

ASTROPARTÍCULAS

# IceCube:

El telescopio de neutrinos más grande del mundo ha entrado en funcionamiento en el Polo Sur. Uno de sus objetivos consistirá 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.

FOTOGRAFÍA DE EMANUEL JACOBI/NSF

## EN SÍNTESIS

Los neutrinos apenas interactúan 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.

Carlos Pérez de los Heros es profesor del departamento de física y astronomía de la Universidad de Uppsala e investigador en el proyecto IceCube, donde dirige el grupo de búsqueda de materia oscura.



««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 Labora-

torio 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 macroes-

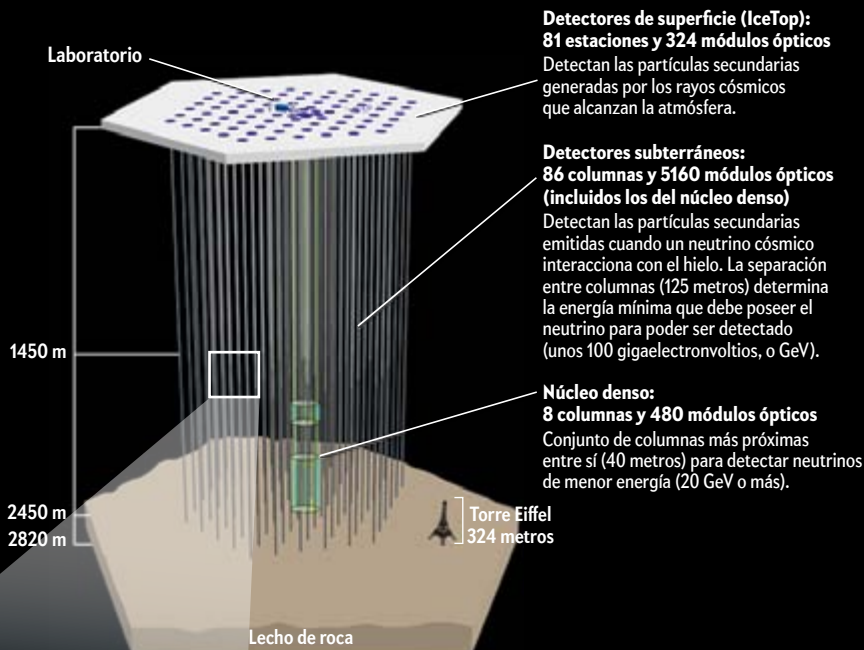
# Un kilómetro cúbico de hielo para detectar neutrinos

Los neutrinos son partículas elementales carentes de carga eléctrica y que apenas interactúan 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 extremada-

mente 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.

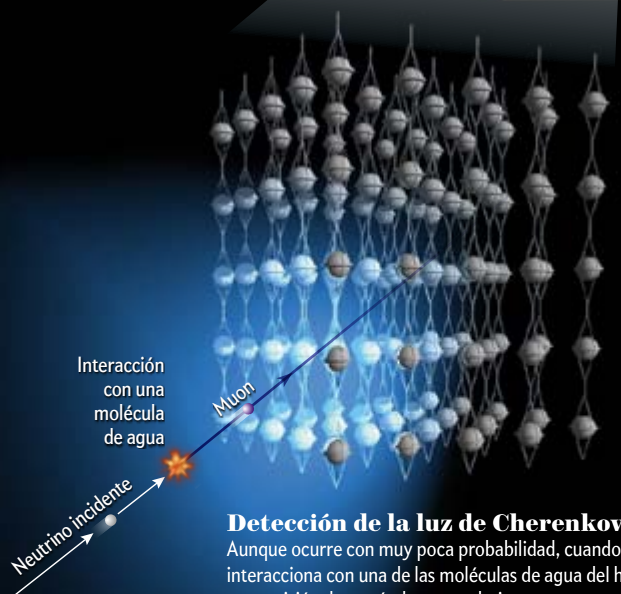
IceCube consta de 86 agujeros de profundidad kilométrica excavados en el hielo del Polo Sur, cada uno de los cuales alberga 60 módulos ópticos espaciados a distancias regulares.



**Detectores de superficie (IceTop):**  
81 estaciones y 324 módulos ópticos  
Detectan las partículas secundarias generadas por los rayos cósmicos que alcanzan la atmósfera.

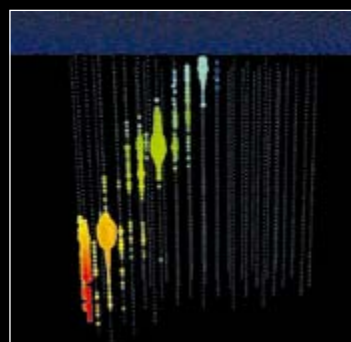
**Detectores subterráneos:**  
86 columnas y 5160 módulos ópticos (incluidos los del núcleo denso)  
Detectan las partículas secundarias emitidas cuando un neutrino cósmico interactúa con el hielo. La separación entre columnas (125 metros) determina la energía mínima que debe poseer el neutrino para poder ser detectado (unos 100 gigaelectronvoltios, o GeV).

**Núcleo denso:**  
8 columnas y 480 módulos ópticos  
Conjunto de columnas más próximas entre sí (40 metros) para detectar neutrinos de menor energía (20 GeV o más).



## Detección de la luz de Cherenkov

Aunque ocurre con muy poca probabilidad, cuando un neutrino interactúa 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).

estructuras. 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 interactúan 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 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 partí-

cula 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 perforado 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.



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 esquiés 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).

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 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 millonésima 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

## 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.

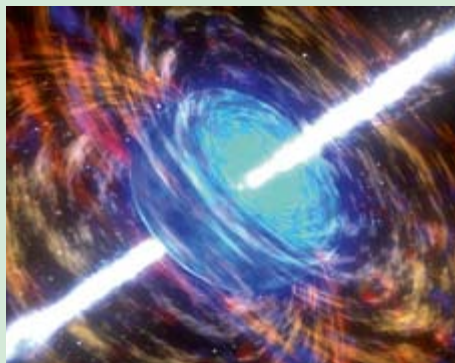
Además, la materia en expansión emitiría también protones de muy alta energía, lo cual explicaría asimismo el origen de los rayos cósmicos más energéticos detectados hasta la fecha. Los rayos cósmicos se componen de partículas procedentes del espacio exterior que alcanzan la atmósfera terrestre. Con 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 interactuar 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. El año pasado, 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 nuestros 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. En estos momentos estamos analizando nuevos datos, tomados ya con la configuración definitiva del detector.

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.

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 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 construidos 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 perforar 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 fecha reciente 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, 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 prime-



ros 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 hoy 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 micro-mundo reúnen las características necesarias para resolver uno de los problemas más acuciantes del macrocosmos, la materia oscura. Una casualidad difícil de ignorar.

## 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

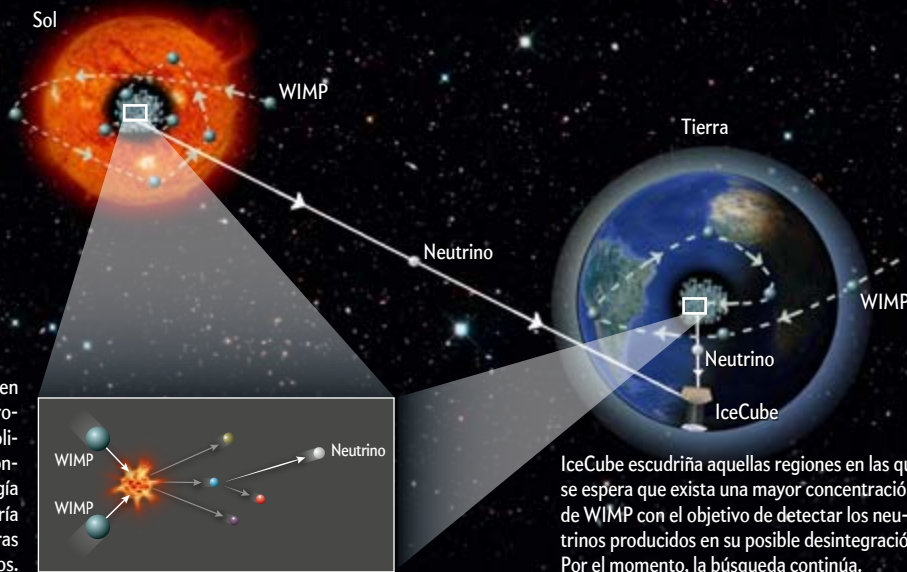
gigantescos halos de materia oscura que envuelven a las galaxias se componen de un gas de partículas elementales aún por descubrir.

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.

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 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, Próxima 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 neu-

trinos 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 corto 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.

---

#### PARA SABER MÁS

---

**Neutrinos para observar el cosmos.** G. B. Gelmini, A. Kusenko y T. J. Weiler en *Investigación y Ciencia* n.º 406, julio de 2010.

**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. Disponible en [arxiv.org/abs/1101.3349](http://arxiv.org/abs/1101.3349)

**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. Disponible en [arxiv.org/abs/1112.1840](http://arxiv.org/abs/1112.1840)

**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](http://www.icecube.wisc.edu)