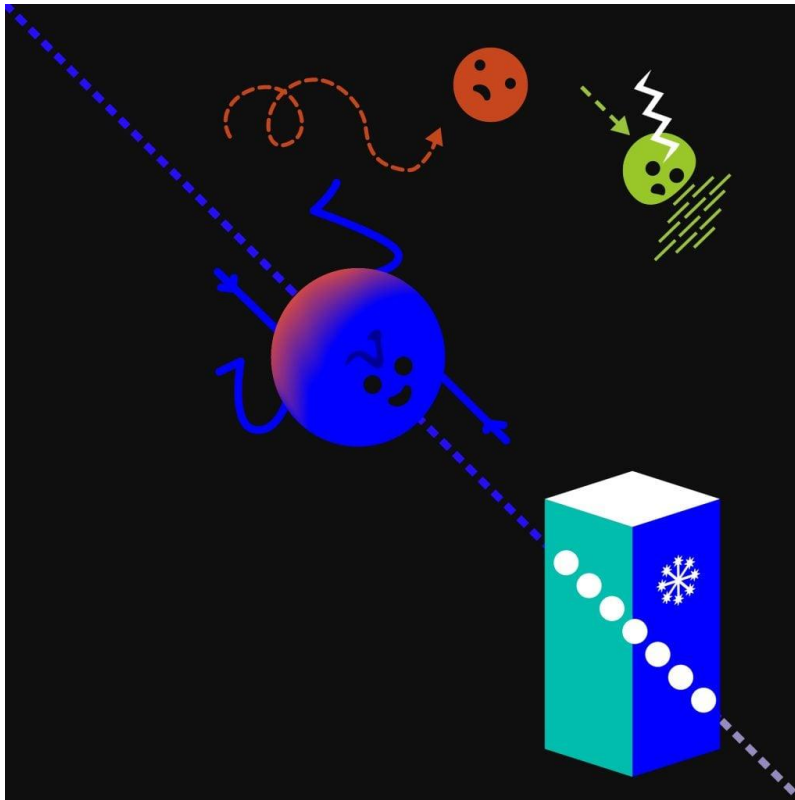


El hielo en el Polo Sur revela la existencia de aceleradores de partículas cósmicas.

Francis Halzen sentó las bases de un nuevo tipo de astronomía. Su idea consistía en utilizar el hielo glaciar del Polo Sur para capturar las misteriosas partículas llamadas neutrinos. El resultado fue el Observatorio de Neutrinos IceCube, capaz de rastrear neutrinos originados en el cosmos distante.



© Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias

El neutrino es la partícula más esquiva del universo, carece de carga eléctrica y casi no tiene masa. Generalmente, atraviesa la materia sin ser detectado; rara vez un neutrino se hace notar al colisionar con un núcleo atómico. Cada segundo, sin que te des cuenta, 65 mil millones de neutrinos provenientes del Sol atraviesan la uña de tu dedo meñique.

Los neutrinos también provienen de otras regiones del espacio y traen consigo pistas para desentrañar algunos de los misterios del cosmos. Los investigadores que logran capturar estos neutrinos cósmicos, menos frecuentes, pueden obtener información sobre los entornos extremos del universo donde se originaron.

En la década de 1980, Francis Halzen se dio cuenta de que el hielo antártico podría ser ideal para capturar una cantidad suficiente de estos esquivos neutrinos, lo que permitiría a los investigadores obtener más información sobre sus lejanos orígenes. Rápidamente convenció a muchos del potencial de su idea y, en 1992, un grupo de tenaces investigadores e ingenieros realizó los primeros intentos de introducir sensores de luz en el glaciar del Polo Sur. El gran avance se produjo unos veinte años después: el telescopio de neutrinos IceCube registró neutrinos con propiedades que convencieron a los investigadores de que se originaban en regiones distantes del espacio. La búsqueda de las fuentes de neutrinos del universo había comenzado en serio.

La física de partículas se encuentra con la astrofísica.

Halzen creció en Bélgica. Se sintió atraído por la física de partículas gracias a los avances en este campo durante la década de 1960 y, en un principio, se centró en las partículas masivas formadas por quarks. Poco después de terminar su doctorado, se trasladó a la Universidad de Wisconsin-Madison, en Estados Unidos. Más tarde, comprendió lo que la física de partículas puede aprender de las partículas que nos llegan del espacio y cómo la astrofísica, a su vez, puede beneficiarse de la física de partículas.

La motivación para la búsqueda de neutrinos surge de la observación de partículas completamente diferentes. El cosmos es atravesado continuamente por partículas que se conocen colectivamente como rayos cósmicos. Generalmente, estas partículas son protones, que son núcleos atómicos desnudos de hidrógeno. Los protones provenientes del espacio a veces nos alcanzan con una cantidad asombrosa de energía, mucho mayor de la que se les puede proporcionar en un acelerador de partículas en la Tierra.

El origen de los rayos cósmicos con las energías más extremas ha sido uno de los secretos mejor guardados del universo. Dado que la física nos dice que los procesos que pueden acelerar protones a altas energías también dan lugar a neutrinos de alta energía, estos últimos podrían proporcionar pistas cruciales sobre dichos aceleradores de partículas cósmicas.

Quien logre identificar neutrinos con enormes cantidades de energía podrá diferenciarlos de los neutrinos de energía considerablemente menor que provienen de sustancias radiactivas en descomposición, del Sol o de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre. Los neutrinos que no se originan en nuestro entorno deben provenir de algún lugar muy lejano, quizás de procesos violentos en regiones donde han explotado estrellas o de galaxias activas distantes.

Destellos en el hielo

En la década de 1980, mientras Halzen trabajaba con partículas cósmicas, supo que investigadores soviéticos planeaban usar receptores de radio para captar señales de neutrinos en la Antártida. La idea era que, al colisionar un neutrino con un núcleo atómico en el hielo, se produce una chispa eléctrica que genera una onda de radio. Si esta era lo suficientemente fuerte, podría captarse con una antena de radio. Halzen se inspiró y se dio cuenta de que otro método podría ser instalar sensores de luz en el hielo de los glaciares y buscar destellos de luz provenientes de las colisiones.

Anteriormente, alrededor de 1960, varios físicos sugirieron que el agua podría ser un buen material para capturar neutrinos del espacio. En las raras ocasiones en que un neutrino

colisiona con un núcleo atómico, se produce una partícula cargada que viaja en la misma dirección que el neutrino original y emite luz azul. Debido a la transparencia del agua, esta luz puede detectarse. Con el equipo adecuado, es posible determinar la trayectoria de la luz e incluso observar el origen del neutrino. El factor más importante es contar con un volumen de agua lo suficientemente grande como para observar la evidencia de numerosas colisiones de neutrinos.

La idea de Halzen era utilizar hielo natural en lugar de agua. Se puso en contacto con su colega de investigación, John G. Learned, quien trabajaba en el proyecto DUMAND. Este era un proyecto similar que buscaba capturar señales luminosas de neutrinos interactuando en las aguas profundas y cristalinas del océano frente a las costas de Hawái. Juntos, los físicos analizaron las oportunidades y los desafíos que implicaba la captura de neutrinos en la Antártida. Presentaron por primera vez su concepto de observatorio de neutrinos en el hielo del Polo Sur en 1988, en una conferencia en Polonia.

Un telescopio de neutrinos en el Polo Sur.

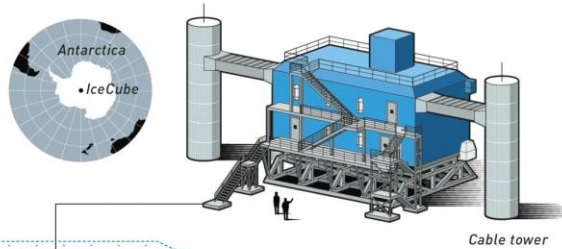
Francis Halzen se dio cuenta de que ubicar el observatorio de neutrinos en el Polo Sur geográfico tenía muchas ventajas: allí ya existía una estación de investigación, con una organización para transportes regulares y todo lo necesario para que un equipo pudiera trabajar.

El hielo también ofrece muchas ventajas como material. A suficiente profundidad, la oscuridad es constante. A diferencia del océano, no hay interferencia de seres vivos y los niveles de sustancias radiactivas son bajos. El hielo es estable y proporciona una superficie sólida para quienes trabajan en las instalaciones. La zona es geológicamente estable y no presenta terremotos.

Una desventaja es que el frío hace imposible viajar hacia y desde el Polo Sur durante gran parte del año. Todo el trabajo práctico debe realizarse durante el breve verano antártico, entre noviembre y febrero.

An observatory in the ice

IceCube is a cubic kilometre of ice equipped with light sensors on long cables, as well as a building on the surface where the signals from the ice are collected. Data are then forwarded via satellite for analysis.



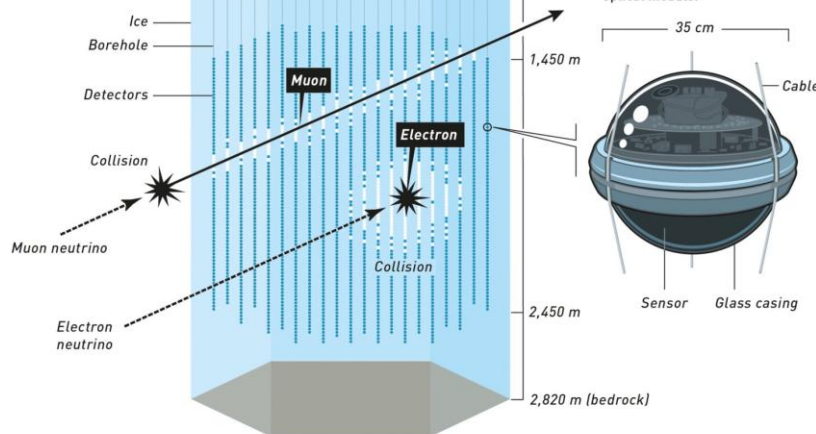
PARTICLES AND LIGHT

Most neutrinos that reach IceCube travel straight through it without registering. The few neutrinos that collide with an atomic nucleus create light that can be captured and analysed.

There are three different types of neutrinos that create different patterns in IceCube. When an electron neutrino or tau neutrino collide with an atomic nucleus, they cause a cascade of particles that illuminate the area around the collision. A muon neutrino that collides not only creates a cascade, it also creates a particle, a muon, that makes a long trail of light through the ice.

OPTICAL MODULES

The sensor that captures the light sits in glass casing and faces downward. The casing also holds electronics that process the signal before it is sent to the surface. The entire unit is called an optical module.



© Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias

Al principio, Halzen se conformó con el trabajo teórico, mientras que Learned estaba ocupado con su propio proyecto y nunca retomó sus teorías sobre la captura de neutrinos en el Polo Sur. La historia podría haber terminado ahí, pero el concepto había generado tanto interés que, en pocos años, investigadores de diversas instituciones se reunieron en torno a Halzen para llevar a buen término su idea de un observatorio de neutrinos en la Antártida.

Para empezar, tuvieron que resolver todos los problemas prácticos que implicaba colocar instrumentos a gran profundidad en el hielo. De los glaciólogos aprendieron que se pueden perforar agujeros de kilómetros de profundidad utilizando una especie de cabezal de ducha sofisticado que usa agua caliente para derretir el hielo. Luego, se podía bajar un cable largo con sensores de luz al agujero lleno de agua. Halzen describe estos sensores como una bombilla al revés: el instrumento capta la luz y luego la transforma en una señal eléctrica.

Las burbujas en el hielo podrían causar problemas.

Primero, el equipo de investigación probó a hundir los sensores en el hielo de Groenlandia para comprobar que podían registrar la luz de las partículas presentes en el hielo. Después, comenzaron a construir el primer observatorio de neutrinos en el Polo Sur, el predecesor de IceCube: AMANDA.

Halzen ha descrito cómo, en la Nochebuena de 1993, estaba sentado a la mesa con el ordenador en el regazo, esperando un mensaje que confirmara que el primer cable con módulos ópticos se había instalado en el hielo.

La sección superior del hielo estaba llena de burbujas que dispersaban la luz en distintas direcciones y difuminaban la información sobre el movimiento de las partículas, por lo que los primeros intentos resultaron decepcionantes. Sin embargo, el hielo resultó ser extremadamente puro y transparente por debajo de los 1400 metros de profundidad. Allí, los destellos de luz de los neutrinos podían viajar 300 metros antes de ser absorbidos, mucho más de lo que se esperaba. Un resultado secundario del proyecto de neutrinos es que los investigadores han aprendido mucho sobre las propiedades del hielo a diferentes profundidades.

La construcción de AMANDA continuó hasta enero de 2000. Todo funcionó según lo previsto, pero no era suficiente para detectar los neutrinos de alta energía procedentes de aceleradores de partículas cósmicas. Se necesitaba un mayor volumen, por lo que se inició el trabajo en IceCube: un kilómetro cúbico de hielo equipado con sensores de luz. IceCube alcanzó su tamaño máximo en 2011, con 5160 sensores de luz distribuidos en 86 cables.

A lo largo de los años, Halzen ha seguido desempeñando un papel fundamental como catalizador, primero en AMANDA y luego en IceCube. Como investigador principal comprometido y entusiasta, ha llevado estos proyectos desde la fase inicial hasta la obtención de mediciones completas y resultados científicos.

IceCube finalmente encuentra neutrinos cósmicos

Un observatorio de neutrinos como IceCube detecta más que los neutrinos que buscan los investigadores. Estos neutrinos cósmicos deben detectarse frente a las señales de fondo producidas por los rayos cósmicos que entran en la atmósfera terrestre. Algunas de estas partículas pueden penetrar hasta los sensores situados entre 1450 y 2450 metros bajo la superficie. Diariamente se registran más de cien millones de estas partículas procedentes de la atmósfera sobre la Antártida. Los rayos cósmicos también crean neutrinos en la atmósfera y, de estos, unos cientos al día llegan a IceCube tras atravesar la Tierra desde el hemisferio norte.

Para detectar los neutrinos cósmicos, los investigadores deben identificar eventos específicos en los que los neutrinos hayan interactuado en el hielo. Aunque no puedan estar completamente seguros de que un solo neutrino se haya originado fuera de la Tierra, pueden analizar todos los eventos seleccionados y comprobar si, en general, sus propiedades coinciden con lo que esperan de los neutrinos cósmicos y difieren de las de los neutrinos atmosféricos. En 2013, el equipo de investigación presentó las primeras pruebas que confirmaban el hallazgo de neutrinos cósmicos y, un par de años después, habían recopilado tantos datos que pudieron confirmar su descubrimiento.

¿Qué esperan aprender los investigadores de los neutrinos del universo?

La astronomía de neutrinos comenzó a pequeña escala en la década de 1960, cuando Raymond Davis Jr. observó neutrinos provenientes del Sol. Esto fue confirmado por el equipo de investigación del observatorio de neutrinos de Kamiokande en Japón, dirigido por Masatoshi Koshiba, quienes lograron determinar la trayectoria de los neutrinos y rastrear su origen.

En 1987, Kamiokande captó una lluvia de neutrinos que podría estar relacionada con la explosión de una estrella, una supernova, en la Gran Nube de Magallanes, nuestra galaxia vecina. Este descubrimiento pronto se complementó con mediciones de neutrinos realizadas simultáneamente en Estados Unidos y la Unión Soviética.

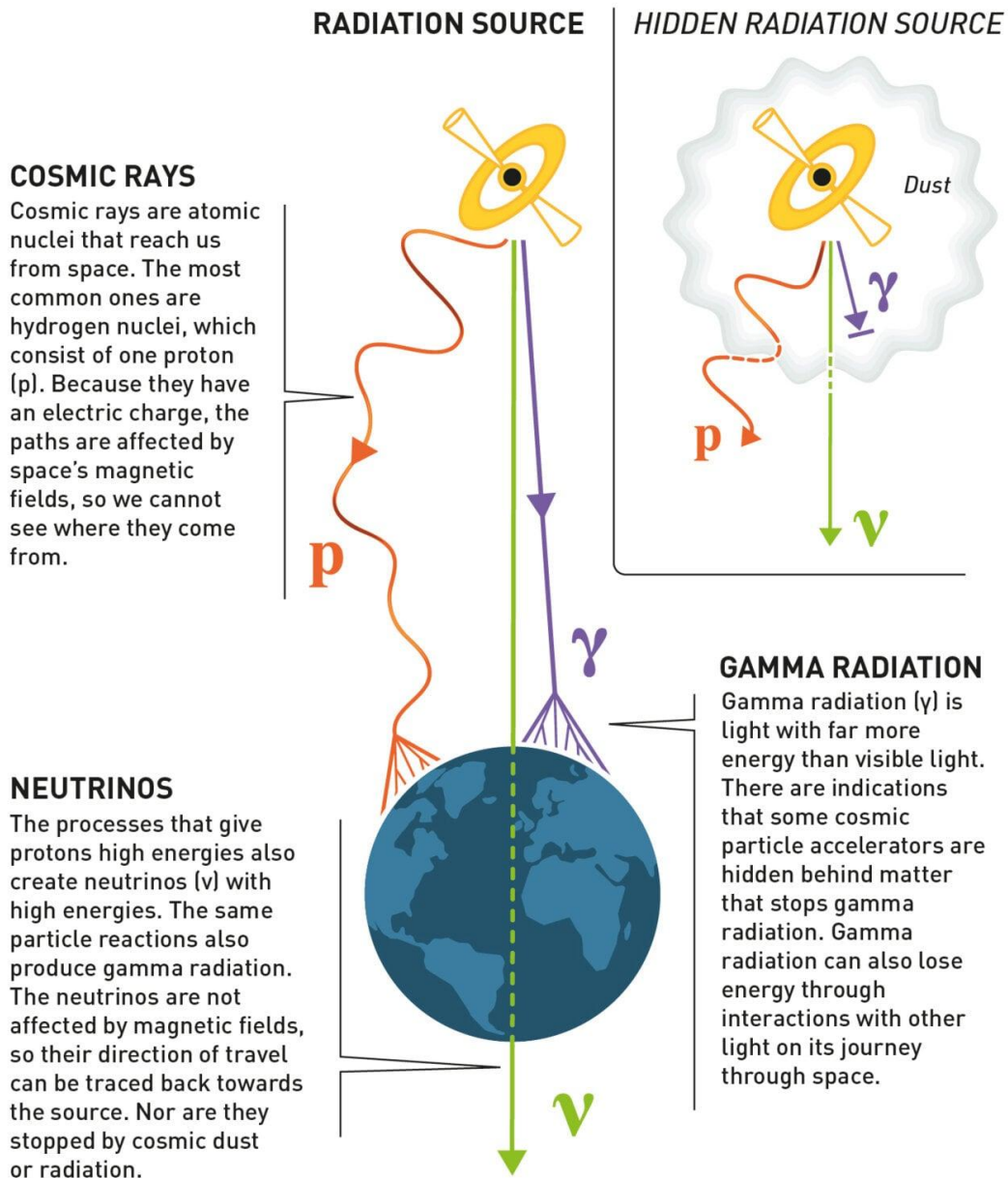
[Raymond Davis Jr.](#) y [Masatoshi Koshiba](#) fueron galardonados con el Premio Nobel de Física de 2002 por estos avances, que demostraron que los neutrinos podían utilizarse para estudiar fenómenos en el espacio.

Un problema persistía: la cantidad de neutrinos capturados por Raymond Davis Jr. era apenas un tercio de la prevista en los cálculos de las reacciones que deberían ocurrir en el Sol. La razón de esto resultó estar relacionada con la existencia de tres tipos de neutrinos. Los físicos descubrieron que los neutrinos pueden cambiar de forma, por lo que un neutrino creado como un tipo puede llegar a un instrumento en la Tierra como otro; y la observación de estos neutrinos transformados requería una técnica diferente a la utilizada por [Raymond Davis Jr.](#) La naturaleza cambiante de los neutrinos se reveló mediante experimentos en Japón y Canadá, y el Premio Nobel de Física 2015 fue otorgado a [Takaaki Kajita](#) y [Arthur B. McDonald](#) por este descubrimiento.

Messengers from space

Space contains objects that release vast amounts of energy. There are processes that accelerate particles and which can sometimes provide particles with a million times more energy than can be achieved in experiments on Earth.

These violent events create different types of radiation, which reach us as messengers carrying information about the processes in which they originated. The neutrinos' properties mean that they can reveal information about cosmic particle accelerators that other forms of radiation cannot.



© Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias

El neutrino ha ayudado a los físicos a confirmar sus modelos de los procesos que ocurren en el interior del Sol y en el interior de una supernova. La idea detrás de IceCube es llevar

la astronomía de neutrinos a un nuevo nivel, con la esperanza de que estos aporten información sobre fenómenos ocultos tras nubes de polvo u objetos tan distantes que otras formas de radiación han desaparecido en el camino. El objetivo es obtener un conocimiento que no se puede conseguir de ninguna otra manera.

En comparación con los protones, los neutrinos tienen la ventaja de no estar cargados eléctricamente. La trayectoria de los protones cargados en el espacio se curva debido a los campos magnéticos que atraviesan, lo que imposibilita determinar su origen siguiendo la dirección que tomaron. Sin embargo, los procesos que aceleran los protones también producen neutrinos, que no se ven afectados por los campos magnéticos, por lo que debería ser posible determinar dónde se aceleran los protones de rayos cósmicos siguiendo la trayectoria de los neutrinos de mayor energía.

Otro tipo de mensajero de los procesos más violentos del universo es la radiación gamma. Esta también se atenúa al interactuar con la luz y la materia en su viaje a través del espacio, mientras que los neutrinos no se ven afectados.

Se esperan más resultados.

Un objetivo importante es determinar las fuentes individuales de neutrinos celestes. IceCube ha detectado algunas fuentes potenciales, entre ellas la galaxia activa NGC 1068 (también conocida como M77). De los neutrinos registrados por IceCube, 79 parecen provenir de la dirección de esta galaxia. Sin embargo, esta evidencia no es lo suficientemente sólida como para identificar definitivamente a NGC 1068 como fuente de neutrinos; cuantos más neutrinos capturen los sensores, mayor será la probabilidad de encontrar su origen.

En los últimos años, los investigadores responsables de IceCube también han podido observar neutrinos de alta energía provenientes de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Suponen que estos neutrinos se originan cuando la radiación cósmica colisiona con los átomos del tenue gas que separa las estrellas.

Sin duda, oiremos hablar mucho de la astronomía de neutrinos en los próximos años, a medida que otros sigan el camino trazado por IceCube. Existen varios telescopios de neutrinos en el hemisferio norte en diversas etapas de desarrollo, pero en agua en lugar de hielo. El proyecto que inspiró a Francis Halzen en la década de 1980, DUMAND, finalizó en 1995, pero sus enseñanzas perduran a través de otros proyectos, como los del lago Baikal, el Mediterráneo, el mar de China Meridional y la costa oeste de Canadá. Al mismo tiempo, IceCube continúa capturando neutrinos. Ya se está planificando la próxima expansión en el Polo Sur, donde IceCube-Gen2 ocupará la asombrosa cantidad de ocho kilómetros cúbicos de hielo.

Francis Halzen. Premio Nobel en Física 2026