómicas sin carga eléctrica, de masa casi nula y que se mueven a una velocidad próxima a la de la luz. Ni siquiera les afecta la fuerza nuclear fuerte, la cual mantiene unidos los núcleos de los átomos.

La observación de tales partículas constituye un reto formidable; una dificultad que es, por sí misma, motivo de interés. Dado que interactúan tan débilmente con la materia, los neutrinos pueden emerger con libertad de lugares de otro modo inaccesibles e informarnos sobre ellos. Uno de esos lugares es el centro del Sol. Y el mensaje que nos traen los neutrinos so-

lares es desconcertante y polémico: algo falla en los modelos actuales del Sol o en nuestra explicación de las leyes de la física. La resolución de ese misterio podría ayudarnos a entender el brillo solar, la evolución de las estrellas y la relación entre las interacciones fundamentales de la naturaleza.

Hasta donde sabemos existen tres tipos, o «sabores», de neutrinos. El más corriente en los experimentos terrestres es el neutrino electrónico, el cual interactúa con los electrones. Los otros dos sabores, el neutrino muónico y el tauónico, interactúan con los parientes más masivos y de vida corta del electrón: los muones y las partículas tau. Se cree que electrones, muones y partículas tau, junto con sus correspondientes neutrinos, son

EN SÍNTESIS

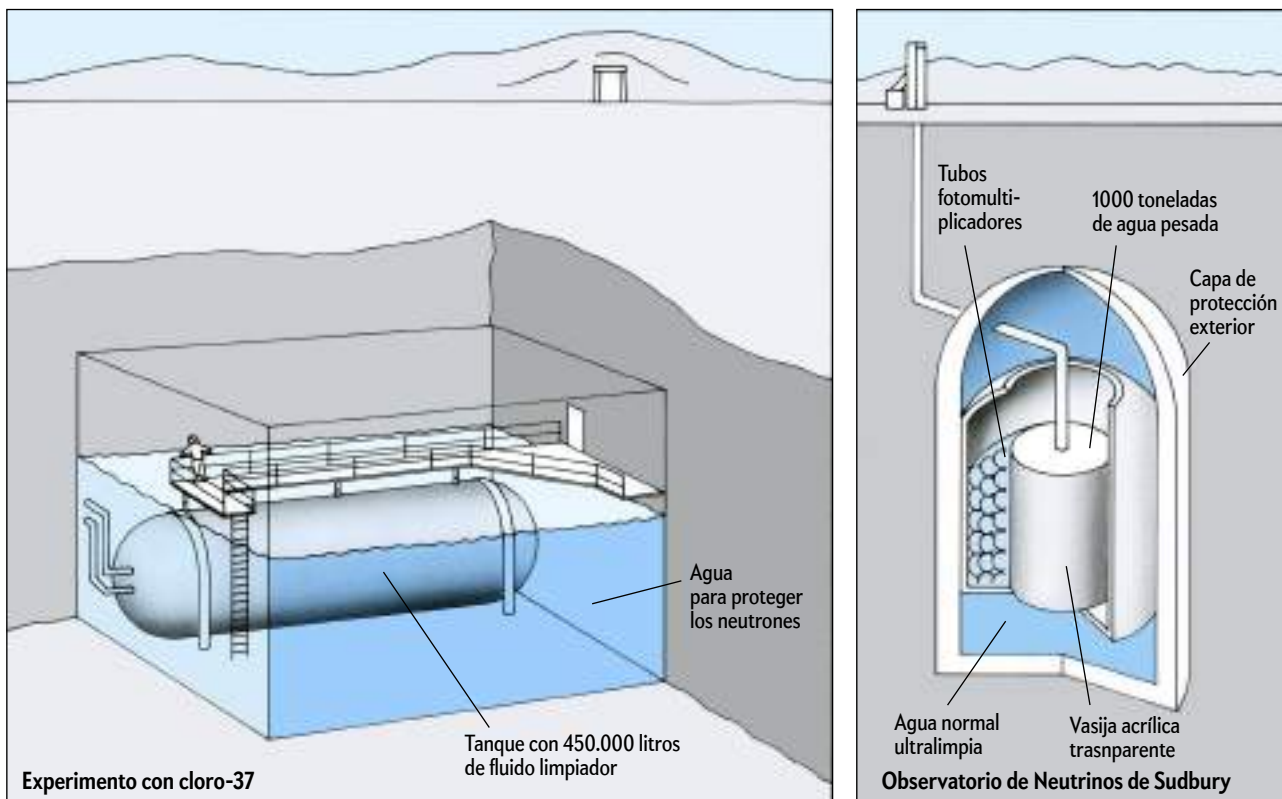
El Sol produce energía debido a las reacciones nucleares de su interior. Tales reacciones deberían generar una ingente cantidad de neutrinos electrónicos. Sin embargo, en la Tierra solo se detecta una pequeña parte de ellos.

Algunos intentos de explicar esta discrepancia pasan por modificar los modelos que describen el funcionamiento interno del Sol. No obstante, tales modelos predicen con enorme éxito las propiedades y la evolución de todo tipo de estrellas.

Otros intentos postulan cambios en las teorías que describen las partículas elementales. Estos van desde considerar posibles interacciones con partículas de materia oscura hasta asignar una pequeña masa a los neutrinos.



UN EJEMPLO DE COLABORACION INTERNACIONAL para solucionar el problema de los neutrinos solares es el Experimento de Galio Soviético-Americano (SAGE). En esta instalación soviética, los físicos buscan los neutrinos producidos por las reacciones nucleares que tienen lugar en el interior del Sol. La luz visible de la estrella solo aporta información sobre sus caóticas capas externas. Los neutrinos, sin embargo, pueden atravesar el astro como si fuera transparente. Estas partículas ofrecen una visión única de las condiciones reinantes en el interior solar y sirven de banco de pruebas de las teorías físicas en vigor.



LOS DETECTORES DE NEUTRINOS intentan aprovechar las raras ocasiones en que estas partículas interaccionan con la materia ordinaria. El primer detector representado aquí (*izquierda*) opera en una mina de Dakota del Sur desde 1968. Contiene unos 450.000 litros de un líquido limpiador enriquecido con cloro. Cuando un átomo de cloro absorbe un neutrino, se convierte en un isótopo radiactivo de argón que puede aislarse químicamente. El Observatorio de Neutrinos de Sudbury (*derecha*), en Ontario, almacenará 1000 toneladas de agua pesada (compuesta por deuterio, en vez de por hidrógeno ordinario). Un neutrino puede colisionar contra un electrón y producir un destello de radiación, o contra un núcleo de deuterio y disociarlo en un protón y un neutrón. El deuterio puede también absorber un neutrino y convertirse en dos protones y un positrón (un antielectrón).

partículas elementales, los constituyentes básicos de los que está formado el universo.

Los neutrinos solares no pueden atraparse para su estudio, ya que la mayoría de ellos atraviesan directamente la Tierra. Ocasionalmente, sin embargo, un neutrino puede interaccionar con un átomo y dejar una señal observable. Desde 1968 hasta 1986, el único detector de neutrinos solares del mundo fue una elegante instalación experimental alojada en la mina de oro de Homestake, en Dakota del Sur, y dirigida por Raymond Davis Jr., por entonces en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. Davis llenó un gran tanque con percloroetileno, un fluido para limpiar que contiene cloro. Un neutrino puede interaccionar con el cloro-37 (isótopo estable que constituye una cuarta parte del cloro terrestre) y convertir uno de los neutrones de su núcleo en un protón, con lo que pasa a ser argón-37 (isótopo radiactivo del gas inerte). Cada pocos meses, Davis vaciaba el tanque, separaba químicamente los átomos de argón y los contaba a partir de su radiactividad, a fin de estimar el flujo de neutrinos que habían atravesado el tanque.

El número de reacciones desencadenadas por los neutrinos solares era tan bajo que se definió una nueva unidad para expresarlo: la unidad de neutrino solar (SNU, por sus siglas en inglés), igual a un suceso por segundo por cada 10^{36} átomos de muestra. Las teorías estándar de las reacciones nucleares que

se desarrollan en el Sol predicen que un detector de cloro-37 debería registrar un flujo de $7,9 \pm 2,6$ SNU, donde los errores describen la incertidumbre teórica total.

Casi desde el mismo comienzo del experimento se observó que el flujo de neutrinos era bajo. Al principio, las discrepancias podían atribuirse de manera plausible a imprecisiones teóricas y experimentales. Pero, tras 18 años de refinar los cálculos teóricos y los datos experimentales, el desacuerdo permanece y ya supera el margen de imprecisión. Davis y sus colaboradores infieren que el flujo de neutrinos solares es de $2,1 \pm 0,3$ SNU.

Una segunda instalación experimental, ubicada en Kamioka (Japón) y conocida como Kamiokande II, se halla desde 1986 dedicada a la caza de neutrinos solares. Esta sigue un método distinto, basado en detectar los electrones que el paso de los neutrinos ha arrancado de las moléculas de agua. Las mediciones de Kamiokande II son compatibles con los resultados de Davis. El misterio de estos neutrinos «perdidos» es lo que se conoce como problema de los neutrinos solares.

UNA PREDICCIÓN PROBLEMÁTICA

El problema de los neutrinos preocupa a los astrónomos que intentan entender los procesos que hacen que el Sol y las demás estrellas brillen. Las capas exteriores del Sol sufren la acción de la convección, la turbulencia, la rotación y los campos mag-

néticos, lo cual dificulta comprender los procesos que tienen lugar en esas regiones. Pero los neutrinos se generan en las profundidades del núcleo solar, cuyas condiciones reinantes tendrían que ser mucho más fáciles de calcular.

A grandes rasgos, todos los modelos solares postulan que el Sol brilla a causa de la fusión nuclear. En ella, los núcleos de hidrógeno (protones) se fusionan para formar núcleos de helio, también llamados partículas alfa (dos protones y dos neutrones ligados). Unos 600 millones de toneladas de hidrógeno solar se consumen en este proceso cada segundo. Se cree que este conjunto de reacciones proporcionan energía a las estrellas estables como el Sol y a las de masa menor. Se conoce como «cadena pp» porque se inicia con la fusión de dos protones. El resultado neto de la cadena pp es que cuatro protones se convierten en una partícula alfa, dos positrones (la réplica en antimateria de los electrones), dos neutrinos electrónicos y unos 25 millones de electronvoltios (eV) de energía. (Un fotón de luz visible tiene una energía de unos 2 eV.)

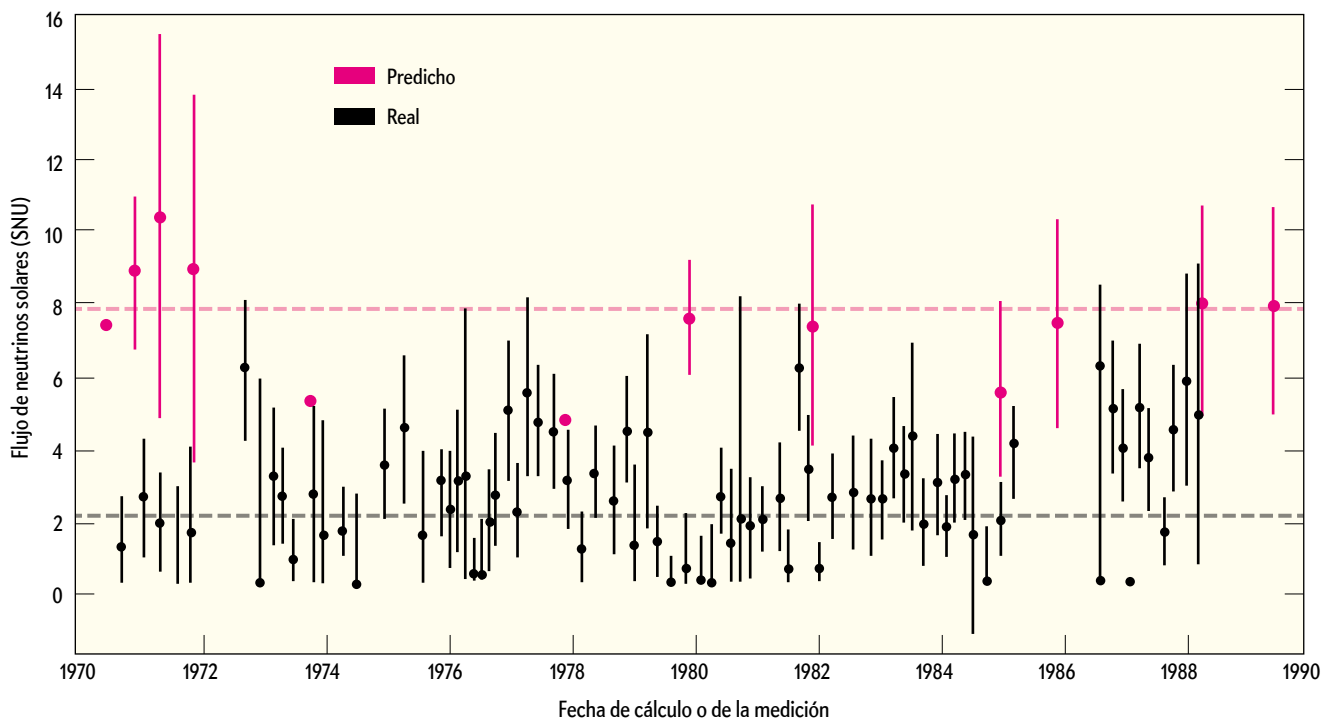
La mayoría de los neutrinos solares se genera en la primera reacción de la cadena pp: la reacción pp, en la que un protón se desintegra en un neutrón en la inmediata vecindad de otro protón. Las dos partículas forman una variedad pesada del hidrógeno llamada deuterio, junto con un positrón y un neutrino. Las energías de los neutrinos producidos en esta reacción no sobrepasan los 420.000 eV. El neutrino de menor energía que puede detectarse con el experimento de Davis viene determinado por la energía necesaria para convertir cloro-37 en argón-37,

unos 814.000 eV. Kamiokande II tiene un umbral aún más alto, unos 7,5 millones de eV.

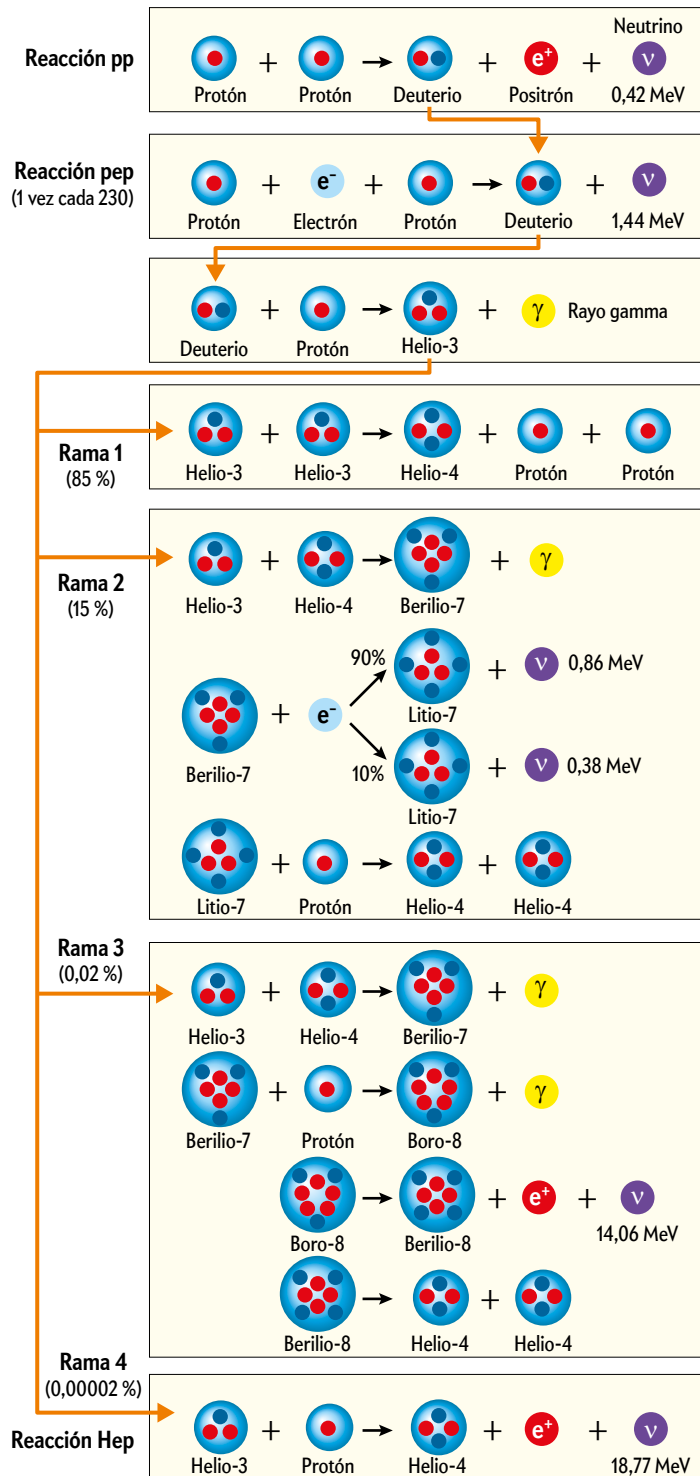
En otra reacción solar que genera neutrinos se ven implicadas tres partículas (dos protones y un electrón) y se produce deuterio y un neutrino. Estos se conocen como «neutrinos pep» (protón-electrón-protón). La probabilidad de que ocurra esta reacción es 230 veces menor que la de la reacción pp. Sin embargo, los neutrinos pp tienen una energía de 1,44 millones de eV, por lo que ya pueden observarse con el detector de cloro-37, aunque con un rendimiento bajo.

El núcleo de deuterio producido por cualquiera de estas reacciones se fusiona con otro protón para formar helio-3 (que contiene dos protones y un neutrón) y un rayo gamma. Por lo común —el 85 por ciento de las veces, según los modelos al uso—, el ciclo de la reacción se completa cuando dos núcleos de helio-3 se fusionan para dar lugar a una partícula alfa y a dos protones, los cuales se reincorporarán al ciclo desde el principio. En este proceso no se generan más neutrinos. Aproximadamente el 15 por ciento de las veces, sin embargo, el helio-3 se fusiona con una partícula alfa, lo que genera berilio-7 y un rayo gamma. El berilio-7 absorbe entonces un electrón, se transforma en litio-7 y emite un neutrino. El 90 por ciento de estos neutrinos tienen una energía de 861.000 eV, apenas la suficiente para dejar su huella en el experimento del cloro-37.

En contadas ocasiones (aproximadamente una vez por cada 5000 ciclos completos de la cadena pp), el berilio-7 se fusiona con un protón para formar boro-8, el cual es radiactivo y acaba por



LAS PREDICCIONES Y LAS OBSERVACIONES relativas al flujo de neutrinos solares que llegan a la Tierra están en desacuerdo desde hace decenios. El flujo de estas partículas se mide en «unidades de neutrinos solares» (SNU), equivalentes una interacción por segundo por cada 10^{36} átomos de muestra. Las mediciones del detector de cloro (*puntos negros*) revelan un flujo total de $2,1 \pm 0,3$ SNU (*línea negra de trazos*). Sin embargo, los cálculos realizados desde 1970 (*puntos rojos*) predicen un flujo de $7,9 \pm 2,6$ SNU (*línea roja a trazos*). Ambos valores no coinciden ni siquiera en los extremos de los intervalos de error. Ello indica que, o bien existe algún proceso que impide detectar los neutrinos, o bien los mecanismos de producción de energía en el Sol difieren de los considerados por los modelos al uso.



LA CADENA DE REACCIONES NUCLEARES PROTÓN-PROTÓN se cree que proporciona más del 98 por ciento de la energía del Sol. En ella, la reacción inicial protón-protón produce la mayoría de los neutrinos solares. Estos carecen de energía suficiente para ser detectados en los experimentos con cloro, aunque deberían aparecer en los detectores de galio. Se cree que la mayoría de los neutrinos detectados en los experimentos con cloro son los neutrinos de alta energía producidos por el boro-8. Los neutrinos de la reacción helio-protón (Hep) son más enérgicos, pero resultan tan escasos que apenas contribuyen a las mediciones. La frecuencia relativa de estas reacciones depende de las condiciones reinantes en el interior del Sol. Si estas fueran distintas de las consideradas por los modelos al uso, las predicciones relativas al flujo de neutrinos podrían ser incorrectas.

desintegrarse en dos partículas alfa, un positrón y un neutrino muy energético. Este último alcanza energías de hasta 15 millones de eV. Según los cálculos, la desintegración del boro-8 es responsable de la mayoría de los neutrinos detectados.

En el interior solar, el núcleo de helio-3 se fusiona con un protón libre para formar una partícula alfa, un positrón y un neutrino. Los «neutrinos Hep» (helio-protón) resultantes tienen energías de hasta 18,77 millones de eV. Sin embargo, esta reacción es tan poco frecuente (1000 veces menos probable que la del boro-8) que apenas contribuye a la detección de neutrinos en los detectores actuales.

La teoría que describe estas reacciones se entiende bien y goza de coherencia interna. Sin embargo, el flujo observado de neutrinos solares no se corresponde con el predicho por ella.

¿FALLA EL MODELO SOLAR?

¿Cabría la posibilidad de que el problema de los neutrinos solares se debiera a algún error en el modelo estándar del Sol? En principio, este modelo puede ser muy preciso, ya que los astrónomos conocen con gran exactitud la masa del Sol, su luminosidad, su edad y la composición química de su superficie. Además, se trata de una estrella tranquila, de edad mediana y que aún se encuentra en su estado de evolución más sencillo.

El modelo estándar del Sol se basa en varias hipótesis plausibles que se sustentan sobre abundantes pruebas observacionales. Creemos que el Sol ha evolucionado sin grandes desviaciones del equilibrio desde su nacimiento. Las reacciones nucleares antes descritas proporcionan la energía suficiente para alimentar el Sol durante 5000 millones de años, la edad del sistema solar. La presión térmica y el flujo de radiación emitida debe equilibrar exactamente la fuerza atractiva de la gravedad solar; de lo contrario, el Sol colapsaría (o se expandiría) en menos de una hora. Creemos que el Sol tenía una composición química uniforme cuando se formó. Durante milenios, las reacciones que se suceden en su núcleo han consumido hidrógeno y producido helio. Pero las capas externas no parecen mezclarse con el núcleo, por lo que su composición debería ser muy similar a la composición inicial del Sol.

El modelo solar estándar explica la relación entre la luminosidad, la masa y la temperatura tanto en el Sol como en otras estrellas que difieren en luminosidad hasta en un factor de 100 millones. En los últimos años, las oscilaciones acústicas de la superficie del Sol han servido para investigar su estructura interna, y las frecuencias de las oscilaciones calculadas a partir del modelo estándar concuerdan con los miles de valores observados con una precisión de más del 1 por ciento. Y el mayor hito del modelo solar es tan impresionante que suele pasar inadvertido: los astrónomos usan esta teoría de manera rutinaria para interpretar las propiedades físicas y químicas de estrellas per-

tenecientes a toda clase de entornos, desde aquellas próximas al Sol hasta otras alojadas en galaxias remotas. Por tanto, cualquier modificación del modelo solar tendría profundas consecuencias en astronomía. La única señal directa de las reacciones nucleares predichas por el modelo solar es el flujo de neutrinos. El problema estriba en que dicha predicción parece ser incorrecta.

Podríamos pensar que calcular las condiciones reinantes en el centro del Sol es difícil. No obstante, a pesar de su elevada temperatura (unos 15 millones de grados) y enorme densidad (150 gramos por centímetro cúbico, 13 veces la densidad del plomo), creemos que el centro del Sol queda bien descrito por las leyes de los gases sujetas a pequeñas correcciones que no deberían alterar significativamente el flujo predicho de neutrinos.

A la hora de calcular el flujo de neutrinos solares, una gran fuente de incertidumbre es nuestro desconocimiento de la composición del interior profundo del Sol, donde se generan los neutrinos. Varios autores han señalado que la producción de neutrinos solares es sensible a la composición química del interior de la estrella, y han propuesto modelos según los cuales el Sol nació con una composición interna bastante distinta de la que presenta su exterior visible. Con todo, ninguno de tales modelos ha logrado explicar todas las características observadas del Sol. Además, distintos modelos de la evolución estándar del Sol, desarrollados independientemente por varios equipos de investigadores, predicen flujos de neutrinos idénticos hasta en un 10 por ciento siempre que se utilicen los mismos parámetros de entrada.

¿FALLAN LOS CÁLCULOS?

¿Y si fueran erróneos los flujos de neutrinos calculados? El margen de error a la hora de calcular el flujo de neutrinos solares se estima a partir del intervalo teórico total; es decir, a partir de los intervalos de valores que parecen plausibles en los cálculos publicados. Este método de estimar el error no es inmune ante posibles fallos conceptuales de la teoría, pero es objetivo y sencillo de evaluar. En la práctica, la única posibilidad de que el verdadero valor quede fuera del intervalo teórico total es que exista una equivocación en la determinación de alguno de los parámetros de entrada.

Entre 1963 y 1988, mis colaboradores (en particular Roger K. Ulrich, de la Universidad de California en Los Ángeles) y yo hemos publicado 19 cálculos sobre los eventos de neutrinos que cabe esperar en experimentos con cloro-37. De estos, los 11 publicados a partir de 1970 resultan compatibles con la tasa de $7,9 \pm 2,6$ SNU aludida con anterioridad.

Otra posibilidad sería que la discrepancia se debiera a un error experimental. La instalación de cloro-37 está ubicada bajo tierra a fin de proteger el dispositivo de los rayos cósmicos, los cuales podrían alterar los resultados del experimento. Los átomos de argón-37 producidos en el tanque se extraen con un rendimiento superior al 90 por ciento y se registran mediante contadores electrónicos muy sensibles, capaces de detectar la desintegración de un solo átomo al mes.

Davis ha acumulado y analizado datos de flujos de neutrinos durante 18 años. Estos indican un ritmo medio de producción de argón-37 de $0,46 \pm 0,04$ átomos por día. Sustrayendo el ruido de fondo y considerando la tasa de interacción entre el cloro-37 y los neutrinos, se llega al problemático flujo de $2,1 \pm 0,3$ SNU. Los números reflejan un nivel de confianza del 68 por ciento, lo que significa que hay un 32 por ciento de probabilidades de que el verdadero valor caiga fuera de ese margen de error. Nueve tomas de datos recientes, realizadas entre 1986

y 1988, arrojan un flujo de neutrinos solares de $3,2 \pm 0,7$ SNU: muy por debajo del flujo predicho, aunque posiblemente indicativo de un aumento.

Por su parte, la instalación experimental de Kamiokande II detecta la radiación de Cherenkov (un análogo óptico a la ruptura de la barrera del sonido) que emiten los electrones acelerados a velocidades próximas a la de la luz cuando interaccionan con neutrinos energéticos. El detector Kamiokande se diseñó originalmente para observar la hipotética desintegración del protón. Pero, a finales de 1984, un equipo de la Universidad de Pensilvania dirigido por Eugene W. Beier y Alfred K. Mann ayudó a sus colegas japoneses, bajo la dirección de Masatoshi Koshiba y Yoichi Totsuka, de la Universidad de Tokio, a remodelar la instalación para detectar los sucesos menos energéticos que producen los neutrinos solares. Por suerte, la conversión concluyó a finales de 1986, justo unos meses antes de la explosión de una brillante supernova que fue observada en febrero de 1987. Kamiokande II detectó los neutrinos emitidos por la supernova y halló que estos coincidían con los predichos por las teorías que describen estas explosiones estelares.

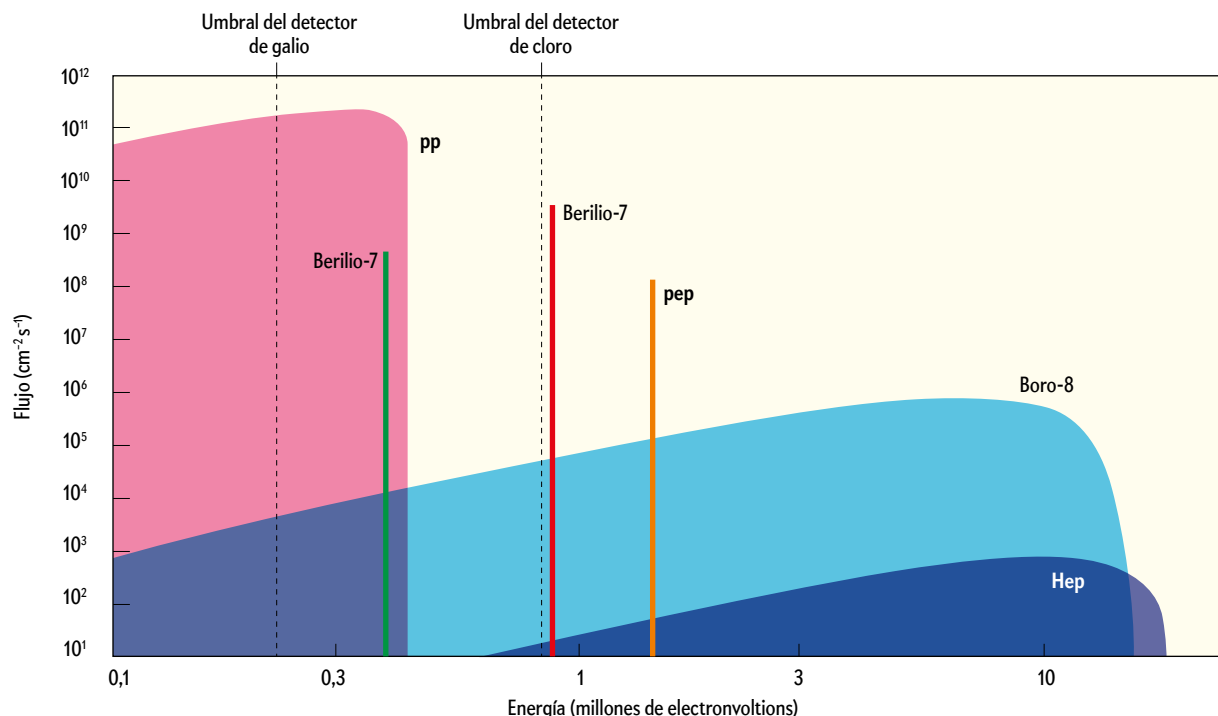
Las interacciones neutrino-electrón dispersan los electrones hacia delante y, por tanto, proporcionan una indicación de la dirección de la que provienen los neutrinos. Kamiokande II ha encontrado que los electrones se dispersan preferentemente según la dirección del eje Tierra-Sol, lo que confirma el origen solar de los neutrinos. Las medidas preliminares del flujo de neutrinos del detector Kamiokande se muestran de acuerdo con los resultados del experimento de cloro-37: en torno a 0,39 veces el valor esperado a partir del modelo solar estándar. Tomados en conjunto, los dos experimentos proporcionan una prueba sólida de que existe un déficit de neutrinos solares.

¿ES EL SOL ESTABLE?

Una posible explicación del déficit de neutrinos es que el Sol esté atravesando una fase de calma transitoria en su actividad y que la teoría se confirmara para la producción total de neutrinos durante períodos largos. Al objeto de comprobar esta posibilidad, George A. Cowan, del Laboratorio Nacional de los Álamos, y Wick C. Haxton, de la Universidad de Washington en Seattle, propusieron un experimento para medir la variabilidad temporal del flujo de neutrinos. En ocasiones, los neutrinos solares que atraviesan la Tierra reaccionan con átomos de molibdeno, un elemento raro, y dan lugar a un electrón y a un isótopo radiactivo de tecnecio. Este isótopo se desintegra gradualmente, pero el bombardeo de neutrinos lo repone de forma continua. Solo los neutrinos solares energéticos, como los generados en el proceso del boro-8, pueden inducir esta reacción.

El tecnecio tiene un período de semidesintegración de 4,2 millones de años. Su concentración actual refleja su ritmo total de producción durante los últimos millones de años y, por tanto, la intensidad del flujo de neutrinos solares en las épocas pasadas. Un equipo de investigación encabezado por Kurt Wolfsberg, de Los Álamos, medirá la concentración de tecnecio radiactivo en rocas inalteradas de la mina de molibdeno de Henderson, en Colorado, situada a 1800 metros de profundidad.

El modelo solar predice que el comportamiento del Sol no cambia en intervalos de pocos millones de años, de manera que el flujo medio de neutrinos obtenido en el experimento del tecnecio debería concordar con las medidas actuales. Si así ocurre, entonces el bajo flujo de neutrinos del Sol no sería un fenómeno temporal. Pero si el nivel histórico se ajustara a las predicciones más altas, la hipótesis de una constancia extrema



ESPECTRO DE ENERGÍAS de los neutrinos producidos en el Sol, calculado a partir de las teorías actualmente aceptadas para describir la física de neutrinos. Las líneas a trazos indican los umbrales de detección de los experimentos de galio y cloro. El espectro real podrá determinarse, entre otras alternativas, gracias a las medidas del Observatorio de Neutrinos de Sudbury. Si la forma de las curvas difiere significativamente de las representadas aquí, las teorías actuales tendrán que modificarse.

en el comportamiento del Sol sería errónea. Quedarán todavía algunas incertidumbres, pues no acabamos de conocer con exactitud el nivel de radiación de fondo ni el ritmo de producción del tecnecio.

Un dato clave, todavía por conocer, es el relativo a la cantidad de neutrinos solares de baja energía que se producen en la reacción pp primaria, la cual no puede determinarse por los experimentos con cloro-37 o por los efectuados en Kamiokande II. Dos nuevos observatorios de neutrinos que emplean detectores de galio-71 explorarán este intervalo de energías. Cuando el galio-71 absorbe un neutrino, produce un electrón y un átomo radiactivo de germanio-71. Los átomos de germanio pueden separarse químicamente del galio, y la cantidad de germanio-71 se determina contando las desintegraciones radiactivas.

La energía mínima que han de tener los neutrinos para desencadenar la reacción del galio-71 es de 233.000 eV, muy por debajo de la energía máxima de los neutrinos generados por la importante reacción pp. Los cálculos basados en el modelo estándar del Sol y la física de partículas elementales en vigor establecen que los neutrinos de la reacción pp deben dar cuenta aproximadamente de la mitad de los sucesos detectables por medio del galio-71.

Hay ya detectores de neutrinos de galio que operan en la Unión Soviética y en Italia. El experimento soviético cuenta con colaboración estadounidense de Los Álamos y las universidades de Louisiana, Pensilvania y Princeton, razón por la que se conoce también como Experimento de Galio Soviético-Americano (SAGE). Esta instalación usa 60 toneladas de galio metálico y se encuentra ubicada en las entrañas de un monte del norte del Cáucaso, en la Unión Soviética.

El experimento en Italia está organizado por GALLEX, una colaboración en la que participan Alemania Occidental, Francia, Italia, Israel y Estados Unidos. Empleará un detector de 30 toneladas de galio en forma de cloruro de galio. El dispositivo se instalará en un laboratorio construido en el túnel del Gran Sasso, en Italia central. La magnitud de estos dos experimentos es impresionante, en particular si tenemos presente que, en el momento en que se desarrollaron las técnicas experimentales, la producción mundial total de galio apenas rondaba las 10 toneladas anuales.

Los experimentos SAGE y GALLEX aplicarán diferentes métodos de extracción química, aunque tendrán contadores atómicos similares, y la comparación de sus resultados debería sacar a la luz cualquier posible error sistemático. Las leyes actualmente aceptadas de la física de neutrinos implican que, para que el Sol brille, el número de sucesos observados en los experimentos con galio tendría que ser, como mínimo, el 60 por ciento de lo que predice el modelo solar estándar. Esta cifra resulta ser independiente de casi cualquier posible alteración del modelo solar. En cambio, si las leyes de la física de neutrinos fueran otras, el resultado podría ser muy distinto, tal vez no mayor del 10 por ciento del valor estándar.

DETECTAR NEUTRINOS DE OTROS TIPOS

Hay en proyecto un potente detector de neutrinos que servirá como continuación a los experimentos de galio. Los Gobiernos de Canadá y EE.UU. han aprobado la financiación de un detector de 1000 toneladas de agua pesada (la que contiene deuterio, en vez de hidrógeno ordinario) que se instalará en una mina de níquel cerca de Sudbury, en Ontario. El Observatorio de Neu-

trinos de Sudbury (SNO) es una iniciativa en la que colaboran científicos de Canadá, EE.UU. y el Reino Unido. Buscará electrones producidos por neutrinos que interaccionen con núcleos de deuterio y determinará la energía y dirección de esos electrones. Registrará también la radiación de Cherenkov de las colisiones neutrino-electrón. El telescopio de neutrinos del SNO será sensible a los neutrinos del boro-8 y a los neutrinos Hep, aunque no podrá detectar neutrinos solares de menor energía.

El SNO será un detector con múltiples prestaciones, ya que estudiará tanto la dispersión como la absorción de neutrinos. La absorción solo ocurre con neutrinos electrónicos. Sin embargo, la dispersión pueden experimentarla las tres variedades de neutrinos, si bien los muónicos o tauónicos tienen una probabilidad siete veces menor de ser dispersados por un electrón que los neutrinos electrónicos. Se cree que los procesos nucleares que se desarrollan en el Sol solo crean neutrinos electrónicos. No obstante, algunos teóricos han sugerido que otros procesos físicos del interior solar hasta ahora inadvertidos podrían transformar algunos de los neutrinos electrónicos en muónicos o tauónicos, los cuales escaparían a la detección por parte de los experimentos con cloro-37. Más adelante nos ocuparemos de esta crisis de identidad de los neutrinos.

Hay un tipo de reacción en el detector de deuterio que es sensible por igual a las tres clases de neutrino: el modo de «corrientes neutras», en el que un neutrino rompe el núcleo de deuterio en el neutrón y el protón que lo forman. Esta reacción puede constituir la base de un «detector de igualdad de oportunidades» que evite los sesgos de los detectores basados en la absorción de neutrinos (sensibles solo a los neutrinos electrónicos) y de los basados en la dispersión (solo débilmente sensibles a los neutrinos electrónicos y tauónicos). Comparar los resultados de un detector de este tipo con los obtenidos en experimentos más especializados tal vez ayudase a resolver el problema fundamental de si los neutrinos de una clase se transforman en neutrinos de otra.

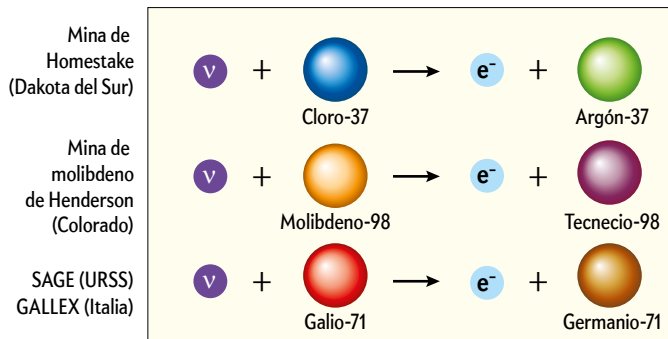
Se está investigando el empleo de dispositivos de baja temperatura como posibles detectores de los neutrinos de baja

energía producidos en la reacción básica pp. Estos se basan en el principio según el cual una pequeña cantidad de energía puede tener un gran efecto a bajas temperaturas. Un grupo de la Universidad Stanford está preparando un detector de silicio cristalino enfriado a temperaturas extremadamente bajas (del orden del milikelvin) para registrar electrones dispersados de baja energía. Las dispersiones de neutrinos pueden provocar excitaciones observables en helio líquido ultrafrío, una posibilidad que se está investigando en la Universidad Brown. Otros grupos están desarrollando un detector que utiliza indio-115, capaz de absorber neutrinos a energías relativamente bajas. Una iniciativa internacional encabezada por Ramaswamy S. Raghavan, de los Laboratorios AT&T Bell, planea estudiar los neutrinos solares mediante detectores de boro que generarán destellos luminosos cuando los neutrinos produzcan electrones rápidos.

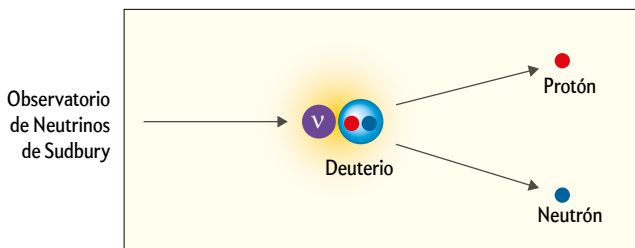
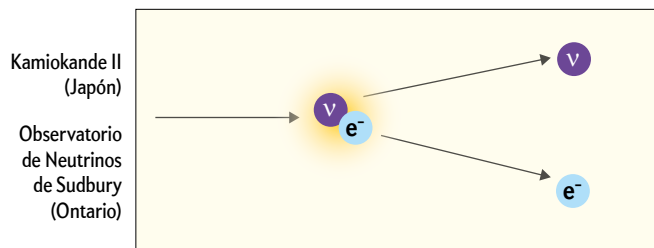
NUEVA FÍSICA

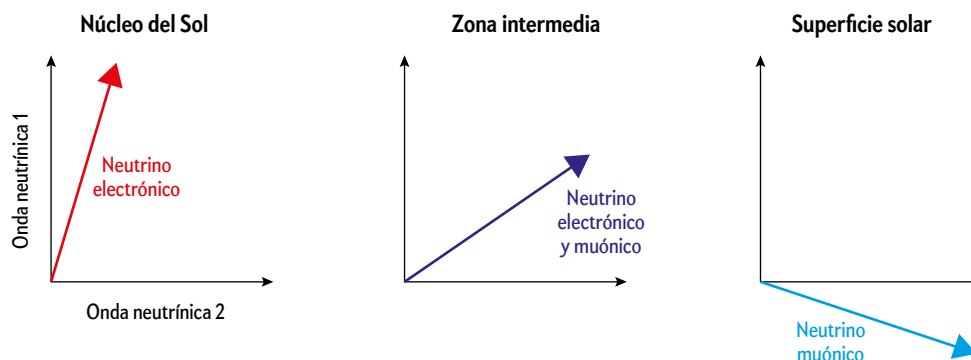
¿Qué soluciones al problema de los neutrinos solares podrían revelar estos nuevos detectores? Un conjunto de propuestas se centra en modificar el modelo solar estándar. Puede que, contrariamente a lo que pensamos, el núcleo del Sol sea muy pobre en elementos más pesados que el hidrógeno; o tal vez un proceso de mezcla cause que los elementos pesados se distribuyan por toda la estrella. La convección inestable en el astro podría provocar que este se comportara de manera distinta a la que creemos. Todas estas modificaciones rebajarían la temperatura interna estimada del Sol e implicarían una menor producción de neutrinos por el boro-8. Con todo, ninguno de estos modelos así corregidos resulta totalmente compatible con la física conocida, y todos ellos recurren a hipótesis *ad hoc* para explicar el flujo observado de neutrinos.

Una propuesta fascinante intenta resolver al mismo tiempo el problema de los neutrinos solares y el de la «masa oculta» de la cosmología. Ha sido formulada por William H. Press, de Harvard, y David N. Spergel, de la Universidad de Princeton, e independientemente por John Faulkner, de la Universidad



LOS NEUTRINOS PUEDEN INTERACCIONAR con la materia ordinaria de distintas maneras. Un neutrino puede ser absorbido por un núcleo atómico y transformar un neutrón en un protón, tras lo cual el átomo se convierte en un elemento distinto y emite un electrón (arriba). Los neutrinos pueden también ser dispersados por los electrones; en tal caso, estos últimos se mueven siguiendo aproximadamente la trayectoria del neutrino incidente (centro). Por último, un núcleo de deuterio puede absorber un neutrino y disociarse sin transferencia de carga eléctrica (abajo); esta reacción tiene la ventaja de que puede ser inducida por aquellos tipos de neutrinos que no pueden detectarse fácilmente por otros métodos.





EL EFECTO MIKHEYEV-SMIRNOV-WOLFENSTEIN aporta una posible solución al problema de los neutrinos solares. Los neutrinos podrían comportarse como una superposición de ondas (*mostradas aquí como vectores*) que avanzan a velocidades distintas. Las condiciones reinantes en el Sol desplazarían la fase relativa de esas ondas, lo que provocaría que un neutrino electrónico (*izquierda*) acabara comportándose como un neutrino muónico (*derecha*).

de California en Santa Cruz, y Roland L. Gilliland, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Boulder, en Colorado. Estos investigadores postulan que cierta clase de partículas subatómicas aún por descubrir, conocidas como «partículas masivas que interaccionan débilmente» (WIMP, por sus siglas en inglés) y que habrían sido creadas en ingentes cantidades en el universo primitivo, serían las responsables de la enorme masa invisible que parece existir en las grandes estructuras cósmicas. En tal caso, estas partículas podrían agruparse alrededor de cuerpos muy masivos, como el Sol, y, si tienen las propiedades adecuadas, podrían redistribuir el calor en el interior de la estrella, lo que reduciría el flujo de neutrinos del boro-8 hasta los niveles observados.

Otra posibilidad es que los modelos solares actuales sean correctos, pero que existan deficiencias en las teorías físicas vigentes. El flujo esperado de neutrinos solares se calcula a partir del modelo estándar de la física de partículas elaborado por Sheldon Glashow, de Harvard; Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, y Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, el cual establece una descripción unificada de las interacciones electromagnéticas y nucleares débiles. En su versión más sencilla, todos los neutrinos tienen una masa exactamente nula. Sin embargo, hay extensiones de dicho modelo que permiten un amplio abanico de masas para los neutrinos.

Hoy por hoy no existe una medición de la masa de los neutrinos que goce de aceptación general, si bien las observaciones cosmológicas sugieren que ninguno de los tres tipos de neutrino debería superar los 80 eV. Las masas predichas por las extensiones del modelo estándar de la física de partículas son mucho menores, en el intervalo comprendido entre una millonésima de eV y un eV.

Medir masas tan pequeñas es por ahora imposible en las instalaciones experimentales terrestres, aunque podría lograrse examinando los neutrinos solares. La razón es que la masa de los neutrinos afectaría al modo en que estos se propagan a lo largo de grandes distancias, como la que media entre la Tierra y el Sol. Las observaciones de neutrinos solares podrían llegar a revelar masas tan pequeñas como una millonésima de eV, lo que permitiría poner a prueba nuevas teorías físicas.

Un neutrino con masa podría comportarse como un pequeño imán, por lo que el campo magnético del Sol podría invertir el

espín del neutrino a medida que este emerge de la estrella. Un neutrino con el espín invertido no sería detectado en la Tierra. Esta solución, propuesta hace muchos años, ha sido nuevamente considerada por científicos soviéticos para explicar las posibles pistas que apuntan a una relación inversa entre la actividad solar y el flujo de neutrinos. En los momentos de alta actividad del Sol, su magnetismo aumenta, y el flujo de neutrinos solares parece haber disminuido durante el pico del ciclo anterior (1979-1980) para crecer después durante un tiempo de baja actividad (1986-1988). Esta solución supone que el neutrino tiene un campo magnético mucho más intenso de lo que predicen las teorías estándar, aunque, según algunos cálculos, resultaría incompatible con otros datos astronómicos.

OSCILACIONES DE NEUTRINOS

Algunas extensiones de la física de partículas actual, conocidas como teorías de gran unificación, buscan un marco común para describir las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. En 1985, la comunidad de físicos vibró con una elegante propuesta para resolver el problema de los neutrinos solares que resultaba compatible con las predicciones de dichas teorías para la masa de los neutrinos. Esta propuesta fue formulada por Stanislav Mikheyev y Alexei Smirnov, de la Academia de Ciencias Soviética, y se basaba en trabajos previos de Lincoln Wolfenstein, de la Universidad Carnegie Mellon. Según ella, los neutrinos de un tipo podrían transformarse, u «oscilar», en neutrinos de otro, un fenómeno conocido como efecto Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW).

El efecto MSW exige que por lo menos un tipo de neutrino tenga una masa distinta de cero. En su propagación, los neutrinos no se comportan solo como partículas, sino también como ondas, y tales ondas pueden considerarse una superposición de dos o más estados de diferente masa. Estos avanzan a distinta velocidad, por lo que la fase entre esas dos componentes podría cambiar a medida que los distintos estados de masa se van desacompanando. Eso haría que un neutrino electrónico acabase pareciendo un neutrino de una variedad distinta.

En el interior del Sol, las interacciones entre los neutrinos electrónicos y los electrones podrían alterar el equilibrio de estados de masa en la onda. Por tanto, un neutrino podría escapar del Sol con la apariencia de un neutrino tauónico o muónico, los cuales no serían detectados por los experimentos con

cloro-37. Incluso en el vacío, la fase de las componentes de un neutrino electrónico podría cambiar y alterar de esta manera sus características. Como consecuencia, el flujo observado de neutrinos podría resultar mucho menor que el vaticinado por la teoría estándar, aun cuando los neutrinos se crearan en el centro del Sol en la cantidad predicha. Para que se produjera el efecto MSW, el neutrino más masivo tendría que poseer una masa comprendida entre tan solo 0,01 y 0,001 eV.

Si el efecto MSW fuera la explicación correcta del problema de los neutrinos solares, entonces los neutrinos contendrían importantes claves sobre la energía a la que se unifican las cuatro interacciones fundamentales. Se cree que esta energía es extremadamente alta: en torno a los 10^{24} eV, por lo que se encuentra muy lejos del alcance de los aceleradores de partículas terrestres. Sin embargo, los científicos podrían explorarla estudiando aquellos neutrinos cuyas masas son tan diminutas que escapan a la medición. Sin duda, se trata de una posibilidad maravillosa y sobrecogedora.

Esta atrevida explicación del problema de los neutrinos solares admite una comprobación directa. Tanto el modelo solar estándar como sus modificaciones predicen que la forma del espectro de energías de los neutrinos solares debería coincidir con la que arrojan los cálculos actuales, por más que el flujo total generado por cada clase de reacción nuclear sea distinto. La hipótesis MSW predice que la transformación de neutrinos electrónicos en otras variedades depende de la energía. Por tanto, el espectro de energías esperado diferiría del vaticinado por las predicciones estándar. Por ejemplo, el flujo de neutrinos pp podría ser muy inferior al que permiten las teorías actuales. Los experimentos con galio podrían revelar un gran déficit de neutrinos, lo que supondría una prueba del efecto MSW.

Los experimentos que se acometan durante la próxima década podrían dar con la solución del problema de los neutrinos solares. Tal vez ello abra el camino hacia un conocimiento más completo de los mecanismos que rigen la producción de energía y la evolución de las estrellas, o quizá lo haga hacia una teoría más completa de la física de partículas y del comportamiento de los neutrinos. Si la naturaleza se muestra dispuesta a colaborar, los experimentos con neutrinos solares podrían tener éxito en ambos frentes. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, julio de 1990

EL AUTOR

John N. Bahcall (1934-2005) fue profesor en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Reconocido astrofísico, destacó por sus trabajos sobre el modelo solar estándar y por sus notables contribuciones al problema de los neutrinos solares, al que dedicó una gran parte de su carrera investigadora.

PARA SABER MÁS

Solar neutrinos: A scientific puzzle. John N. Bahcall y Raymond Davis Jr. en *Science*, vol. 191, págs. 264-267, enero de 1976.

The case of the missing solar neutrinos. W. A. Fowler en *Science underground*. American Institute of Physics Conference Proceedings, 1983.

Report on the status of solar neutrino experiments. Raymond Davis Jr. en *Proceedings of the Seventh Workshop on Grand Unification*. World Scientific, 1987.

Solar neutrinos: A field in transition. John N. Bahcall, Raymond Davis Jr. y Lincoln Wolfenstein en *Nature*, vol. 334, págs. 487-493, agosto de 1988.

Neutrino astrophysics. John N. Bahcall. Cambridge University Press, 1989.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Alberto Ramos: *Un abanico de partículas*; Manuel Puigcerver: *Así explota una supernova*; Ramón Pascual: *El problema de los neutrinos solares, La resolución del problema de los neutrinos solares*; Juan Pedro Campos: *Detección de la masa de los neutrinos*; Tomás Ortín: *Mensajeros fantasmales de nueva física*; Miguel A. Vázquez Mozo: *El enigma de los neutrinos, Neutrinos ocultos*; Ernesto Lozano Tellechea: *¿Por qué hay materia en el universo?*

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.

València, 307, 3.ª 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.

Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.

Valencia, 307, 3.ª 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.

Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Copyright © 2020 Scientific American Inc.,
1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2020 Prensa Científica S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN edición impresa: 1135-5662 ISSN edición digital: 2385-5673
Dep. legal: B-32.350-1995

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España

HISTORIA DE UN PROBLEMA

Detección de la masa de los neutrinos



Un gigantesco detector construido en las entrañas del monte Ikenoyama, en Japón, ha captado la metamorfosis que sufren los neutrinos a medida que viajan. Esta observación apoya con solidez la tesis de que estas esquivas partículas tienen masa

Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka

EL DETECTOR SUPER-KAMIOKANDE se encuentra en una mina de zinc en el interior del monte Ikenoyama. Su tanque de acero inoxidable contiene 50.000 toneladas de agua ultrapura, tan transparente que la luz puede atravesar casi 70 metros antes de perder la mitad de su intensidad. Esa agua es monitorizada por 11.000 tubos fotomultiplicadores que cubren las paredes, el suelo y el techo con el objetivo de detectar destellos de luz de Cherenkov, la manifestación de que se ha producido una colisión entre un neutrino de alta energía y un núcleo atómico del agua. En esta fotografía, unos técnicos en balsas hinchables limpian los tubos.



EN SÍNTESIS

Desde que se vaticinara la existencia del neutrino en los años treinta del siglo xx, los físicos habían supuesto que estas partículas carecían de masa. Hoy se conocen tres tipos de neutrino: el electrónico, el muónico y el tauónico.

En 1998, el experimento japonés Super-Kamiokande descubrió que los neutrinos de un tipo podían transformarse espontáneamente en neutrinos de otro. Las leyes cuánticas sugieren que este fenómeno solo es posible si los neutrinos tienen masa.

Este hallazgo no afecta de manera significativa a la estructura del modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, reviste importancia para las teorías de gran unificación y podría ayudar a explicar el problema de los neutrinos solares.

EN OCASIONES, LA BASURA DE UNA PERSONA PUEDE ser el tesoro de otra. Para un físico, la basura es el «ruido de fondo»: aquellos procesos asociados a fenómenos prosaicos y bien conocidos. El tesoro es la «señal»: indicaciones de nuevos fenómenos que esperamos que amplíen nuestra comprensión del universo. Desde hace veinte años, varios grupos de todo el mundo intentan detectar la desintegración del protón, un proceso extremadamente raro que, suponiendo que realmente ocurra, se ocultaría bajo una montaña de reacciones de fondo instadas por neutrinos, esquivas partículas muy difíciles de detectar. El protón, uno de los constituyentes principales de los átomos, parece ser inmortal. Pero observar su desintegración supondría un fuerte espaldarazo para las llamadas teorías de gran unificación, las cuales muchos investigadores creen que se hallan tras el exitoso modelo estándar de la física de partículas. Para detectar dicho proceso se han construido gigantescas instalaciones subterráneas en minas y túneles, con el objetivo de protegerlas de la incesante lluvia de rayos cósmicos. Sin embargo, por muy profundos que se encuentren, tales detectores siguen estando expuestos a los penetrantes neutrinos.

La primera generación de detectores de desintegraciones de protones operó entre 1980 y 1995 y no encontró señal alguna de dicho proceso. Pero, en el camino, los investigadores se percataron de que el ruido de fondo causado por los neutrinos no era tan prosaico como se pensaba. Uno de esos experimentos, el detector Kamiokande, estaba instalado en Kamioka, una localidad minera situada a unos 250 kilómetros de Tokio. El nombre es la contracción de Kamioka Nucleon Decay Experiment («Experimento de Desintegración de Nucleones de Kamioka»). Tanto en esta instalación como en el experimento IMB, ubicado en una mina de sal de Ohio, los investigadores emplearon detectores muy sensibles que monitorizaban un depósito de agua ultrapura para captar el destello que revelaría que un protón se había desintegrado.

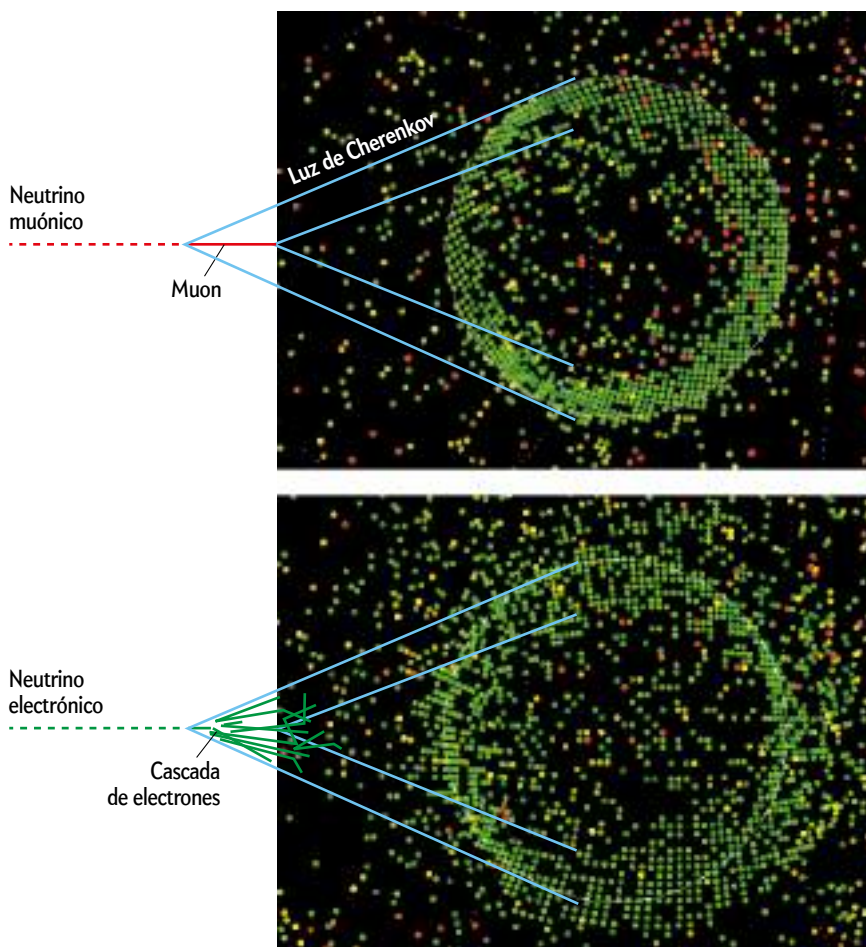
Sin embargo, un suceso así habría pasado inadvertido, cual aguja en un pajar, entre unos mil destellos similares causados por la interacción entre los neutrinos y los núcleos atómicos del agua. Y aunque los investigadores no registraron la desintegración de ningún protón, el análisis de esas mil reacciones destapó un auténtico tesoro: tentadores indicios de que los neutrinos son partículas inesperadamente volubles que, en su propagación, pueden cambiar de identidad. De confirmarse, dicho fenómeno

sería tan apasionante y refractario a las teorías actuales como la misma desintegración del protón.

Los neutrinos son partículas asombrosas y sutiles. Cada segundo, unos 60.000 millones atraviesan cada centímetro cuadrado de nuestro cuerpo (o de cualquier otro objeto), la mayoría procedentes del Sol. Dado que apenas interactúan con otras partículas, esos 60.000 millones suelen atravesarnos sin rozar un átomo. De hecho, si lanzásemos un haz de neutrinos a través de un año luz de plomo, la mayoría de ellos lo atravesaría sin inmutarse. Un detector del tamaño de Kamiokande apenas apresa una minúscula fracción de todos los neutrinos que lo atraviesan cada año.

Existen tres variedades, o «sabores», de neutrinos. Cada uno de ellos está asociado a una de tres partículas con carga eléctrica presentes en el modelo estándar: el electrón y sus parientes de mayor masa, el muon y la partícula tau. La interacción entre un neutrino electrónico y un núcleo atómico puede dar lugar a un electrón; la interacción entre un neutrino muónico y un núcleo, a un muon; y la de uno tauónico y un núcleo, a una partícula tau. Desde que se propusiera la existencia de los neutrinos en la década de 1930, los físicos han dado por supuesto que se trataba de partículas sin masa. Sin embargo, la teoría cuántica nos dice que, si pueden cambiar de sabor, lo más probable es que tengan masa. De ser cierto, la masa conjunta de estas etéreas partículas podría superar a la de todas las estrellas del universo.

PÁGINAS ANTERIORES: DAVID HERSTEIN; ICRP, UNIVERSIDAD DE TOKYO (corros de luz)



LOS CONOS DE LUZ DE CHERENKOV se emiten cuando un neutrino de alta energía choca contra un núcleo atómico y produce una partícula cargada. Un neutrino muónico genera un muon que, tras recorrer aproximadamente un metro, proyectará un anillo muy nítido sobre los detectores (arriba). Un electrón, producido por un neutrino electrónico, generará en cambio una pequeña cascada de electrones y positrones, cada uno de los cuales creará su propio cono de Cherenkov. El resultado es un anillo de luz borroso (abajo).

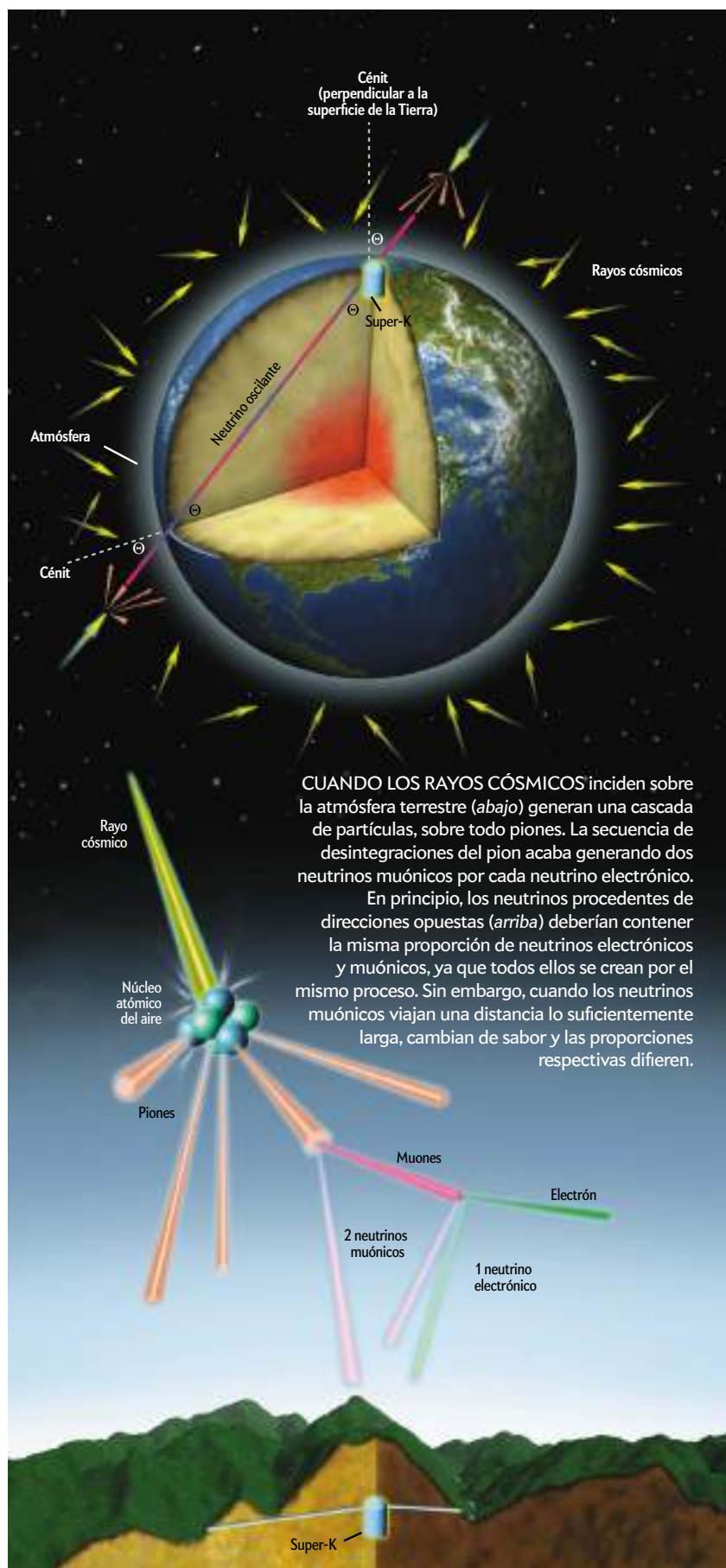
UNA TRAMPA MAYOR

Como ocurre a menudo en física de partículas, progresar exige construir una máquina más grande que la anterior. El detector Super-Kamiokande, o Super-K, mantuvo el diseño básico de Kamiokande aunque decuplicando sus proporciones. En él, una batería de detectores sensibles a la luz observa sin cesar 50.000 toneladas de agua a la espera de que alguno de sus protones se desintegre o reciba el impacto de un neutrino. En ambos casos, la reacción crea partículas que pueden identificarse por el destello luminoso que producen, conocido como luz de Cherenkov. Este fenómeno, descubierto por Pavel A. Cherenkov en 1934, viene a ser el análogo óptico de lo que ocurre en acústica cuando un cuerpo rompe la barrera del sonido. Al igual que un avión genera una onda de choque cuando vuela más rápido que el sonido, una partícula dotada de carga eléctrica (un electrón o un muon, por ejemplo) emite luz de Cherenkov cuando su velocidad supera a la de la luz en el medio en que se esté moviendo. Cabe notar que esto no contradice la teoría de la relatividad de Einstein, ya que en ella la velocidad fundamental es c , la que alcanza la luz en el vacío. En el agua, sin embargo, la luz se propaga un 25 por ciento más despacio. Pero otras partículas, si tienen la energía suficiente, pueden moverse por ella a una velocidad casi igual a c . La luz de Cherenkov se emite a lo largo de un cono cuyo eje es la trayectoria de vuelo de la partícula emisora.

En Super-K, la partícula cargada viaja unos metros y el cono de radiación de Cherenkov proyecta un anillo de luz sobre la pared, cubierta de fotodetectores. El tamaño, la forma y la intensidad de este anillo revelan las propiedades de la partícula cargada, las cuales nos dicen a su vez las del neutrino que la produjo. Resulta sencillo distinguir la luz de Cherenkov generada por los electrones de la creada por los muones. Los primeros dan lugar a una cascada de partículas y el anillo es borroso, mientras que los segundos producen un círculo nítido. La luz de Cherenkov permite también medir la energía y la dirección del electrón o muon, las cuales constituyen aproximaciones aceptables de las del propio neutrino.

A Super-K no le es fácil identificar el tercer tipo de neutrino, el tauónico, ya que este solo puede interactuar con un núcleo y crear una partícula tau si tiene energía suficiente. Un muon es unas 200 veces más masivo que un electrón; una partícula tau, unas 3500 veces. La masa del muon cae dentro del intervalo de energías de los neutrinos atmosféricos, pero solo una pequeña fracción de estos porta energías del orden de la masa de una partícula tau. Como consecuencia, la mayoría de los neutrinos tauónicos atravesarán Super-K sin ser detectados.

Una de las preguntas más básicas que suelen hacer los físicos experimentales es: «¿cuántos?». Hemos construido un magnífico detector para estudiar los neutrinos, así que nuestra primera tarea consiste en contar cuántos vemos. De la mano de esa pregunta viene otra: «¿cuántos esperábamos ver?». Para responderla, primero hemos de analizar cómo se producen estas partículas.



PROPORCIONES SUTILES

Super-K observa neutrinos atmosféricos. Estos se crean en la cascada de partículas que se genera cuando un rayo cósmico impacta contra la atmósfera. Los proyectiles incidentes (los rayos cósmicos) son en su mayoría protones, a los que acompañan algunos núcleos más pesados como helio o hierro. Cada colisión desata una cascada de partículas secundarias, en su mayoría piones y muones, las cuales se desintegran en pleno vuelo y crean neutrinos. Sabemos aproximadamente cuántos rayos cósmicos inciden en la atmósfera por segundo, y cuántos piones y muones se producen en cada colisión, de modo que podemos predecir cuántos neutrinos esperamos ver.

Por desgracia, el margen de precisión de ese cálculo es de un 25 por ciento, por lo que no queda más remedio que echar mano de un truco frecuente: suele ser más fácil determinar la razón entre dos magnitudes que cada una de ellas por separado. En el caso de Super-K, la clave es la desintegración de un pion en un muon y en un neutrino muónico, seguida de la desintegración del muon en un electrón, un neutrino electrónico y otro neutrino muónico. No importa cuántos rayos cósmicos caigan en la atmósfera terrestre o cuántos piones se produzcan: por cada neutrino electrónico tendría que haber alrededor de dos neutrinos muónicos. En realidad el cálculo es algo más complicado y obliga a efectuar simulaciones por ordenador de las cascadas de rayos cósmicos, pero finalmente predice una razón con una precisión del 5 por ciento.

Tras contar neutrinos durante casi dos años, Super-K halló que la proporción entre neutrinos muónicos y electrónicos era de 1,3 a 1, no la esperada de 2 a 1. Por mucho que forcemos las hipótesis sobre el flujo de neutrinos, sobre su interacción con los núcleos y sobre cómo responde el detector a estos sucesos, no hay justificación para una proporción tan baja... a menos que los neutrinos de un tipo puedan convertirse en neutrinos de otro.

Ahora podemos recurrir de nuevo al truco de las proporciones para poner a prueba tan sorprendente conclusión. La pista que nos conduce a nuestro segundo cociente viene de preguntar cuántos neutrinos han de llegar desde cada dirección. Los rayos cósmicos caen sobre la atmósfera terrestre de una forma bastante uniforme en todas las direcciones. Solo hay dos efectos que malogran esa regularidad. El primero tiene que ver con el campo magnético de la Tierra, que, al desviar algunos rayos cósmicos, sobre todo los de poca energía, sesga las direcciones de llegada. El segundo se debe a los rayos cósmicos que llegan tangencialmente a la Tierra, los cuales crean cascadas que no descienden hasta las profundidades de la atmósfera y cuyo desarrollo difiere del seguido por las que se precipitan de arriba abajo.

Ahora, si «miramos» cielo arriba con cierto ángulo de inclinación con respecto a la vertical, y luego abajo, hacia el suelo,

con ese mismo ángulo, «veremos» el mismo número de neutrinos procedentes de cada dirección. Ambos conjuntos de neutrinos son producidos por rayos cósmicos que inciden contra la atmósfera con el mismo ángulo, si bien en el primer caso las colisiones ocurren sobre nuestra cabeza y, en el segundo, al otro lado del globo. Para sacar partido de este hecho, escogemos sucesos de neutrinos de energía lo suficientemente alta (para asegurarnos de que los rayos cósmicos progenitores no han sido desviados por el campo magnético de la Tierra) y dividimos el número de neutrinos que van hacia arriba por el de neutrinos que van hacia abajo. Si los neutrinos no cambian de sabor, esta razón ha de ser exactamente uno.

Según lo esperado, vimos que el número de neutrinos electrónicos de alta energía que iban hacia arriba era prácticamente igual al de los que iban hacia abajo. Sin embargo, los neutrinos muónicos que volaban hacia arriba eran la mitad de los que se dirigían hacia abajo. Este hallazgo constituye una segunda prueba de que los neutrinos cambian de identidad y, además, proporciona una pista sobre la naturaleza de la metamorfosis. Los neutrinos muónicos que van hacia arriba no pueden convertirse en neutrinos electrónicos, pues no observamos un exceso de neutrinos electrónicos ascendentes. Eso nos deja, por tanto, con la opción del neutrino tauónico. Los neutrinos muónicos que se convierten en tauónicos atraviesan Super-K sin ser detectados.

SABORES VOLUBLES

Las dos razones citadas son un buen indicio de que los neutrinos muónicos se transforman en tauónicos. Pero, ¿por qué los neutrinos tendrían que cambiar de sabor?

La física cuántica describe una partícula que se mueve por el espacio en términos de una onda: además de masa y carga, la partícula tiene una longitud de onda, puede difractarse, etcétera. Y también puede ser la superposición de dos ondas. Supongamos ahora que esas dos ondas tienen asociadas masas ligeramente distintas. Cuando viajen juntas, la más ligera se adelantará a la más masiva, y las ondas interferirán de una manera que fluctuará a lo largo de la trayectoria de la partícula. Hay una analogía musical para este tipo de interferencia: el sonido oscilante que producen dos notas casi iguales.

En música, este efecto provoca oscilaciones en el volumen. En física cuántica, lo que oscila es la probabilidad de detectar un tipo u otro de neutrino. Al principio, la probabilidad de que el neutrino sea muónico es del 100 por cien. Y, tras recorrer una cierta distancia, la de que se presente como un neutrino tauónico será también del 100 por cien. En otras posiciones, en cambio, será muónico o tauónico en función de cómo caiga el dado.

Tales oscilaciones no dejan de resultar un tanto extrañas para una partícula. Sin embargo, hay otra partícula que realiza

HEIDI NOLAND (gráfico); ALP, EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES (Paul y Reines);
CORTESÍA DEL INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS, PRINCETON (Davis)

1930



Wolfgang Pauli salva el principio de conservación de la energía con la hipótesis de que una partícula todavía desconocida se lleva la energía que falta en algunas desintegraciones radiactivas.

1933

Enrico Fermi formula la teoría de la desintegración beta e incorpora la partícula de Pauli, llamada ahora «neutrino», en italiano «el pequeño neutro».

1956



Frederick Reines (centro) y Clyde Cowen fueron los primeros en detectar el neutrino; se valieron del reactor nuclear del río Savannah.

1962

El primer haz de neutrinos creado por un acelerador muestra en Brookhaven que hay neutrinos electrónicos y muónicos.

1969

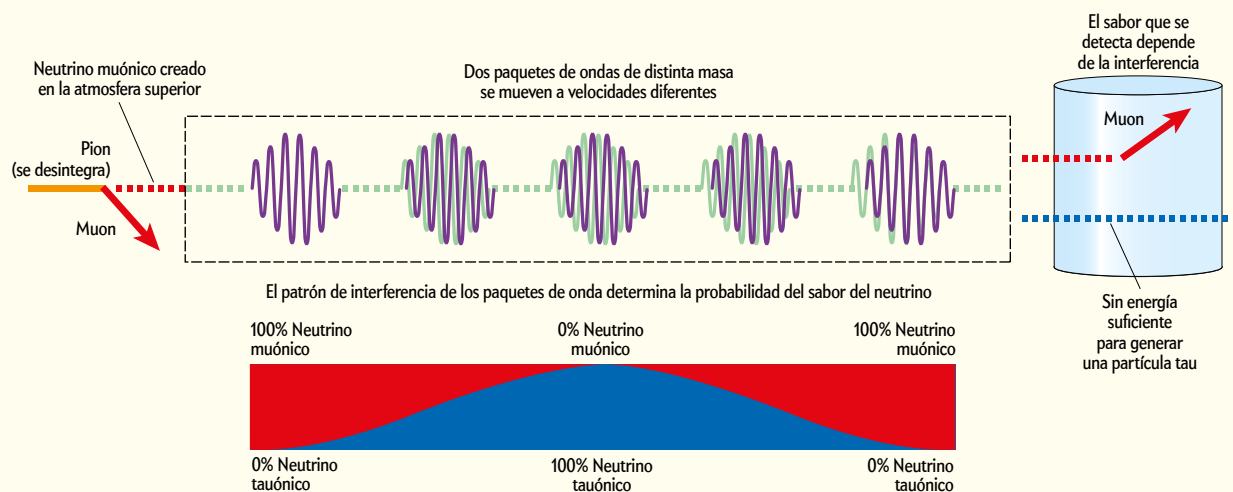


Raymond Davis Jr. fue el primero en medir los neutrinos procedentes del Sol; utilizó 600 toneladas de líquido de limpieza en una mina de Homestake, Dakota del Sur.

Así oscilan los neutrinos

Cuando un pion se desintegra (*izquierda*) produce un neutrino. En términos cuánticos, ese neutrino parece quedar descrito por una superposición de dos paquetes de ondas de distinta masa (*violeta y verde*) que no se propagan a la misma velocidad. El más ligero adelanta al más pesado, lo que provoca un patrón de interferencia cambiante que determinará el sabor del neutrino detectado: muónico (*rojo*) o tauónico (*azul*). Como todos

los efectos cuánticos, se trata de un fenómeno probabilístico. Allí donde se originó el neutrino, el sabor detectado será muónico con un 100 por cien de probabilidad. Pero dicha probabilidad cambia a medida que el neutrino avanza. Cuando llega al detector (*derecha*), la suerte cuántica está echada. Si es muónico se producirá un muon que Super-K puede detectar; pero si es tauónico, el experimento no observará nada.



contorsiones parecidas: el fotón, la partícula de luz. Este puede tener varias polarizaciones: vertical, horizontal, circular a izquierdas o a derechas. Estas no difieren en la masa, pues los fotones carecen de ella, pero en algunos materiales con actividad óptica, la luz polarizada circularmente a izquierdas se mueve más deprisa que la polarizada a derechas. Un fotón con una polarización vertical es una superposición de esas dos posibilidades. Cuando atraviesa un material ópticamente activo, su polarización gira (es decir, oscila) y pasa de vertical a horizontal y así sucesivamente, conforme los dos componentes circulares se sincronizan y desincronizan.

Para las oscilaciones de neutrinos del tipo que vemos en Super-K no hace falta un material ópticamente activo. Basta con que exista una diferencia de masas entre las dos componentes del neutrino para que el sabor oscile, ya se propague por el

aire, por roca sólida o por el puro vacío. Cuánto habrá oscilado un neutrino cuando llegue a Super-K dependerá de su energía y de la distancia que haya recorrido desde su creación. Para los neutrinos que van hacia abajo, que como mucho habrán recorrido unas docenas de kilómetros, no podrá haber tenido lugar más que una pequeña fracción del ciclo de oscilación y su sabor solo se habrá modificado ligeramente, por lo que la gran mayoría de las veces detectaremos el neutrino muónico original. En cambio, los neutrinos que se mueven hacia arriba, producidos a miles de kilómetros de distancia, habrán pasado por tantas oscilaciones que, en promedio, solo detectaremos la mitad de ellos como muónicos. La otra mitad atravesará Super-K en la indetectable forma tauónica.

Esta descripción tan solo proporciona una imagen aproximada, pero los argumentos basados en la proporción entre sabores

1975-1977

Se descubren la partícula tau y el quark *b*, y con ellos, una tercera generación de quarks y leptones.

1983

Se descubren en el CERN los bosones *W* y *Z*, los transmisores de la fuerza débil, la que interviene en las reacciones neutrónicas.

1987



Astronomía de neutrinos: los experimentos sobre la desintegración del protón IMB y Kamiokande detectan 19 neutrinos de la supernova 1987A, de la Gran Nube de Magallanes.

1989

La tasa de desintegración del bosón *Z* se mide con precisión en el SLAC y en el CERN y se ve que solo hay tres generaciones activas de neutrinos.

1998



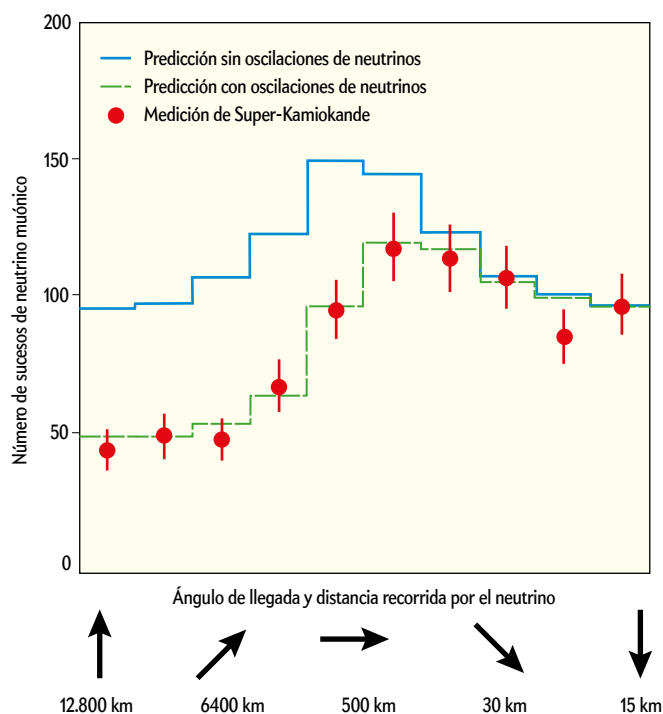
Super-K obtiene indicios de la existencia de las oscilaciones de neutrinos.

y entre los sucesos ascendentes y descendentes resultan tan persuasivos que se considera la explicación más probable de los datos. También hemos investigado la variación del número de neutrinos muónicos según la energía del neutrino y el ángulo de llegada, y hemos comparado los datos y las predicciones para toda una familia de escenarios posibles, incluida la inexistencia de oscilaciones. Los números no se parecen a los que esperaríamos ver si no hubiese oscilaciones. Sin embargo, concuerdan con las oscilaciones de neutrinos previstas para ciertos valores de la diferencia de masas y de otros parámetros físicos.

Con unos 5000 sucesos observados en los dos primeros años del experimento, creemos haber eliminado la posibilidad de que los datos se deban a un espejismo estadístico. Con todo, sigue siendo importante confirmar el efecto mediante la observación de las mismas oscilaciones con otros experimentos o técnicas. Hasta cierto punto, el efecto ya se ha visto ratificado por otros detectores en Minnesota e Italia, si bien estos han registrado menos sucesos y la confianza estadística es menor.

CORROBORACIONES

Hay otro tipo de interacción entre neutrinos que permite una nueva corroboración: sus colisiones contra los núcleos de las rocas que rodean a nuestro detector. Los neutrinos electrónicos producen electrones y las subsiguientes cascadas de partículas, las cuales son absorbidas por la roca y no llegan nunca a la caverna de Super-K. Los neutrinos muónicos muy energéticos, en cambio, crean muones que pueden atravesar muchos metros de roca y llegar a nuestro detector. Contamos esos muones procedentes de los neutrinos que se mueven hacia arriba (los que van



EL NÚMERO DE NEUTRINOS de alta energía que llegan a Super-K (rojo) coincide con los predichos por la hipótesis de que estas partículas oscilan (verde), pero no con las predicciones que descartan las oscilaciones (azul). Los neutrinos que van hacia arriba (parte izquierda de la gráfica) han recorrido una distancia suficiente para que la mitad de ellos cambie de sabor y escape a la detección.

hacia abajo quedan ocultos por el fondo de muones de los rayos cósmicos que entran en el monte Ikenoyama desde arriba).

Podemos contar los muones que viajan hacia arriba y llegan al detector con trayectorias muy diversas, desde los que suben verticalmente hasta los que se desplazan casi horizontalmente. Estos caminos corresponden a distancias recorridas por los neutrinos desde su producción en la atmósfera hasta la creación de un muon cerca del Super-K, las cuales pueden ser de solo 500 kilómetros (la distancia al borde de la atmósfera cuando se mira horizontalmente) o de hasta 13.000 kilómetros (el diámetro de la Tierra cuando se mira justo hacia abajo). Hallamos que la cantidad de neutrinos muónicos de baja energía y que han viajado una distancia más larga ha mermado más que la de los neutrinos de alta energía que han recorrido una distancia menor: justamente lo que esperaríamos si el fenómeno se debiera a las oscilaciones. El análisis detallado arroja unos parámetros de física de neutrinos muy similares a los de nuestro primer estudio.

Si tenemos en cuenta solo los tres tipos conocidos de neutrinos, nuestros datos indican que los neutrinos muónicos se convierten en tauónicos. Y la teoría cuántica nos dice que, casi con toda seguridad, la causa que se esconde tras las oscilaciones es la masa de esos neutrinos, por más que durante setenta años se haya supuesto que estas partículas no tenían masa.

Por desgracia, la teoría cuántica también obliga a que nuestro experimento se limite a medir la diferencia del cuadrado de las masas de las dos componentes, ya que esa es la magnitud que determina la longitud de onda de la oscilación, la cual no es sensible a la masa de las partículas por separado. Los datos de Super-K dan una diferencia de los cuadrados de las masas comprendida entre 0,001 y 0,01 electronvoltios (eV) al cuadrado. Dada la pauta que siguen las masas de otras partículas conocidas, es probable que uno de los neutrinos sea mucho más ligero que el otro. En tal caso, la masa del neutrino más masivo estaría entre los 0,03 y los 0,1 eV. ¿Qué consecuencias podemos extraer de este resultado?

CONSECUENCIAS FÍSICAS

En primer lugar, el hecho de que los neutrinos tengan masa no arruina el modelo estándar de la física de partículas. Las diferencias entre los estados de masa que constituyen cada tipo de neutrino exige introducir los llamados «parámetros de mezcla». Una pequeña mezcla de este tipo entre variedades de partículas ya se ha observado en los quarks, pero nuestros datos implican que los neutrinos necesitan un grado de mezcla mucho mayor. Esta información es importante a la hora de considerar nuevas teorías.

En segundo lugar, 0,05 eV sigue siendo una cifra muy cercana a cero, al menos si la comparamos con las masas de las demás partículas de materia. (La más ligera es el electrón, cuya masa asciende a 511.000 eV). Por tanto, la suposición de que los neutrinos carecían de masa estaba justificada. Sin embargo, los físicos que intentan construir teorías de gran unificación han de tomar nota de esta ligereza de los neutrinos con respecto a las demás partículas. Para ello suelen recurrir a un instrumento matemático, conocido como «mecanismo del balancín» (*seesaw mechanism*), el cual exige que los neutrinos tengan masas muy pequeñas pero no nulas. Aquí la «palanca» que separa los neutrinos de los quarks y leptones cargados (entre miles de millones y billones de veces más masivos) sería la masa de alguna partícula muy pesada, quizá del orden de magnitud de la escala de gran unificación.

Otros problemas y otras posibilidades

Hay otras indicaciones de que los neutrinos tienen masa. Durante más de treinta años se han estado captando neutrinos electrónicos generados por los procesos de fusión nuclear en el Sol. Sin embargo, estos experimentos han observado siempre menos neutrinos de los predichos por los mejores modelos solares.

Super-K ha contado también esos neutrinos solares y solo ha encontrado un 50 por ciento de los esperados. Estamos estudiando estos datos con la esperanza de identificar una huella clara de oscilaciones de neutrinos. El Observatorio de Neutrinos de Sudbury, en Ontario, detectó sus primeros neutrinos en 1999. Contiene mil toneladas de agua pesada, lo que facilita la detección de neutrinos solares. Pronto empezarán a funcionar otros experimentos.

Un experimento del Laboratorio Nacional de Los Álamos aporta un indicio más de la existencia de oscilacio-

nes de neutrinos: detecta neutrinos electrónicos procedentes de una fuente que solo debería producir neutrinos muónicos. La señal está mezclada con procesos de fondo y el resultado no ha sido confirmado todavía por otros experimentos, pero en los próximos años se emprenderán varios para verificarlo.

Las oscilaciones entre neutrinos muónicos y tauónicos inducidas por la masa parecen ser la explicación más natural de los datos de Super-K, pero hay otras posibilidades. La primera es que, en la situación más general, se mezclen los tres sabores de neutrinos. Los datos de Super-K son compatibles, en las energías que cubre, con algunas oscilaciones entre neutrinos muónicos y electrónicos. Pero los resultados de un experimento efectuado en la central nuclear de Chooz, en Francia, limitan en gran medida la magnitud de las oscilaciones entre los sabores electrónico y muónico en Super-K.

Otra posibilidad es que los neutrinos muónicos oscilen a un sabor de neutrino no detectado hasta ahora. Los estudios sobre el bosón Z realizados en el CERN muestran que solo hay tres sabores activos de neutrinos («activo» quiere decir que el sabor participa en la interacción nuclear débil). Un nuevo sabor, pues, tendría que ser «estéril»: una variedad de neutrino que solo interaccionaría con la materia por medio de la gravedad. Algunos físicos apoyan esta idea, ya que las observaciones relativas a tres fenómenos distintos (los neutrinos solares, los atmosféricos y los datos de Los Álamos) no parecen poder explicarse mediante un conjunto único de masas asociadas a los neutrinos electrónicos, muónicos y tauónicos. También se han propuesto otros mecanismos de oscilación basados en fenómenos más extraños que la masa de los neutrinos.

En el inventario de masas del universo habrá que registrar la del neutrino. Los astrónomos llevan años intentado determinar cuánta masa suman la materia luminosa de las estrellas y la masa ordinaria, difícil de ver, de las enanas marrones o del gas difuso. La masa total puede medirse también indirectamente a partir del movimiento orbital de las galaxias y de la velocidad a la que se expande el universo. Pero la masa total que arrojan estas estimaciones indirectas multiplica por 20 el valor previo. La masa de los neutrinos que se desprende de nuestros resultados es demasiado pequeña para resolver este misterio por sí sola. No obstante, los neutrinos creados durante la gran explosión llenan el espacio, y su masa podría ser del orden de la de todas las estrellas juntas. Puede que hayan influido en la formación de las grandes estructuras astronómicas, como los cúmulos de galaxias.

De nuestros datos se beneficiarán dos próximos experimentos. Basándose en los primeros indicios producidos por detectores menores, muchos físicos han decidido no tener que depender de los neutrinos producidos por los rayos cósmicos, gratuitos pero incontrolables, y han optado por crearlos en aceleradores. Para que se observen las oscilaciones estas partículas han de recorrer una larga distancia, razón por la que estos haces de neutrinos apuntan hacia detectores situados a cientos de kilómetros. Ahora mismo hay uno en construcción en una mina de Minnesota, optimizado para estudiar los neutrinos producidos en el acelerador del Fermilab, en las afueras de Chicago, a 730 kilómetros.

Todo buen detector de neutrinos atmosféricos es también un buen detector de neutrinos de acelerador. En Japón empleamos Super-K para observar un haz de neutrinos creado a 250 kilómetros de distancia en el laboratorio del acelerador KEK. Al contra-

rio de lo que ocurre con los neutrinos atmosféricos, en este caso se puede encender y apagar el haz, de energía y dirección bien definidas. Y lo más importante: hemos instalado un detector similar a Super-K cerca de donde nace el haz para caracterizar los neutrinos muónicos antes de que oscilen. Nos valemos, otra vez, de la razón entre los neutrinos detectados cerca de la fuente y lejos de ella para anular la incertidumbre y verificar el efecto. Los primeros haces artificiales de neutrinos acaban de entrar en las montañas japonesas, y algunos de ellos ya han sido apresados por las 50.000 toneladas de Super-K. Cuántos exactamente será el siguiente capítulo de esta historia. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, octubre de 1999

LOS AUTORES

Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka fueron miembros de la colaboración Super-Kamiokande que en 1998 descubrió el fenómeno de las oscilaciones de neutrinos. Por este logro, Kajita recibiría el premio Nobel en 2015. Actualmente Kearns es profesor en la Universidad de Boston y Kajita en la de Tokio. Totsuka falleció en 2008.

PARA SABER MÁS

The elusive neutrino: A subatomic detective history. Nickolas Solomey. Scientific American Library y W.H. Freeman and Company, 1997.
Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. Colaboración Super-Kamiokande en *Physical Review Letters*, vol. 81, págs. 1562-1567, agosto de 1998.

La resolución del problema de los neutrinos solares

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury ha despejado un enigma planteado hace 30 años al demostrar que los neutrinos provenientes del Sol cambian de sabor en su camino hacia la Tierra

Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark

CONSTRUIR UN DETECTOR DEL TAMAÑO DE UN EDIFICIO DE diez pisos a dos kilómetros de profundidad es una extraña manera de estudiar el Sol. Sin embargo, solo así hemos podido resolver un antiguo enigma relativo a los procesos físicos del interior de esta estrella. Ya en 1920, Arthur Eddington propuso que la energía del Sol procedía de las reacciones de fusión nuclear. Pero los esfuerzos emprendidos hace decenios para confirmar los detalles de esta idea chocaron con un obstáculo: los experimentos diseñados para detectar uno de los productos de dichas reacciones, los neutrinos, solo observaban una fracción de los esperados. En 2002, los resultados del Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO), en Ontario, zanjaron este problema y confirmaron plenamente la propuesta de Eddington.

Como todos los experimentos subterráneos diseñados para estudiar el Sol, el SNO persigue detectar neutrinos, los cuales se producen en grandes cantidades en el núcleo solar. Pero, al contrario que la mayoría de las instalaciones previas, el SNO detecta neutrinos con agua pesada, en la que cada átomo de hidrógeno consta de un neutrón adicional (es decir, se encuentra en forma de deuterio, un isótopo del hidrógeno). Esos neutrones permiten detectar los neutrinos solares de una nueva manera, capaz de identificar los tres tipos, o «sabores», de estas partículas. Gracias

a ello, el SNO ha demostrado que el déficit de neutrinos solares observado hasta ahora no se debía a mediciones imprecisas ni a un conocimiento imperfecto de las reacciones del Sol, sino a una nueva propiedad de los neutrinos mismos.

Irónicamente, confirmar nuestra mejor teoría sobre el Sol ha sacado a la luz el primer fallo del modelo estándar de la física de partículas, nuestra mejor teoría sobre los constituyentes fundamentales de la materia. Ahora conocemos el Sol mejor que el universo microscópico.

EL PROBLEMA

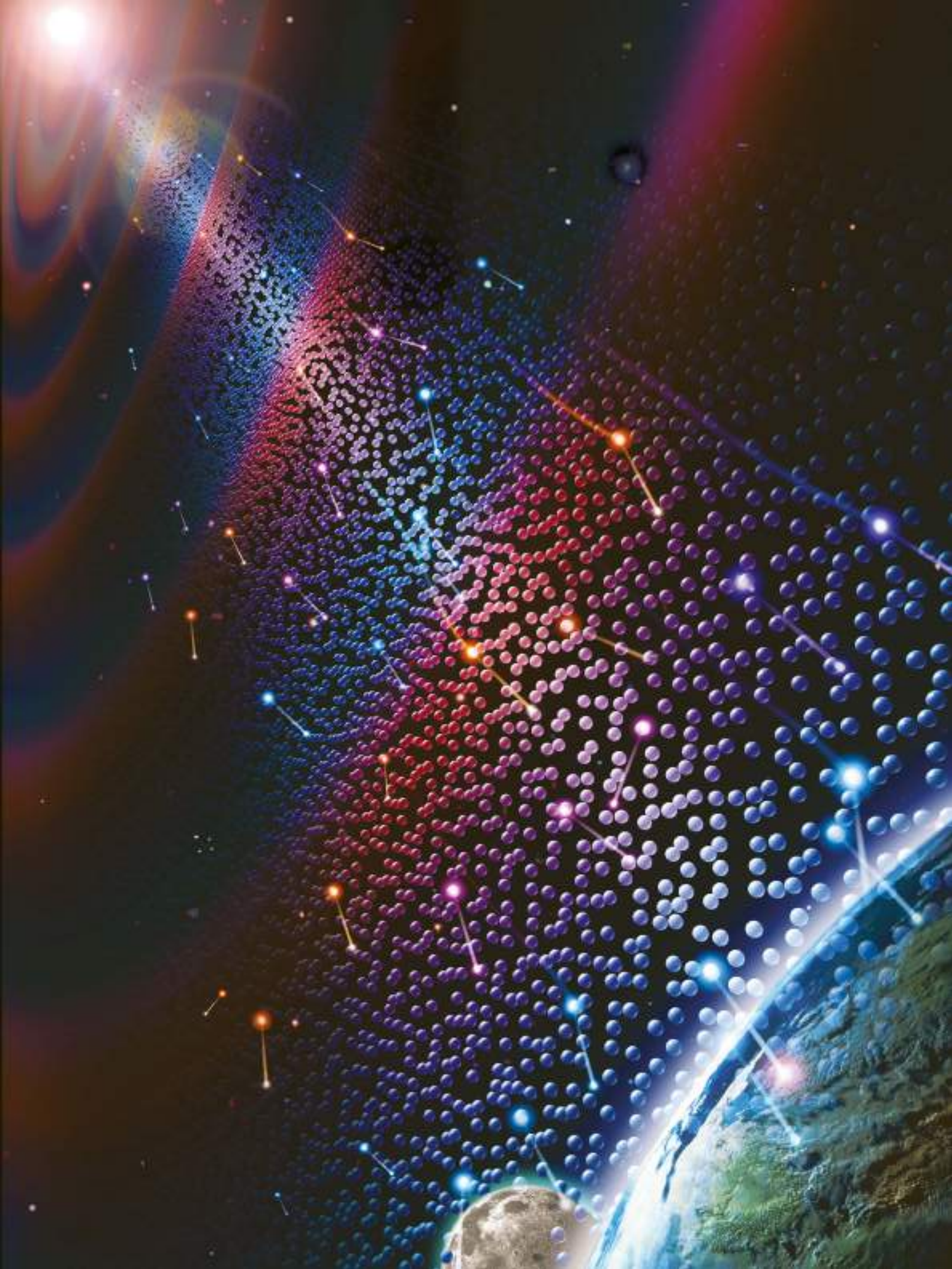
El primer experimento sobre neutrinos solares, iniciado en los años sesenta por Raymond Davis Jr., de la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores, quería ser una triunfante confirmación de que la fusión generaba la energía solar y, al mismo tiempo, el inicio de un nuevo campo, en el que los neutrinos nos harían saber más acerca del Sol. Dicho experimento, localizado en una mina de oro en Dakota del Sur, detectaba neutrinos mediante una técnica radioquímica. Contenía 615 toneladas de tetracloroetileno líquido, una sustancia usada para limpiar en seco. Los neutrinos transformaban los átomos de cloro del fluido en átomos de argón. Pero, en vez de producir un átomo de argón al día, como predecían los modelos, Davis observó uno

EN SÍNTESIS

Desde los años sesenta, numerosos experimentos han estado detectando muchos menos neutrinos electrónicos procedentes del Sol de los que predice la teoría. Este desacuerdo se conoce como problema de los neutrinos solares.

En 2002, el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO) demostró que esa discrepancia se debía a que una gran parte de los neutrinos electrónicos originados en el Sol se transforman en neutrinos de otro tipo antes de llegar a la Tierra.

Los resultados del SNO han confirmado la validez de los modelos solares e implican que, al contrario de lo que se pensaba, los neutrinos sí tienen masa. Ello obligará a modificar en consecuencia el modelo estándar de la física de partículas.



cada 2,5 días. (En 2002, Davis compartió el premio Nobel con Masatoshi Koshiba, de la Universidad de Tokio, por sus trabajos pioneros en física de neutrinos.) Los experimentos realizados en los treinta años siguientes hallaron resultados similares, pese a que empleaban una variedad de técnicas diferentes. El número de neutrinos procedentes del Sol siempre era claramente inferior al predicho: en algunos casos 1/3 y en otros 3/5, dependiendo de la energía de los neutrinos estudiados. Sin ninguna pista sobre el origen de semejante diferencia entre las predicciones y las observaciones, los físicos tuvieron que posponer su objetivo original de estudiar el Sol mediante neutrinos.

Mientras continuaban los experimentos sobre estas partículas, los teóricos mejoraron los modelos usados para predecir la cantidad de neutrinos emitidos por el Sol. Aunque tales modelos son complejos, solo parten de unas pocas hipótesis: que la energía del Sol es producida por reacciones nucleares que modifican las abundancias de los elementos; que esa energía genera una presión hacia fuera que se equilibra con la fuerza de la gravedad; y que es transportada hacia el exterior por fotones y fenómenos de convección. Los modelos solares siguieron prediciendo flujos de neutrinos mayores que los medidos. Pero otras predicciones, como el espectro de vibraciones heliosísmicas de la superficie solar, concordaban muy bien con los datos.

La misteriosa diferencia entre las predicciones y las medidas acabó conociéndose como el problema de los neutrinos solares. Y aunque muchos físicos creían que la causa estaba en las dificultades que entraña detectar neutrinos y en los cálculos relativos a su ritmo de producción en el Sol, una tercera posibilidad comenzó a ganar adeptos, a pesar de sus revolucionarias implicaciones. El modelo estándar de la física de partículas contempla la existencia de tres «sabores» de neutrinos sin masa: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico. Sabemos que las reacciones de fusión en el Sol solo pueden producir neutrinos electrónicos, y los experimentos como el de Davis estaban pensados para detectar ese sabor (a las energías de los neutrinos solares, solo los neutrinos electrónicos pueden convertir átomos de cloro en átomos de argón). No obstante, si el modelo estándar fuese incompleto y los sabores de neutrinos no fuesen totalmente independientes unos de otros, sino que pudieran mezclarse entre sí, entonces los neutrinos electrónicos generados en el Sol podrían transformarse en neutrinos de otro tipo antes de llegar a la Tierra, con lo que no serían detectados.

El mecanismo más plausible para explicar tales cambios de sabor son las llamadas oscilaciones de neutrinos. Estas requieren que cada uno de los tres sabores de neutrino (el electrónico, el muónico y el tauónico) sea una mezcla de tres estados (designados 1, 2 y 3) de diferente masa. Por ejemplo, el neutrino electrónico podría corresponder a una mezcla de los estados 1 y 2, y el muónico a una mezcla diferente de esos mismos dos estados. La teoría predice que, a medida que viajan del Sol a la Tierra, tales mezclas «oscilarán» entre un sabor y otro.

En 1998, la colaboración Super-Kamiokande ofreció una prueba especialmente convincente de las oscilaciones de neutrinos. Este experimento halló que los neutrinos muónicos producidos en la atmósfera por el impacto de los rayos cósmicos desaparecían con una probabilidad que dependía de la distancia que hubiesen recorrido. Esa desaparición de neutrinos se dejaba explicar a la perfección por el fenómeno de las oscilaciones; en este caso, entre neutrinos muónicos y tauónicos. A las energías de los rayos cósmicos, Super-Kamiokande observa con facilidad los neutrinos muónicos, pero los tauónicos suelen escapar a la detección.

Un proceso similar podría explicar el déficit de neutrinos solares. Según un modelo, los neutrinos oscilarían durante los ocho minutos que dura su viaje a través del espacio vacío entre el Sol y la Tierra. Según otro, la oscilación se amplificaría durante los dos primeros segundos de viaje, dentro del propio Sol, debido a las interacciones específicas de cada sabor de neutrino con la materia. Cada modelo requiere sus propios parámetros, los cuales vienen dados por las diferencias entre las masas y los grados de mezcla entre sabores. Pero, a pesar de los indicios aportados por Super-Kamiokande y otras instalaciones, existía la posibilidad de que los neutrinos no desapareciesen a causa de las oscilaciones, sino por algún otro proceso. La primera prueba directa de las oscilaciones de neutrinos solares no llegó hasta 2001, año en que se detectaron los neutrinos transformados.

EL OBSERVATORIO

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury fue diseñado para hallar esa prueba directa a partir de las distintas interacciones que tienen lugar entre los neutrinos y las 1000 toneladas de agua pesada que lo componen. Una de esas interacciones solo detecta neutrinos electrónicos; las otras, todos los sabores sin distinguir entre ellos. Si los neutrinos solares que llegan a la Tierra son solo electrónicos —y, por tanto, no ha ocurrido ninguna transformación de sabores—, el recuento de neutrinos de todos los sabores coincidirá con el de los neutrinos electrónicos. Por otro lado, si el número de neutrinos de todos los sabores fuera muy superior al de neutrinos electrónicos, eso demostraría que los neutrinos solares han cambiado de sabor.

La capacidad del SNO para detectar tanto los neutrinos electrónicos como los de todos los sabores estriba en los deuterones, los núcleos de deuterio que componen el agua pesada. El neutrón de un deuterón puede dar lugar a dos procesos muy distintos: la absorción de un neutrino electrónico, lo que genera un electrón, y la fragmentación del deuterón. Solo los neutrinos electrónicos son absorbidos; en cambio, la ruptura del deuterón puede provocarla cualquiera de los tres sabores. Una tercera reacción, la dispersión de electrones por parte de los neutrinos, también permite detectar otros neutrinos además de los electrónicos, pero es mucho menos sensible a los neutrinos muónicos y tauónicos que la fragmentación del deuterón.

El SNO no fue el primer experimento que usó agua pesada. En los años sesenta, T. J. Jenkins y F. W. Dix, de la Universidad Case Western Reserve, utilizaron unas 2 toneladas de agua pesada para detectar neutrinos solares desde la superficie. Sin embargo, los rayos cósmicos enmascararon la señal. En 1984, Herb Chen, de la Universidad de California en Irvine, propuso transportar 1000 toneladas de agua pesada del reactor nuclear canadiense CANDU a las profundidades de la mina de níquel Creighton, en Sudbury, ya que esta sí se encontraba a la profundidad suficiente para detectar con claridad tanto la absorción de neutrinos como la disociación de los deuterones.

La propuesta de Chen condujo al establecimiento de la colaboración científica SNO y, finalmente, a la construcción del detector. Las 1000 toneladas de agua pesada se hallan en una vasija acrílica transparente de 12 metros de diámetro, y son monitorizadas por más de 9500 tubos fotomultiplicadores dispuestos sobre una esfera geodésica de 18 metros de diámetro. Cada tubo es capaz de detectar un solo fotón. Toda la estructura está rodeada por agua ordinaria ultrapura, la cual llena una cavidad a dos kilómetros bajo la superficie.

Los neutrinos solares pueden observarse a gran profundidad gracias a lo poco que interactúan con la materia ordinaria.



ESTOS TUBOS FOTOMULTIPLICADORES, más de 9500, son los ojos del Observatorio de Neutrinos de Sudbury. Se reparten por una esfera geodésica de 18 metros de diámetro y monitorizan 1000 toneladas de agua pesada para detectar las interacciones entre esta y los neutrinos procedentes del Sol. Para evitar señales espurias, todos los materiales deben hallarse lo más exentos posible de trazas de elementos radiactivos naturales.

Durante el día, los neutrinos atraviesan con facilidad los dos kilómetros de roca que median hasta el SNO, y por la noche hacen lo propio con los miles de kilómetros que recorren a través de la Tierra. De hecho, es la debilidad de sus interacciones lo que los hace tan aptos para estudiar el Sol. La mayor parte de la energía generada en el centro del Sol tarda millones de años en alcanzar la superficie de la estrella y salir al exterior. Los neutrinos, en cambio, emergen a los dos segundos y nos llegan directamente desde donde se produce la energía solar.

LAS MEDICIONES

Dado que ni todo el Sol ni toda la Tierra son capaces de impedir el paso de los neutrinos, captarlos con un detector de tan solo 1000 toneladas constituye todo un reto. Pero, aunque la gran

mayoría de los neutrinos que entran en el SNO lo atraviesan sin dejar rastro, en muy contadas ocasiones uno colisionará contra un electrón o un núcleo y depositará la energía suficiente para poder observar el evento. Por fortuna, el Sol produce enormes cantidades de neutrinos (cada segundo, unos cinco millones de neutrinos de alta energía atraviesan cada centímetro cuadrado de la Tierra), lo que compensa la débil interacción de estas partículas y, en las 1000 toneladas de agua pesada del SNO, da lugar a unos 10 eventos diarios. Los tres tipos de reacciones de neutrinos que tienen lugar en el SNO acaban generando electrones de alta energía, los cuales pueden detectarse debido a la luz de Cherenkov que producen.

Con todo, ese pequeño número de eventos diarios debe distinguirse de la luz de Cherenkov generada por otras partículas. En la alta atmósfera, los rayos cósmicos crean continuamente muones, los cuales pueden llegar al detector y producir su propia luz de Cherenkov. Los kilómetros de roca interpuestos entre la superficie y el SNO reducen esa lluvia de muones a un goteo de unos tres por hora. Y aunque ese ritmo sea mucho mayor que los 10 eventos de neutrinos diarios mencionados arriba, los muones resultan fáciles de distinguir por la luz de Cherenkov que generan en el agua ordinaria que rodea al detector.

Una fuente mucho más siniestra de falsos recuentos es la radiactividad intrínseca a los propios materiales del detector. Todo lo que hay en el detector —ya sea el agua pesada, la vasija acrílica que la contiene o el vidrio y el acero de los tubos fotomultiplicadores y de la estructura de soporte— contiene trazas de elementos radiactivos naturales. El aire de la mina contiene gas radón, también radiactivo. Cada vez que un núcleo de estos elementos radiactivos se desintegra, se desprende un electrón de alta energía o un rayo gamma, lo que acaba generando luz de Cherenkov que imita la señal de un neutrino. El agua y los demás materiales se han purificado para eliminar la mayor parte de los contaminantes radiactivos (o se han seleccionado de manera que sean naturalmente puros), pero bastan unas pocas partes por mil millones para enmascarar las señales.

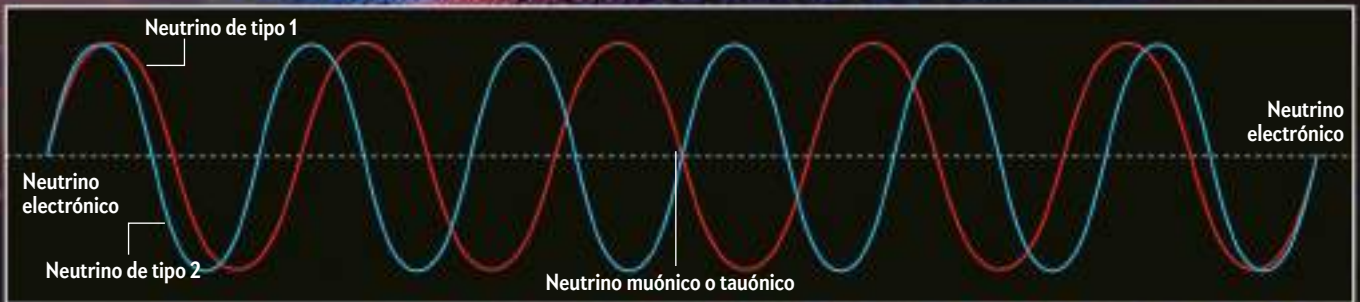
La tarea del SNO es, por tanto, muy compleja: ha de contar los eventos causados por neutrinos, determinar cuáles de ellos se deben a cada una de las tres reacciones posibles, y estimar cuántos presuntos neutrinos corresponden en realidad a otras causas, como la contaminación radiactiva. Un error de algunos puntos porcentuales en cualquiera de las etapas de análisis invalidaría la comparación entre el flujo de neutrinos electrónicos y el flujo total de neutrinos. En 306 días de funcionamiento entre noviembre de 1999 y mayo de 2001, el SNO registró casi 500 millones de eventos. Tras la reducción de datos, solo quedaban 2928 como posibles candidatos.

El SNO no puede determinar de manera inequívoca si cada evento candidato fue el resultado de una clase de reacción o de otra. Un suceso concreto puede deberse tanto a la disociación de un deuterón como a la absorción de un neutrino. Por fortuna, cuando examinamos muchos eventos comienzan a aparecer las diferencias. Por ejemplo, la escisión de un núcleo de deuterio genera siempre un rayo gamma de la misma energía, mientras que los electrones emitidos por la absorción de un neutrino o por la dispersión de electrones exhiben un amplio espectro de energías. Además, la dispersión de electrones produce electrones que se alejan del Sol, mientras que la luz de Cherenkov asociada a la fragmentación de un deuterón puede apuntar en cualquier dirección. Por último, también son diferentes los lugares donde se producen las reacciones: la dispersión de electrones, por ejemplo, ocurre tanto en la capa exterior de agua ligera como

La detección de los neutrinos mutantes

Así oscilan los neutrinos

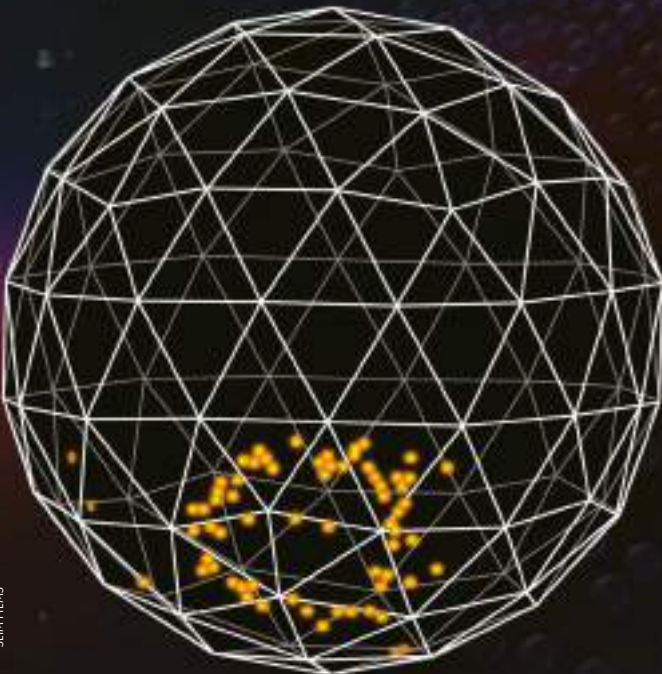
Un neutrino electrónico (izquierda) es en realidad una superposición de los neutrinos de tipo 1 y de tipo 2 con sus ondas cuánticas en fase. Dado que las ondas de tipo 1 y 2 tienen distintas longitudes de onda, tras recorrer una cierta distancia se desfazarán, lo que dará como resultado un neutrino muónico o uno tauónico (centro). Más adelante, las oscilaciones volverán a transformar el neutrino en uno de tipo electrónico (derecha).



¿Dónde oscilan los neutrinos?

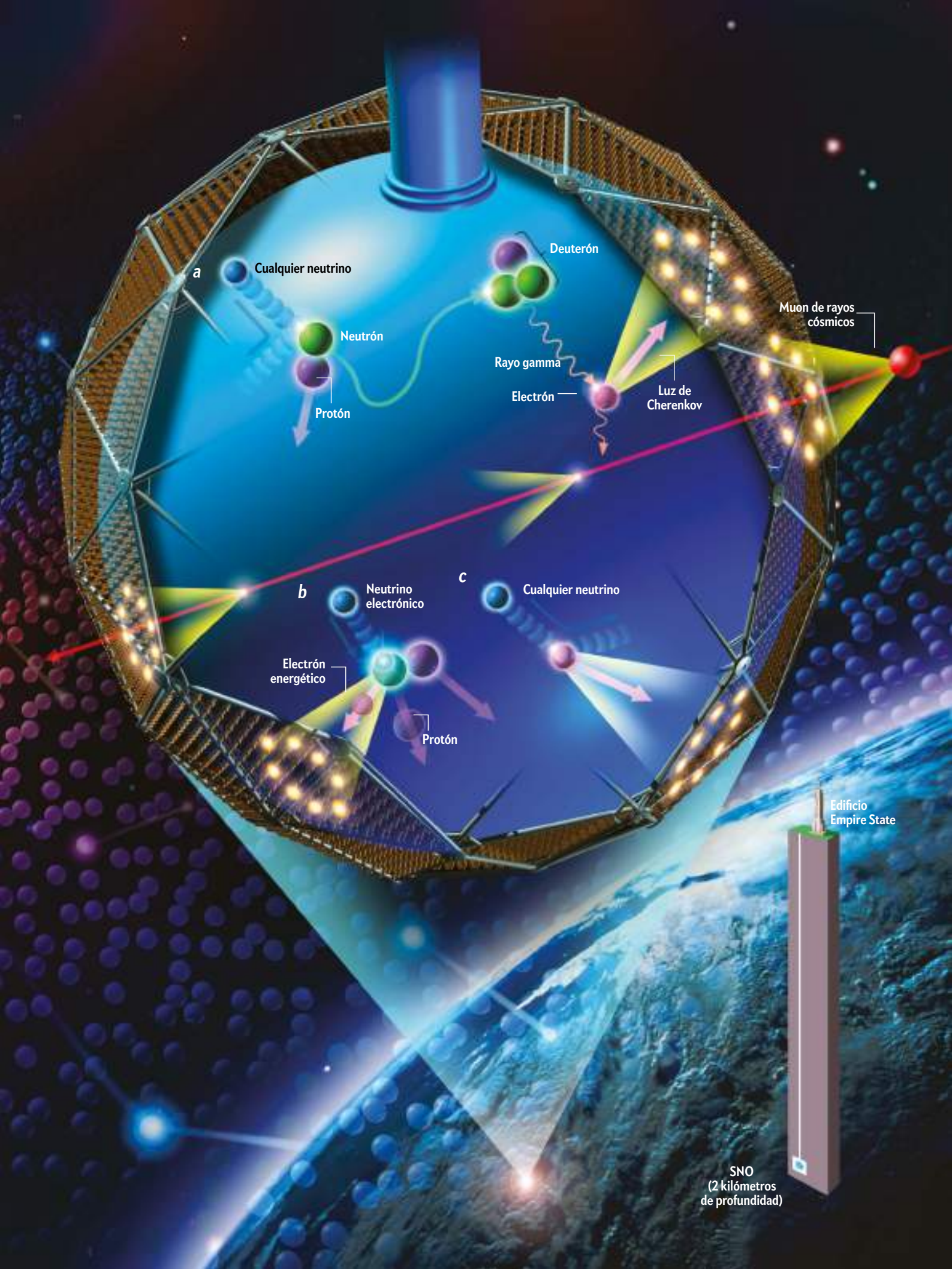
Los neutrinos electrónicos producidos en el núcleo del Sol pueden oscilar mientras aún estén en el interior de la estrella o, una vez que hayan emergido, durante su viaje de ocho minutos a la Tierra. La magnitud de la oscilación dependerá de varios parámetros, como las diferencias de masas y los grados de mezcla intrínsecos de los neutrinos de tipo 1 y de tipo 2. También pueden producirse oscilaciones adicionales en el interior de la Tierra, las cuales se manifestarán mediante diferencias entre los resultados diurnos y los nocturnos.

Señal generada por la posible detección de un neutrino



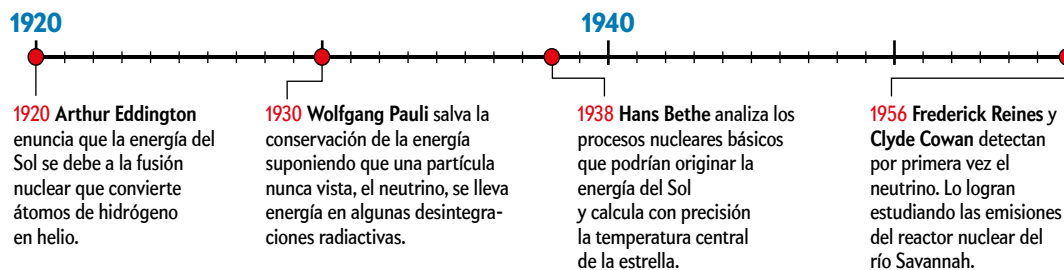
Así detecta el SNO los neutrinos

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO, [página opuesta](#)) detecta neutrinos a partir del característico anillo de luz de Cherenkov que emiten los electrones que se mueven a gran velocidad. Un neutrino puede producir un electrón energético en el agua pesada del SNO (*esfera azul grande*) de tres maneras. Al incidir sobre un deuterón (a), el neutrino (azul) puede disociar el protón (púrpura) y el neutrón (verde) que lo componen. El neutrón se combinará después con otro deuterón y se desprenderá un rayo gamma (*línea ondulada*), que a su vez liberará un electrón (rosa) que emitirá luz de Cherenkov (*amarillo*). Por otro lado, un neutrón puede absorber un neutrino (b) y convertirse en un protón y un electrón de alta energía. Solo los neutrinos electrónicos pueden ser absorbidos de esta manera. Por último, el neutrino puede chocar directamente con un electrón (c). Los muones producidos por los rayos cósmicos (rojo) se distinguen de los neutrinos por la cantidad de luz de Cherenkov que producen y porque la generan tanto fuera como dentro del detector. El hecho de que el detector se encuentre a dos kilómetros de profundidad reduce el número de muones a niveles aceptables.



Ocho décadas de Sol y neutrinos

Los físicos han tardado casi un siglo en entender el mecanismo por el que el Sol genera energía. Mientras, los neutrinos han pasado de ser meras hipótesis a convertirse en una herramienta experimental de primer orden. El hallazgo del fenómeno de las oscilaciones de neutrinos augura nuevos descubrimientos en física fundamental.



en el agua pesada; las otras reacciones no. Una vez conocidos estos detalles, es posible determinar estadísticamente cuántos de los sucesos observados han de asignarse a cada reacción.

Ese conocimiento de los detalles del detector fue posible gracias a mediciones que, en sí mismas, ya eran verdaderos experimentos de física nuclear. Para establecer cómo debía medirse la energía a partir de la luz de Cherenkov, introdujimos fuentes radiactivas de energía conocida. Para medir la propagación de la luz de Cherenkov por el detector y su reflexión en los distintos medios (el agua, el acrílico o los tubos fotomultiplicadores), usamos luz láser de longitud de onda variable. Los efectos de la contaminación radiactiva se evaluaron mediante experimentos similares, incluida la calibración radiológica del agua con nuevas técnicas concebidas expresamente para el SNO.

Una vez efectuado el análisis estadístico, el conjunto definitivo de datos atribuía 576 sucesos a la fragmentación de deuterones, 1967 a la absorción de neutrinos y 263 a la dispersión de electrones. La radiactividad y otros procesos de fondo causaron los 122 restantes. Con estos números, y a partir de la pequeña probabilidad de que un neutrino cualquiera disocie un deuterón, sea absorbido o colisione contra un electrón, hay que calcular cuántos neutrinos han atravesado realmente el SNO. El resultado es que los 1967 eventos de absorción registrados representan 1,75 millones de neutrinos electrónicos que atraviesan el detector por segundo y por centímetro cuadrado. Esta cifra solo da cuenta del 35 por ciento del flujo de neutrinos predicho por los modelos solares. Por tanto, el primer resultado del SNO es la confirmación de los experimentos pasados: el número de neutrinos electrónicos procedentes del Sol es muy inferior al predicho por los modelos solares.

Sin embargo, la pregunta clave es si el número de neutrinos electrónicos procedentes del Sol es significativamente menor que el de neutrinos de todos los sabores. Y, de hecho, los 576 eventos asignados a la disociación de deuterones arrojan un flujo total de 5,09 millones de neutrinos por segundo y por centímetro cuadrado: mucho más que los 1,75 millones de neutrinos electrónicos mencionados más arriba. Estos números han sido determinados con gran precisión; la diferencia entre ellos es más de cinco veces la incertidumbre experimental.

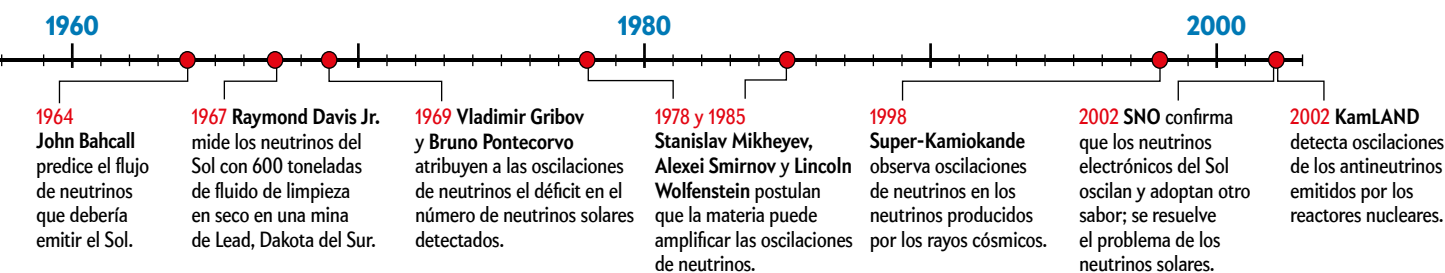
El excedente de neutrinos detectados por la ruptura de deuterones significa que casi 2/3 de los neutrinos que llegan del Sol son neutrinos muónicos o tauónicos. Pero las reacciones de fusión en el Sol solo generan neutrinos electrónicos; por tanto, algunos de ellos han de transformarse antes de llegar a la Tierra. Así pues, el SNO ha demostrado directamente que los neutrinos

no se atienen al simple esquema contemplado por el modelo estándar de tres sabores independientes y sin masa. Tras décadas de intentos, solo Super-Kamiokande y el SNO han demostrado que hay propiedades de las partículas elementales que el modelo estándar no abarca. Haber observado la transformación entre los sabores de los neutrinos supone una confirmación experimental directa de que aún quedan cosas por descubrir en el universo microscópico.

Pero ¿qué ocurre con el problema de los neutrinos solares? ¿Explica el descubrimiento de que los neutrinos electrónicos se transforman en otro sabor todo el déficit observado durante los últimos treinta años? La respuesta es afirmativa: el flujo inferido de 5,09 millones de neutrinos por segundo y por centímetro cuadrado encaja sorprendentemente bien con las predicciones de los modelos solares. Por fin podemos afirmar que entendemos cómo se produce la energía del Sol. Tras un rodeo de treinta años en el que vimos que el Sol podía decirnos algo nuevo acerca de los neutrinos, podemos por fin retornar al objetivo original de Davis y valernos de los neutrinos para conocer el Sol. Entre otras cuestiones, el estudio de los neutrinos solares permitirá determinar qué parte de la energía del Sol se produce por fusión nuclear directa de átomos de hidrógeno y qué parte está catalizada por átomos de carbono.

EL FUTURO

Pero las implicaciones del descubrimiento del SNO van más allá. Si los neutrinos cambian de sabor gracias al mecanismo de oscilaciones, su masa tiene que ser distinta de cero. Tras los fotones, los neutrinos son la segunda partícula conocida más abundante del universo. Por tanto, incluso una pequeña masa podría tener una gran importancia en cosmología. Los experimentos que estudian las oscilaciones, como el SNO y Super-Kamiokande, solo miden diferencias de masa, no las masas en sí. Sin embargo, hallar que las diferencias de masa no son cero demuestra que al menos algunas de sus masas tampoco lo son. La combinación de las medidas de oscilaciones, relativas a las diferencias de masa, con los límites superiores a la masa de los neutrinos impuestos por otros experimentos indican que estas partículas podrían representar entre el 0,3 y el 21 por ciento de la densidad crítica de un universo plano (otros datos cosmológicos indican que el universo es plano). Estas cantidades no son despreciables (son similares al 4 por ciento que aportan el gas, el polvo y las estrellas), aunque no bastan para explicar toda la materia que parece haber en el universo. Puesto que los neutrinos eran la última de las partículas conocidas de las que podía esperarse



que constituyesen la materia oscura, deben existir partículas ignotas cuya densidad, además, ha de ser muy superior a la de cualquiera de las partículas que sí conocemos.

El SNO también ha estado buscando pruebas directas de los efectos de la materia en las oscilaciones de neutrinos. Como dijimos al principio, el viaje a través del Sol puede aumentar la probabilidad de las oscilaciones. Si es así, el paso de los neutrinos a través de miles de kilómetros de Tierra podría provocar una ligera inversión del proceso, lo que haría que se detectaran más neutrinos electrónicos procedentes del Sol por la noche que durante el día. El SNO parece detectar una cantidad de neutrinos ligeramente mayor durante la noche; pero, por ahora, las medidas no tienen la significación estadística suficiente para saber si corresponden o no a un efecto real.

Estos resultados solo marcan el comienzo. En las observaciones mencionadas aquí, hemos detectado los neutrones procedentes de la fragmentación de los deuterones a partir de su captura por otros átomos de deuterio, un proceso poco eficiente que no produce mucha luz. En mayo de 2001 se añadieron al agua pesada dos toneladas de cloruro de sodio (sal común) muy purificado. Los núcleos de cloro capturan los neutrones con una eficiencia mucho mayor que los de deuterio. Ello genera una luz más intensa y fácil de distinguir de los procesos de fondo, lo que permitirá comprobar los resultados iniciales. La colaboración SNO también ha construido un conjunto de detectores ultralimpios, conocidos como «contadores proporcionales», que permitirán detectar los neutrones directamente. En esencia, eso permitirá comprobar los resultados obtenidos hasta ahora mediante un experimento independiente.

El SNO no está solo. En diciembre de 2002 se dieron a conocer los primeros resultados de KamLAND, un experimento japonés-estadounidense. El detector se encuentra en el mismo lugar que Super-Kamiokande, pero estudia los antineutrinos electrónicos producidos por reactores nucleares de japoneses y coreanos. Si el cambio de sabor observado por el SNO se debe a las oscilaciones neutrónicas amplificadas por la materia, la teoría predice que esos antineutrinos deberían cambiar de sabor tras recorrer algunas decenas de kilómetros. Y de hecho, KamLAND ha observado un déficit de antineutrinos electrónicos, lo que indicaría que se han producido oscilaciones en el camino desde los reactores hasta el detector. Además, los resultados de KamLAND implican unas diferencias de masas y unos parámetros de mezcla similares a los observados por el SNO.

Los futuros experimentos de neutrinos quizás escruten uno de los mayores misterios del universo: ¿por qué este se compone

de materia y no de antimateria? En los años sesenta, el físico Andréi Sájarov señaló que, para obtener un universo de materia a partir de una gran explosión de energía pura, las leyes de la física tenían que ser distintas para partículas y antipartículas. Esta diferencia se conoce como violación de la simetría CP (carga-paridad). Varios experimentos en física de partículas han demostrado que la violación de CP se da en la naturaleza. Sin embargo, la cuantía observada no basta para explicar la cantidad de materia que nos rodea. Tiene que haber nuevos fenómenos que impliquen una mayor violación de CP. Un candidato natural son las oscilaciones de neutrinos.

Observar oscilaciones de neutrinos con violación de CP constaría de diversas etapas. En primer lugar habría que observar la aparición de neutrinos electrónicos en haces intensos de neutrinos muónicos. En segundo lugar, se deberían construir aceleradores que produjeran haces de neutrinos tan intensos y puros que sus oscilaciones se captasen en detectores de diversos continentes o en las antípodas. Y cierto proceso radiactivo raro, la desintegración beta doble sin neutrinos, proporcionaría información adicional acerca de las masas de los neutrinos y de la violación de CP.

Es posible que pase más de una década hasta que estos experimentos se hagan realidad. Eso puede parecer un largo camino, pero los últimos treinta años han demostrado que los físicos de neutrinos pueden ser muy pacientes y perseverantes, algo imprescindible para descubrir los secretos de estas esquivas partículas. Tales secretos están íntimamente ligados a nuestra comprensión de la física de partículas, a la astrofísica y a la cosmología, por lo que habremos de perseverar.

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, junio de 2003

EL AUTOR

Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark participaron en los experimentos del Observatorio de Neutrinos de Sudbury que condujeron a la resolución del problema de los neutrinos solares, logro por el que McDonald recibiría el premio Nobel en 2015. Actualmente son catedráticos en las universidades de Queen, Pensilvania y Oxford, respectivamente.

PARA SABER MÁS

The origin of neutrino mass. Hitoshi Murayama en *Physics World*, vol. 15, n.º 5, págs. 35-39, mayo de 2002.

The asymmetry between matter and antimatter. Helen R. Quinn en *Physics Today*, vol. 56, n.º 2, págs. 30-35, febrero de 2003.

The background of the image is a dark, textured surface, possibly a liquid or a solid material with a fine grain. It is covered with numerous iridescent, bubble-like structures. These structures vary in size and shape, some appearing as small, round droplets and others as larger, more elongated, teardrop-like forms. They exhibit a range of colors, including deep blues, purples, greens, and yellows, which are likely due to light interference. The lighting is dramatic, with a strong light source from the upper right creating bright highlights and deep shadows, emphasizing the three-dimensional quality of the bubbles. The overall effect is one of a dynamic, almost living, microscopic world.

Partículas mutantes



Tubos fotomultiplicadores de uno de los detectores de neutrinos del experimento Daya Bay, en China.

EL DESTELLO LUMINOSO procedente del
impacto de un neutrino activa los sensores
de este detector (*recreación artística*).



The background is a dark, textured field of fine, intersecting lines in shades of purple and blue, creating a web-like or particle detector aesthetic. Overlaid on this are several curved paths of small, glowing dots in yellow, orange, and red. Larger, semi-transparent hexagonal shapes in yellow and orange are scattered along these paths, particularly on the right side of the image.

PARTÍCULAS MUTANTES

MENSAJEROS FANTASMALES DE NUEVA FÍSICA

Las exóticas propiedades
de los neutrinos podrían aportar
las pistas necesarias para ir
más allá del modelo estándar

Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod

P

OCOS FÍSICOS HAN TENIDO EL PRIVILEGIO DE TRAER AL MUNDO UNA NUEVA PARTÍCULA elemental. Sin embargo, cuando Wolfgang Pauli concibió el neutrino en 1930, las dudas templaron su entusiasmo inicial. «He hecho algo terrible», confesaría más tarde a sus colegas de profesión. «He postulado una partícula imposible de detectar.»

El neutrino es decididamente esquivo. Su naturaleza fantasmal le permite atravesar casi todas las barreras físicas, también los materiales que componen los detectores de partículas. De hecho, fluyen constantemente a través de la Tierra sin apenas interactuar con nada. Pero los temores de Pauli se revelaron un tanto exagerados: sí resulta posible detectar neutrinos, aunque ello exija grandes dosis de ingenio y afán experimental.

Los neutrinos resultan muy extraños por varias razones. No forman átomos ni guardan relación alguna con la química. Son las únicas partículas elementales de materia que no poseen carga eléctrica. Su masa resulta ínfima: menos de la millonésima parte de la masa de la siguiente partícula más ligera, el electrón. Y, mucho más que cualquier otra partícula, los neutrinos se metamorfosean: su identidad fluctúa entre las tres variedades, o *sabores*, que se conocen: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico.

Los físicos llevan más de 80 años perplejos ante las propiedades del neutrino. Hoy en día aún ignoramos algunas de sus propiedades más básicas. ¿Existen solo tres sabores de neutrinos o hay más? ¿Por qué poseen una masa tan minúscula? ¿Son el neutrino y el antineutrino la misma partícula? ¿Por qué mutan de identidad con tanto brío?

Numerosos experimentos en todo el mundo, ya sea en colisionadores de partículas, en reactores nucleares o en pozos de minas abandonadas, se dedican a investigar tales cuestiones. Sus respuestas deberían proporcionar información clave sobre la estructura íntima de la materia. Además, las extrañas propiedades del neutrino tal vez guíen a los físicos en su empeño por formular una teoría de gran unificación: una que combine todas las partículas e interacciones —salvo la gravedad— bajo una misma estructura matemática. El modelo estándar, la mejor teoría de la que disponemos hasta el momento, no puede acomodar todas las complejidades del neutrino. Por ello, debemos ampliarlo.

LA CUESTIÓN DE LA MASA

En lo que se refiere al sector del modelo estándar que incluye los neutrinos, la manera más estudiada para extenderlo consiste en postular la existencia de ciertas entidades denominadas neutrinos dextrógiros. La quiralidad de una partícula (su cualidad de levógira o dextrógira) puede entenderse como una versión de la carga eléctrica que determina si dicha partícula participa o no en la interacción nuclear débil, la causante de las desintegraciones radiactivas. Solo las partículas levógiras experimentan la interac-

EN SÍNTESIS

Los neutrinos bien pueden considerarse las partículas elementales más enigmáticas que existen. Extremadamente ligeros y carentes de carga eléctrica, su detección reviste especial complejidad.

Los físicos aún no comprenden bien el origen de su exigua masa. Tampoco saben si el neutrino y el antineutrino corresponden a partículas diferentes o si, por el contrario, son idénticos.

Hasta la fecha se han detectado tres especies de neutrinos. Los de un tipo pueden metamorfosearse en otro de manera espontánea, un proceso cuyo origen sigue sin entenderse por completo.

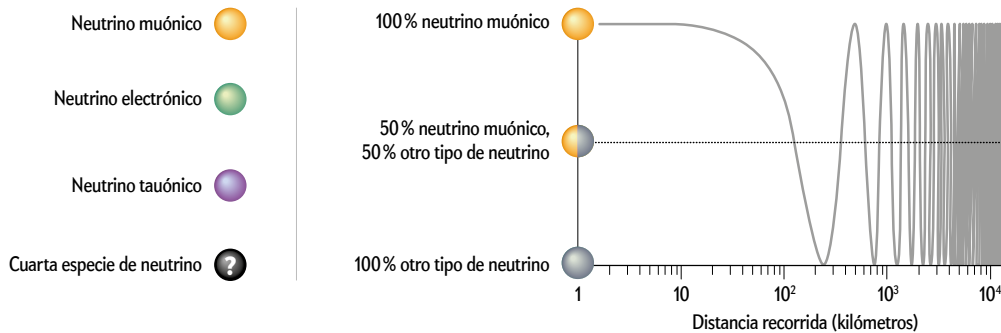
Desentrañar la verdadera naturaleza de estas partículas podría allanar el camino hacia una teoría unificada y ayudaría a entender el origen de la asimetría cósmica entre materia y antimateria.

Oscilaciones de neutrinos

Los neutrinos se propagan a velocidades próximas a la de la luz. A medida que avanzan, ya sea a través del espacio, la Tierra o un cuerpo humano, los neutrinos de un tipo se transforman en otro; decimos que «oscilan». Ese comportamiento no es errático: la probabilidad de esas transformaciones puede predecirse a partir de las propiedades de las partículas.

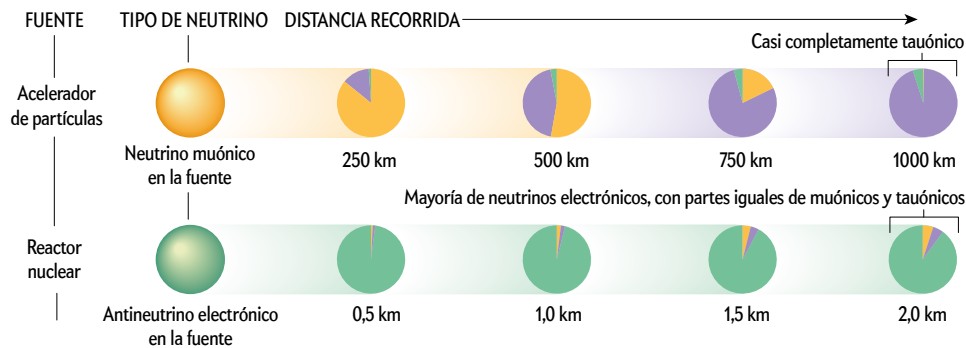
Paleta de sabores

Existen al menos tres especies, o sabores, de neutrinos: el electrónico, el muónico y el tauónico. Algunos físicos sospechan la existencia de una cuarta clase. Esta gráfica ilustra la probabilidad de que un neutrino muónico cambie de sabor tras recorrer cierta distancia. En la práctica, las distancias de oscilación dependen de la energía del neutrino.



Transformaciones típicas

Los experimentos miden cómo cambia el sabor de los neutrinos que emite una fuente cuando llegan a un detector distante. Las gráficas muestran varios patrones de oscilación fuente-detector idealizados, según se trate de experimentos en aceleradores de partículas o en reactores nucleares.



ción débil. Por tanto, los hipotéticos neutrinos dextrógiros serían incluso más difíciles de detectar que sus compañeros levógiros, los cuales sí han sido observados experimentalmente y son los que forman parte del modelo estándar.

Los neutrinos se clasifican como leptones, la misma familia de partículas a la que pertenece el electrón. Los leptones no experimentan la interacción fuerte, la responsable de mantener unidos a protones y neutrones en el interior del núcleo atómico. Dado que los neutrinos carecen de carga eléctrica, tampoco toman parte en la interacción electromagnética. En consecuencia, los neutrinos levógiros solo experimentan las interacciones gravitatoria y débil. Un neutrino dextrógiro, sin embargo, sería inmune también a esta última.

La existencia de neutrinos dextrógiros resolvería de forma bastante razonable uno de los enigmas asociados a estas partículas: su diminuta masa. Las partículas elementales que poseen masa la adquieren gracias a su interacción con el campo de Higgs, un campo físico que impregna todo el universo. Se cree que la partícula descubierta hace casi un año en el Gran Colisionador

de Hadrones (LHC) del CERN es el bosón de Higgs. Este último corresponde a una manifestación del campo de Higgs, del mismo modo que el fotón constituye una manifestación del campo electromagnético. En ese proceso de adquisición de masa, el campo de Higgs se acopla al «equivalente débil» de la carga eléctrica. Por tanto, dado que los neutrinos dextrógiros no poseen dicha carga, su masa no depende del campo de Higgs. En su lugar, esta se debería a un mecanismo completamente distinto que bien podría tener lugar a las altísimas energías características de la gran unificación. Esa propiedad convertiría a los neutrinos dextrógiros en partículas muy pesadas.

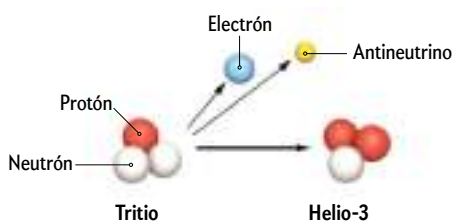
Los efectos cuánticos podrían relacionar las propiedades de los neutrinos dextrógiros con las de sus hermanos levógiros de tal modo que la masa de los primeros «infectase» a los segundos. La intensidad de ese contagio, sin embargo, resultaría minúscula, lo que dotaría a los neutrinos levógiros de una masa ínfima. Esta relación se conoce como mecanismo de balancín (*seesaw*), ya que una masa muy elevada «levanta» a otra minúscula.

En el corazón de la antimateria

Varios experimentos en todo el mundo estudian un exótico proceso radiactivo llamado desintegración beta doble. Con ello, pretenden averiguar si neutrinos y antineutrinos son la misma partícula. De ser el caso, los neutrinos podrían alterar el equilibrio entre materia y antimateria, lo cual ayudaría a entender por qué en nuestro universo la primera domina sobre la segunda.

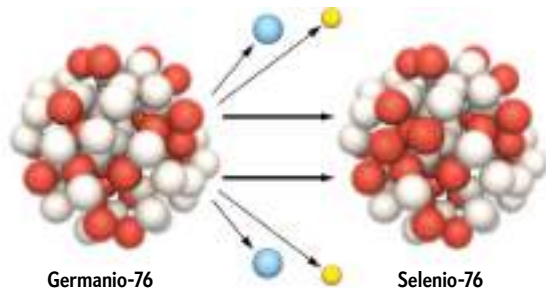
Desintegración beta simple

Algunos núcleos radiactivos experimentan desintegraciones beta. En ellas, un neutrón se transforma en un protón y emite un electrón y un antineutrino. Aquí, un núcleo de tritio se transmuta en uno de helio-3.



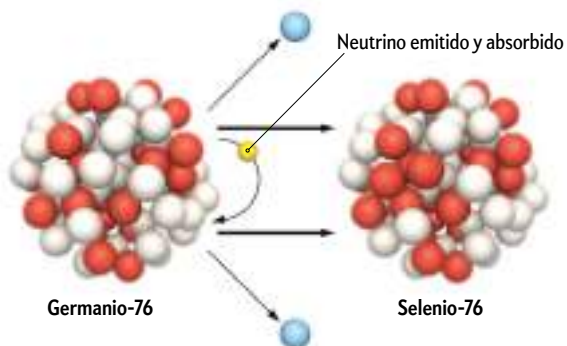
Desintegración beta doble

Ciertos isótopos pueden sufrir dos desintegraciones beta simultáneas. Dos neutrones se convierten en dos protones y emiten dos electrones y dos antineutrinos.



Desintegración beta doble sin neutrinos

Si los neutrinos fuesen su propia antipartícula, los procedentes de las dos desintegraciones beta podrían cancelarse (una de las desintegraciones absorbería un neutrino en lugar de emitir un antineutrino). Este proceso aún no ha sido observado.



Otra explicación para dar cuenta de la masa de los neutrinos se basa en la supersimetría, una de las teorías más estudiadas para extender el modelo estándar. Según esta hipótesis, por cada una de las especies de partículas conocidas debería existir una compañera muy similar pero con distinto espín. Por tanto, la supersimetría multiplica al menos por dos el número de partículas elementales. Dado que hasta ahora nadie ha detectado ninguna de tales *supercompañeras*, en caso de existir, su masa tendría que ser enorme. En un futuro, tal vez el LHC alcance la energía necesaria para producirlas y determinar sus propiedades.

Uno de los rasgos más atractivos de la supersimetría reside en que una de las nuevas partículas predichas por la teoría, el neutralino, constituiría un candidato perfecto para dar cuenta de la materia oscura cósmica, la misteriosa sustancia invisible que se cree que compone la mayor parte de la masa de las galaxias y los cúmulos de galaxias. Aunque dicha sustancia no absorbe ni emite luz, los físicos sospechan de su existencia porque pueden observar los efectos gravitatorios que ejerce sobre la materia visible. Pero, para explicar la materia oscura, el neutralino tendría que ser muy estable; es decir, no podría desintegrarse con rapidez en otras partículas [véase «Mundos oscuros», por J. Feng y M. Trodden; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011].

Un neutralino con una vida demasiado corta devolvería a sus pupitres a los investigadores de la materia oscura, pero supondría una bendición para los físicos de neutrinos. La estabilidad del neutralino depende de una hipotética propiedad llamada paridad R, la cual prohíbe que las supercompañeras se desintegren en las partículas ordinarias del modelo estándar. Pero si la paridad R no existe, el neutralino sería inestable y su desintegración dependería, en parte, de la masa del neutrino.

Dos de nosotros (Hirsch y Porod), en colaboración con José Valle, de la Universidad de Valencia, y Jorge C. Romão, de la Universidad Técnica de Lisboa, hemos demostrado que esa relación entre los neutrinos y el neutralino podría medirse en el LHC. Si la estabilidad del neutralino depende del neutrino, la vida media del primero podría deducirse a partir de las propiedades conocidas del segundo. Además, el neutralino viviría el tiempo suficiente para que los detectores del LHC pudieran registrar todo el proceso desde su producción hasta su desintegración.

MATERIA Y ANTIMATERIA

Todas las explicaciones plausibles sobre la pequeñez de la masa de los neutrinos apuntan a ámbitos inexplorados de la física. Pero una de ellas, el mecanismo de balancín, tal vez nos ayude a resolver otro misterio que lleva decenios abrumando a los físicos: por qué la materia acabó prevaleciendo sobre la antimateria tras la gran explosión que dio origen a nuestro universo.

Todas las partículas del modelo estándar tienen su correspondiente antipartícula, idéntica a la primera pero con cargas opuestas. Así, la carga eléctrica del electrón es -1 y la del antielectrón, o positrón, $+1$. Cuando un electrón y un positrón chocan, sus cargas se cancelan. Ambas partículas se aniquilan y solo dejan tras de sí un destello de radiación. El hecho de que el neutrino dextrógiro no posea cargas de ningún tipo abre las puertas a una posibilidad muy interesante: que neutrinos y antineutrinos sean idénticos. En jerga técnica, decimos que el electrón y el positrón son partículas de Dirac; por otro lado, un neutrino idéntico a su antineutrino sería clasificado como partícula de Majorana. Si el mecanismo de balancín se mostrase correcto, los neutrinos levógiros no solo se verían contagiados por la masa de sus compañeros dextrógiros, sino también por su

cualidad de partículas de Majorana. En otras palabras, si algunos neutrinos son idénticos a su propia antipartícula, entonces lo mismo ocurre con todos ellos.

Semejante propiedad acarrearía varias consecuencias fascinantes. Entre ellas, la posibilidad de que los neutrinos provoquen transiciones entre partículas y antipartículas. En los procesos ordinarios, el número leptónico (el número de leptones menos el número de antileptones) se conserva. Los neutrinos, sin embargo, violarían esa regla, lo cual generaría un desequilibrio entre la cantidad de materia y la de antimateria. Esa asimetría ha desempeñado un papel fundamental en la evolución del universo. Si después de la gran explosión la cantidad de materia hubiese sido igual a la de antimateria, ambas se habrían aniquilado y no habrían dejado nada con lo que formar galaxias, planetas o vida. Físicos y cosmólogos se preguntan desde hace tiempo por qué en nuestro universo predomina la materia sobre la antimateria.

DESINTEGRACIONES BETA DOBLES

La posible equivalencia entre neutrinos y antineutrinos no tiene por qué quedar relegada al ámbito de las teorías sin confirmar. Numerosos experimentos, pasados y presentes, han intentado verificar dicha hipótesis mediante el estudio de ciertas reacciones nucleares exóticas: las desintegraciones beta dobles.

La confirmación experimental de la existencia del neutrino llegó de la mano de la desintegración beta, el proceso por el que un neutrón de un núcleo atómico se convierte en un protón y emite un electrón y un antineutrino. Algunos isótopos radiactivos pueden experimentar dos desintegraciones beta simultáneas. En circunstancias normales, ello implica la emisión de dos electrones y dos antineutrinos. Sin embargo, si el neutrino fuese una partícula de Majorana, el antineutrino emitido durante la primera desintegración podría ser absorbido en la segunda. Como resultado, se produciría una doble desintegración beta en la que no se emitirían ni neutrinos ni antineutrinos. Donde no había ningún leptón aparecerían de repente dos de ellos (los electrones), pero sin los antileptones que usualmente equilibran la balanza. Por tanto, el proceso violaría la conservación del número leptónico.

Hoy por hoy, la búsqueda de desintegraciones beta dobles sin emisión de neutrinos ofrece las mejores posibilidades de determinar empíricamente si los neutrinos son partículas de Majorana. Y, desde un punto de vista más general, brindan también las mejores perspectivas para comprobar si existen procesos que violen la conservación del número leptónico.

En principio, el experimento que debe llevarse a cabo es simple: se toma un isótopo que pueda experimentar dos desintegraciones beta simultáneas, como el germanio-76, y se espera a que aparezcan dos electrones sin los correspondientes antineutrinos. En la práctica, sin embargo, tales experimentos resultan muy difíciles de realizar. Las desintegraciones beta dobles son muy exóticas, por lo que deben reunirse grandes cantidades de germanio o de otros isótopos para documentarlas con fiabilidad. Para empeorar las cosas, el flujo constante

de partículas subatómicas provenientes de los rayos cósmicos ahoga la exigua señal de dichas desintegraciones. Por ello, los experimentos deben llevarse a cabo bajo tierra, en minas abandonadas u otros laboratorios subterráneos, para que la roca los proteja de los rayos cósmicos.

El único testimonio de una posible desintegración beta doble sin neutrinos fue referido en 2001 por la colaboración Heidelberg-Moscú. Pero, por desgracia, este ha sido puesto en tela de juicio por otros experimentos. La próxima generación de detectores, algunos de los cuales ya se encuentran tomando datos, debería proporcionar resultados mucho más precisos. Los experimentos EXO-200, en Nuevo México, y KamLAND-Zen, en Japón, publicaron hace poco sus primeros datos. Y aunque

parecen contradecir los resultados de la colaboración Heidelberg-Moscú, tampoco pueden descartarlos por completo.

El experimento GERDA, en Italia, que comenzó sus operaciones en 2011, emplea el mismo isótopo que la colaboración Heidelberg-Moscú. Su avanzado diseño intentará poner a prueba el controvertido resultado de su predecesor. Mientras EXO-200 y KamLAND-Zen continúan tomando datos, para 2014 se prevé la puesta en marcha del detector CUORE, también en Italia. Gracias a estos y otros experimentos, resulta razonable esperar que la incógnita que plantea la doble desintegración beta sin neutrinos se resuelva antes del final de la presente década.

PEQUEÑOS MUTANTES

Hallar un nuevo tipo de neutrino o demostrar que neutrinos y antineutrinos corresponden a la misma partícula incrementaría aún más el grado de intriga

que los rodea. Pero, al mismo tiempo que investigamos posibles nuevos aspectos de estas partículas, continuamos debatiéndonos para descifrar un atributo bien documentado pero hasta ahora mal entendido: su fuerte tendencia a la metamorfosis. En términos técnicos, decimos que la cantidad de violación del sabor leptónico, o de mezcla de neutrinos, resulta mucho mayor que la mezcla de sabores entre quarks, las partículas que componen los protones y los neutrones.

Numerosos investigadores de todo el mundo intentan explicar este comportamiento a partir de nuevas simetrías de la naturaleza; es decir, mediante conexiones matemáticas que relacionen partículas e interacciones en apariencia distintas. Un ejemplo serían las simetrías que dictan el modo en que las partículas conocidas se transforman unas en otras. En fecha reciente, Gautam Bhattacharyya, del Instituto Saha de Física Nuclear de Calcuta, Philipp Leser, de la Universidad Técnica de Dortmund, y uno de nosotros (Päs) hemos descubierto que tales simetrías afectarían de manera notable al campo de Higgs. La interacción del campo de Higgs con quarks y neutrinos que cambian de sabor implicaría desintegraciones inusuales del bosón de Higgs, las cuales deberían de poder observarse en el LHC. Tales señales podrían ayudarnos a entender las frenéticas transmutaciones de los neutrinos y, en cualquier caso, constituirían uno de los descubrimientos más espectaculares del LHC.

**Una nueva
generación
de experimentos
en colisionadores
de partículas,
reactores nucleares
y pozos de minas
abandonadas
debería proporcionar
datos clave sobre las
propiedades de los
neutrinos**

Un secreto escrito en el cielo

SUDEEP DAS Y TRISTAN L. SMITH

Hasta ahora ha sido imposible medir con precisión la minúscula masa de los neutrinos, y no por falta de intentos. Los numerosos experimentos realizados durante las últimas décadas en laboratorios de todo el mundo tan solo han logrado imponer cotas bastante laxas a las masas de las tres especies de neutrinos.

Contamos con razones de peso para pensar que el mejor método para determinar la masa de estas diminutas partículas consiste, irónicamente, en medir sus efectos sobre la estructura a gran escala del universo. A pesar de su minúscula masa, la ingente cantidad de neutrinos presentes en el cosmos (del orden de 10^{89}) les otorga un papel clave en la evolución del universo.

La idea puede resumirse como sigue. Poco después de la gran explosión se sintetizaron grandes cantidades de helio a partir de núcleos de hidrógeno. Ese proceso liberó un número enorme de neutrinos. A medida que el cosmos se expandía y se enfriaba, las

pequeñas fluctuaciones de densidad en esa sopa primordial se fueron amplificando. En las zonas donde la densidad era superior a la media, la gravedad atrajo aún más materia.

La materia oscura, la sustancia invisible que compone la mayor parte de la masa del universo, fue la primera que formó agregados, ya que solo experimenta los efectos de la gravedad (y, a lo sumo, los de la interacción débil). A partir de esas aglomeraciones se formarían más tarde las galaxias y los cúmulos de galaxias. Los neutrinos, al ser extremadamente ligeros, comenzaron a agruparse algo más tarde. Al viajar casi libres por el cosmos, ralentizaron la formación de agregados de materia oscura.

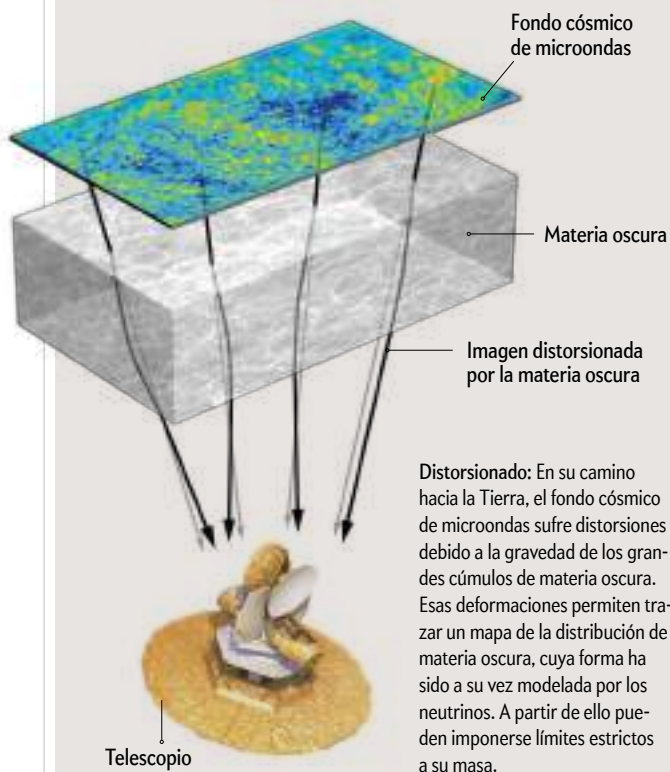
Ese efecto debería ser detectable en la actualidad. Cuanto mayor sea la masa de los neutrinos, más habrían entorpecido la acumulación de materia y más borrosos serían los contornos de las grandes estructuras que observamos hoy. Por tanto, medir con detalle la distribución de masa en el universo permitiría determinar la masa de los neutrinos.

Cartografiar la distribución de materia, la mayor parte de la cual es materia oscura, no resulta sencillo. Sin embargo, se ha observado que el fondo cósmico de microondas (CMB, la radiación fósil de la gran explosión) exhibe ligeras distorsiones. Estas se producen porque, en su camino hacia la Tierra, los fotones se desvían por efecto de la atracción gravitatoria que ejercen las grandes concentraciones de materia oscura. Estudiar ese efecto de lente gravitacional sobre el CMB ofrece un método muy prometedor para medir la distribución de materia oscura en el universo.

Las nuevas medidas de precisión del CMB nos permitirán crear un mapa muy detallado de la distribución de materia oscura. Si esta conforma estructuras con bordes muy bien definidos y separadas por grandes vacíos, podremos concluir que las masas de los neutrinos son ínfimas; si, por el contrario, sus contornos se muestran difusos, sabremos que los neutrinos poseen una masa mayor.

La nueva generación de experimentos sobre el CMB debería permitirnos calcular las masas combinadas de las tres especies de neutrinos con una precisión de cinco millonésimas de la masa del electrón. La posibilidad de medir la masa de la más ligera y esquiva de las partículas a partir de la observación del universo a gran escala continúa sorprendiendo e inspirando a los físicos para profundizar en el estudio de la naturaleza.

Sudeep Das ha sido investigador en el Laboratorio Nacional Argonne de EE.UU. **Tristan L. Smith** es actualmente profesor en el Colegio Universitario Swarthmore, en Pensilvania.



Mientras tanto, otros experimentos intentan medir con exactitud la frecuencia con la que los neutrinos cambian de identidad. Laboratorios como T2K, en Japón, MINOS, en EE.UU., y OPERA, en Italia, detectan haces de neutrinos procedentes de aceleradores situados a muchos kilómetros de distancia. Con ello, persiguen medir qué cambios de sabor tienen lugar cuando estas partículas recorren grandes trayectos a través de la Tierra. Las escalas implicadas resultan de tal magnitud que, en su viaje, los neutrinos cruzan fronteras nacionales. (En 2011, la colaboración OPERA provocó un gran revuelo al anunciar

que los neutrinos generados en el CERN, cerca de Ginebra, habían llegado al laboratorio italiano en menos tiempo que el que tardaría la luz en recorrer la misma distancia. Meses más tarde, sin embargo, esos resultados se demostraron erróneos.) Por otro lado, proyectos como Double Chooz, en Francia, Daya Bay, en China, y RENO, en Corea del Sur, miden las oscilaciones de neutrinos producidos en reactores nucleares cercanos [*véase «En busca de la última transformación de los neutrinos»*, por I. Gil, P. Novella y M. Cerrada; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2011].

Los parámetros que gobiernan las transiciones entre un sabor y otro reciben el nombre de ángulos de mezcla. El último y más pequeño de ellos, también conocido como «ángulo de reactor», fue medido en 2012. Su valor da cuenta de la probabilidad de que un neutrino o antineutrino electrónico cambie de sabor tras haber recorrido una distancia corta. La medición de este parámetro ha abierto las puertas a que futuros experimentos comparen las propiedades de neutrinos y antineutrinos. La observación de cierta asimetría entre ellos, conocida como violación de *CP*, podría contribuir en gran medida a entender la abundancia de materia en nuestro universo.

De entre las búsquedas en curso, T2K tiene quizá por primera vez buenas posibilidades de obtener indicios de violación de *CP* en neutrinos. Hoy asistimos a una interesante carrera entre varias colaboraciones para dar respuesta a estas y otras cuestiones clave. El experimento de larga distancia NOvA, en construcción en EE.UU., podría también observar la violación de *CP* en neutrinos. NOvA lanzará un haz de estas partículas a través de la Tierra desde el laboratorio Fermilab, cerca de Chicago, hasta un detector en Minnesota, a 810 kilómetros de distancia. Los neutrinos harán ese viaje en menos de tres milisegundos. Uno de los objetivos del experimento consiste en determinar la jerarquía de masas de los neutrinos; es decir, precisar cuál es el más pesado y cuál el más ligero. Por ahora solo sabemos que al menos dos especies de neutrino tienen masa. Pero, como en otros muchos aspectos, los detalles se nos escapan.

NEUTRINOS ESTÉRILES

Semejante cantidad de experimentos tan distintos ha dado lugar a algunas interpretaciones enfrentadas. Uno de los indicios empíricos más atractivos —y polémicos— sugiere la existencia de una nueva partícula: el neutrino estéril.

Retomando los temores de Pauli, el neutrino estéril solo podría detectarse por medios indirectos, al igual que el neutrino dextrógiro del mecanismo de balanceo. (Si bien este último sería mucho más pesado y, desde un punto de vista teórico, ambas partículas resultan casi mutuamente excluyentes.) Sin embargo, dos proyectos podrían haber observado ya algunos indicios de la existencia de un neutrino estéril. El experimento LSND, que funcionó en el Laboratorio Nacional de Los Álamos durante los años noventa, publicó en 2001 ciertos datos que, aunque controvertidos, apuntaban a un tipo de transformación bastante escurridiza: la conversión de antineutrinos muónicos en antineutrinos electrónicos. El experimento MiniBooNE, en el Fermilab, que comenzó a dar sus primeros frutos en 2007, también halló indicios de ese tipo de transmutación. Sin embargo, esas oscilaciones no encajaban bien en el esquema usual de tres neutrinos.

Las leyes de la mecánica cuántica solo permiten las oscilaciones de neutrinos si estos poseen masa y si, además, cada especie posee una masa diferente. Las diferentes masas de los neutrinos podrían generar oscilaciones como las observadas por LSND y MiniBooNE solo si existiese una diferencia de masas adicional a las ya conocidas. En otras palabras, necesitaríamos que hubiese cuatro especies de neutrinos, en lugar de tres. Sin

embargo, el acoplamiento de un cuarto neutrino a la interacción débil provocaría que el bosón *Z* (una de las tres partículas que sabemos que median dicha interacción) se desintegrara demasiado rápido. Por tanto, la hipotética nueva partícula no debería experimentar en absoluto la interacción débil. De ahí el calificativo «estéril»: dicho neutrino estaría desacoplado casi por completo del resto de las partículas elementales.

Otros detectores muy distintos y que estudian neutrinos procedentes de reactores nucleares cercanos también han obtenido resultados que podrían apuntar a un neutrino estéril. Varios experimentos han referido una desaparición anómala de antineutrinos electrónicos en distancias muy cortas. Si ello se

interpreta en términos de oscilaciones de neutrinos, implicaría la existencia de neutrinos estériles. Otros cálculos sobre la producción de neutrinos en los diferentes reactores parecen también reforzar dicha hipótesis.

Hoy por hoy, sin embargo, los indicios sobre neutrinos estériles son aún incompletos, indirectos y contradictorios, tal y como cabe esperar de una partícula que, en caso de existir, sería extraordinariamente difícil de detectar. Sin embargo, MiniBooNE y un experimento paralelo aún en construcción en Fermilab, MicroBooNE, podrían aportar datos más firmes en un futuro próximo. Por otro lado, los expertos están debatiendo una nueva generación de diseños

experimentales que permitiría investigar la anomalía observada en esos reactores.

No deja de resultar sorprendente que tanto el poderoso LHC como los experimentos sobre los humildes neutrinos, que implican energías mucho menores, proporcionen vías complementarias para explorar los engranajes más íntimos de la naturaleza. Más de 80 años después de que Wolfgang Pauli concibiese su «partícula indetectable», los neutrinos aún guardan sus secretos con gran celo. Con todo, la recompensa que supondría desentrañarlos justifica los enormes esfuerzos que, durante las últimas décadas, hemos venido realizando para curiosear en la vida privada de esta partícula. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, junio de 2013

LOS AUTORES

Martin Hirsch investiga en el Instituto de Física Corpuscular, centro mixto de la Universidad de Valencia y el CSIC. **Heinrich Päs** investiga en la Universidad Técnica de Dortmund. **Werner Porod** es profesor de física en la Universidad de Wurzburg.

PARA SABER MÁS

Testing neutrino mixing at future collider experiments. W. Porod, M. Hirsch, J. Romão y J. W. F. Valle en *Physical Review D*, vol. 63, 115.004, abril de 2001.
Neutrino masses and particle physics beyond the standard model. H. Päs en *Annalen der Physik*, vol. 11, n.º 8, págs. 551-572, septiembre de 2002.

PARTÍCULAS MUTANTES

El enigma de los neutrinos

El mayor experimento jamás diseñado
para estudiar estas misteriosas partículas
podría revelar qué hay más allá
del modelo estándar

Clara Moskowitz





VOY ANDANDO POR UNA PASARELA EN UNA GIGANTESCA CAVERNA LLENA DE EQUIPOS industriales. Me explican que billones de neutrinos atraviesan mi cuerpo cada segundo. Extiendo los brazos, aunque por supuesto no siento absolutamente nada. Sin apenas masa y a una velocidad casi igual a la de la luz, estas partículas fantasmales atraviesan el espacio vacío entre mis átomos sin dejar rastro. La gran mayoría de ellos cruza del mismo modo la enorme caja metálica que domina la caverna. Pero, unas cuantas veces al día, un neutrino colisiona contra alguno de los átomos de este artificio del tamaño de un autobús escolar. Al hacerlo, libera partículas con carga eléctrica que dejan trazas detectables. Los físicos confían en que esos datos les lleven a un territorio inexplorado.

El aparato forma parte del experimento NOvA (de NuMI Off-Axis Electron Neutrino Appearance; la «v» significa «neutrino», por su similitud con la letra griega ν , símbolo para los neutrinos en física de partículas), del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), en Batavia, Illinois. En Minnesota se encuentra enterrado un detector similar, aunque de mayor tamaño. Su objetivo consiste en capturar neutrinos que, tras pasar por el primer aparato, hayan atravesado los 800 kilómetros de roca que separan ambas instalaciones.

Operativo desde 2014, NOvA es el experimento de neutrinos más largo del mundo. Sin embargo, es también el predecesor de uno mucho mayor: el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE, por sus siglas en inglés). Este comenzará en Fermilab, donde un haz de protones colisionará contra un blanco de grafito y generará neutrinos. Después, estos viajarán 1300 kilómetros bajo tierra desde Illinois a Dakota del Sur. Los 500 kilómetros adicionales servirán para aumentar la probabilidad de que las peculiares propiedades de estas partículas acaben manifestándose.

DUNE es el experimento de física de altas energías más ambicioso que se haya intentado construir en suelo estadounidense desde el fracasado Supercolisionador Superconductor (SSC), en los años noventa del pasado siglo. El proyecto, que costará

1500 millones de dólares, debería comenzar a tomar datos en la década de 2020 y se espera que permanezca operativo durante al menos veinte años. Con unos mil investigadores de 30 países, se convertirá también en el mayor experimento de neutrinos del mundo. Asimismo, será la primera vez que el principal laboratorio de física de partículas de Europa, el CERN, invierta en un proyecto fuera del continente. Y, al igual que en 2012 el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) descubrió el bosón de Higgs, los científicos confían en que DUNE les permita entender el universo a un nivel más profundo. «Queremos hacer con los neutrinos lo que el LHC hizo con el higgs», explica Mark Thomson, físico de Cambridge y coportavoz de DUNE. «Creemos que estamos a punto de iniciar la siguiente gran revolución en física de partículas.»

La razón de que los neutrinos levanten tantas expectativas se debe a que se trata de las primeras partículas que no parecen ajustarse del todo al modelo estándar, la teoría que describe la materia y sus interacciones básicas a un nivel fundamental. Según ella, los neutrinos deberían carecer de masa. Sin embargo, hace ya más de 15 años que dos experimentos, uno en Japón y otro en Canadá, descubrieron que estas partículas poseen una masa diminuta. Pero lo interesante es que no parecen adquirirla de la misma manera que el resto de las partículas, por lo que su

EN SÍNTESIS

De todas las partículas elementales conocidas, los neutrinos probablemente sean las más misteriosas. Aunque durante décadas se pensó que carecían de masa, hoy sabemos que no es así. El origen de su masa, sin embargo, sigue siendo un enigma.

Un ambicioso proyecto aún en construcción, el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE), en EE.UU., enviará haces de neutrinos de Illinois a Dakota del Sur, a 1300 kilómetros de distancia.

DUNE estudiará el curioso fenómeno por el que estas partículas mutan espontáneamente de identidad. Con ello, los físicos esperan dilucidar el origen de su masa y otros fenómenos, como la asimetría entre materia y antimateria en el universo.

origen podría deberse a nuevos fenómenos físicos: una partícula, interacción o mecanismo aún por descubrir.

En los últimos años, debido a la falta de resultados en otros frentes, el estudio de los neutrinos se ha consolidado como una de las líneas de investigación más prometedoras en física de partículas. Por ahora, el LHC no ha encontrado nada que no estuviese predicho por el modelo estándar; al mismo tiempo, los experimentos diseñados para detectar las partículas que constituyen la materia oscura siguen con las manos vacías. «Sabemos que el modelo estándar no está completo. Hay algo más allá, pero ignoramos qué», explica Stephen Parke, físico de neutrinos del Fermilab. «Hay quien ha apostado su carrera al LHC; otros nos hemos decidido por los neutrinos.»

UN MISTERIO DE PESO

El día después de mi visita a la caverna de NOvA llego a una oficina vacía en el tercer piso del Robert Rathbun Wilson Hall, el edificio principal del Fermilab. Parke, acompañado del físico teórico André de Gouvêa, de la Universidad Noroccidental de EE.UU., me explica que ha escogido esta oficina para nuestro encuentro porque, en su día, fue la de Leon Lederman, antiguo director del Fermilab y padre de una técnica para generar haces de neutrinos usando aceleradores. Aquel trabajo sentaría más tarde los cimientos de DUNE y, en 1962, permitiría descubrir una de las tres especies de neutrino, lo que en 1988 le valdría a Lederman el Nobel de física. Parke y De Gouvêa reconocen que, aunque la física de neutrinos ha avanzado mucho desde entonces, los científicos siguen perplejos. «Lo interesante de los neutrinos es que, cuanto más aprendemos sobre ellos, más preguntas nos surgen», puntualiza Parke. «Son partículas malvadas.»

Parke, original de Nueva Zelanda, quedó fascinado por los neutrinos poco después de llegar a EE.UU. en los años setenta para cursar su doctorado. En las décadas siguientes, los neutrinos perdieron su reputación de aburridas partículas sin masa. «Hemos vivido una revolución tras otra», afirma Parke. «La cuestión es: ¿queda alguna pendiente?» Él y De Gouvêa apuestan que sí. «Solo ahora hemos empezado a medir las propiedades de los neutrinos a un nivel equiparable al del resto de las partículas», indica De Gouvêa. Y apostilla: «No conocemos sus masas, podría haber nuevos tipos de neutrinos y podrían interactuar con otras partículas que no lo hacen con nada más».

DUNE se centrará en estudiar la extraña tendencia de los neutrinos a cambiar de identidad, un proceso conocido como «oscilación». Existen tres especies, o «sabores», de neutrino: el electrónico, el muónico y el tauónico. Se distinguen porque, al interactuar con los átomos de un detector, generan partículas de tipos diferentes: los neutrinos electrónicos dan lugar a electrones, mientras que los muónicos y los tauónicos producen, respectivamente, muones y tauones (partículas similares al electrón pero más masivas). Lo sorprendente es que los neutrinos de un tipo pueden transformarse espontáneamente en neutrinos de otro. Un neutrino muónico producido en Fermilab puede llegar a Dakota del Sur convertido en uno electrónico o tauónico. Hasta ahora, se trata de las únicas partículas elementales conocidas que sufren semejante metamorfosis.

Cuando hace más de 15 años se observó este comportamiento, el hallazgo sirvió para resolver un antiguo misterio. En los años sesenta, los científicos comenzaron a estudiar los neutrinos que llegaban a la Tierra procedentes del Sol. Sin embargo, solo detectaban un tercio de los que predecía la teoría. Años más tarde, las oscilaciones explicaron el fenómeno:

los dos tercios que faltaban eran neutrinos electrónicos que, en su camino a la Tierra, se habían convertido en muónicos o tauónicos. Y estos últimos escapaban a los experimentos, que únicamente eran capaces de detectar neutrinos electrónicos. Pero, aunque aquel descubrimiento acabó con el llamado «problema de los neutrinos solares», puso sobre la mesa otro: según las leyes cuánticas, los neutrinos solo pueden cambiar de tipo si tienen masa. Y eso era precisamente lo que no predecía el modelo estándar.

El hecho de que los neutrinos oscilen se debe a que cada sabor corresponde a una superposición cuántica de tres «estados de masa». Por tanto, un neutrino de un sabor determinado nunca tiene una masa bien definida, sino que queda descrito por una combinación de las tres masas posibles. Cuando viajan por el espacio, las componentes asociadas a cada uno de los tres estados de masa avanzan a velocidades ligeramente distintas. Con el tiempo, ese desajuste genera cambios en la mezcla de estados de masa que caracterizan el neutrino. De esta manera, un neutrino muónico (definido por una combinación específica de masas) puede acabar convertido en uno electrónico o tauónico.

Los científicos aún ignoran los valores exactos de las masas asociadas a cada estado; por el momento, solo saben que son diferentes y distintas de cero. Al contar cuántos neutrinos oscilan en su viaje entre Illinois y Dakota del Sur, DUNE pretenderá determinar la relación entre las diferentes masas. La teoría indica que estas podrían ordenarse de forma que dos sean muy pequeñas y una grande, o bien de modo que dos sean grandes y una pequeña. La primera posibilidad recibe el nombre de «jerarquía normal»; la segunda se conoce como «jerarquía invertida». DUNE debería ser capaz de distinguir entre ambas opciones, ya que la materia que habrán de atravesar los neutrinos a lo largo de su camino debería de afectar a las oscilaciones. Si la jerarquía normal resultase ser la correcta, a la llegada se observaría una relación de sabores distinta de la que tendría lugar con una jerarquía invertida. «Enviar neutrinos a través de la materia nos permite determinar esa diferencia con facilidad. Cuanto más distancia recorran los neutrinos, más clara será la señal», indica Thomson. Y concluye: «Este es un problema físico que DUNE resolverá con toda seguridad en pocos años».

EL ORIGEN DE LA MASA

Una vez conocida la jerarquía de masas de los neutrinos, los investigadores esperan poder abordar un problema más importante: cómo adquieren su masa estas partículas. La masa de la mayoría de las partículas, como los electrones o los quarks, se debe a su interacción con el campo de Higgs, el cual impregna todo el espacio y se encuentra asociado al bosón de Higgs. Sin embargo, el mecanismo de Higgs solamente funciona con partículas que presenten tanto una versión «levógira» como una «dextrógira», una propiedad básica relacionada con la orientación relativa del espín y del sentido de movimiento. El problema reside en que, hasta ahora, solo se han detectado neutrinos levógiros. Si el origen de su masa fuera el mecanismo de Higgs, también deberían existir neutrinos dextrógiros.

El hecho de que no se hayan detectado neutrinos dextrógiros indica que, si existen, no interactúan con las demás partículas conocidas, una posibilidad que los físicos consideran poco probable. Además, si el mecanismo de Higgs actuase también sobre los neutrinos, lo natural sería que sus masas fueran similares a las del resto de las partículas conocidas. Sin embargo, los

Partículas desconcertantes

Los neutrinos son partículas de masa ínfima que atraviesan la materia a velocidades cercanas a la de la luz. Existen tres tipos, o «sabores». Cuando se propagan, los neutrinos de un sabor se transforman espontáneamente en neutrinos de otro, un proceso conocido como «oscilación». Ese comportamiento es el que se propone estudiar el Experimento de Neutrinos del Sub-suelo Profundo (DUNE), el más ambicioso hasta la fecha y cuya entrada en funcionamiento está prevista para la década de 2020. En él, haces de neutrinos generados en el Fermilab, en Illinois, viajarán a través de 1300 kilómetros de roca hasta el Centro de Investigación Subterráneo Sanford, en Dakota del Sur. Al llegar, se medirán las oscilaciones ocurridas durante el viaje.

Centro de Investigación
Subterráneo Sanford
(Dakota del Sur)

SABORES Y MASAS

Los tres tipos de neutrino, electrónico, muónico y tauónico, hacen referencia a las partículas con las que interaccionan: electrones, muones y partículas tau. Contrariamente a lo que se pensó durante décadas, los neutrinos sí poseen masa. Sin embargo, un neutrino de un sabor dado no tiene una masa bien definida, sino que corresponde a una superposición cuántica de tres «estados de masa». Por ahora, los físicos ignoran los valores precisos de cada una de las masas.

TIPOS DE NEUTRINO

Sabor



Neutrino
electrónico



Neutrino
muónico



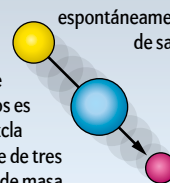
Neutrino
tauónico

Cada
sabor de
neutrinos es
una mezcla
diferente de tres
estados de masa

Estados de masa

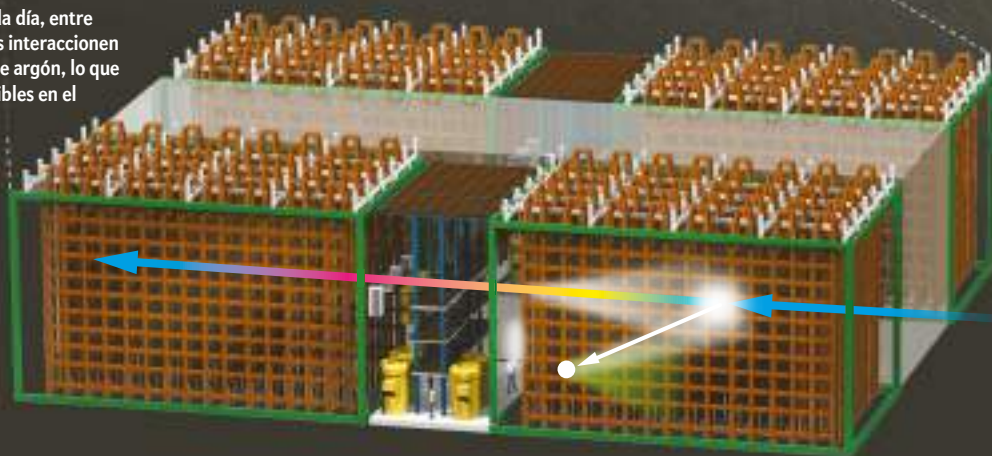


Al propagarse, los
neutrinos cambian
espontáneamente
de sabor



DETECTOR LEJANO

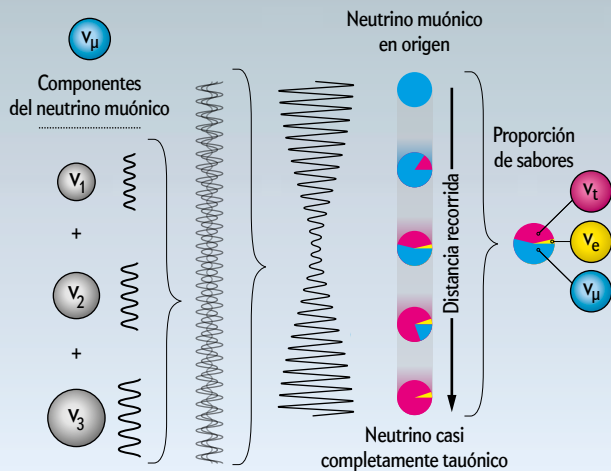
Cada uno de los cuatro módulos del detector lejano de DUNE contendrá 17.000 toneladas de argón líquido. Los físicos esperan que, cada día, entre 10 y 20 neutrinos interaccionen con los átomos de argón, lo que dejará trazas visibles en el detector.



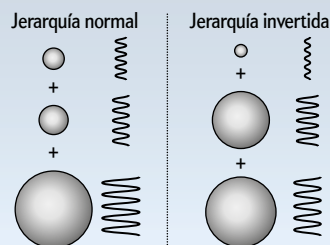
1300 kilómetros

OSCILACIONES Y EL PAPEL DE LA MASA

A medida que un neutrino avanza por el espacio, los diferentes estados de masa que lo componen viajan a velocidades ligeramente distintas. Con el tiempo, ese desfase modifica las proporciones en las que se combinan los tres estados de masa, lo que provoca cambios en el sabor del neutrino. Por ejemplo, un neutrino muónico puede mutar en uno electrónico o tauónico.



Aunque no se conocen los valores precisos de las masas asociadas a los neutrinos, la teoría indica que podría haber dos ligeros y uno relativamente pesado («jerarquía normal»), o uno ligero y dos pesados (jerarquía invertida). Se espera que el experimento DUNE determine cuál es la jerarquía correcta.



UN LARGO VIAJE

DUNE enviará haces de neutrinos desde el Fermilab, en Illinois, hasta el centro de Sanford en Dakota del Sur, a 1300 kilómetros de distancia. Este recorrido, el mayor hasta el momento en un experimento terrestre de neutrinos, permitirá estudiar las oscilaciones.



DETECTOR CERCANO

Se trata de una versión reducida del detector lejano. Los investigadores compararán las medidas efectuadas en ambas instalaciones para deducir cuántos neutrinos han cambiado de sabor durante el viaje.

Cuando un neutrino colisiona contra un átomo, genera partículas detectables, como electrones o fotones

Trayectoria del haz de neutrinos

Partícula con carga eléctrica

Haz de neutrinos muónicos

El acelerador de partículas genera haces de neutrinos

Fermilab (Illinois)



El inyector principal de Fermilab, un acelerador circular subterráneo, acelera protones para generar los haces de neutrinos que se estudiarán en el experimento DUNE.

neutrinos son extraordinariamente ligeros: aunque sus estados de masa no se conocen con exactitud, se sabe que las masas asociadas son cien mil veces menores que la del electrón, ya de por sí muy ligero. «Muy poca gente piensa que el mecanismo de Higgs sea el responsable de la masa de los neutrinos», señala Nigel Lockyer, director del Fermilab. «Lo más probable es que se trate de un mecanismo muy diferente, el cual estará asociado a otras partículas.»

Una posibilidad que los físicos contemplan con emoción es que los neutrinos sean partículas de Majorana; es decir, que sean sus propias antipartículas. Esto último es posible porque los neutrinos carecen de carga eléctrica, que es lo que distingue a una partícula de su antipartícula. Se cree que las partículas de Majorana pueden adquirir masa sin necesidad del mecanismo de Higgs, tal vez mediante la interacción con otro campo aún por descubrir. Este escenario requiere la existencia de un grupo de neutrinos de gran masa, los cuales podrían ser hasta un billón de veces más pesados que las partículas más masivas conocidas hasta la fecha. De alguna manera, ello compensaría la ínfima masa de los neutrinos ordinarios.

En física de partículas, la posibilidad de descubrir una nueva escala de energía resulta muy atractiva. «Históricamente, siempre hemos progresado explorando la naturaleza a diferentes escalas», indica De Gouvêa. Además, si hay un nuevo campo que da masa a los neutrinos, quizás este afecte también a otras partículas. «Si la naturaleza lo hace con los neutrinos, ¿con qué más puede hacerlo?», especula Lockyer. «¿Podría la materia oscura tener una masa de Majorana?»

DUNE no comprobará directamente si los neutrinos son partículas de Majorana, pero medir la jerarquía de masas ayudará a quienes ya persiguen ese objetivo en varios experimentos en Japón, Europa y otros lugares. Además, DUNE debería ayudar a dilucidar el origen de la masa de estas partículas, al aportar detalles sobre cómo evoluciona la combinación de sus estados de masa a medida que oscilan. «Queremos hacer el mejor experimento posible de oscilaciones de neutrinos, porque sabemos que es ahí donde aprenderemos sobre su masa», asegura De Gouvêa.

MATERIA CONTRA ANTIMATERIA

Por otro lado, estas diminutas partículas podrían ayudar a resolver un misterio de proporciones cósmicas: por qué el cosmos se compone de materia y no de antimateria. Los modelos teóricos predicen que, en la gran explosión que dio origen al universo, una y otra tuvieron que generarse en igual cantidad. No obstante, por alguna razón, cuando la mayor parte de la materia se aniquiló con la antimateria, quedó un pequeño exceso de la primera. A esa exigua diferencia debemos la existencia de todas las galaxias, planetas y estrellas que vemos en la actualidad.

Para explicar esa asimetría, los científicos buscan una partícula que no se comporte igual que su antipartícula. Varias pistas, entre las que se cuentan algunos indicios obtenidos en otros experimentos, apuntan a los neutrinos. DUNE buscará señales de la llamada «violación de CP» (carga-paridad); en otras palabras, pruebas de que neutrinos y antineutrinos os-

cilan de forma distinta entre los distintos sabores. Por ejemplo, DUNE podría observar que los antineutrinos muónicos se transforman en antineutrinos electrónicos a un ritmo entre la mitad y el doble de rápido de como lo hacen los correspondientes neutrinos. Parke considera que una diferencia semejante podría explicar por qué la materia prevaleció sobre la antimateria en la batalla primigenia. Curiosamente, los antineutrinos podrían oscilar de forma distinta que los neutrinos aunque fuesen partículas de Majorana. En tal caso, lo único que distinguiría a unos de otros sería su quiralidad, asociada a la orientación de su espín. Y los neutrinos, levógiros, se comportarían de manera distinta que los antineutrinos, dextrógiros.

DUNE también podrá determinar si solo existen tres sabores de neutrinos o si, por el contrario, hay más esperando a ser descubiertos. Estos neutrinos adicionales serían los conocidos como «estériles», ya que no interactuarían en absoluto con la materia ordinaria. Algunos experimentos previos, como el Detector de Neutrinos con Líquido Centellador (LSND), en Los Álamos, o MiniBooNE, en Fermilab, obtuvieron en su día datos no concluyentes que apuntaban a que un tipo adicional de neutrino estaba interfiriendo con las oscilaciones, lo que sugirió la existencia de neutrinos estériles con masas mucho mayores que las de los neutrinos conocidos. Los investigadores confían en que DUNE confirme o descarte esta posibilidad. «Los neutrinos estériles podrían modificar significativamente el tipo de oscilaciones que observemos en DUNE», apunta Thomson.

UNA GRAN APUESTA

DUNE ha sido diseñado para tomar muchos más datos y con mucha mayor precisión que cualquier otro experimento de neutrinos. El proyecto usará un haz de neutrinos de alta energía dos veces más potente que cualquiera de los hoy existentes, y lo dirigirá a un detector más de cien veces mayor que el más vasto de su clase.

La pieza central del proyecto será el detector de Dakota del Sur, el cual se instalará en el Centro de Investigación Subterráneo Sanford. La máquina constará de cuatro módulos de detectores, cada uno del tamaño de una piscina olímpica pero seis veces más profundo, que se llenarán con 17.000 toneladas de argón líquido. Cuando un neutrino colisione contra un átomo de argón, tanto en Fermilab como en Sanford, producirá una partícula que, dependiendo del sabor del neutrino, será un electrón, un muon o una tauón. Los muones viajarán a través del argón líquido en línea recta, arrancando a su paso electrones de los átomos y dejando así una traza detectable. Si la colisión crea un electrón, el proceso dará lugar a un fotón que, a su vez, producirá más electrones y fotones, lo que generará una cascada de partículas. Los neutrinos tauónicos crearán una partícula tau, pero solo si el neutrino de partida tiene energía suficiente. Ello se debe a que la partícula tau es de mayor masa que el electrón o el muon, por lo que producirla requiere más

«Lo interesante de los neutrinos es que, cuanto más aprendemos sobre ellos, más preguntas nos surgen»

—*Stephen Parke, Fermilab*

energía. El CERN comenzará en 2018 a ensayar versiones en miniatura del detector lejano de DUNE. «Estos detectores son parecidos a una misión espacial: una vez en funcionamiento, no es posible pararlos y desmontarlos para hacer reparaciones», explica Joseph Lykken, subdirector de Fermilab. «Una vez introducidas las 17.000 toneladas de argón líquido, es simplemente demasiado complicado volver a sacarlo.»

Para poder llevarse a término, DUNE tendrá que superar los obstáculos políticos y presupuestarios que en el pasado han acabado con otros grandes proyectos en física. En julio de 2017, los científicos y las autoridades organizaron una ceremonia en las instalaciones de Sanford para celebrar el inicio de las excavaciones, que durarán al menos tres años. Pero también se efectuaron grandes trabajos de excavación para el fallido SSC, el cual iba a ser

mayor incluso que el LHC y que muy probablemente hubiese descubierto el bosón de Higgs. Sin embargo, el proyecto fue cancelado en 1993 debido a los sobrecostos y a cambios políticos. «Uno puede retroceder en la historia y ver lo que ocurrió con el SSC. Y sí, es triste», afirma Lockyer. «El carácter internacional de DUNE es un gran paso adelante», añade. Contar con el compromiso y la financiación de más de un país debería contribuir a que el destino de DUNE no sea el del SSC. «Yo creo que se construirá», dice Loycker. Aunque matiza: «Pero ¿podría no ser así? Sí».

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, diciembre de 2017

LA AUTORA

Clara Moskowitz es redactora de *Scientific American*. Cursó estudios de física y astronomía en la Universidad Wesleyan y cuenta con un título de posgrado en periodismo científico de la Universidad de California en Santa Cruz.

PARA SABER MÁS

Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) conceptual design report volume 2: The physics program for DUNE at LBNF. Colaboración DUNE. Disponible en arXiv, diciembre de 2015.

Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) conceptual design report volume 1: The LBNF and DUNE projects. Colaboración DUNE. Disponible en arXiv, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

IceCube: Astrofísica desde el hielo. Carlos Pérez de los Heros, en este mismo número.

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod, en este mismo número.

Un nuevo método para estudiar las oscilaciones de neutrinos. Helen O'Keefe en *lyC*, octubre de 2016.

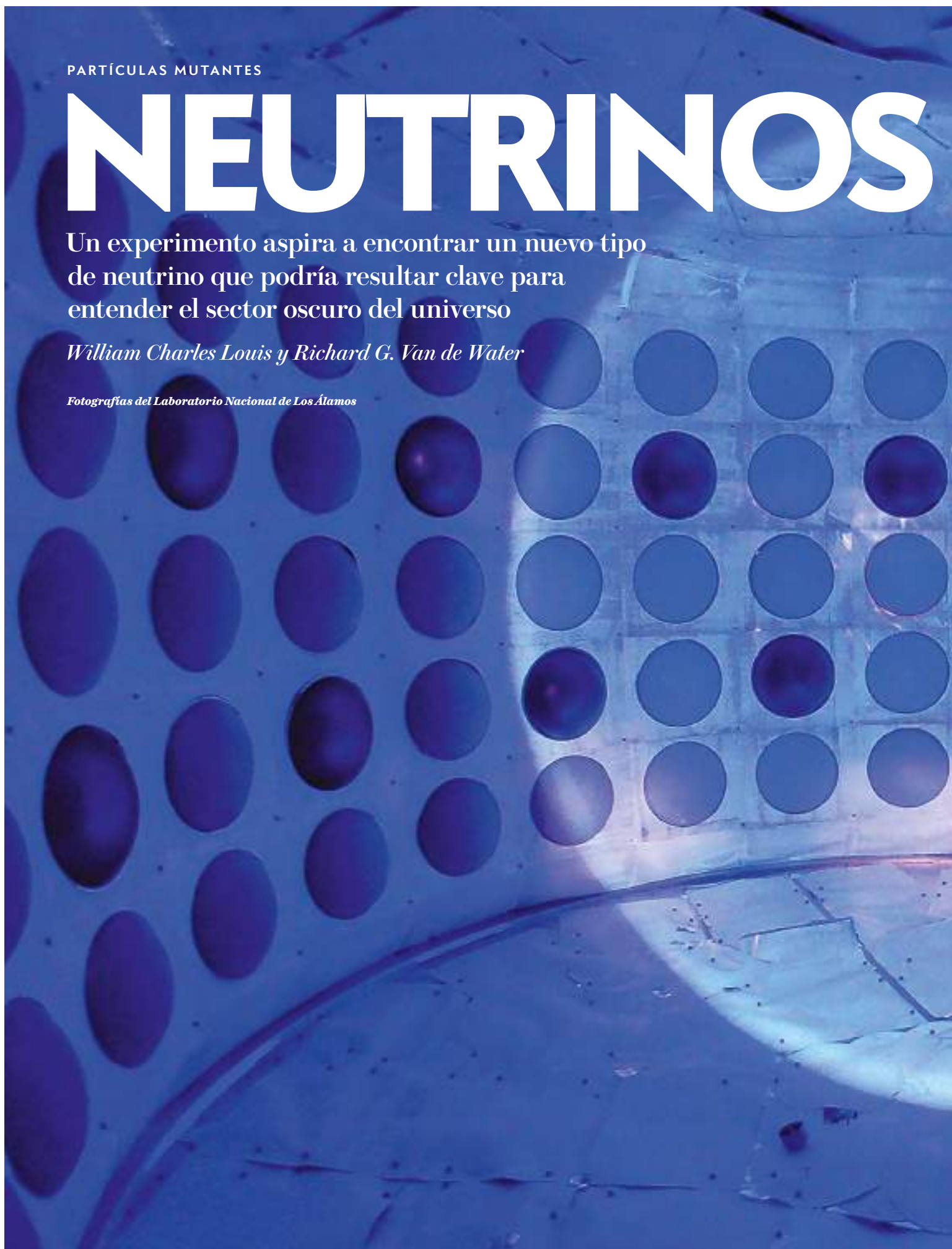
PARTÍCULAS MUTANTES

NEUTRINOS

Un experimento aspira a encontrar un nuevo tipo de neutrino que podría resultar clave para entender el sector oscuro del universo

William Charles Louis y Richard G. Van de Water

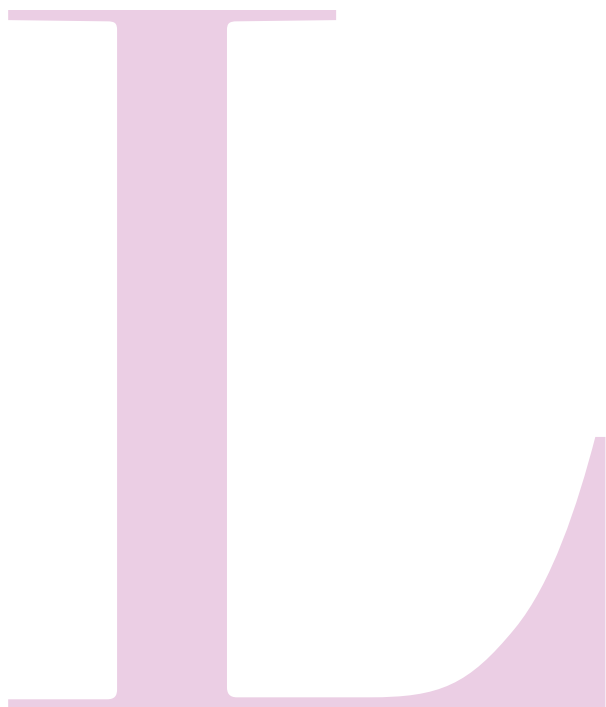
Fotografías del Laboratorio Nacional de Los Álamos



OCULTOS

The background image shows the interior of a large, cylindrical detector. The walls are covered in a grid of circular holes, which appear as dark, oval shapes. The lighting is dim and blue, with some faint red and orange glows visible in the lower left corner, possibly from a light source or a small fire. The overall atmosphere is mysterious and scientific.

Interior del detector del experimento Coherent CAPTAIN-Mills.



OS FÍSICOS QUE ASISTIERON A NUESTRA PRESENTACIÓN en la Conferencia Internacional de Física y Astrofísica de Neutrinos celebrada en 2010 en Atenas seguramente esperaban que nos desdijésemos de un controvertido hallazgo de la década anterior. Y, en vez de eso, los dejamos mudos de asombro.

Todo había comenzado en 1996, cuando publicamos unos datos obtenidos con el Detector de Neutrinos con Líquido Centellaador (LSND) del Laboratorio Nacional de Los Álamos, situado en Nuevo México. Esos resultados parecían entrar en conflicto con la idea generalmente aceptada de que los neutrinos (unas partículas diminutas y omnipresentes que atraviesan casi toda la materia) pueden ser de tres tipos o sabores, puesto que apuntaban a la posible existencia de un cuarto sabor aún no detectado. La comunidad científica se mostró escéptica y, de hecho, los datos preliminares de un experimento posterior hacían pensar que nuestros resultados de 1996 eran incorrectos: después de todo, no había un cuarto sabor de neutrino. Sin duda, aquel día en Atenas la audiencia esperaba que nuestros hallazgos más recientes desmintieran de una vez por todas los resultados del experimento LSND. Sin embargo, desvelamos que las pruebas a favor de un cuarto tipo de neutrino eran aún más convincentes.

No es que lo hubiéramos descubierto, pero nuestro trabajo en el experimento MiniBooNE (alojado en el Laboratorio Nacional Fermi, en Illinois) demostró que, casi con total seguridad, había un problema en nuestra manera de entender la física de partículas. Y la solución más plausible era que existiese un nuevo neutrino «estéril», llamado así porque no interaccionaría con el resto de la materia más que a través de la gravedad. Transcurrida una década desde nuestra presentación en Grecia, los datos de MiniBooNE han reforzado aún más la idea de que hay un cuarto tipo de neutrino.

En la actualidad, creemos que hay una probabilidad de más del 99,999999 por ciento de que exista algo más allá de la física conocida, y los neutrinos estériles son serios aspirantes a constituir ese algo. Aun así, la idea de que nuestros experimentos hayan detectado un cuarto neutrino sigue siendo controvertida, ya que el modelo estándar de la física de partículas —uno de los marcos teóricos mejor comprobados de la historia— solo admite tres sabores de neutrinos. No obstante, sabemos que el modelo estándar no es una teoría completa, ya que no explica la materia y la energía oscuras, las componentes invisibles que parecen dominar el cosmos. Y un nuevo sabor de neutrino podría aportar una conexión con ese territorio oculto. Tras años de incertidumbre, se están poniendo en marcha varios proyectos que podrían dilucidar este misterio, incluido nuestro propio experimento, llamado Coherent CAPTAIN-Mills (CCM).

¿QUÉ ES UN NEUTRINO ESTÉRIL?

Los neutrinos son partículas fantasmales. Billones de ellos nos atraviesan cada segundo, casi a la velocidad de la luz. Con todo, los neutrinos estériles serían aún más fantasmales: al no experimentar la fuerza electromagnética, la fuerte ni la débil (a través de las que interaccionan otras partículas), serían esencialmente indetectables. Eso los convertiría en parte de ese reino oculto que los físicos llaman el sector oscuro, donde habitan la energía y materia oscuras que representan el 95 por ciento de la den-

EN SÍNTESIS

Los neutrinos pueden ser de tres tipos o sabores. Pero algunos experimentos muestran indicios de un cuarto sabor, un neutrino «estéril» que no sentiría ninguna fuerza salvo la gravedad.

Si existen los neutrinos estériles, nos llevarán más allá del modelo estándar de la física de partículas y podrían proporcionar una conexión con la materia y energía oscuras.

Varios experimentos intentan verificar la existencia de los neutrinos estériles, como el Coherent CAPTAIN-Mills, que busca caídas en el número de neutrinos detectados a diferentes distancias de la fuente.

sidad de energía del universo. Los neutrinos estériles podrían interactuar con la materia oscura a través de fuerzas de la naturaleza aún desconocidas, y hasta podrían ser la materia oscura: algunas teorías afirman que estas partículas podrían conformar una parte o incluso la mayoría de la materia invisible del cosmos.

Si existiesen los neutrinos estériles, estaríamos ante la más reciente de las sorpresas que esta desconcertante familia de partículas ha deparado a los físicos. La primera llegó en la década de 1960, cuando los experimentos diseñados para detectar los neutrinos procedentes del Sol registraron muchos menos de los previstos. Todas las estrellas obtienen su energía a partir de reacciones de fusión nuclear en las que los protones se combinan para formar núcleos de helio, que a su vez se funden en elementos más pesados. Entre los productos de estas reacciones están los neutrinos electrónicos (uno de los tres sabores conocidos, junto con los neutrinos muónicos y los tauónicos). La teoría predice la llegada de un flujo continuo de esas partículas desde el Sol, pero los experimentos solo midieron una pequeña fracción del número esperado. Este déficit se bautizó como el problema de los neutrinos solares.

Al principio, muchos físicos supusieron que en realidad no entendíamos bien los procesos que tenían lugar en el Sol. Pero el verdadero problema resultó ser a la vez más simple y mucho más profundo: no es que el Sol emitiese menos neutrinos, sino que las partículas no llegaban a los detectores de la Tierra o, mejor dicho, cambiaban por el camino.

Los científicos acabaron comprendiendo que los neutrinos no son objetos puros: cada uno es una mezcla de todos los sabores y puede oscilar entre ellos durante su viaje. Este hallazgo resultó sorprendente por varias razones. Para empezar, el hecho de que los neutrinos cambien de sabor significa que no pueden ser partículas sin masa que viajan a la velocidad de la luz, como predice el modelo estándar. Esto es consecuencia de la teoría especial de la relatividad de Einstein, que afirma que el tiempo transcurre más lentamente para un objeto en movimiento que para uno en reposo. A medida que aumenta la velocidad del objeto, el tiempo se ralentiza, y acabaría por detenerse a la velocidad de la luz.

Eso implica que para una partícula que viaja a la velocidad de la luz, el tiempo parece congelado. Pero si los neutrinos alteran su sabor, están cambiando, por lo que experimentan el tiempo y tienen que moverse más despacio que la luz. Y según la relatividad especial, eso significa que deben tener masa, lo cual supone un problema para el modelo estándar. Los físicos Takaaki Kajita y Arthur B. McDonald recibieron el premio Nobel de física en 2015 por el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos [*véase «La resolución del problema de los neutrinos solares», por Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark; en este mismo número*].

SEÑALES SORPRENDENTES

Esta inesperada capacidad de los neutrinos para cambiar de sabor es lo que estábamos estudiando en las décadas de 1990 y

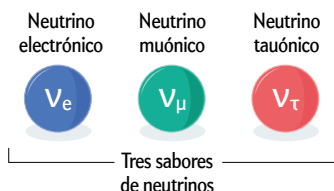
LOS NEUTRINOS ORDINARIOS

Sabores de neutrinos

Los neutrinos se cuentan entre las partículas más sorprendentes del universo. Poseen una masa muy pequeña (pero no nula, como se esperaba) y viajan casi a la velocidad de la luz, sin interactuar prácticamente nunca con el resto de la materia. Estas huidizas partículas ayudan a los científicos a entender algunas de las cuestiones más fundamentales de la física.

Las propiedades de los neutrinos

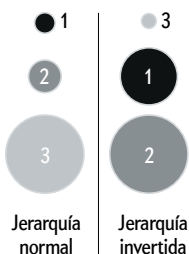
Hay tres tipos o sabores de neutrinos: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico.



Los sabores en realidad no son estados puros, sino una mezcla o superposición de tres posibles estados de masa.

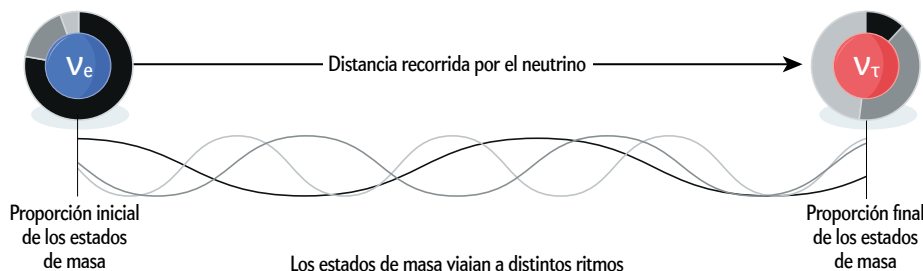


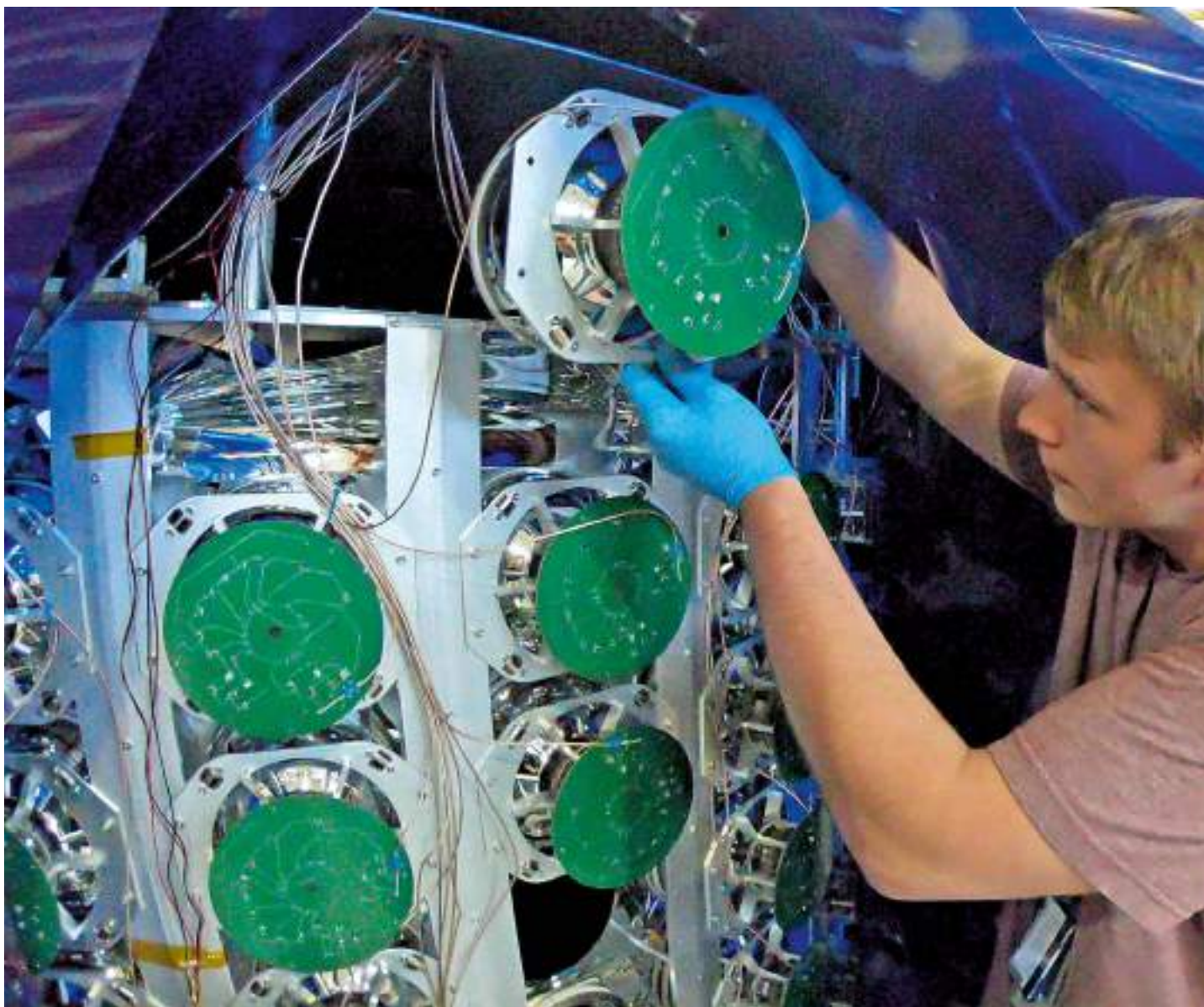
Aún no sabemos la masa de cada uno de esos estados, aunque las tres son diminutas. La teoría indica que, o bien hay dos masas muy pequeñas y una algo mayor (jerarquía normal), o al revés: una muy pequeña y dos algo mayores (jerarquía invertida).



Oscilación de sabores

Cuando un neutrino viaja a través del espacio, cada estado de masa lo hace a un ritmo ligeramente distinto. Con el tiempo, esa diferencia altera la mezcla de los estados de masa y hace que el neutrino cambie de sabor, en un proceso denominado oscilación. Así, una partícula puede comenzar como neutrino electrónico y acabar siendo un neutrino tauónico.





Un investigador del experimento Coherent CAPTAIN-Mills retira un tubo fotomultiplicador para reemplazarlo, como parte de una mejora del detector de neutrinos.

2000 (junto a otros físicos) con LSND y MiniBooNE cuando nos encontramos con persistentes indicios de la existencia de más neutrinos. Ambos experimentos empleaban aceleradores de partículas para generar un flujo continuo de neutrinos muónicos y registraban los neutrinos electrónicos mediante detectores situados a una determinada distancia.

Si pudiéramos acompañar a un neutrino que se desplaza libremente, veríamos que oscila de un sabor a otro, pasando por todos ellos de manera cíclica. Los sabores electrónico, muónico y tauónico serían observables, al menos en principio. Pero si existiera una variedad estéril, los neutrinos también podrían transformarse en ese cuarto sabor. Para un observador que viajara con la partícula, esta simplemente desaparecería durante una parte del vuelo. En el caso más sencillo, el neutrino reaparecería al cabo de un tiempo con uno de sus tres sabores normales,

aunque también existe la posibilidad teórica de que un neutrino estéril se desintegre y ponga fin al ciclo de oscilaciones.

Normalmente, las oscilaciones entre los tres sabores conocidos solo ocurren a lo largo de grandes distancias. Sin embargo, como es probable que los neutrinos estériles sean más masivos que los sabores ordinarios, las partículas podrían cambiar a esa nueva variedad (y luego volver a uno de los sabores normales) con más rapidez. Por lo tanto, si los neutrinos estériles existen, deberían acelerar el proceso de oscilación y reducir drásticamente la distancia que viaja, por ejemplo, un neutrino muónico antes de convertirse en electrónico.

Y eso es justamente lo que habíamos hallado en nuestros experimentos anteriores: que los neutrinos muónicos desaparecían mucho más deprisa de lo esperado al alejarse de su fuente y aparecían más neutrinos electrónicos de los previstos. Observamos oscilaciones para distancias de entre decenas y cientos de metros, en lugar de las decenas o cientos de kilómetros que anticipábamos. No debería ser posible que tantos neutrinos muónicos mutaran en neutrinos electrónicos en trayectos así



de cortos, a no ser que se estuviesen transformando en neutrinos estériles por el camino.

Nuestros experimentos no son los únicos que han arrojado resultados anómalos. Algunos detectores de neutrinos instalados cerca de reactores nucleares (los cuales generan neutrinos como subproducto, igual que el Sol) también aportan indicios de que algo no cuadra. Estos proyectos han detectado un número inesperadamente bajo de neutrinos, lo que sugiere que algunas partículas podrían haberse convertido en neutrinos estériles en su viaje desde el reactor. No obstante, estos resultados son más difíciles de interpretar, ya que los físicos no saben con certeza cuántos neutrinos se producen en los reactores de fisión. Por ello, registrar menos neutrinos de los previstos podría indicar la existencia de un cuarto sabor o, simplemente, que los científicos han sobreestimado la cantidad de partículas que deberían observar [véase «¿Producen los reactores nucleares neutrinos estériles?», por Alejandro Algorta y José Luis Taín; *en este mismo número*].

En Rusia, el Detector de Antineutrinos de Reactor basado en Centelleador Plástico de Estado Sólido (DANSS) trata de

El detector de neutrinos del proyecto Coherent CAPTAIN-Mills es extraído de su tanque, que se llena de argón líquido durante el experimento.

sortear estas incertidumbres. Este experimento se localiza bajo un reactor nuclear, pero los científicos varían la distancia entre el reactor y el detector de neutrinos cada pocos días, a fin de comprobar si los neutrinos electrónicos realmente están cambiando de sabor a medida que se alejan de su fuente. Con esta táctica, los investigadores pueden determinar si se producen oscilaciones a distancias cortas aun sin saber el número preciso de neutrinos que genera el reactor.

El enorme observatorio de neutrinos IceCube, una red de fotodetectores de un kilómetro cúbico de volumen enterrada en el hielo de la Antártida, también busca neutrinos estériles. La red registra la llamada radiación de Cherenkov, una señal luminosa originada cuando un neutrino de alta energía procedente de la atmósfera superior interacciona con el hielo y da lugar a una cascada de partículas. Estudiando esa radiación, los

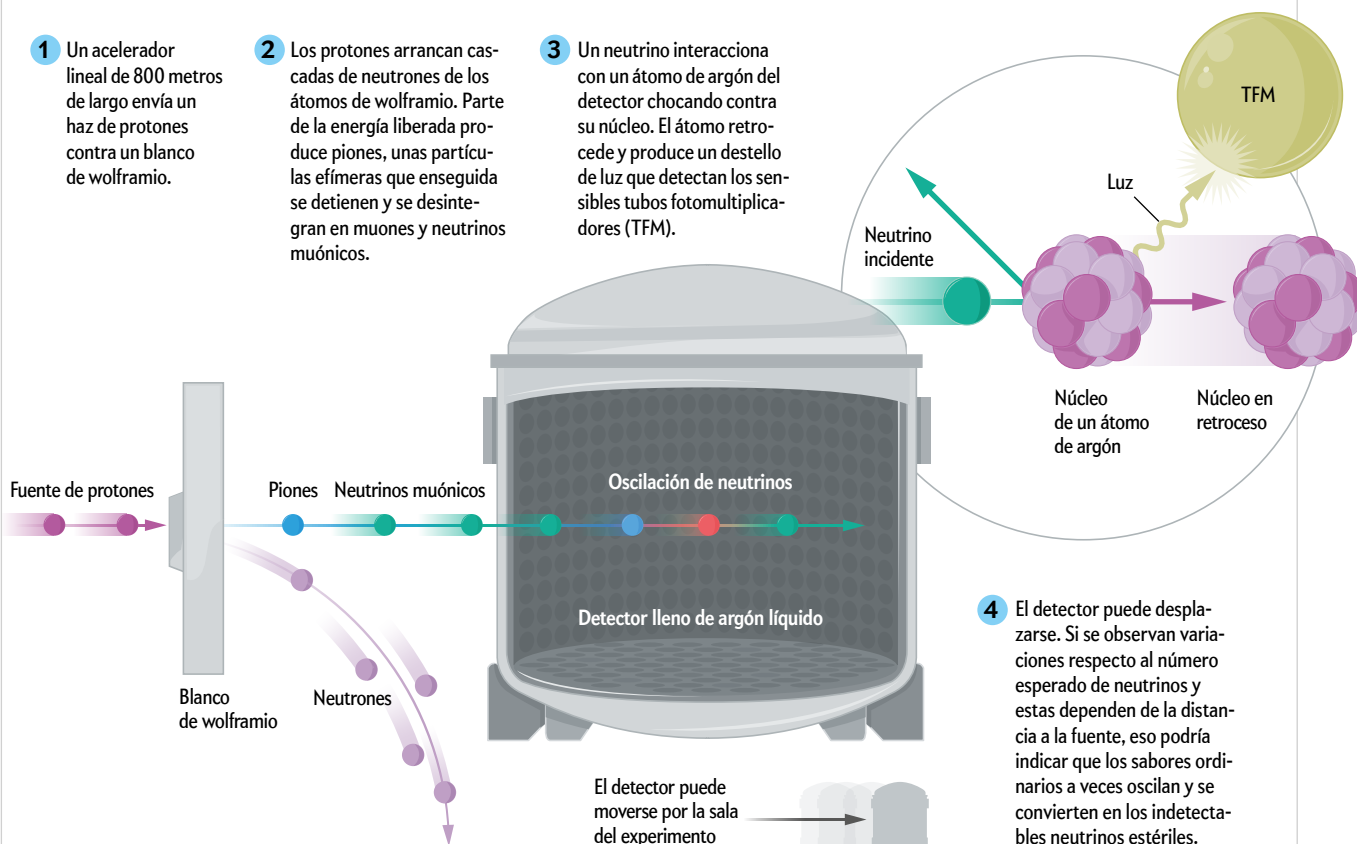
Contar neutrinos

El experimento Coherent CAPTAIN-Mills busca indicios de un cuarto sabor de neutrino: el neutrino estéril. Los sabores ordinarios interactúan muy raramente con otras partículas, pero los neutrinos estériles no lo harían nunca y solo se comunicarían con el resto del universo a través de la gravedad. Si existieran estas partículas, los neutrinos ordinarios podrían oscilar para convertirse en estériles, y viceversa. El experimento no detectará los neutrinos estériles, pero revelaría descensos en el número de neutrinos registrados a diferentes distancias, que indicarían que los neutrinos normales se tornan estériles y «desaparecen».

1 Un acelerador lineal de 800 metros de largo envía un haz de protones contra un blanco de wolframio.

2 Los protones arrancan cascadas de neutrones de los átomos de wolframio. Parte de la energía liberada produce piones, unas partículas efímeras que enseguida se detienen y se desintegran en muones y neutrinos muónicos.

3 Un neutrino interactúa con un átomo de argón del detector chocando contra su núcleo. El átomo retrocede y produce un destello de luz que detectan los sensibles tubos fotomultiplicadores (TFM).



4 El detector puede desplazarse. Si se observan variaciones respecto al número esperado de neutrinos y estas dependen de la distancia a la fuente, eso podría indicar que los sabores ordinarios a veces oscilan y se convierten en los indetectables neutrinos estériles.

científicos pueden conocer el tipo, la energía y la dirección de vuelo del neutrino que desencadenó el proceso [véase «IceCube: Astrofísica desde el hielo», por Carlos Pérez de los Heros; en este mismo número].

El equipo de IceCube acaba de publicar en el repositorio arXiv un análisis (basado en ocho años de datos) de los neutrinos que han llegado a sus detectores tras atravesar la Tierra. Este estudio buscaba indicios de la desaparición de neutrinos muónicos, la cual (de producirse) podría implicar la existencia de neutrinos estériles, en consonancia con los resultados de LSND y MiniBooNE. Sin embargo, no han hallado pruebas sólidas en ese sentido.

Los indicios a favor de los neutrinos estériles son intrigantes y sugerentes, pero aún no pueden considerarse decisivos. Los neutrinos que estudia IceCube poseen un amplio abanico de energías, lo cual complica el análisis de sus oscilaciones. Y en los experimentos con reactores resulta difícil distinguir los neutrinos que persiguen los investigadores de los neutrinos «de fondo», producidos por el Sol y por las desintegraciones radio-

activas de los materiales del detector, y que pueden enmascarar la señal buscada.

Algunos experimentos, como LSND y MiniBooNE, permiten conectar y desconectar los aceleradores que generan los neutrinos para determinar el ruido de fondo, pero siguen presentando limitaciones relacionadas con el hecho de que solo podamos buscar neutrinos en un pequeño intervalo de distancias. En general, los métodos que hemos usado hasta ahora para registrar neutrinos se han basado en grandes detectores inmóviles que reducían nuestra flexibilidad. Esos proyectos nos proporcionan un fotograma de la película, pero para comprender todo el argumento lo que necesitamos es una secuencia de fotogramas.

UNA ESTRATEGIA NOVEDOSA

Hay un nuevo tipo de experimentos que deberían permitirnos captar esos fotogramas. Como hemos mencionado, lo ideal sería viajar junto a un neutrino para ver cómo oscila. Aunque eso sea imposible, los nuevos experimentos ofrecen una manera de tomar instantáneas durante el proceso de oscilación, lo que

podría revelar huellas de los neutrinos estériles, si es que existen. Entre estos proyectos están el Programa de Neutrinos de Línea de Base Corta del Fermilab y el experimento CCM que estamos poniendo en marcha en Los Álamos.

Nuestro experimento se desarrolla en una sala del Centro de Ciencia de Neutrones de Los Álamos (LANSCE), al final de un acelerador de partículas de 800 metros de longitud que envía un haz de protones contra un blanco de wolframio. Cuando los protones impactan con los átomos de wolframio, arrancan una cascada de neutrones a través de un proceso llamado espalación. Parte de la energía liberada genera piones, unas partículas efímeras que enseguida se detienen y se desintegran en muones y (lo que es más importante para nuestros intereses) neutrinos muónicos con una energía muy concreta.

Los neutrinos se detectan mediante la dispersión coherente, un efecto basado en el hecho de que todas las partículas —y en particular los neutrinos— se comportan no solo como pequeñas canicas, sino también como ondas. Esta dualidad onda-corpúsculo es una de las piedras angulares de la mecánica cuántica. La longitud de onda asociada a una partícula depende de su energía: cuanto más energética sea (cuanto más deprisa se mueva), menor será su longitud de onda.

Cuando un neutrino con longitud de onda corta choca con un núcleo atómico, interacciona con uno solo de sus protones o neutrones. Pero si la energía del neutrino es lo bastante baja como para que su longitud de onda sea comparable al diámetro del núcleo, ocurre algo especial: el neutrino interacciona con todo el núcleo, en vez de hacerlo con un solo protón o neutrón. Podemos establecer una analogía con las olas que golpean un barco: un buque grande apenas se verá afectado por una serie de pequeñas ondas en el agua, pero una ola con gran longitud de onda en mar abierto lo elevará de manera espectacular. Así pues, los neutrinos con longitudes de onda largas interaccionan con el núcleo atómico como un todo, y la probabilidad de observar esta clase de impactos es mucho mayor a energías bajas.

Este tipo de dispersión se llama «coherente» porque la longitud de onda del neutrino es similar al tamaño del núcleo. Al recibir el golpe, el átomo retrocede. Si la interacción ocurre en un material adecuado, tal retroceso produce un pequeño destello de luz, mientras que el neutrino continúa su camino en una dirección ligeramente distinta a la que traía. Si captamos el destello con un detector muy sensible (un tubo fotomultiplicador), podemos saber dónde y cuándo se produjo la colisión, así como la energía cinética del átomo. Aunque la dispersión coherente no revela el sabor de cada neutrino dispersado, sí permite medir la suma de las interacciones de los tres sabores conocidos. Este hecho es crucial: si dicha suma no coincide con el número esperado de neutrinos, eso podría indicar la presencia de neutrinos estériles, que al no interaccionar con el argón no producirían destellos de luz.

Dado que en estos experimentos es más probable que el neutrino interaccione con todo un núcleo atómico que con uno solo de sus nucleones, podemos usar detectores más pequeños en vez de los colosales instrumentos que se precisaban en el pasado. Frente al tanque de 800 toneladas de aceite mineral de MiniBooNE, el detector del experimento CCM contiene solo 10 toneladas de argón líquido. Al ser un detector compacto, podemos desplazarlo y observar los neutrinos a diversas distancias de la fuente. Si las partículas sufren suficientes oscilaciones en las decenas de metros que mide la sala del LANSCE, observaremos que el número total de interacciones es menor

que el esperado, y que esta discrepancia varía con la distancia. Eso sería una prueba concluyente de que los neutrinos se están convirtiendo en neutrinos estériles. De hecho, con solo tres sabores no deberíamos ver oscilaciones a lo largo de distancias tan pequeñas.

Por supuesto, es posible que el experimento CCM no halle indicios de los neutrinos estériles. En ese caso, las observaciones de los neutrinos conocidos disminuirán de forma continua a medida que alejemos el detector del blanco de wolframio, igual que el brillo aparente de una bombilla se reduce conforme nos apartamos de ella.

No detectar neutrinos estériles sería decepcionante, pero no descartaría la posibilidad de que existan uno o más tipos de ellos. Lo que sí nos permitiría es acotar sus propiedades: dado que las oscilaciones dependen de las masas relativas de los neutrinos y de los llamados ángulos de mezcla, no encontrar signos de un cuarto sabor nos revelaría qué valores de estos parámetros son menos probables. De este modo, restringiríamos los intervalos a explorar en futuras búsquedas de los neutrinos estériles.

MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

A los físicos experimentales que presentan resultados en desacuerdo con el modelo estándar de la física de partículas se les suele considerar culpables hasta que se demuestre lo contrario, porque los científicos que han puesto en duda esta teoría en el pasado se han equivocado. No obstante, sabemos que el modelo estándar no es una teoría completa: las propias oscilaciones de los neutrinos son una prueba de ello.

Desde 1956, cuando Frederick Reines y Clyde Cowan (nuestros predecesores en Los Álamos) descubrieron los neutrinos, la investigación de estas partículas elementales ha dado lugar a nuevos y apasionantes avances en física. Aunque los neutrinos estériles siguen siendo un tema polémico 25 años después de que halláramos los primeros indicios de su existencia, los nuevos experimentos están a punto de resolver esta larga controversia, en un sentido o en otro. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, septiembre de 2020

LOS AUTORES

William Charles Louis es físico en el Laboratorio Nacional de Los Álamos y miembro de la Sociedad Americana de Física y de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia. **Richard G. Van de Water** es físico en el Laboratorio Nacional de Los Álamos y miembro de la Sociedad Americana de Física.

PARA SABER MÁS

Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment. Alexis A. Aguilar-Arevalo et al. en *Physical Review Letters*, vol. 121, n.º 22, art. 221801, noviembre de 2018.

Bounds on non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data. Sergei V. Demidov en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020, n.º 3, art. 105, marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod, en este mismo número.

El papel de los neutrinos en la evolución del universo. Licia Verde, en este mismo número.

El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz, en este mismo número.

¿Producen los reactores nucleares neutrinos estériles?

Una nueva técnica apunta a la resolución de un rompecabezas que desde hace una década ocupa a los físicos de neutrinos. Los resultados serán clave para interpretar los datos de futuros experimentos

Alejandro Algora y José Luis Taín

UNO DE LOS GRANDES OBJETIVOS DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL hoy en día consiste en buscar indicios de fenómenos que vayan más allá del modelo estándar, el esquema teórico empleado desde hace años por los físicos para describir todas las partículas elementales y sus interacciones. En esta carrera, un papel de especial relevancia lo desempeñan los neutrinos: esquivas partículas de masa ínfima y carentes de carga eléctrica.

La existencia del neutrino fue propuesta en los años treinta del siglo pasado por Wolfgang Pauli como posible solución al problema de la conservación de la energía en la desintegración beta, el proceso por el que un neutrón de un núcleo atómico se transforma espontáneamente en un protón, un electrón y —según la propuesta de Pauli— un antineutrino. Sin embargo, al tratarse de una partícula que apenas interacciona con las demás, su detección no llegó hasta un cuarto de siglo después. Esta se logró gracias a un experimento pionero efectuado en la central nuclear de Savannah River, en Carolina del Sur, por Clyde Cowan y Frederick Reines, quien en 1995 recibiría por ello el premio Nobel de física (Cowan falleció en 1974).

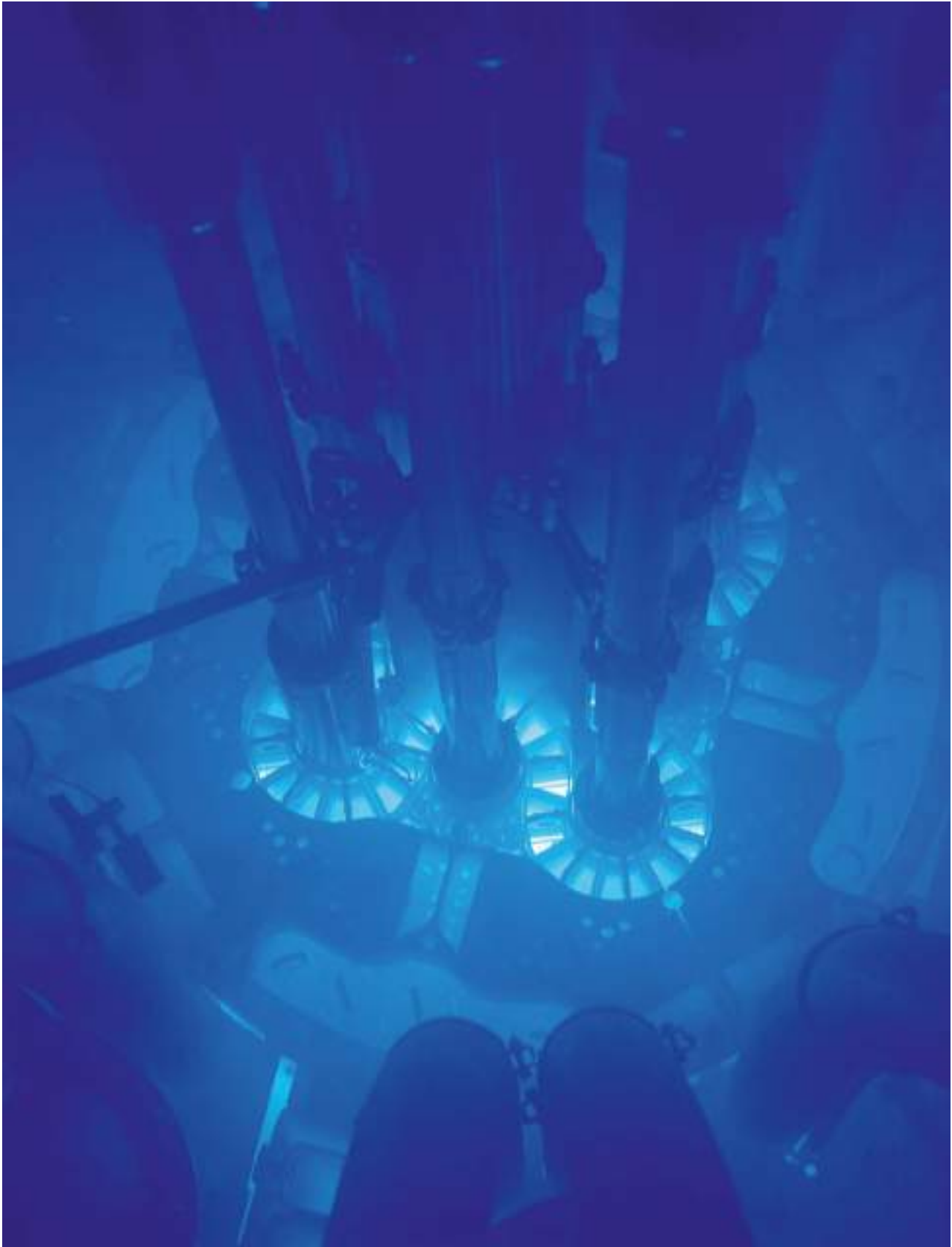
No es difícil entender por qué el experimento de Cowan y Reines se llevó a cabo en un reactor nuclear. La razón se debe a que estas instalaciones constituyen las mayores fuentes pacíficas de neutrinos jamás creadas por el ser humano. En una central moderna de un gigavatio de potencia, las reacciones nucleares

que tienen lugar en su interior emiten del orden de 10^{21} anti-neutrinos por segundo.

Hasta ahora, sin embargo, las características de los neutrinos generados por una central nuclear no coincidían por completo con las predicciones teóricas, un desacuerdo que a lo largo de los años ha dado lugar a interesantes elucubraciones. En un trabajo publicado el año pasado en *Physical Review Letters*, una colaboración internacional en la que ha participado nuestro grupo de investigación del Instituto de Física Corpuscular (IFIC) de Valencia ha conseguido un avance clave en la resolución del rompecabezas. Los resultados suponen un paso importante hacia una mejor comprensión de estas enigmáticas partículas y serán cruciales a la hora de interpretar los datos de experimentos futuros.

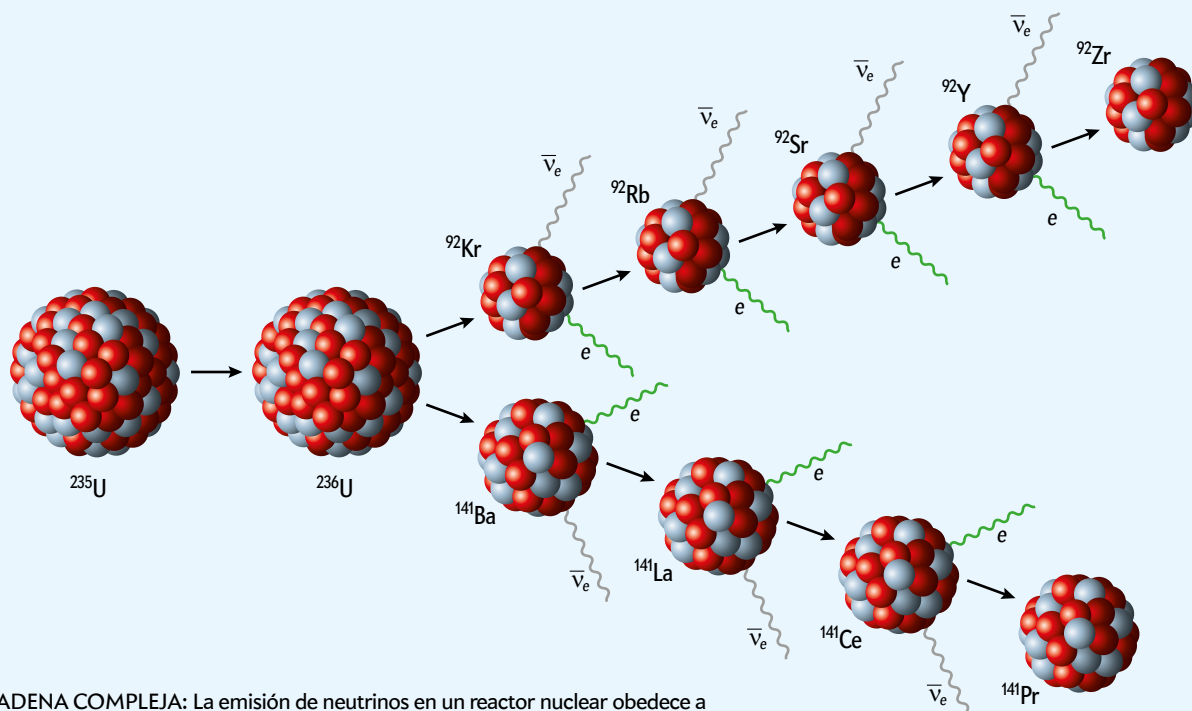
PARTÍCULAS DESCONOCIDAS

El modelo estándar contempla la existencia de tres tipos de neutrino: el electrónico, el muónico y el tauónico, en principio todos ellos sin masa. Sin embargo, a finales del siglo pasado se descubrió que los neutrinos de un tipo pueden transformarse espontáneamente en neutrinos de otro, un fenómeno conocido como «oscilación». La importancia de este hallazgo radica en que, según las leyes de la mecánica cuántica, dicho proceso solo puede tener lugar si los neutrinos tienen masa. Así pues, el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos obligó a abandonar



LABORATORIO NACIONAL DE ARGONNE, EEUU. [CC BY-SA 2.0]

NÚCLEO de un reactor nuclear experimental en el Laboratorio Nacional de Idaho, en Estados Unidos. Hace años que los físicos intentan conocer con precisión el espectro de neutrinos que emiten estas instalaciones.



CADENA COMPLEJA: La emisión de neutrinos en un reactor nuclear obedece a una serie de intrincados procesos muy difíciles de modelizar. Cuando un núcleo de uranio-235 se bombardea con neutrones (*no mostrados*), se transforma en un núcleo de uranio-236 que posteriormente se fisionará en otros núcleos más ligeros. Esta ilustración muestra uno de los múltiples canales de desintegración que puede seguir el proceso: los productos de fisión primarios (^{141}Ba y ^{92}Kr) sufren siete desintegraciones beta, en cada una de las cuales se emite un electrón (e) y un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$). En el proceso también se emiten varios neutrones adicionales (*no mostrados*).

la hipótesis de que estas partículas tenían masa nula y supuso una señal de física más allá del modelo estándar «tradicional».

El proceso de las oscilaciones de neutrinos queda descrito por varios parámetros. Estos son esencialmente las diferencias de los cuadrados de las masas que pueden asociarse a estas partículas, así como tres cantidades adicionales conocidas como «ángulos de mezcla». Determinar experimentalmente estos parámetros exige usar técnicas complementarias y muy ingeniosas.

Una de ellas se basa en usar aceleradores para generar un tipo concreto de neutrino, y luego detectar a una gran distancia de la fuente cuántas de las partículas originales se han transmutado en neutrinos de otra clase. Otros experimentos usan como fuente un reactor nuclear e intentan medir la probabilidad de «supervivencia» de los neutrinos generados en él; es decir, la probabilidad de que los (anti)neutrinos electrónicos producidos en el reactor recorran una cierta distancia sin transformarse en neutrinos muónicos o tauónicos.

En este tipo de experimentos, la detección de los neutrinos se basa en la desintegración beta inversa. En ella, un antineutrino electrónico es absorbido por un núcleo de hidrógeno (un protón), el cual se transforma en un neutrón y un positrón (la antipartícula del electrón). Sin embargo, la probabilidad de que se produzca esta reacción crece rápidamente con la energía del antineutrino, por lo que la eficiencia del proceso de detección es muy sensible al espectro de energías de los antineutrinos emitidos en el reactor. Por tanto, estos experimentos requieren

conocer con gran precisión cuántos neutrinos de cada energía se generan en una central nuclear.

En principio, dicho espectro puede calcularse si conocemos la composición inicial del combustible nuclear, la proporción de los distintos productos de fisión que se generan en el proceso (cada fisión de un átomo de combustible da lugar a otros isótopos radiactivos y a una cadena de múltiples desintegraciones beta) y la energía de los neutrinos asociados a cada uno de esos procesos. La pregunta es cómo obtener el espectro de neutrinos relacionado con cada isótopo fisible.

EL ENIGMA DE LOS NEUTRINOS AUSENTES

En los años ochenta se realizaron una serie de medidas en el reactor experimental del Instituto Laue-Langevin de Grenoble, las cuales permitieron determinar el espectro beta total emitido por los isótopos de combustible más relevantes (uranio-235, plutonio-239 y plutonio-241). Esos espectros beta totales se convirtieron después en espectros de neutrinos empleando la ley de conservación de la energía. No obstante, dicha conversión resulta compleja y obliga a hacer varias suposiciones adicionales.

En primer lugar, los espectros de neutrinos se compararon con los resultados de experimentos en los que la detección se había efectuado a muy poca distancia del reactor y donde, por tanto, no se habían registrado oscilaciones. Ese cotejo inicial entre los datos experimentales y los modelos de emisión fue considerado satisfactorio, lo que abrió la puerta a diseñar las

primeras mediciones de oscilaciones con detectores situados a mayor distancia de los reactores.

En 2011, sin embargo, dos grupos reevaluaron de forma independiente el método de conversión a partir de la información disponible en aquel momento. La gran sorpresa fue que, al comparar la predicción del flujo de antineutrinos basado en los nuevos cálculos con las medidas realizadas en reactores a distancias cortas, se encontró un déficit del 6 por ciento en el número de antineutrinos detectados. Dicho déficit se conoce desde entonces como «anomalía de neutrinos de reactor».

¿A qué podía deberse esa ausencia de neutrinos? Al respecto, una emocionante perspectiva apuntaba a la existencia de «neutrinos estériles». Este nuevo tipo de neutrino fue postulado hace tiempo como posibilidad teórica, ya que explicaría de manera natural el hecho de que los neutrinos ordinarios posean masa, al tiempo que proporcionaría un excelente candidato para dar cuenta de la materia oscura. Debe su nombre a que no experimentaría ninguna de las interacciones contempladas por el modelo estándar, por lo que no se observaría en los detectores.

Así pues, en caso de que algunos de los neutrinos generados en un reactor oscilasen para convertirse en neutrinos estériles, el resultado sería un déficit en la cantidad de neutrinos ordinarios detectados: justo lo que parecía indicar la anomalía. Esta ha ocupado desde entonces a los investigadores, puesto que se sumaba a los resultados de otros experimentos que también habían sugerido la existencia de neutrinos estériles.

PANDEMONIO NUCLEAR

No obstante, existen otras posibles explicaciones. Una de ellas es que el método de conversión mencionado anteriormente no sea del todo correcto. Por ello, resulta de gran interés buscar técnicas alternativas para llevar a cabo el cálculo de los neutrinos emitidos por una central nuclear.

Una opción es el llamado «método de la suma». Como su nombre indica, esta técnica se basa en sumar, con sus correspondientes pesos, el espectro de antineutrinos generado en cada desintegración beta que tiene lugar en un reactor. Para ello son necesarios varios datos, como la probabilidad de producir un determinado producto de fisión y la de cada desintegración beta posterior. Este objetivo puede parecer inalcanzable, ya que en un reactor se produce una enorme cantidad de productos de fisión (del orden de mil) y de desintegraciones beta distintas. Sin embargo, puede demostrarse que el 75 por ciento del espectro de neutrinos queda determinado por tan solo unas 50 desintegraciones. De esta manera, si identificamos las desintegraciones beta más relevantes y las medimos de la manera adecuada, podremos encontrar una descripción del espectro de neutrinos de un reactor alternativa a la que proporciona el método de conversión.

Con este objetivo en mente, y en colaboración con otros grupos, nuestro equipo de investigación ha estudiado durante más de una década las desintegraciones beta más relevantes para la física de reactores. Las medidas se han llevado a cabo en el Separador de Isótopos en Línea con Guía de Iones (IGISOL) de la Universidad de Jyväskylä, en Finlandia, el cual proporciona haces de gran pureza de los isótopos radiactivos de interés. Pero la principal mejora ha sido el uso de la técnica de «absorción total», en la cual nuestro grupo del IFIC es considerado un experto mundial.

Esta técnica proporciona datos de las desintegraciones beta libres del llamado «efecto Pandemonio»: un error sistemático

en este tipo de experimentos asociado a la baja eficiencia de los detectores empleados habitualmente. Su denominación obedece al nombre que recibía la capital del infierno en la obra *El paraíso perdido*, del poeta inglés John Milton. En 1977, varios investigadores bautizaron así el efecto para recalcar la extrema complejidad de las desintegraciones beta, lo que conduce a la pérdida de información si estas no se estudian mediante las técnicas apropiadas.

Gracias al método de la suma, nuestro trabajo ha demostrado que el espectro de antineutrinos de la central nuclear de Daya Bay, en China, coincide con los cálculos con una precisión de hasta el 2 por ciento. La nueva técnica proporciona la mejor descripción disponible de la emisión de neutrinos por parte de un reactor nuclear y cuestiona la existencia de la anomalía que durante años había intrigado a los expertos.

NUEVAS APLICACIONES

El método de la suma presenta varias ventajas. Una de ellas es que puede aplicarse a cualquier combinación de combustible nuclear, por lo que podría usarse en el seguimiento de los planes de no proliferación de armas atómicas. La composición del combustible usado en una central nuclear es muy distinta de la que se necesita para fabricar armamento. Y dado que el nuevo método abre la puerta a desentrañar lo que ocurre en el interior de una instalación nuclear a partir del análisis de los neutrinos que esta emite, en un futuro podría permitir la construcción de detectores para localizar manipulaciones ilegales de combustible nuclear con fines armamentísticos.

Por otro lado, disponer de un conocimiento detallado del espectro de neutrinos emitido por un reactor será clave para los experimentos de oscilaciones de nueva generación. Uno de ellos será el Observatorio Subterráneo de Neutrinos de Jiangmen (JUNO), en el sur de China, el cual se espera que comience a operar en 2021 y que intentará determinar la llamada «jerarquía de masas» de los neutrinos; es decir, cómo se ordenan sus distintos estados de masa. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, marzo de 2020

LOS AUTORES

Alejandro Algora y José Luis Tañá investigan en el Instituto de Física Corpuscular, un centro mixto del CSIC y la Universidad de Valencia.

PARA SABER MÁS

Reactor antineutrino anomaly. G. Mention et al. en *Physical Review D*, vol. 83, art. n.º 073006, abril de 2011.

Improved predictions of reactor antineutrino spectra. Th. A. Mueller et al. en *Physical Review C*, vol. 83, art. n.º 054615, mayo de 2011.

Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors. P. Huber en *Physical Review C*, vol. 84, art. n.º 024617, agosto de 2011.

Updated summation model: An improved agreement with the Daya Bay antineutrino fluxes. M. Estienne et al. en *Physical Review Letters*, vol. 123, art. n.º 022502, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

En busca de la última transformación de los neutrinos. Inés Gil Botella, Pau Novella Garijo y Marco Cerrada Canals en *IyC*, diciembre de 2011.

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod, en este mismo número.

El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz, en este mismo número.

Los neutrinos y el cosmos

NASA, ESA, ISO, D. LENNON AND E. SABBI (ESA/STSC), J. ANDERSON, S. E. DE MINK, R. VAN DER MAREL, T. SOHN, AND N. WALBORN (STSC), N. BASTIAN (EXCELLENCE CLUSTER, MUNICH), L. BEDIN (INAF-PADUA), E. BRUSSERT (ESO), P. CROWTHER (SHEFFIELD), A. DE KOTER (AMSTERDAM), C. EVANS (UKAT/STFC - EDINBURGH), A. HERRERO (IAC, TENERIFE), N. LANGER (MFA, BONN), I. PLATAIS (JHU) AND H. SANA (AMSTERDAM)

La nebulosa de la Tarántula, en la Gran Nube de Magallanes, albergó la primera explosión de supernova cuyas emisiones de neutrinos se detectaron en la Tierra.



LOS NEUTRINOS Y EL COSMOS

ICECUBE.

El telescopio de neutrinos más grande del mundo opera desde el Polo Sur. Uno de sus objetivos consiste en hallar pruebas de la existencia de materia oscura, la masa invisible del universo

Carlos Pérez de los Heros

ASTROFÍSICA DESDE EL HIELO



A LA LUZ DE LA LUNA: El laboratorio de IceCube inmerso en la noche polar, de seis meses de duración.

EN SÍNTESIS

Los neutrinos apenas interaccionan con la materia, por lo que pueden recorrer grandes distancias cósmicas sin ser absorbidos. Un telescopio de neutrinos permite «ver» fenómenos imposibles de observar con un telescopio óptico.

Con un volumen de detección que abarca un kilómetro cúbico, IceCube es el mayor detector de neutrinos del mundo. Sus 5160 módulos ópticos se encuentran sumergidos en el hielo del Polo Sur, junto a la base Amundsen-Scott.

IceCube detecta neutrinos procedentes de los fenómenos más violentos del universo. También participa en la búsqueda de materia oscura, la misteriosa sustancia invisible que compone la mayor parte de la masa del universo.



«**D**IOS TODOPODEROSO, ESTE LUGAR ES HORRIBLE», ESCRIBIÓ EL OFICIAL ROBERT Falcon Scott al llegar al Polo Sur, el 17 de enero de 1912. Tras dos meses y medio de penosa travesía desde la costa antártica, Scott y sus hombres hubieron de resignarse a encontrar allí la bandera noruega que la expedición de Roald Amundsen había izado un mes antes. Cien años después de aquella odisea, la base polar Amundsen-Scott se ha convertido en un centro científico que hospeda varios proyectos astrofísicos de envergadura. Entre ellos, IceCube, un telescopio de neutrinos de un kilómetro cúbico de tamaño.

Con una temperatura media de 30 grados Celsius bajo cero en verano, inaccesible y en noche perpetua durante los seis meses de invierno, el Polo Sur tal vez no parezca el lugar más idóneo para construir un detector de neutrinos. Añádanse a tales condiciones unas comunicaciones precarias —debido a que la mayoría de los satélites describen órbitas cuasiecuatoriales, no polares— y el hecho de que todo cargamento debe ser transportado en avión ante la imposibilidad de hacerlo por tierra, y la logística necesaria para erigir un proyecto del calibre de IceCube adquiere proporciones descomunales. Sin embargo, decenas de científicos de varios países hemos dedicado más de una década a diseñar y construir IceCube precisamente allí, en el Polo Sur geográfico. ¿Qué convierte al lugar más frío y seco del planeta en un emplazamiento tan especial para la física de neutrinos?

Para responder a esa pregunta debemos repasar brevemente la historia del descubrimiento del neutrino. Hacia los años treinta del siglo xx, numerosos experimentos parecían indicar que ciertas desintegraciones radiactivas violaban el principio de conservación de la energía: la masa del núcleo resultante más la energía de las partículas emitidas era inferior a la masa del núcleo original. Aunque la conservación de la energía constituye uno de los pilares fundamentales de toda teoría física, en aquella época solo había sido verificada empíricamente en fenómenos macroscópicos. ¿Podía ocurrir que en algunos procesos del micromundo la energía no se conservase? Físicos de la talla de Niels Bohr llegaron a especular sobre semejante posibilidad.

Pero, en 1930, Wolfgang Pauli, por entonces profesor de física en el Instituto Politécnico de Zúrich, propuso una elegante solución al problema. Según esta, la energía sí se conservaba en los procesos microscópicos; sin embargo, en las desintegraciones observadas se emitía una partícula neutra y sin masa que, como tal, no podía ser detectada por los aparatos al uso. Dicha partícula, que más tarde recibiría el nombre de neutrino, portaría la energía que faltaba para ajustar los cálculos. Pero, para que tal solución fuera viable, la probabilidad de que un neutrino interaccionase con la materia ordinaria debía resultar extremadamente pequeña. Ello lo convertía en una partícula muy difícil de detectar.

Hubieron de transcurrir más de 25 años para comprobar que la propuesta de Pauli era correcta; así de esquivo es el neutrino. A finales de 1955, Frederick Reines y Clyde Cowan, del Laboratorio Nacional de Los Álamos, llevaron a cabo un ingenioso experimento en las cercanías de un reactor nuclear. Según la hipótesis de Pauli, una central nuclear debería emitir un intenso flujo de neutrinos (en realidad, antineutrinos), procedentes de la desintegración de los núcleos inestables generados en la fisión

del combustible. Para detectarlos, Reines y Cowan llenaron un tanque con una mezcla de agua y líquido centelleador, lo rodearon de fotomultiplicadores y lo emplazaron a once metros del núcleo del reactor. La interacción de un antineutrino con uno de los protones de las moléculas de agua debía producir un neutrón y un positrón; un proceso similar a la desintegración beta del neutrón, pero en sentido inverso. Inmediatamente después, el positrón entraría en contacto con uno de los electrones del agua, por lo que ambas partículas se aniquilarían y se convertirían en rayos gamma (radiación electromagnética de alta energía). Por último, estos provocarían la emisión de destellos de luz en el líquido centelleador, los cuales serían detectados por los fotomultiplicadores.

El experimento de Reines y Cowan dio sus frutos. Poco después, los investigadores mejoraron el diseño original para detectar asimismo el neutrón emitido en la interacción; pero el resultado quedó claro desde el principio: se estaba observando un flujo de neutrinos, ya que existía una diferencia notable en el número de reacciones detectadas cuando el reactor estaba encendido y cuando se encontraba apagado. Además, el cálculo de la probabilidad de interacción concordaba con lo que cabía esperar a partir de las características físicas propuestas para el neutrino.

Hoy sabemos que los neutrinos son partículas elementales (sin subestructura conocida), carentes de carga eléctrica y que únicamente experimentan la atracción gravitatoria y la interacción nuclear débil. Esta última, responsable de las desintegraciones de los elementos inestables de la tabla periódica, es unas 10.000 veces menos intensa que la interacción electromagnética, lo cual explica que los neutrinos resulten tan difíciles de detectar. Existen tres tipos de neutrinos: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico. Estas especies solo se diferencian en el valor de su masa, que, aunque extremadamente pequeña, no es nula, como en un principio había supuesto Pauli. La física de neutrinos ha desempeñado un papel fundamental para ayudarnos a entender las interacciones entre partículas elementales y la evolución del universo joven, desde la gran explosión hasta la formación de las primeras macroestructuras. Sin neutrinos, el cosmos sería un lugar muy distinto del que conocemos.

MENSAJEROS DEL UNIVERSO LEJANO

Sin embargo, la misma propiedad que hace que los neutrinos resulten tan difíciles de detectar los convierte en incomparables mensajeros astronómicos. Dado que apenas interaccionan con la materia, estas partículas no solo escapan con facilidad de cualquier cuerpo celeste en el que hayan sido generadas, sino que pueden recorrer enormes distancias cósmicas sin ser

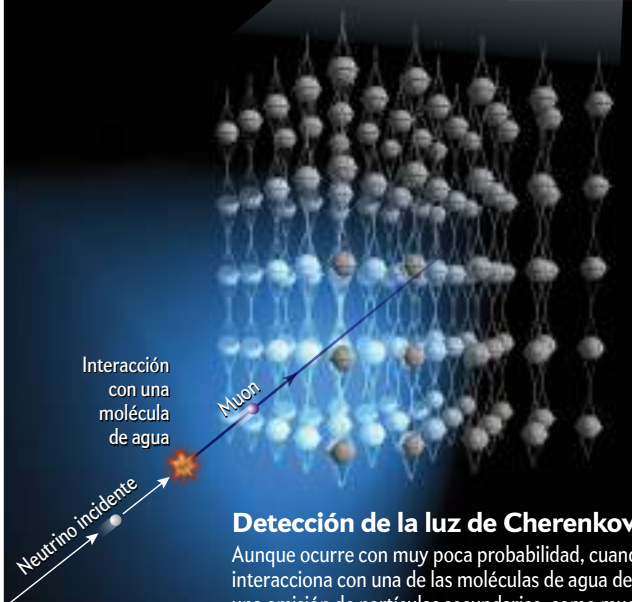
Un kilómetro cúbico de hielo para detectar neutrinos

Los **neutrinos** son partículas elementales carentes de carga eléctrica y que apenas interaccionan con la materia. Se espera que sean generados en gran cantidad de fenómenos astrofísicos, como las explosiones de rayos gamma o en las emisiones de agujeros negros supermasivos. Constituyen excelentes mensajeros astronómicos, ya que pueden recorrer enormes distancias cósmicas sin ser absorbidos por el camino. Sin embargo,

resultan extremadamente difíciles de detectar, por lo que para observarlos es necesario construir dispositivos gigantescos.

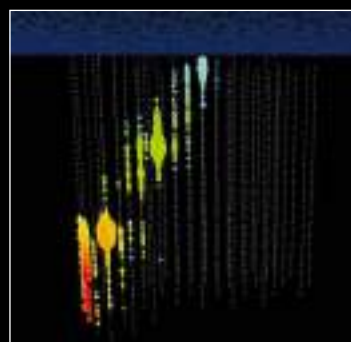
El telescopio de neutrinos IceCube (*abajo*), en el Polo Sur, consta de miles de módulos ópticos enterrados bajo el hielo. Su volumen de detección abarca un kilómetro cúbico, lo que lo convierte en el primer observatorio capaz de detectar neutrinos de muy alta energía.

IceCube consta de 86 agujeros de profundidad kilométrica excavados en el hielo del Polo Sur, cada uno de los cuales alberga 60 módulos ópticos espaciados a distancias regulares.



Detección de la luz de Cherenkov

Aunque ocurre con muy poca probabilidad, cuando un neutrino interacciona con una de las moléculas de agua del hielo se produce una emisión de partículas secundarias, como muones. Si la velocidad de estos supera a la de la luz en el hielo, se emite un frente de onda electromagnético conocido como luz de Cherenkov (*cono azul*). Gracias a la gran transparencia del hielo antártico, dicha radiación puede ser detectada por los módulos ópticos (*esferas*).



Reconstrucción de la trayectoria del neutrino

A partir de la luz de Cherenkov emitida por las partículas secundarias, los sistemas informáticos reconstruyen la energía y la trayectoria del neutrino incidente. La imagen muestra la traza generada por un muon al atravesar IceCube. El tamaño y el color de cada burbuja representan la cantidad de luz detectada y el tiempo relativo de cada señal (los tonos rojizos indican el inicio de la trayectoria; los azules, los instantes posteriores).

absorbidas en el camino. Los fotones interactúan con mucha mayor probabilidad con todo tipo de materia, por lo que numerosos objetos astronómicos resultan opacos al paso de la luz. Un «telescopio de neutrinos», en cambio, nos permitiría «ver» más allá que cualquier telescopio óptico.

Las primeras ideas para escudriñar el cielo en busca de neutrinos fueron propuestas en los años sesenta. Su objetivo consistía en estudiar algunos de los fenómenos más violentos del universo, como los núcleos activos de galaxias o las explosiones de rayos gamma. En ellos, los neutrinos no son generados en desintegraciones radiactivas, sino a partir de haces de materia acelerada y eyectada a enormes velocidades. Los neutrinos así producidos pueden poseer cualquier energía; en particular, varios órdenes de magnitud superior a la de los neutrinos procedentes de las desintegraciones nucleares, de unos pocos megaelectronvoltios (MeV).

Esos mismos procesos cósmicos emiten también radiación electromagnética de muy alta energía, por lo que los flujos de neutrinos y rayos gamma se encuentran correlacionados. Así, a partir de algunos de los parámetros que caracterizan una galaxia activa o una explosión de rayos gamma, pueden derivarse límites sobre el flujo de neutrinos que debería llegar hasta la Tierra. Este resulta ser muy débil: no más de unos pocos neutrinos por kilómetro cuadrado al año. En consecuencia, hacer astrofísica de neutrinos requiere emplear dispositivos gigantescos.

Ya en la década de los setenta quedó claro que se necesitarían detectores de un kilómetro cúbico de tamaño; un reto que superaba con creces las posibilidades técnicas de la época. Tres decenios después, ha sido el esfuerzo conjunto de más de 300 científicos de 40 universidades y laboratorios de EE.UU., Alemania, Suecia, Bélgica, Canadá, Japón, Nueva Zelanda, Suiza y el Reino Unido lo que ha hecho posible IceCube, el primer telescopio de neutrinos de altas energías de un kilómetro cúbico de tamaño.

La detección de neutrinos con energías del orden del gigaelectronvoltio (GeV) o superiores se realiza por métodos indirectos basados en la luz de Cherenkov. Esta radiación es emitida cuando una partícula con carga eléctrica atraviesa un material a una velocidad mayor que la de la luz en dicho medio. Aunque la velocidad de la luz es máxima en el vacío, en el interior de un medio óptico su propagación se ralentiza debido a las continuas interacciones entre los fotones y los átomos del material. Por tanto, en el seno de un medio sí puede ocurrir que algunas partículas muy energéticas se desplacen más rápido que la luz. En tal caso, la radiación de Cherenkov surge como consecuencia del frente de onda producido por el reordenamiento instantáneo de los átomos del material al paso de una partícula dotada de carga eléctrica (un fenómeno similar al que tiene lugar con las ondas de presión cuando un avión rompe la barrera del sonido).

Aunque ocurre con muy poca probabilidad, cuando un neutrino interactúa con un átomo, se producen varias partículas secundarias como consecuencia del choque. Si se trata de un neutrino muónico, una de ellas será un muon (una partícula elemental con la misma carga que el electrón, pero unas 200 veces más masiva). En los casos en los que el neutrino incidente posee una energía muy elevada, el muon sale despedido en una dirección muy similar a la de aquel. Por tanto, si somos capaces de reconstruir la trayectoria del muon, podremos «apuntar» hacia la dirección del cielo desde la que llegó el neutrino; es decir, podremos hacer astrofísica. La detección de los muones se realiza a partir de la radiación de Cherenkov que estos emiten, la cual es registrada por una serie de fotomultiplicadores posicionados de la manera adecuada. Por supuesto, todo el

proceso ha de transcurrir en el seno de un material transparente que permita que la luz de Cherenkov llegue hasta los fotomultiplicadores.

Si se trata de neutrinos electrónicos o tauónicos, las partículas producidas en la colisión serán un electrón o una partícula tau (una versión pesada del muon). Aunque estos también emiten radiación de Cherenkov, la traza que dejan en los detectores resulta demasiado corta para reconstruir con fiabilidad la trayectoria del neutrino incidente. Ello se debe a que los electrones pierden energía con gran rapidez; los tauones, por su parte, poseen una vida media muy breve (del orden de 10^{-15} segundos) y se desintegran con gran rapidez en otras partículas. Aunque en IceCube hemos desarrollado técnicas para analizar las trazas que los neutrinos electrónicos y tauónicos generan en las proximidades del detector, en lo que sigue nos ceñiremos a la detección de neutrinos muónicos.

Los primeros observatorios de neutrinos de gran tamaño, como el detector Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB, en Michigan) o el japonés Kamiokande, ambos ya fuera de servicio, constaban de enormes tanques llenos de varias toneladas de agua purificada y rodeados de fotomultiplicadores. Esos detectores se emplazaron en grandes cavernas, perforadas ex profeso para protegerlos de los muones atmosféricos. Estos muones, generados en la atmósfera terrestre debido al continuo bombardeo de los rayos cósmicos, resultan indistinguibles de los muones producidos a partir de la interacción con un neutrino, por lo que uno de los objetivos principales a la hora de construir un detector de neutrinos consiste en reducir su exposición a los muones atmosféricos. Sin embargo, la construcción de observatorios en minas subterráneas o en túneles bajo montañas impone serias limitaciones al tamaño del dispositivo. El mayor observatorio de neutrinos construido en una caverna excavada a tal efecto es el detector Super-Kamiokande, en Japón. Este consta de un recipiente cilíndrico de acero, de 39 metros de diámetro por 42 de alto, que aloja 50.000 toneladas de agua ultrapura. A pesar de que lleva 16 años funcionando de manera satisfactoria, su tamaño restringe la clase de observaciones que pueden efectuarse, ya que no basta para detectar neutrinos de altas energías.

NEUTRINOS BAJO EL HIELO

Excavar un kilómetro cúbico de roca resulta sencillamente imposible. Esta dificultad nos trae de nuevo al Polo Sur y al innovador diseño de IceCube: en vez de llenar un tanque con agua, se emplea el hielo de la Antártida como material transparente. A tal fin se han excavado varios agujeros de profundidad kilométrica, espaciados a intervalos regulares y en cuyo interior se han dispuesto varios módulos ópticos. Ello permite abarcar un volumen de detección de un kilómetro cúbico sin tener que cavar un nicho de tales dimensiones. El grosor del glaciar del Polo Sur asciende a unos 2800 metros. Salvo en otras regiones de la Antártida y en Groenlandia, no existe en la Tierra ninguna otra capa de hielo de espesor semejante.

Además, debido a las grandes presiones que reinan a esas profundidades, el aire que en circunstancias normales habría quedado atrapado en forma de burbujas microscópicas dispersas (las mismas que confieren a los cubitos de nuestros congeladores un aspecto blanquecino) ha acabado fusionado en la estructura cristalina del hielo. En consecuencia, el hielo de la Antártida constituye uno de los materiales más transparentes que se conocen. Estas circunstancias convierten al Polo Sur en un lugar idóneo para construir un telescopio de neutrinos: allí disponemos de un material muy transparente que permite que



1



2



3



4



5

DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE ICECUBE, entre 2005 y finales de 2010, se excavaron 86 agujeros de 60 centímetros de diámetro y unos 2500 metros de profundidad para instalar en ellos más de 5000 módulos ópticos. Vista aérea del campamento de perforación de IceCube (1). Tres módulos ópticos listos para las últimas pruebas de laboratorio antes de ser enviados al Polo Sur (2). Un avión Hércules LC130 con esquíes descargando parte del equipo de perforación (3). Un módulo óptico se fija al cable principal, momentos antes de ser enviado a las profundidades (4). Comienzo de un viaje de 2000 metros hacia el interior del hielo antártico (5).

la luz de Cherenkov se propague sin problemas, con el grosor adecuado para enterrar el detector y reducir el flujo de muones atmosféricos, y cerca de una base científica en la que instalar la infraestructura necesaria.

Debido a su diseño, IceCube no es un detector compacto, sino que consta de una serie de módulos ópticos que conforman una red tridimensional. Cada módulo cuenta con un fotomultiplicador acoplado a los instrumentos electrónicos necesarios para leer la señal, todo ello protegido por una esfera de cristal de 50 centímetros de diámetro. Estos dispositivos se hallan conectados al laboratorio por medio de un cable que proporciona los 1400 voltios necesarios para su funcionamiento, al tiempo que transmite las señales del fotomultiplicador a los ordenadores encargados de reconstruir la trayectoria del muon.

Cada módulo óptico registra el instante en que detecta un destello de luz de Cherenkov. Para ello, los módulos se calibran desde la superficie, a fin de mantener una sincronización continua entre su reloj interno y un sistema GPS matriz con una precisión de una milmillonésima de segundo. Al conocer la localización de cada módulo y el instante en que se detecta

una señal, los equipos informáticos reconstruyen la trayectoria del muon y, a partir de ella, deducen la dirección del neutrino incidente. Dado que, dependiendo de su energía, los muones pueden atravesar desde decenas hasta miles de metros de hielo, IceCube puede detectar neutrinos en un intervalo de energías muy amplio, desde algunas decenas de GeV hasta el petaelectronvoltio (un millón de GeV).

Durante la construcción de IceCube se excavaron decenas de agujeros de 60 centímetros de diámetro y 2450 metros de profundidad. Para derretir el hielo se empleó agua a 90 grados, inyectada a presión a través de una manguera que proporcionaba 760 litros por minuto. Cada agujero tardó en perforarse unas 35 horas. Después, en cada uno de ellos se insertó un cable con 60 módulos ópticos, separados entre sí por una distancia vertical de 17 metros; una operación de unas 10 horas de trabajo. Al cabo de unos días, el agua derretida volvió a congelarse, tras lo cual el cable y los módulos ópticos quedaron fijos.

Mediante varios sensores de presión sumergidos con cada cable, puede conocerse la profundidad a la que ha quedado enterrado cada uno de los módulos ópticos. Dado que la posición

EXPERIMENTOS

Pero... ¿dónde están los neutrinos?

Las explosiones de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés) constituyen uno de los procesos más violentos que se conocen en el universo. En apenas unos segundos, pueden emitir una cantidad de energía equivalente a la que radiará el Sol durante toda su vida. Se han observado explosiones de este tipo en galaxias lejanas distribuidas de manera uniforme por todo el cielo. De media, desde la Tierra se detecta una GRB al día. Aunque tal vez parezca una frecuencia elevada, corresponde a una explosión cada millón de años en una galaxia típica.

El origen de tales explosiones plantea serios problemas, ya que resulta muy difícil imaginar procesos que liberen una cantidad de energía semejante en tan poco tiempo. Uno de los modelos más populares es el denominado «bola de fuego»; un nombre que no debe interpretarse de manera literal. Este postula la existencia de un sistema inicial que, dotado de una enorme densidad de materia y energía, se expande a velocidades cercanas a la de la luz. Aunque su naturaleza dista mucho de estar clara (como posibles candidatos se barajan desde explosiones de hipernovas hasta colisiones entre agujeros negros y estrellas de neutrones), un sistema de tales características podría radiar grandes cantidades de rayos gamma.

Además, la materia en expansión emitiría también protones de muy alta energía, lo cual explicaría asimismo el origen de los rayos cósmicos más energéticos detectados hasta la fecha. Los rayos cósmicos se componen de partículas procedentes del espacio exterior que alcanzan la atmósfera terrestre. Con energías que en ocasiones llegan a superar el exaelectronvoltio (10^9 GeV, un millón de veces superiores a las alcanzadas en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN), su procedencia continúa planteando un enigma.

¿Podría el modelo de bola de fuego explicar a un tiempo las explosiones de rayos gamma y la procedencia de los rayos cósmicos más energéticos? Según dicha hipótesis, la materia acelerada durante la explosión debería interaccionar entre sí y provocar una cascada de reacciones en las que se generarían piones, muones y neutrinos. Por tanto, las explosiones de rayos gamma deberían ir acompañadas de la emisión de neutrinos de alta energía. En 2012, IceCube se unió a los esfuerzos internacionales para entender tales fenómenos.

A partir de datos tomados entre abril de 2008 y mayo de 2010 (cuando la construcción del detector aún no se había completado), IceCube llevó a cabo una búsqueda de neutrinos en coincidencia espaciotemporal con 307 GRB detectadas durante dicho período. No se halló ningún flujo anómalo sobre el esperado debido a los neutrinos atmosféricos, lo cual permitió imponer límites bastante estrictos sobre algunos de los parámetros libres que caracterizan

al modelo de bola de fuego. Según estos resultados, o bien los protones emitidos durante una GRB no bastan para dar cuenta del flujo de rayos cósmicos de alta energía, o bien las suposiciones del modelo que predicen una emisión de neutrinos deben ser revisadas.

Al recibir el premio Nobel de física en 1936, Victor Hess, considerado el descubridor de los rayos cósmicos, puso énfasis en que, para progresar en el estudio de estos, sería necesario emplear «todos nuestros recursos y aparatos de manera simultánea». Más de 75 años después, el origen de los rayos cósmicos continúa siendo un misterio, pero sin duda estamos aplicando todos los medios a nuestro alcance para resolverlo.



Recreación artística de una explosión de rayos gamma.

del cable sobre la superficie es conocida, ello permite determinar las tres coordenadas espaciales de cada módulo con una precisión de centímetros; una condición imprescindible para reconstruir con fiabilidad la trayectoria de los muones. IceCube consta de 86 columnas de módulos ópticos, separadas por una distancia típica de 125 metros. En total, se han enterrado 5160 módulos a una profundidad de entre 1450 y 2450 metros. Dado que, una vez colocados, los módulos no pueden recuperarse para ser reparados o sustituidos, su diseño debe ser simple y robusto. Los módulos ópticos de IceCube fueron contruidos para aguantar un mínimo de 20 años en las condiciones extremas del hielo profundo. La esfera de cristal que rodea cada uno de ellos presenta un grosor de tres centímetros, puesto que debe soportar presiones de hasta 600 atmósferas.

La construcción de IceCube comenzó en 2005 y se extendió hasta diciembre de 2010. Se necesitaron 181 vuelos en aviones Hércules LC130 para transportar unas 10.000 toneladas de material hasta la base Amundsen-Scott. A ella solo puede accederse entre mediados de octubre y febrero, cuando las condiciones atmosféricas permiten mantener vuelos diarios con la estación de McMurdo, situada en la costa del mar de Ross, a 1300 kilómetros de distancia. A fin de excavar el máximo número de agujeros durante esos cuatro meses y acelerar el proyecto, se instaló una central eléctrica de 5 megavatios de potencia. Como el lector puede imaginar, trabajar a temperaturas de entre 30 y 40 grados bajo cero y a una altitud de unos 3000 metros añade dificultades de todo tipo, tanto fisiológicas y humanas como en lo que respecta al comportamiento de los materiales y la maquinaria.

El hecho de que IceCube haya sido construido para explorar el cielo constituye su única similitud con un telescopio tradicional. Una de las diferencias más llamativas reside en que IceCube mira «hacia abajo»; es decir, hacia el centro de la Tierra. Ello se debe a que, incluso a las profundidades a las que se encuentran los módulos ópticos, aún llegan muones atmosféricos a través del hielo, por lo que IceCube utiliza la Tierra como filtro. Gracias a los programas informáticos adecuados, se registran solo los muones que cruzan el detector «desde abajo». Dado que las únicas partículas que pueden atravesar el planeta son los neutrinos, un muon que llegue al detector desde la dirección del horizonte o con un ángulo mayor solo puede proceder de un neutrino que atravesó la Tierra e interactuó en la vecindad del detector. Por tanto, al estar localizado en el Polo Sur, IceCube explora el cielo del hemisferio norte. En los últimos años se han desarrollado métodos para filtrar los datos procedentes de muones atmosféricos, lo cual ha hecho de IceCube un detector adecuado para estudiar todo el cielo. Dichas técnicas se basan en rechazar los muones que llegan al detector pero que han sido producidos fuera de su volumen. Estos últimos, sin embargo, pueden incluir tanto muones atmosféricos como otros generados por neutrinos de alta energía, por lo que, al excluir todos ellos, el intervalo de energías al cual el experimento es sensible se ve reducido para aquellos neutrinos provenientes del hemisferio sur celeste.

IceCube no puede apuntar en una dirección del cielo determinada, sino que gira con la Tierra. No obstante, a diferencia de los telescopios tradicionales, IceCube nos permite examinar todo el cielo de forma continua, ya que puede detectar neutrinos procedentes de cualquier dirección en todo momento. Los programas informáticos que analizan sin cesar las señales registradas por los módulos ópticos extraen la dirección de cada uno de los muones que atraviesan el detector. A tal fin, 300 ordenadores situados en el laboratorio de IceCube, en la base Amundsen-Scott, realizan un análisis preliminar de las señales

procedentes de los módulos ópticos y los datos de calibración del detector, lo que supone unos 700 gigaoctetos de información al día. Después esos datos se filtran, tratando de conservar los sucesos que se consideran más interesantes, como aquellos que corresponden a una región del cielo de particular interés o a una energía determinada. La cantidad de información se reduce así a unos 100 gigaoctetos al día, los cuales se transmiten por satélite a un centro de análisis de datos en Madison, en Estados Unidos. Desde allí, los datos se ponen a disposición de todos los miembros de la colaboración para proceder a un estudio más exhaustivo.

CIELOS OSCUROS

En un principio, IceCube fue concebido para escudriñar el cielo en busca de neutrinos de alta energía y estudiar con ellos los objetos más lejanos del universo. Sin embargo, puede también emplearse para estudiar la materia oscura, la misteriosa sustancia que hoy sabemos que constituye el 85 por ciento de toda la materia que existe en el universo.

Los primeros indicios relativos a la existencia de un tipo de materia invisible datan de los años treinta del siglo xx, cuando dos estudios independientes mostraron la universalidad del problema. El primero de ellos, realizado en 1932 por el astrónomo holandés Jan Oort, analizó la velocidad de rotación de las estrellas en los brazos exteriores de la Vía Láctea. El segundo, efectuado por el suizo Fritz Zwicky un año después, estudió la velocidad de las galaxias del cúmulo de Coma, un grupo de unas mil galaxias localizadas a 320 millones de años luz de la Tierra. En ambos casos, la conclusión fue idéntica: ni las estrellas de la Vía Láctea ni las galaxias del cúmulo de Coma se movían como cabría esperar a partir de la atracción gravitatoria ejercida por la masa observada en esos sistemas. De hecho, numerosas estrellas de las observadas por Oort presentaban velocidades tan elevadas que hubieran debido salir despedidas de la Vía Láctea. Fue Zwicky quien acuñó el término «materia oscura» para referirse a esa materia invisible pero necesaria para explicar las observaciones. Hoy contamos con pruebas que apuntan a la existencia de materia oscura en todas las galaxias estudiadas y también en el medio intergaláctico. Pero, si bien los datos se muestran robustos y han sido obtenidos por métodos independientes y a escalas muy distintas, la naturaleza de la materia oscura continúa siendo un misterio.

El problema principal reside en que no puede tratarse de materia ordinaria en forma de nubes de gas frío, planetas o estrellas muertas (enanas marrones, estrellas de neutrones o agujeros negros). Tales objetos se componen, en esencia, de protones, neutrones y electrones. Sin embargo, hoy sabemos que el número de partículas de ese tipo que fueron creadas durante la gran explosión no bastan para dar cuenta de toda la materia oscura observada en el universo. Su cantidad puede calcularse a partir de las abundancias de hidrógeno, helio y deuterio primordiales, medidas con gran precisión a lo largo de la última década. Esos resultados muestran que, si toda la materia oscura se compusiese de partículas ordinarias, el universo no sería tal y como lo observamos hoy. En tal caso, sus primeros estadios se habrían caracterizado por una densidad mucho mayor. Dado que la eficiencia de una reacción nuclear depende de la temperatura y densidad del plasma, la síntesis de elementos ligeros habría transcurrido con mayor rapidez y sus cantidades relativas diferirían mucho de las observadas en la actualidad. Por tanto, resulta imposible suponer que en el universo primigenio se creó una cantidad adicional considerable de protones y neutrones

sin vernos obligados a extraer conclusiones irreconciliables con su estructura actual.

La hipótesis adoptada por la mayoría de los físicos consiste en suponer que la materia oscura se encuentra formada por un tipo de partícula aún desconocida. Aunque todavía no hemos logrado detectarla, resulta posible deducir varias de sus propiedades: no puede experimentar los efectos de la interacción electromagnética (es decir, ha de ser neutra, ya que de lo contrario podría emitir o absorber fotones), debe interactuar muy débilmente con la materia ordinaria y, a fin de dar cuenta de los efectos gravitatorios observados, su masa ha de ser elevada, entre decenas o centenares de veces mayor que la masa del protón [véase «Mundos oscuros», por Jonathan Feng y Mark Trodden; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011].

Dichas partículas reciben el nombre genérico de WIMP, siglas inglesas de «partículas masivas que interactúan débilmente». Se cree que tales partículas serían estables y que habrían sido creadas en grandes cantidades durante la gran explosión que dio origen a nuestro universo. Más tarde se habrían agregado en cúmulos, a partir de los cuales se gestaron, por atracción gravitatoria, las galaxias que hoy pueblan el cosmos. Según este modelo, las WIMP formarían en la actualidad grandes halos, invisibles pero muy masivos, que afectarían al movimiento de las galaxias y a la materia visible. Sin embargo, dado que interactúan muy débilmente con las partículas ordinarias, no habrían alterado la evolución del universo primitivo ni las reacciones nucleares en las que se sintetizaron los elementos ligeros.

Aunque elegante, una solución de este tipo podría considerarse demasiado ad hoc como para otorgarle relevancia científica. Al fin y al cabo, se limita a desviar el problema de entender el origen de la materia oscura al de detectar una nueva partícula elemental que, por lo demás, no desempeñaría ninguna otra función en la estructura general del cosmos. En cierto modo, nos encontramos en una situación muy similar a aquella en la que se encontraba Pauli hace ochenta años: la necesidad de postular la existencia de una partícula casi imposible de detectar para salir de un atolladero experimental.

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS AL RESCATE

Sin embargo, aquí la física de partículas acude en nuestro auxilio por medio de una vía inesperada: ciertas teorías que tratan de generalizar el modelo estándar de las interacciones fundamentales predicen la existencia de partículas de tipo WIMP, una aparente coincidencia que ha dado en llamarse «milagro WIMP». Así pues, algunas de las nuevas partículas que los físicos teóricos necesitan para completar su descripción del micromundo reúnen las características necesarias para resolver uno de los problemas más acuciantes del macrocosmos, la materia oscura. Una casualidad difícil de ignorar.

Aunque son varias las teorías que predicen la existencia de partículas de tipo WIMP, aquí solo mencionaremos dos. Una de ellas es la supersimetría, propuesta hace varios decenios para resolver ciertos problemas conceptuales del modelo estándar. A grandes rasgos, esta hipótesis implica duplicar el número de

DETECCIÓN DE WIMP

Neutrinos y materia oscura

Hoy sabemos que en torno al 85 por ciento de toda la materia existente en el universo es materia oscura: una misteriosa sustancia que no absorbe ni emite luz, y cuyo único efecto observable consiste en el poderoso arrastre gravitatorio que ejerce sobre estrellas y galaxias. Se

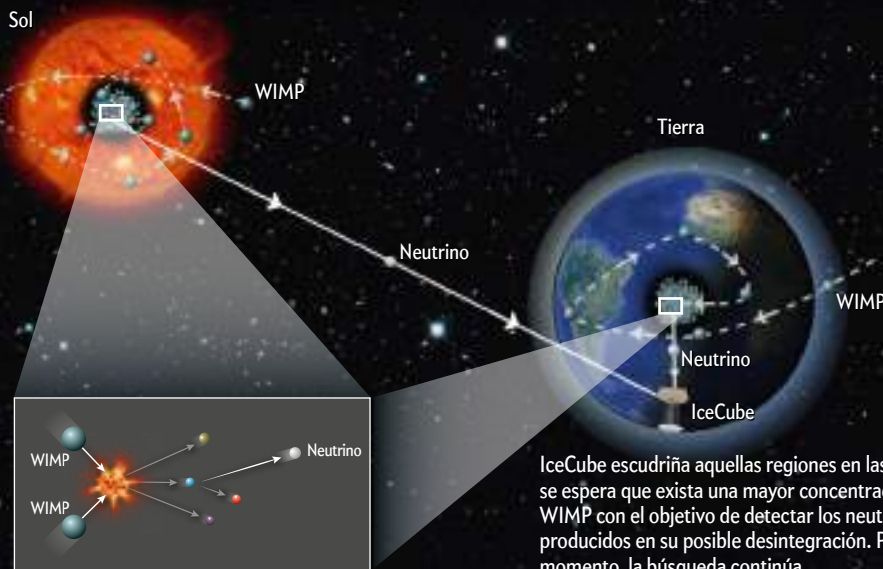
cree que los gigantescos halos de materia oscura que envuelven a las galaxias se componen de un gas de partículas elementales aún por descubrir.

Las partículas de materia oscura poseerían una gran masa, carecerían de carga eléctrica y solo experimentarían

los efectos de la interacción débil. Reciben el nombre genérico de WIMP, siglas inglesas de «partículas masivas que interactúan débilmente». IceCube se ha unido a los esfuerzos internacionales para detectar indicios de su existencia y desentrañar su naturaleza.

Debido a la atracción gravitatoria, las WIMP formarían agregados más densos en aquellas regiones que contienen una gran cantidad de materia ordinaria, como el centro galáctico, el interior del Sol o el centro de nuestro planeta.

Varias propuestas teóricas predicen que las WIMP podrían ser su propia antipartícula, por lo que la colisión fortuita entre dos de ellas conduciría a su aniquilación. La energía liberada en ese proceso generaría una cascada de partículas de otras clases; entre ellas, neutrinos.



IceCube escudriña aquellas regiones en las que se espera que exista una mayor concentración de WIMP con el objetivo de detectar los neutrinos producidos en su posible desintegración. Por el momento, la búsqueda continúa.

partículas elementales: por cada partícula conocida, la supersimetría predice la existencia de otra con la misma carga eléctrica y características similares, pero cuyo espín difiere en $1/2$. Ninguna de esas partículas ha sido detectada todavía; por tanto, para que dicho esquema resulte compatible con los experimentos, las partículas supersimétricas deberían poseer una masa elevada y desintegrarse con gran rapidez. Así ocurriría con todas ellas, salvo con una: la más ligera de todas. La teoría predice que la partícula supersimétrica más ligera debe ser estable, neutra y con una masa comprendida entre unos pocos y miles de GeV; además, interactuaría muy débilmente con la materia ordinaria. Justo las propiedades que se atribuyen a las WIMP.

Otras teorías que proporcionan una WIMP aceptable son aquellas que postulan la existencia de dimensiones suplementarias del espacio, adicionales a las tres que nos revela nuestra experiencia cotidiana. En caso de existir, esas dimensiones extra deberían poseer una longitud microscópica, ya que de lo contrario experimentaríamos sus efectos. Ello abre la posibilidad a que existan partículas que solo «viven» en esas dimensiones, pero que, al poseer masa, ejercen efectos gravitatorios sobre nuestras tres dimensiones habituales. Una de dichas partículas debe también ser estable y, por tanto, constituye una buena candidata a WIMP.

En vista de lo anterior, los halos de materia oscura de las galaxias estarían compuestos por un gas de WIMP. Dicho gas no se distribuiría de manera uniforme: por efecto de la atracción gravitatoria, cabe esperar una acumulación de WIMP en aquellas regiones de la galaxia que cuentan con una mayor densidad de materia ordinaria, como el centro galáctico. Un efecto parecido podría ocurrir también en el sistema solar; al fin y al cabo, el Sol constituye una concentración considerable de materia en una región que, por lo demás, se encuentra casi vacía (la estrella más cercana a nosotros, Proxima Centauri, se halla a 4,2 años luz de distancia). Algunas WIMP permanecerían atrapadas en órbitas alrededor del Sol y, al interactuar con la materia ordinaria, perderían velocidad y quedarían confinadas en el interior del astro. A lo largo de los 4000 millones de años de vida del sistema solar, tales procesos habrían provocado la acumulación de cierta cantidad de materia oscura en el interior del Sol. Algo similar podría ocurrir también en el interior de los planetas más masivos; en particular, también en la Tierra.

En cualquier caso, ya sea en el centro galáctico, en el Sol o en el interior de nuestro planeta, una mayor concentración de WIMP incrementa la probabilidad de que dos de ellos colisionen entre sí. Y aquí nos encontramos con otro de los aspectos del milagro WIMP: en la mayoría de las teorías que predicen su existencia, partícula y antipartícula son idénticas, algo posible en el caso de partículas neutras. Por tanto, la colisión entre dos WIMP puede conducir a su aniquilación y la subsiguiente creación de partículas elementales de otras clases. Un gran número de ellas serían inestables y se desintegrarían inmediatamente en partículas de otro tipo; entre ellas, neutrinos. Esta posibilidad nos permite emplear un telescopio de neutrinos en la búsqueda de materia oscura.

Ese constituye precisamente uno de los objetivos que perseguimos en IceCube: «miramos» al Sol, al interior de la Tierra, al halo y al centro de la Vía Láctea en busca de un exceso de neutrinos sobre el flujo conocido de neutrinos atmosféricos. Hasta ahora no hemos detectado indicios de la aniquilación de WIMP. Sin embargo, tales resultados nulos revisten gran utilidad en física. Las teorías supersimétricas presentan un gran número de parámetros libres, lo cual se presta a escoger múltiples combinaciones, todas ellas válidas desde un punto de vista

matemático. Por tanto, la única manera de discriminar entre ellas consiste en contrastar sus predicciones con los resultados experimentales. En nuestro caso, aquellos modelos que predigan que la cantidad de WIMP capturadas en el Sol produciría un flujo de neutrinos que no ha sido observado por IceCube pueden descartarse. Con todo, aún existen modelos que predicen un flujo demasiado exiguo como para que IceCube hubiera podido detectarlo en el tiempo que lleva tomando datos. Estos continuarán siendo válidos hasta que sus predicciones se vean descartadas por los experimentos: un claro ejemplo del método científico en funcionamiento.

En su configuración final, IceCube comenzó a tomar datos a finales de 2011, y se prevé que continúe haciéndolo durante al menos una década. En estos momentos se barajan varias ideas para extender el intervalo de energías a las que el detector es sensible. El umbral energético depende de la separación entre las columnas de módulos ópticos: son los 125 metros de distancia que median entre una y otra los que determinan la mínima energía detectable de un neutrino, que en estos momentos ronda los 100 GeV. Para reducir esa cota, 8 de las 86 columnas ya se han colocado a 40 metros de distancia. Aunque ocupan un volumen muy inferior a un kilómetro cúbico, ese núcleo de módulos ópticos, más denso, permite detectar neutrinos con energías de unos 20 GeV.

A fin de reducir aún más dicho umbral, se está estudiando la posibilidad de añadir unos 20 cables en el centro del detector, con una distancia mutua de 20 metros y una separación vertical entre módulos ópticos de apenas unos metros. Este subdetector, bautizado como PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade) lograría detectar neutrinos con energías de hasta 1 GeV. Ello abriría las puertas a emplear el hielo de la Antártida para observar supernovas, medir las oscilaciones de neutrinos (la metamorfosis espontánea por la que un tipo de neutrino se transforma en otro durante su propagación), además de posibilitar la búsqueda de WIMP con masas inferiores a las que podemos detectar hoy.

Durante las próximas décadas, desde el desierto más seco, frío e inhóspito de la Tierra, los físicos continuaremos aprovechando el hielo de la Antártida para seguir acumulando estadística y entender mejor lo que los neutrinos pueden decirnos sobre el universo lejano y la materia oscura. La astrofísica de neutrinos no ha hecho más que empezar. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, marzo de 2013

EL AUTOR

Carlos Pérez de los Heros es profesor en el Departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Uppsala y miembro de la colaboración IceCube.

PARA SABER MÁS

Search for dark matter from the galactic halo with the IceCube Neutrino Telescope. Colaboración IceCube en *Physical Review D*, vol. 84, 022004, 29 de julio de 2011.

Multiyear search for dark matter annihilations in the Sun with the AMANDA-II and IceCube detectors. Colaboración IceCube en *Physical Review D*, vol. 85, 042002, 22 de febrero de 2012.

An absence of neutrinos associated with cosmic-ray acceleration in gamma-ray bursts. Colaboración IceCube en *Nature*, vol. 484, 19 de abril de 2012. Página web del proyecto IceCube: www.icecube.wisc.edu

EN NUESTRO ARCHIVO

Neutrinos para observar el cosmos. G. B. Gelmini, A. Kusenko y T. J. Weiler en *lyC*, julio de 2010.

El papel de los neutrinos en la evolución del universo

Varios estudios han propuesto que la existencia de neutrinos «estériles» podría explicar algunas observaciones cosmológicas. No todos los expertos están de acuerdo

Licia Verde



DISCREPANCIA CÓSMICA: La abundancia de cúmulos de galaxias (en la imagen, el cúmulo de Pandora) calculada a partir del fondo cósmico de microondas no parece coincidir con la observada en el universo actual. Para algunos físicos, ello apunta a la existencia de nuevas partículas elementales. Otros abogan por un reanálisis más cuidadoso de los datos cosmológicos.

MÁS DE MEDIO SIGLO DESPUÉS DE SU HALLAZGO EXPERIMENTAL, los neutrinos siguen siendo unos grandes desconocidos. Sabemos que se crean en algunos tipos de reacciones nucleares, como las que instantes después de la gran explosión dieron lugar a los primeros núcleos atómicos del universo o las que, hoy en día, hacen brillar el Sol. Sin embargo, carecen de carga eléctrica y apenas interaccionan con la materia, por lo que resultan extremadamente difíciles de detectar. De los 80.000 cuatrillones ($8 \cdot 10^{28}$) de neutrinos que, cada segundo, atraviesan la Tierra procedentes del Sol, nuestro planeta solo intercepta uno o dos. Ello se debe a que estas partículas subatómicas solo experimentan la fuerza de la gravedad y, a escalas microscópicas, la interacción nuclear débil. Por esa razón, con frecuencia han sido apodadas «partículas fantasma».

El modelo estándar de la física de partículas, la teoría matemática que describe el mundo subatómico y sus interacciones,

contempla la existencia de tres tipos de neutrinos, todos los cuales han sido detectados experimentalmente. No obstante, hay un problema que aún persiste: por un lado, la versión tradicional del modelo estándar supone que los neutrinos carecen de masa; por otro, existen indicios experimentales muy claros de que su masa, aunque pequeña, no es cero.

En particular, desde hace unos años sabemos que los neutrinos «oscilan»; es decir, que los de un tipo pueden transmutarse espontáneamente en neutrinos de otro. Y las reglas de la mecánica cuántica implican que, para que ello ocurra, los neutrinos han de tener masa. El consenso entre los físicos es que el modelo estándar debe ampliarse para dar cabida a este fenómeno. Son varios los mecanismos que se han propuesto para explicar la masa del neutrino, si bien los expertos aún ignoran cuál es el correcto [véase «[Mensajeros fantasmales de nueva física](#)», por Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod; en este mismo número]. Uno de ellos postula la existencia de neutrinos «esté-

riles», una nueva familia que no experimentaría la interacción nuclear débil.

EL UNIVERSO COMO DETECTOR

A pesar de su interés, el valor exacto de la masa de los neutrinos aún no ha podido determinarse experimentalmente. No se trata de una cuestión puramente académica. Además de obligar a una revisión del modelo estándar, la masa de los neutrinos afecta a otras áreas de la física. Por ejemplo, estas partículas podrían dar cuenta de una fracción, diminuta pero tal vez no despreciable, de la misteriosa materia oscura, responsable de cerca del 90 por ciento de la masa del universo.

La cosmología proporciona una sugerente alternativa para estudiar los neutrinos y medir su masa. La idea básica consiste «mirar al universo» y usar todo el espacio como un gran detector. Dado que estas partículas abundan en el cosmos, su efecto colectivo influye en varios parámetros cosmológicos, como la tasa de expansión del universo, la abundancia de cúmulos de galaxias o las cantidades estadísticas que caracterizan el fondo cósmico de microondas. De hecho, las mejores cotas superiores a la masa de los neutrinos proceden hoy de la cosmología [véase «Un secreto escrito en el cielo», por Sudeep Das y Tristan L. Smith; *en este mismo número*].

También la cosmología moderna cuenta con su modelo estándar, conocido en jerga técnica como Λ CDM, o Lambda-CDM. En la versión más simple de este modelo, los neutrinos tampoco tienen masa. Su gran ventaja reside en que, a partir de unos pocos parámetros, permite describir la evolución del universo desde que tenía unos 400.000 años (la época en que se emitieron los fotones que hoy componen el fondo cósmico de microondas) hasta la actualidad, 14.000 millones de años después de la gran explosión.

El fondo cósmico de microondas puede entenderse como una instantánea del universo cuando este no era más que una sopa de núcleos atómicos (hidrógeno, principalmente), electrones, fotones y otras partículas. A partir de los datos de esta radiación primigenia, el modelo Λ CDM permite calcular los parámetros que describen el universo actual. En particular, resulta posible deducir su edad, cuán rápido se expande en estos momentos y la abundancia de grandes estructuras, como galaxias y cúmulos de galaxias.

OBSERVACIONES EN DESACUERDO

En los últimos dos años, las observaciones del satélite Planck, de la ESA, nos han permitido estudiar el fondo cósmico de microondas con un detalle sin precedentes. Esos datos han sacado a la luz ciertas discrepancias entre las observaciones del universo actual y las relativas al cosmos primitivo.

Por un lado, varias observaciones parecen indicar que hoy el universo contiene menos estructuras que las que predice el modelo Λ CDM si, como «condiciones iniciales», tomamos los datos del satélite Planck. Por otro, la velocidad de expansión del cosmos actual (el parámetro de Hubble) resulta ligeramente mayor que la calculada a partir del fondo de microondas.

Al menos en principio, los neutrinos podrían ayudar a resolver tales discrepancias. Si estas partículas tuviesen una masa apreciable, su tirón gravitatorio frenaría el crecimiento de estructuras cósmicas y desdibujaría el patrón de agrupamiento de las galaxias, lo que reduciría el número de cúmulos. Además, resulta posible demostrar que, si existiesen más de tres especies de neutrinos, ello contribuiría a aumentar la tasa actual de expansión cósmica.

En 2014, Mark Wyman y otros investigadores de la Universidad de Chicago publicaron un estudio en el que argumentaban que, si el modelo Λ CDM se ampliaba para incluir neutrinos relativamente masivos y una cuarta familia estéril, ambas discrepancias se reducirían de manera considerable. En otro trabajo, Richard Battye, de la Universidad de Manchester, y Adam Moss, de la de Nottingham, llegaron a conclusiones parecidas. Estos y otros estudios han indicado cómo reconciliar datos aparentemente incompatibles. Sin embargo, no todos los investigadores comparten sus conclusiones.

En un trabajo llevado a cabo junto con Boris Leistedt y Hiranya Peiris, del Colegio Universitario de Londres, hallamos que introducir neutrinos con una masa relativamente elevada producía una concordancia solo aparente. La estructura a gran escala del universo ha sido estudiada mediante observaciones y técnicas de análisis muy dispares, por lo que existen varias series de datos al respecto. Y los modelos con neutrinos tan masivos, aunque ajustan estadísticamente algunas combinaciones de datos, no eliminan todas las discrepancias existentes entre ellos.

Al efectuar un análisis con distintas combinaciones de datos y examinar las diferentes posibilidades, puede verse que, en realidad, casi todos los datos favorecen el modelo Λ CDM frente a cualquiera de sus deformaciones. Solo la abundancia de cúmulos de galaxias sigue fuera de línea. Sin embargo, esta clase de observaciones son las que más dificultades entrañan para los cosmólogos. Si por un momento las dejamos de lado, las anomalías desaparecen.

En nuestra opinión, la tensión entre los diferentes conjuntos de datos apunta a la existencia de errores sistemáticos en las observaciones cosmológicas más delicadas. Y, en cualquier caso, si las investigaciones futuras descartasen efectos sistemáticos, habría que considerar hipótesis alternativas a la adición de neutrinos muy masivos.

En definitiva, los experimentos de física de partículas que miden las oscilaciones de neutrinos permiten derivar un límite inferior a su masa. La cosmología nos brinda una cota superior. Pero no hay mucho margen. Si logramos mantener los efectos sistemáticos bajo control, las investigaciones cosmológicas futuras podrán determinar la masa de estas partículas. Ese es el reto para los próximos años, pero también una apasionante perspectiva. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, abril de 2015

LA AUTORA

Licia Verde es investigadora ICREA en el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona.

PARA SABER MÁS

Neutrinos help reconcile Planck measurements with the local universe.

Mark Wyman et al. en *Physical Review Letters*, vol. 112, 051302, 6 de febrero de 2014.

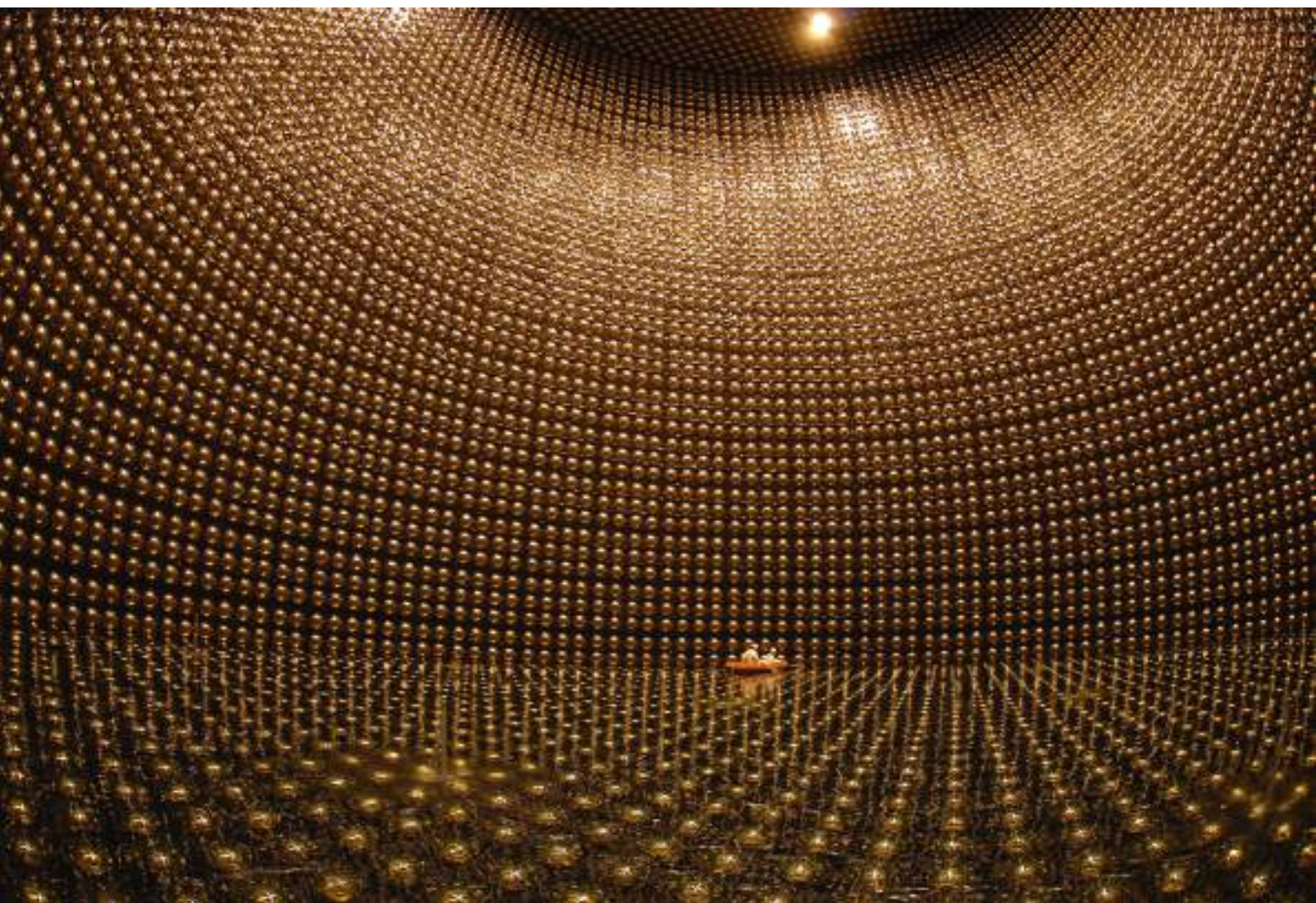
Evidence for massive neutrinos from cosmic microwave background and lensing observations. Richard Battye y Adam Moss en *Physical Review Letters*, vol. 112, 051303, 6 de febrero de 2014.

No new cosmological concordance with massive sterile neutrinos. Boris Leistedt, Hiranya V. Peiris y Licia Verde en *Physical Review Letters*, vol. 113, 041301, 21 julio de 2014.

¿Por qué hay materia en el universo?

El experimento japonés T2K halla indicios de una diferencia clave en el comportamiento de neutrinos y antineutrinos. En caso de confirmarse, el resultado podría explicar por qué la materia dominó sobre la antimateria en el origen del cosmos

Silvia Pascoli y Jessica Turner



INTERIOR del detector subterráneo de neutrinos Super-Kamiokande, en Japón.

TODA LA MATERIA VISIBLE DEL UNIVERSO SE COMPONE EN última instancia de partículas elementales. De ellas, las conocidas como fermiones se clasifican a su vez en dos tipos: quarks (que dan lugar a partículas compuestas, como el protón o el neutrón) y leptones. Estos últimos comprenden el electrón, el muon, la partícula tau y los neutrinos.

Por cada tipo de partícula elemental existe una antipartícula con las mismas propiedades pero de carga opuesta. El ejemplo más conocido tal vez sea el del positrón, la antipartícula del electrón. Durante mucho tiempo se pensó que, en un «mundo especular» hecho de antimateria, las antipartículas deberían comportarse de la misma manera que sus homólogas de materia. Sin embargo, desde los años sesenta sabemos que los quarks y los antiquarks no respetan dicha simetría. Ahora, un trabajo publicado en *Nature* por la colaboración internacional T2K ha referido indicios de que la misma violación de simetría podría darse también en los leptones: un resultado largamente buscado y que afecta de manera profunda a nuestra comprensión de las leyes físicas fundamentales y la evolución del universo.

La mencionada simetría entre partículas y antipartículas se conoce con el nombre técnico de «simetría de paridad y conjugación de carga» (CP). La transformación asociada combina el intercambio de cada partícula por su correspondiente antipartícula, así como la reflexión especular de su posición y su movimiento. En otras palabras: si se respetara la simetría CP, las leyes que gobernarían un «universo especular» hecho de antimateria deberían ser idénticas a las leyes físicas que conocemos. Pero ¿por qué se rompe la simetría CP? ¿Cuáles son las consecuencias de dicha ruptura?

UNIVERSO ASIMÉTRICO

En 1967, el físico Andréi Sájarov propuso que la violación de la simetría CP era uno de los requisitos clave para explicar por qué nuestro universo parece tener una pequeña preferencia por la materia frente a la antimateria. Dicho desequilibrio, cuantificado en unas pocas partículas por cada 10.000 millones de fotones, es en última instancia el responsable de la existencia de los planetas, las estrellas y de nosotros mismos. Si el universo hubiera comenzado con cantidades exactamente iguales de partículas y antipartículas, unas y otras se habrían aniquilado poco después de la gran explosión y hoy el cosmos solo contendría fotones.

¿Cómo surgió ese pequeño exceso de materia en los primeros instantes del universo? Aunque sabemos que los quarks no respetan la simetría CP, dicha violación es demasiado pequeña para haber generado toda la materia que vemos hoy a nuestro alrededor. Por esa razón, hace tiempo que los físicos estudian la posible violación de la simetría CP en el sector leptónico. Según algunos de los modelos que se han postulado para explicar la masa de los neutrinos, estos tendrían asociados ciertos compañeros muy masivos aún por descubrir. Estos habrían abundado en el universo primitivo y, poco después, se habrían desintegrado. En caso de violarse la simetría CP en este sector, tales desintegraciones podrían haber generado el desequilibrio observado entre materia y antimateria.

El descubrimiento de una violación sustancial de la simetría CP en el sector leptónico sería, por tanto, revolucionario. Si esta se viera acompañada de una violación del «número leptónico» (esto es, si se demostrase que el número de leptones menos el de antileptones no se conserva en los procesos físicos), el hallazgo proporcionaría una sólida prueba circunstancial sobre el origen de la asimetría entre la materia y la antimateria.

PARTÍCULAS MUTANTES

La violación de la simetría CP en el sector leptónico es esquiva, pero puede buscarse estudiando el comportamiento de los neutrinos. Estas partículas elementales, las más enigmáticas del modelo estándar, son notoriamente reacias a interactuar con la materia ordinaria, por lo que resultan muy difíciles de detectar. Sin embargo, son ubicuas: en un instante dado, una taza de café se ve atravesada por unos 100.000 neutrinos «fríos» que permean el universo, así como por un número muchas veces mayor de neutrinos procedentes del Sol.

Existen tres tipos de neutrinos, cada uno de ellos asociado a uno de los leptones con carga eléctrica que conocemos: el electrón, el muon y la partícula tau. Durante décadas se pensó que la masa de los neutrinos era exactamente nula. No obstante, en 1998 el experimento japonés Super-Kamiokande y el Observatorio de Neutrinos de Sudbury hallaron que, en realidad, estas partículas sí que tienen una pequeña masa.

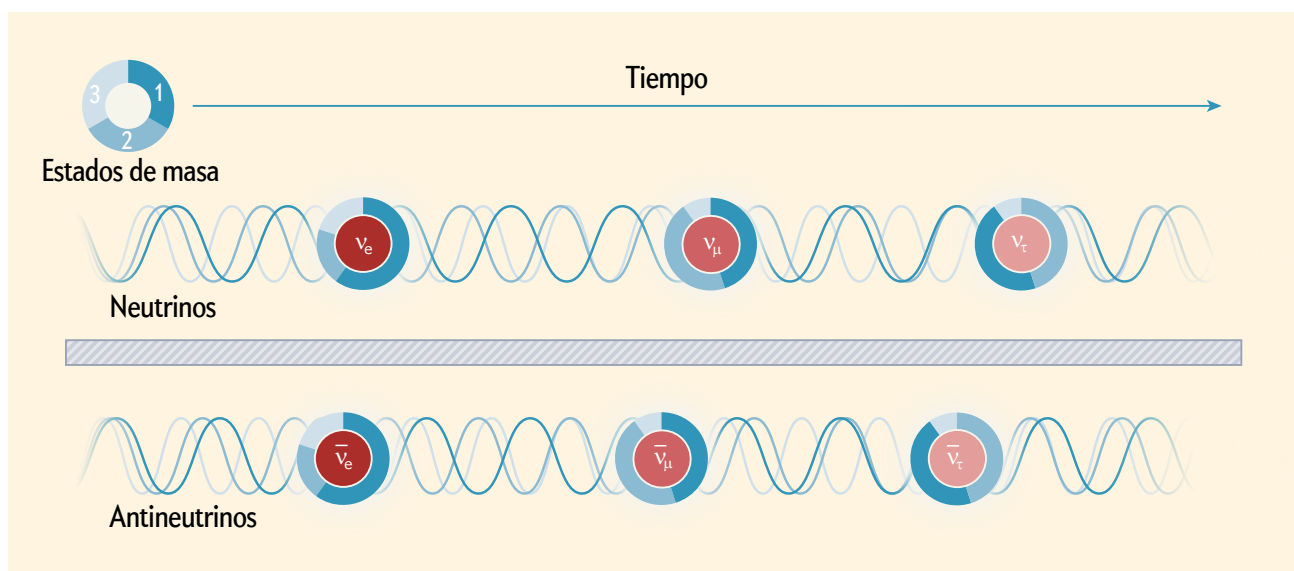
Por otro lado, los neutrinos de un tipo pueden transmutarse espontáneamente en neutrinos de otro. Este curioso efecto cuántico, conocido como «oscilación», tiene su origen en el hecho de que cada tipo de neutrino es en realidad una «mezcla» (una superposición cuántica) de tres estados, cada uno de los cuales tiene asociada una masa diferente. Un aspecto importante es que dicho estado de superposición cuántica puede cambiar con el tiempo, ya que cada una de sus componentes evoluciona de manera distinta. Como consecuencia, un neutrino que fue generado como neutrino muónico puede cambiar y acabar convertido en un neutrino de tipo electrónico.

EL EXPERIMENTO T2K

En las dos últimas décadas han sido varios los experimentos que han estudiado las oscilaciones de neutrinos. Hasta hace pocos años, sin embargo, no se habían detectado oscilaciones de neutrinos muónicos en neutrinos electrónicos. La probabilidad de que se produzca dicha transformación es pequeña, pero en ella se esconde la clave para estudiar la posible violación de la simetría CP en el sector leptónico. Si esta simetría se conserva, la probabilidad de que un neutrino muónico se convierta en uno electrónico debería ser idéntica a la del proceso análogo con antineutrinos. Gracias al estudio de tales oscilaciones con una precisión sin precedentes, la colaboración T2K ha obtenido ahora los primeros indicios de que tal vez eso no se cumpla.

En el experimento T2K se genera un haz de neutrinos en el Complejo de Investigación para la Aceleración de Protones de Japón (J-PARC), en la localidad de Tokai, donde un haz de protones muy energéticos se hace chocar contra un blanco de grafito. Ello produce enormes cantidades de partículas conocidas como piones y kaones, las cuales se desintegran acto seguido en neutrinos (o en antineutrinos, dependiendo de las condiciones del experimento).

La mayoría de esos neutrinos atravesarán la Tierra sin detenerse. Pero algunos de ellos serán interceptados por los detectores subterráneos del experimento Super-Kamiokande, alojado en las entrañas del monte Ikeno, a 295 kilómetros de distancia. Este complejo consta de 50.000 toneladas de agua ultrapura rodeada por un vasto conjunto de fotodetectores. Cuando un neutrino interactúa con uno de los neutrones presentes en el agua, puede generar un muon o un electrón, dependiendo de qué tipo de neutrino haya tomado parte en la reacción. El experimento T2K puede determinar si la partícula producida era un muon o un electrón e inferir así el tipo de neutrino que llegó al detector. Como consecuencia, y a partir de los datos del



NEUTRINOS A TRAVÉS DEL ESPEJO: Cada uno de los tres tipos de neutrinos conocidos (el electrónico, el muónico y el tauónico; ν_e , ν_μ y ν_τ) corresponde en realidad a una superposición cuántica de tres estados de masas diferentes (tonos azules; las ondas constituyen representaciones simplificadas de cómo contribuye cada estado de masa a cada tipo de neutrino). Dado que cada uno de esos estados de masa evoluciona de manera distinta en el tiempo, los neutrinos de una clase pueden transmutarse espontáneamente en neutrinos de otra. Un resultado obtenido recientemente en el experimento T2K, en Japón, sugiere que los neutrinos (arriba) se transformarían a un ritmo distinto que los antineutrinos (abajo). Esa diferencia podría explicar por qué en el origen del universo se creó más materia que antimateria.

haz de partida, es posible medir la probabilidad de oscilación de neutrinos muónicos en electrónicos.

INDICIOS PROMETEDORES

La colaboración T2K ha analizado los datos recopilados entre 2009 y 2018 tanto para neutrinos como para antineutrinos. Al combinarlos con los precedentes de otros experimentos, los investigadores han obtenido indicios de violación de la simetría CP con un nivel de confianza del 95 por ciento, así como pruebas de que el parámetro de violación de CP probablemente sea grande. Tales resultados podrían constituir los primeros indicios del origen de la asimetría entre materia y antimateria en nuestro universo.

Con todo, las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias. En física de partículas ello exige alcanzar un nivel de confianza del 99,9999 por ciento, considerablemente mayor que el logrado ahora. Para obtenerlo será necesario medir con mayor precisión las probabilidades de oscilación de los neutrinos, lo que requerirá emplear haces más intensos, detectores mayores y comprender mejor el proceso experimental.

La próxima generación de experimentos se prepara para acometer ese reto. El proyecto T2HK, también en Japón, empleará la misma técnica que T2K pero usará el detector Hiper-Kamiokande, el cual contará con una cantidad de agua diez veces mayor que su predecesor y un haz más intenso. Hiper-Kamiokande fue aprobado el pasado mes de febrero y su construcción comenzará en breve. Por su parte, el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE), en EE.UU., publicó su informe técnico también en febrero. Con base en Dakota del Sur y una técnica de detección basada en cuatro módulos con miles de toneladas de argón líquido, detectará los neutrinos generados en el laboratorio Fermilab, a 1300 kilómetros de distancia. Varios prototipos menores ya probados en el CERN han

demostrado la viabilidad de DUNE. Con técnicas y mediciones complementarias, cabe esperar que, de aquí a 15 años, T2HK y DUNE proporcionen una respuesta definitiva al enigma de la violación de la simetría CP en el sector leptónico. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, agosto de 2020

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 580, págs. 323-324, 2020.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de **nature**

LAS AUTORAS

Silvia Pascoli investiga en el Instituto de Fenomenología de Física de Partículas de la Universidad de Durham. **Jessica Turner** trabaja en el Departamento de Física Teórica del Fermilab, en Illinois.

PARA SABER MÁS

Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. Andrei Sájarov en *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 5, págs. 24-27, 1967.

Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Colaboración T2K en *Physical Review Letters*, vol. 112, artículo n.º 061802, febrero de 2014.

Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. Colaboración T2K en *Nature*, vol. 580, págs. 339-344, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la materia. James M. Cline en *JyC*, junio de 2005.

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod, en este mismo número.

El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz, en este mismo número.

SUSCRÍBETE A INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
~~82,80 €~~ 75 €
por un año (12 ejemplares)
~~165,60 €~~ 140 €
por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Y además elige 2 números de la colección TEMAS gratis



www.investigacionyciencia.es/suscripciones
Teléfono: +34 935 952 368

Accede a la **HEMIEROTECA DIGITAL**

DE TODAS NUESTRAS PUBLICACIONES



Suscríbete y accede a todos los artículos

PAPEL

Elige la modalidad mixta
y recibirás también
las revistas impresas
correspondientes al
período de suscripción

ARCHIVO

Encuentra toda
la información sobre
el desarrollo de la ciencia
y la tecnología durante
los últimos 30 años

DIGITAL

Accede desde cualquier
ordenador o tableta
al PDF de más de 10.000
artículos elaborados
por expertos

www.investigacionyciencia.es



Prensa Científica, S.A.