

LAS PARTÍCULAS FANTASMA DEL UNIVERSO

LOS NEUTRINOS EN ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA

GEORG G. RAFFELT

Los neutrinos carecen casi por completo de masa y son muy difíciles de detectar porque sus interacciones son extremadamente débiles. Sesenta años después de observar estas «partículas fantasma» por primera vez, ya sabemos mucho acerca de sus propiedades. Hoy en día es casi una tarea rutinaria observar neutrinos en reactores nucleares, en el Sol, en la corteza terrestre, en la atmósfera y en las altas energías provenientes de fuentes cósmicas: se han convertido en mensajeros astrofísicos únicos. Su importancia radica en varios aspectos: los neutrinos transportan información desde algunos de los fenómenos astrofísicos más dramáticos como las supernovas producidas por el colapso de una estrella, podrían haber creado el exceso universal de materia en comparación con la antimateria y, además, otras partículas, más masivas, que interactúan débilmente y son similares a los neutrinos, podrían dar cuenta de la materia oscura del universo.

Palabras clave: neutrinos, materia oscura, supernova, oscilaciones en el sabor, física de astropartículas.

Los neutrinos, los «pequeños neutrales», son únicos entre las partículas elementales porque no se ven afectados por la fuerza electromagnética ni por la nuclear, que une los quarks para formar protones y neutrones. Por lo tanto, los neutrinos solo interactúan mediante lo que conocemos como fuerza débil y, por supuesto, mediante la gravedad, que es incluso más débil. Wolfgang Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como explicación para la energía perdida en la desintegración beta nuclear y, más adelante, hizo un comentario muy conocido en el que afirmaba que había cometido algo terrible al postular una partícula que no se podía observar. Igualmente conocido es el hecho de que estaba equivocado en este aspecto, de la misma manera que tantas otras hipótesis sobre los neutrinos tuvieron que ser revisadas, como su supuesta falta de masa. De hecho, el Premio Nobel de Física de 2015 se entregó precisamente «por el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos, que demuestra que los neutrinos tienen masa», así como el premio Breakthrough en física fundamental

«LOS NEUTRINOS SON ÚNICOS ENTRE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES PORQUE NO SE VEN AFECTADOS POR LA FUERZA ELECTROMAGNÉTICA NI POR LA NUCLEAR. SOLO INTERACTÚAN MEDIANTE LO QUE CONOCEMOS COMO FUERZA DÉBIL»

de 2016, que se entregó a cinco experimentos que observaron oscilaciones de neutrinos. Este término se refiere al hecho de que cada uno de los tres tipos, o «sabores», comunes de neutrino se transforma en otro al propagarse desde el punto de producción (Bilenky, 2010; Gariazzo, Giunti y Laveder, 2016). El neutrino electrónico (ν_e), el muon neutrino (ν_μ) y el tau neutrino (ν_τ) son superposiciones cuánticas de tres valores de masa distintos, lo que provoca una acumulación de diferencias de fase en el camino del neutrino y resulta en el cambio de sabor. Las distancias necesarias para que se dé la conversión son macroscópicas, desde unos pocos kilómetros a unos miles de kilómetros, lo que revela lo pequeñas que son las diferencias de masa de los neutrinos.

Pero Pauli tenía razón en que los neutrinos son difíciles de medir. Todos los cuerpos astrofísicos emiten neutrinos, pero la mayor fuente de neutrinos en el cielo es el Sol, que produce dos neutrinos electrónicos por cada núcleo de helio creado a partir de la fusión del hidrógeno, lo que corresponde a 66.000 mi-



R. Davis/Laboratorio Nacional de Brookhaven

El primer experimento de neutrinos solares en la mina Homestake (Dakota del Sur) fue diseñado por Ray Davis, quien recibió el Premio Nobel de Física en 2002 por este logro. El experimento tomó datos desde 1968 hasta 1994 y observó un total de unos 800 neutrinos solares mediante captura en cloro.

flones de neutrinos por cm^2 y por segundo a su llegada a la Tierra. Si quisiéramos protegernos de esta irradiación, necesitaríamos varios años luz de plomo. Pero el Sol está solo a ocho minutos luz: ningún material común que ocupe para el espacio entre la Tierra y el Sol podría parar los neutrinos. Por supuesto, esto también significa que son inofensivos para nosotros.

Los primeros neutrinos solares se observaron en la mina de oro Homestake, en Dakota del Sur (EE UU), en un experimento pionero de Raymond Davis por el que recibió el Premio Nobel de Física en 2002. Utilizó 600 toneladas de líquido para limpieza en seco (tetracloroetileno, C_2Cl_4), que es barato y contiene una gran cantidad del isótopo ^{37}Cl , que al absorber un neutrino electrónico (ν_e) se convierte en ^{37}Ar . Estos átomos de argón, un gas noble, fueron contados en base a su desintegración radiactiva. Entre 1968 y 1994 se contaron un total de 800 ν_e solares mediante lo

que se conoce como técnica radioquímica. El aparente déficit (por un factor de 3), conocido en aquellos días como el «problema de los neutrinos solares», era el primer vestigio de la conversión de sabor. Homestake solo podía observar lo que sobrevivía del flujo solar tras la conversión parcial de los sabores ν_μ y ν_τ . En 2002, el Observatorio de Neutrinos de Sudbury, en Canadá, informó de que había observado el flujo completo mediante una novedosa técnica que responde de igual manera a todos los sabores.

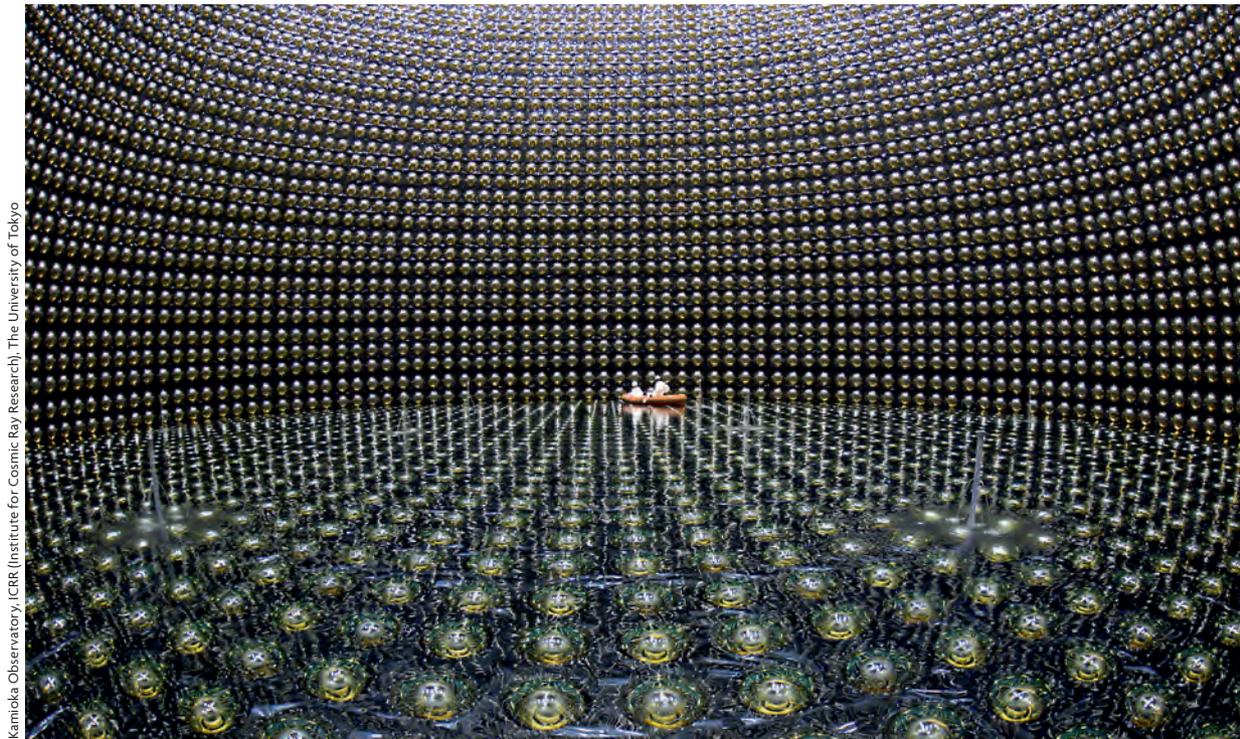
Homestake fue un caso pionero de «física subterránea», realizada en minas profundas o túneles bajo las montañas para proteger de los rayos cósmicos a experimentos que involucran sucesos raros en cuanto a su probabilidad. A día de hoy, existen multitud de experimentos para la detección de neutrinos y el estudio de la naturaleza de la materia oscura que ocupan un gran número de instalaciones subterráneas en todos los continentes. En España, el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (Huesca), ubicado en un antiguo túnel ferroviario en los Pirineos, es un ejemplo significativo. Históricamente, los primeros ejemplos fueron Kolar Gold Fields (en la India) y East Rand Proprietary Mine (en Sudáfrica). Se encuentran a más de dos kilómetros bajo tierra y detectan neutrinos producidos por los rayos cósmicos de alta energía en la atmósfera superior. El primero de estos «neutrinos atmosféricos», el primer neutrino detectado a partir

de una fuente natural, se cuantificó el 23 de febrero de 1965, una década después de que Frederick Reines y Clyde Cowan detectaran antineutrinos electrónicos desde una central nuclear en los EE UU, un logro reconocido con retraso con un Premio Nobel de Física, en 1995.

«EXISTEN MULTITUD DE EXPERIMENTOS PARA LA DETECCIÓN DE NEUTRINOS Y EL ESTUDIO DE LA NATURALEZA DE LA MATERIA OSCURA QUE OCUPAN UN GRAN NÚMERO DE INSTALACIONES SUBTERRÁNEAS EN TODOS LOS CONTINENTES»

■ OBSERVAR EL CIELO DE NEUTRINOS

Hoy en día, el cielo de neutrinos está vigilado por muchos detectores de gran tamaño, que suelen consistir en sensores lumínicos (fotomultiplicadores) que vigilan un volumen activo de agua o de aceite mineral (Scholberg, 2012). Las interacciones de neutrinos producen partículas cargadas que se propagan a velocidades superlumínicas en un medio material y que emiten luz por efecto Cherenkov (especialmente en el agua) o por la escintilación de ciertos compuestos orgánicos disueltos en aceite mineral. El Telescopio Subterráneo de Escintilación de Baksan (escintilador de 200 tonela-



Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo

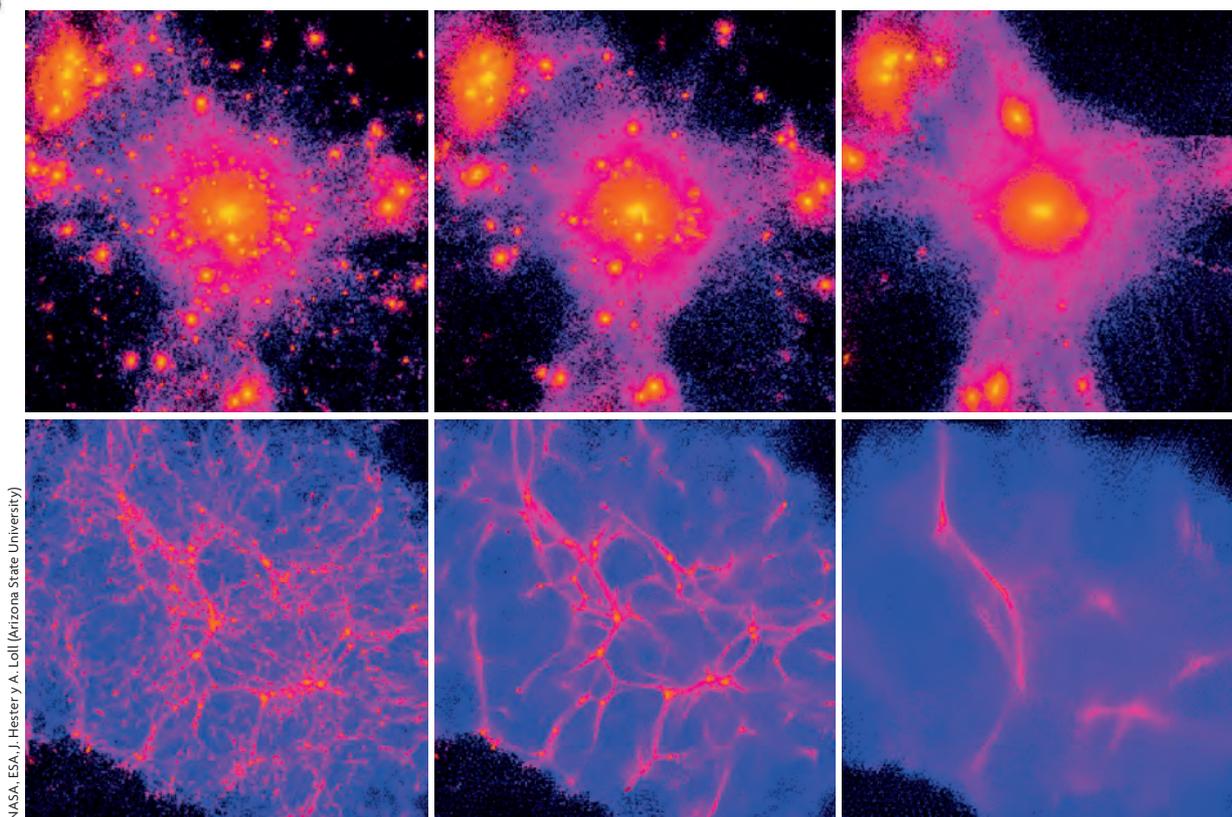
Observatorio de neutrinos Super-Kamiokande en la mina de Kamioka, Japón. El tanque subterráneo completo contiene 50.000 toneladas de agua ultrapura, rodeadas por 1.200 fototubos. Se muestra la superficie del fondo al comienzo del proceso de llenado, después de unas reparaciones (23 de abril de 2006), diez años después de empezar a funcionar, el 1 de abril de 1996. Este detector identificó inequívocamente la conversión de sabor de los neutrinos atmosféricos en 1998.

das), ubicado en una cavidad bajo la montaña Andyrchy en el norte del Cáucaso, comenzó a operar el 30 de junio de 1980 y sigue funcionando. Le siguió en 1984 el Detector Líquido de Escintilación (de 90 toneladas) en una cavidad del túnel de Mont Blanc, que operó hasta el devastador incendio del túnel en 1999. Los primeros grandes detectores Cherenkov (de varios miles de toneladas y con base acuosa) se construyeron a principios de la década de 1980 a gran profundidad, tanto en los EEUU como en Japón, para intentar detectar la desintegración de protones, un proceso hipotético que sigue esquivando a los expertos en la actualidad. En cambio, el 23 de febrero de 1987, tanto estos como Baksan observaron unos veinte eventos en unos pocos segundos, producidos por el estallido de neutrinos de la supernova 1987A, localizada en la Gran Nube de Magallanes, a una distancia de 160.000 años luz. El histórico evento sigue siendo la única señal de neutrinos observada a partir de un colapso estelar (Koshihba, 1992).

Al detector japonés Kamio-
kande, situado en la mina de

Kamioka (Kamioka Nucleon Decay Experiment), le siguió el Super-Kamiokande, del tamaño de una catedral (50.000 toneladas de agua ultrapura vigilada por 1.200 fototubos), que comenzó a operar el 1 de abril de 1996 y sigue funcionando en la actualidad, tras varias reparaciones y mejoras. Ha recogido unos 80.000 neutrinos solares y fue el primero en informar sobre la transformación de sabor de los neutrinos atmosféricos en 1998. Este detector estudia las oscilaciones en el sabor de los neutrinos con un experimento de larga base en el que se envía un haz de neutrinos a Kamioka desde Tokai, a 295 km, experimento que se conoce como Tokai-to-Kamioka o T2K. La belleza de los detectores de este tamaño es que pueden funcionar como observatorios para cumplir múltiples propósitos a la vez. Si el próximo colapso estelar y explosión supernova en nuestra galaxia ocurre a una distancia típica de 10 kpc, producirá unos 8.000 eventos de neutrinos en Super-Kamiokande y por lo tanto ofrecerá información detallada de los procesos físicos del colapso de un núcleo estelar.

«EL DETECTOR SUPER-KAMIOKANDE HA RECOGIDO UNOS 80.000 NEUTRINOS SOLARES Y FUE EL PRIMERO EN INFORMAR SOBRE LA TRANSFORMACIÓN DE SABOR DE LOS NEUTRINOS ATMOSFÉRICOS EN 1998»



NASA, ESA, J. Hestery y A. Loll (Arizona State University)

NASA, ESA, J. Hestery y A. Loll (Arizona State University)

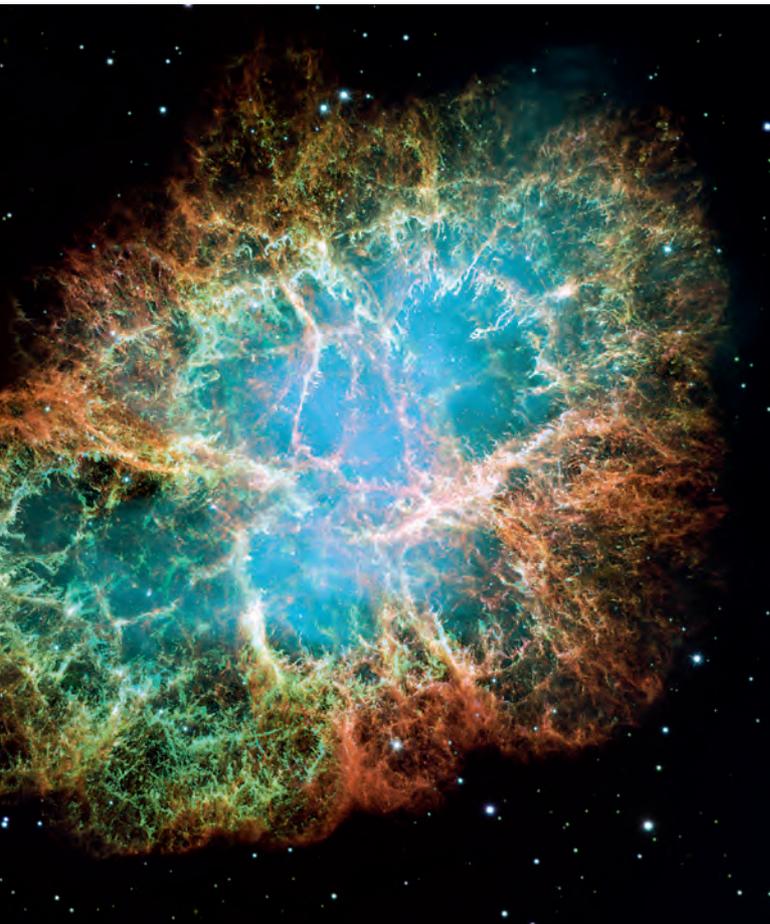
Simulación de la distribución de materia oscura cósmica para materia oscura fría, templada y caliente (de izquierda a derecha; arriba, zoom en uno de los cúmulos de galaxias que se observan en las imágenes inferiores). Los neutrinos con masas pequeñas forman materia oscura caliente y desgastarían la estructura a pequeña escala que se observa en el universo y que se corresponde con la materia oscura fría.

En la actualidad se está desarrollando un detector con base acuosa todavía más grande, el Hyper-Kamiokande, en la escala de los millones de toneladas (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration, 2015). La motivación para la física es descubrir si los neutrinos y los antineutrinos oscilan de la misma forma. Se espera que existan diferencias sutiles, una circunstancia conocida como «violación CP» (CP hace referencia a la simetría de las leyes físicas bajo inversión de carga más reflexión especular invertida), que implica que la materia y la antimateria (o los neutrinos y los antineutrinos) no se comportan de forma perfectamente simétrica.

El objetivo de detectar la violación CP también es la motivación del proyecto DUNE, un nuevo programa de oscilación de base larga en el que un haz de neutrinos se enviará desde el Fermilab (cercano a Chicago) y recorrerá 1.300 km hasta llegar a Homestake, cuyas instalaciones han sido renovadas (y han pasado a llamarse Instalaciones Stanford de Investigación Subterránea; DUNE Collaboration, 2015). El detector empleará un nuevo enfoque, basado en el uso de 20.000 toneladas de argón líquido.

Actualmente, se está creando el mayor escintilador jamás construido (20.000 toneladas), el Observatorio Subterráneo de Neutrinos Jiangmen (JUNO, por sus siglas en inglés) en el sur de China para cuantificar neutrinos originados en reactores a una distancia de 53 km para resolver otra pregunta abierta, el orden exacto de los tres valores de masa de los neutrinos (JUNO, Collaboration, 2016). JUNO será, además, un excelente observatorio de supernovas. Por otro lado, el mayor detector de escintilación existente es el KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector), en Japón, con 1.000 toneladas, que en 2002 envió neutrinos generados en reactores desde una distancia de 180 km para identificar las oscilaciones de sabor y fue el primero en observar «geoneutrinos» provenientes de desintegración radiactiva natural en la corteza de la Tierra, marcando así el inicio de la geofísica de neutrinos.

El Borexino (un escintilador de 300 toneladas) del Laboratorio Nacional Gran Sasso, cerca de Roma, también observó geoneutrinos. Sin embargo, su mayor logro fue cuantificar la distribución en energía de los neutrinos solares observados con una precisión sin pre-



La Nebulosa del Cangrejo está formada por los restos de una supernova histórica del año 1054 y el púlsar del cangrejo que está cerca de su centro son los restos compactos del colapso estelar.

cedentes y con energías más bajas de lo que era anteriormente posible, gracias a su umbral bajo y a una pureza nunca antes vista. De esta forma se están empezando a investigar detalles astrofísicos sobre el Sol que no eran accesibles.

El mayor detector de neutrinos hasta el momento es IceCube, en el Polo Sur. En este detector, se introducen fototubos en recipientes resistentes a la presión hasta profundidades de 2.400 metros, en agujeros perforados con agua caliente a través del hielo. Por su parte, los fototubos se conectan mediante cables. Al volverse a congelar, el hielo ofrece apoyo estructural a la matriz de fotosensores y sirve como material en el que se produce radiación Cherenkov. El detector se completó en diciembre de 2010, e instrumentalizó un volumen de un kilómetro cúbico con unos 5.000 módulos ópticos. El objetivo

del detector es encontrar neutrinos en las energías más altas producidas por los aceleradores cósmicos de partículas que han de existir en el universo para producir los rayos cósmicos de alta energía que constantemente azotan a la Tierra (IceCube Collaboration, 2013). El proyecto de detector IceCube-Gen2, con un volumen diez veces mayor, proporcionará una mayor nitidez de sus fuentes. En paralelo, es posible que se construya un detector de 1 km³ en el lago Baikal y un detector de varios km³ (o varios detectores grandes) en el Mediterráneo, el proyecto KM3NeT.

Estos detectores de gran volumen son demasiado toscos para identificar la luz Cherenkov en neutrinos de baja energía como los del Sol o la Tierra. No obstante, IceCube es un observatorio de supernovas fantástico porque la explosión de neutrinos que estas producen haría que el hielo brillase con luz Cherenkov y su perfil repentino lo alejaría claramente del ruido de fondo uniforme. En el agua de mar, el ruido de fondo es demasiado grande, debido a la abundancia natural de potasio radiactivo.

Pasemos ahora a analizar los escenarios astrofísicos candidatos a ser los aceleradores cósmicos que producen neutrinos en cantidades y energías detectables por los dispositivos descritos en los párrafos anteriores.

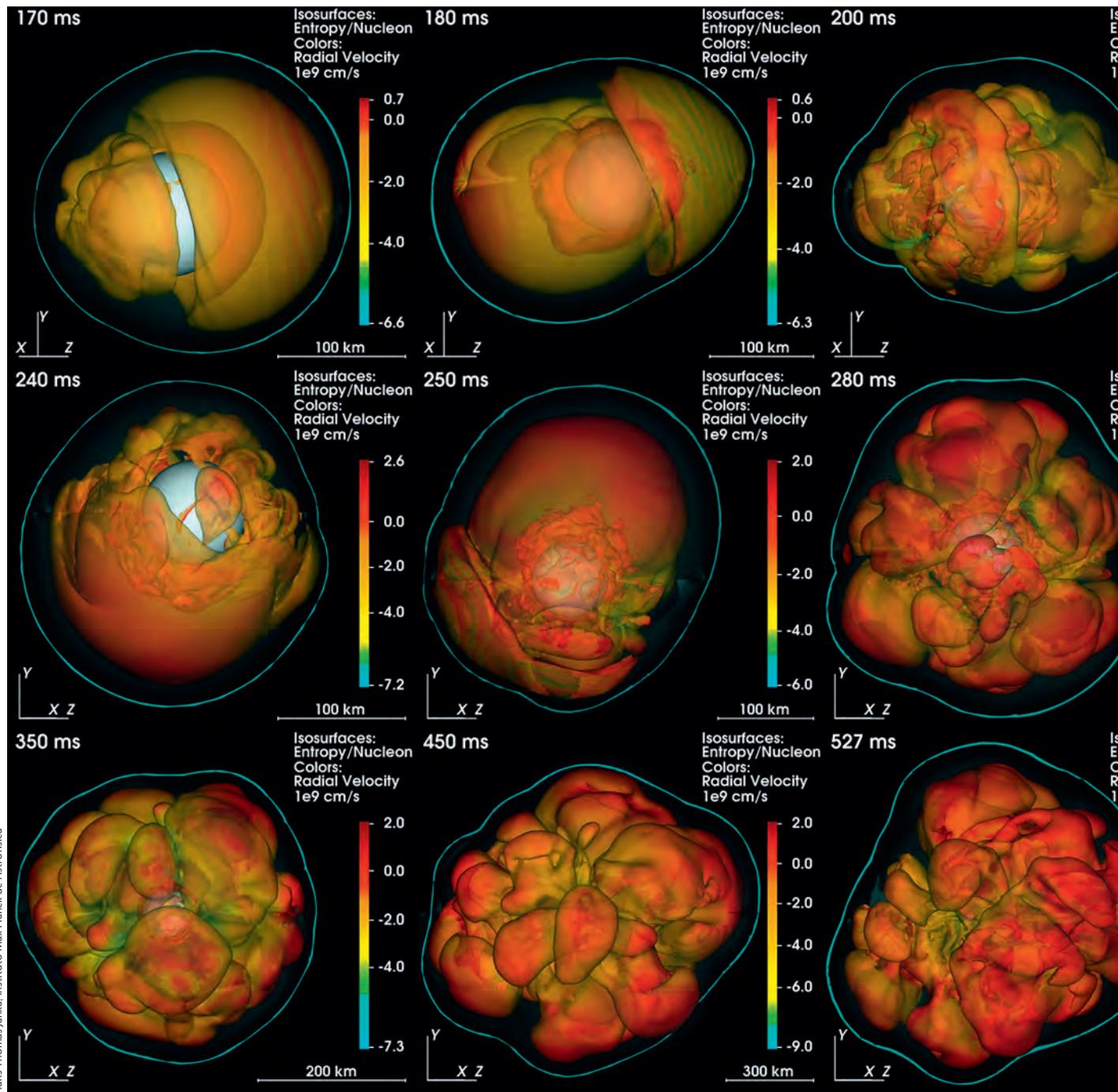
■ COLAPSO DE ESTRELLAS Y SUPERNOVAS

Las estrellas masivas, tras consumir todo el combustible de sus núcleos, acaban colapsando al final de sus vidas, normalmente formando una estrella de neutrones que a menudo se manifiesta como un púlsar. El núcleo estelar de 1 o 2 masas solares finalmente se encoge hasta un radio de 12 a 15 km, librando la energía gravitacional correspondiente al 15% de su masa. La mayor parte de esta enorme cantidad de energía escapa en unos pocos segundos en forma de neutrinos y antineutrinos de todos los sabores. El núcleo estelar colapsado, con la densidad típica de un núcleo atómico, es tan denso que

incluso los neutrinos quedan atrapados y solo pueden escapar por difusión, con un recorrido libre medio¹ de unos pocos metros. Aún así, son las partículas que escaparán más fácilmente y, por lo tanto, se llevarán la mayor parte de la energía.

«EL FONDO CÓSMICO DE NEUTRINOS, RELIQUIA DEL BIG BANG, REPRESENTA UNA PEQUEÑA PARTE DE LA MATERIA OSCURA CÓSMICA»

¹ El recorrido libre medio de una partícula se define como la distancia que puede recorrer sin interactuar. Así, cuanto más pequeña es, más interacciones se producen.



Hans-Thomas Janka, Instituto Max Planck de Astrofísica

Simulación en tres dimensiones de una supernova con un progenitor de veinte masas solares, que muestra la expansión y la convección a gran escala, y finalmente produce con éxito una explosión. Podemos ver diferentes tiempos en la evolución del material que rodea la protoestrella de neutrones que se ha formado después del colapso. Este material sufre convección (que es similar a lo que le pasa al agua cuando entra en ebullición) y por eso se ven todas estas burbujas en la secuencia temporal. La parte más externa de cada imagen (con una línea de color verdoso) indica la posición de la onda de choque, que cada vez está más alejada como corresponde a una explosión, tal y como se ve en la escala espacial que acompaña a cada imagen.

«LAS SEÑALES DE NEUTRINOS DE UN MILLAR DE SUPERNOVAS GALÁCTICAS ESTÁN EN CAMINO, POR LO QUE, MÁS TARDE O MÁS TEMPRANO, EL ÉXITO ESTÁ GARANTIZADO. SERÁ UN GRAN FILÓN DE INFORMACIÓN CIENTÍFICA»



Los neutrinos tienen un papel instrumental en la explosión de la supernova tras el colapso. Cuando el núcleo ha colapsado hasta una densidad nuclear, se endurece de forma repentina, y se forma una onda de choque en su borde que se mueve hacia afuera para expulsar el material exterior. Pero el choque de rebote se detiene, al enfrentarse al empuje de la presión del material que cae hacia el centro, y en aproximadamente una cuarta parte de los casos vuelve a colapsar y forma un agujero negro estelar. Este escenario es conocido como «supernova fallida». La mayoría de las veces, sin embargo, la deposición de energía de los neutrinos que se alejan del núcleo revive a la onda de choque. Este «mecanismo de explosión retardada», «mecanismo de neutrinos» o «mecanismo Bethe-Wilson» es el paradigma estándar para el colapso del núcleo en las explosiones supernova (Janka, 2012), aunque existen otras hipótesis al respecto. Las observaciones de neutrinos procedentes de la supernova 1987A han confirmado la idea de que los neutrinos están atrapados y escapan en unos segundos, pero una confirmación evidente de estas ideas solo podría llegar gracias a un estudio estadístico de neutrinos, que la comunidad espera ansiosamente.

Aunque los detectores existentes son grandes, necesitaríamos una supernova en nuestra propia galaxia o en uno de sus satélites más pequeños como las Nubes de Magallanes. Con una tasa general de unas pocas supernovas por siglo, la espera puede ser larga, pero también podría ocurrir en cualquier momento. Las señales de neutrinos de un millar de supernovas galácticas están en camino, por lo que, más tarde o más temprano, el éxito está garantizado. Será un gran filón de información científica (Mirizzi et al., 2016). A la espera de la próxima explosión, varios observatorios de neutrinos están conectados por el Supernova Early Warning System (“sistema de alerta temprana de supernovas”, SNEWS) y emitirán una alerta temprana a la comunidad astronómica.²

Las supernovas son relativamente escasas en galaxias individuales, pero la energía media a largo plazo liberada en forma de neutrinos es más o menos la misma que emiten todas las estrellas en forma de luz. Los neutrinos representan alrededor del 10% de la densidad de la radiación cósmica general, así como los fotones estelares, mientras que el grueso de esta radiación

cósmica lo componen las microondas cósmicas de fondo. El fondo cósmico de neutrinos, reliquia del Big Bang, de unos 336 por cm^3 en la actualidad, representa una pequeña parte de la materia oscura cósmica. Por lo tanto, el fondo difuso de neutrinos de supernova de todas las supernovas pasadas representa la mayor densidad de radiación cósmica de neutrinos. Es extremadamente difícil de detectar, pero una próxima mejora del Super-Kamiokande y el emergente detector JUNO podrían lograrlo, lo que extendería la astronomía de neutrinos hasta el límite del universo visible.

■ MATERIA OSCURA

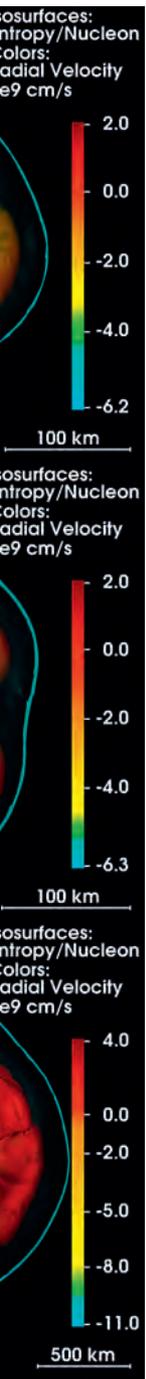
La dinámica gravitatoria de las galaxias y estructuras más grandes, así como la expansión cósmica en conjunto,

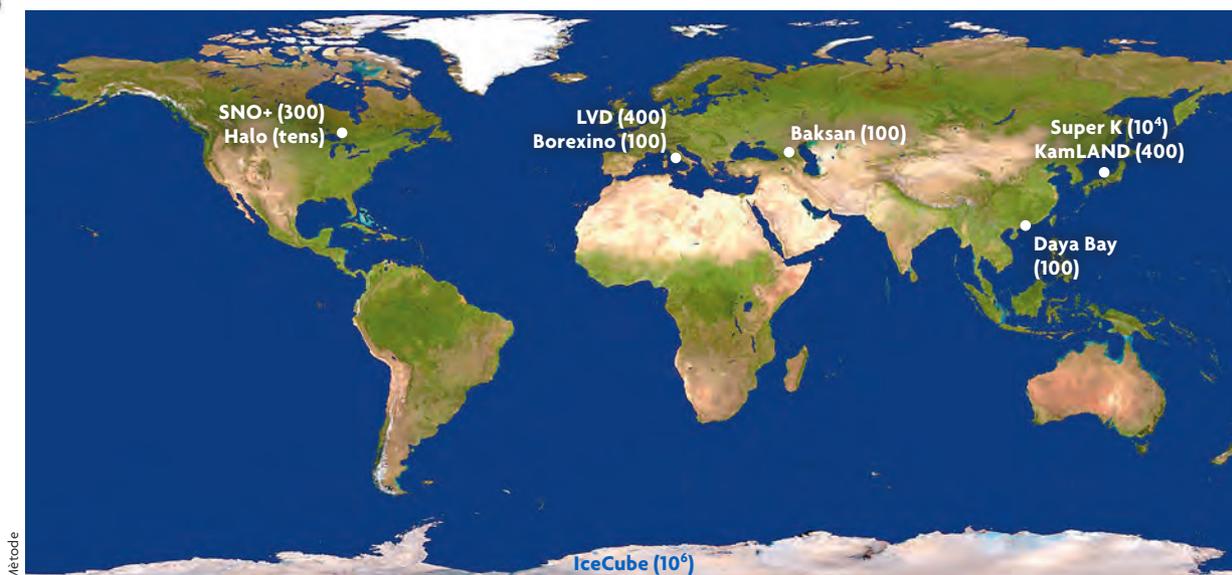
revela grandes cantidades de materia oscura que no se puede atribuir a materiales normales conocidos en la Tierra. Los neutrinos tienen una masa muy pequeña, lo que significa que después de producirse en las altas temperaturas del universo temprano se habrían frenado muy tarde (al no interactuar con la materia) y, por lo tanto, debido a su flujo libre, habrían reducido las fluctuaciones de densidad, que son necesarias para iniciar la formación de galaxias. Por consiguiente, los neutrinos formarían lo que se conoce como «materia oscura caliente», mientras que la formación de galaxias necesita la alternativa «fría», que se mueve muy despacio al principio. Las observaciones cosmológicas modernas de precisión imponen, de hecho, un límite restrictivo en la fracción que puede existir de materia oscura caliente y, por tanto, en el rango posible de masas de los neutrinos. Curiosamente, estos límites superiores se acercan a las diferencias de masa de los neutrinos indicados por las oscilaciones de sabor (Villaescusa-Navarro, Bull y Viel, 2015). La siguiente ronda de mediciones cosmológicas mejoradas, en particular la próxima misión Euclid, puede revelar las masas absolutas de los neutrinos del cielo. Por supuesto, también podrían contradecir a los experimentos con oscilaciones de sabor y plantear nuevas preguntas fundamentales.

Mientras tanto, la naturaleza física de la materia oscura sigue siendo esquiva. Una antigua hipótesis sostiene que consiste en nuevas partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP, en sus siglas en inglés), que se asemejan en muchos aspectos a los neutrinos, excepto porque tienen masas mucho mayores e interacciones

«EL FONDO DIFUSO DE NEUTRINOS DE SUPERNOVA ES EXTREMADAMENTE DIFÍCIL DE DETECTAR, PERO UNA PRÓXIMA MEJORA DEL SUPER-KAMIOKANDE Y EL EMERGENTE DETECTOR JUNO PODRÍAN LOGRARLO»

² Cualquiera puede apuntarse al servicio en <http://snews.bnl.gov/>.





Mapa del mundo con los observatorios de neutrinos a gran escala existentes. Entre paréntesis, el número de sucesos de neutrinos que se espera observar de la siguiente supernova galáctica si esta se encuentra a una distancia típica de 10 kpc. Se está debatiendo la construcción de nuevos grandes detectores, e incluso hay alguno en construcción.

todavía más débiles (Bertone, 2010). Estas partículas están motivadas por varias hipótesis de física teórica de partículas y se podrían encontrar, por ejemplo, en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, en sus siglas en inglés) del CERN, el acelerador de partículas más grande del mundo. También podrían aparecer de forma indirecta. Por ejemplo, podrían acumularse en el Sol y producir neutrinos de alta energía por aniquilación, que podrían ser detectados por el telescopio de neutrinos IceCube. Muchos experimentos de exploración directa buscan minúsculas deposiciones de energía de las WIMP que hipotéticamente forman la materia oscura galáctica, ya que estas podrían colisionar ocasionalmente con núcleos atómicos de varios materiales objetivo. Estas búsquedas de sucesos poco probables representan el uso principal de los laboratorios subterráneos de todo el mundo.

Todavía no se han encontrado WIMP, lo cual genera dudas sobre este paradigma. Sin embargo, la búsqueda aún no ha terminado, aunque llegará el momento en que los detectores sean tan grandes y tan sensibles que empezarán a cuantificar los neutrinos solares y el fondo causado por los neutrinos atmosféricos. Esta circunstancia se conoce como «*neutrino floor*» (“umbral mínimo de neutrinos”) en

las búsquedas de materia oscura. Una máxima tradicional dice que «la sensación de ayer es el calibrado de hoy y el fondo de mañana». En este sentido, parece hasta cierto punto absurdo que los neutrinos solares se puedan convertir en un obstáculo para el progreso científico.

**«SABEMOS QUE LA MATERIA
Y LA ANTIMATERIA
NO SON EXACTAMENTE
LO MISMO, PERO
LAS POCAS DIFERENCIAS
QUE CONOCEMOS
NO SON SUFICIENTES
PARA EXPLICAR
EL EXCESO CÓSMICO
DE MATERIA RESPECTO
A LA ANTIMATERIA»**

La energía de los neutrinos de una supernova solo es algo mayor que la de los neutrinos solares, así que el estallido de neutrinos de la próxima supernova cercana se podrá observar en la siguiente remesa de grandes detectores de WIMP de materia oscura, revelando otra sinergia de los experimentos subterráneos que buscan partículas de interacción débil (Horowitz, Coakley y McKinsey, 2003).

■ EL EXCESO DE MATERIA
SOBRE LA ANTIMATERIA EN
EL UNIVERSO

Se pasa por alto habitualmente que la existencia de materia normal en el universo es tan impresionante como la existencia de materia oscura. En términos de las simetrías físicas, se esperaría que hubiera la misma cantidad de materia y de antimateria que se habrían ya aniquilado, dejando en el universo poco más que fotones y neutrinos. En física de partículas sabemos



que la materia y la antimateria no son exactamente lo mismo, pero las pocas diferencias que conocemos no son suficientes para explicar el exceso cósmico de materia respecto a la antimateria. Una simple hipótesis propone la existencia de compañeros muy pesados a los neutrinos comunes, lo que explicaría que los neutrinos tengan masas tan pequeñas. En este «sistema de balanceo», la media geométrica de las masas de los nuevos neutrinos pesados y de los comunes serían similares a la media de las masas de los quarks ordinarios y de los leptones cargados. Al mismo tiempo, la desintegración de estos neutrinos pesados en el universo temprano podría ser la responsable de la asimetría cósmica entre materia y antimateria de forma natural, mediante un proceso conocido como leptogénesis (Buchmüller, Di Bari y Plümacher, 2005).

Un vestigio de este modelo es la expectativa de que los neutrinos comunes sean sus propias antipartículas. Se dice entonces que son partículas de tipo Majorana. Esta propiedad permite un proceso llamado «doble desintegración beta sin neutrinos» (Dell’Oro, Marcocci, Viel y Vissani, 2016). Algunos núcleos inestables se desintegran emitiendo dos electrones («doble beta») y dos neutrinos a la vez, pero podrían hacerlo también sin emitir neutrinos si estos son de tipo Majorana. Se podría decir que uno de los neutrinos se reabsorbe inmediatamente como antineutrino, dejando solo emerger del núcleo que se desintegra a los dos electrones. Buscar este raro fenómeno es otro tema popular en la física subterránea, representada en España por el proyecto NEXT del laboratorio de Canfranc.³ Sin embargo, al ser las masas de los neutrinos tan pequeñas, este proceso es extremadamente difícil de encontrar.

■ EL REINADO DE LOS DÉBILES EN LOS CIELOS

Aunque los fenómenos cotidianos en la Tierra están determinados por procesos electromagnéticos y nucleares, el universo en su totalidad está dominado por un lado por la gravedad y por otro por las partículas de interacción débil. La identidad de la materia oscura sigue siendo un misterio del universo sin resolver. Mientras, los neutrinos han madurado de su condición de partículas fantasma a ser mensajeros visibles de algunos de los fenómenos astrofísicos más intrigantes. Muchos de

los experimentos diseñados para desentrañar las preguntas restantes sobre neutrinos son también observatorios de neutrinos astrofísicos y, especialmente, de la próxima supernova cercana y su estallido de neutrinos. La astronomía de neutrinos, de forma similar a los recientes comienzos de la astronomía de ondas gravitacionales, es un campo aún en pañales que revelará una nueva visión del universo. ☉

«LOS NEUTRINOS HAN MADURADO DE SU CONDICIÓN DE PARTÍCULAS FANTASMA A SER MENSAJEROS VISIBLES DE ALGUNOS DE LOS FENÓMENOS ASTROFÍSICOS MÁS INTRIGANTES»

REFERENCIAS

- Bertone, G. (Ed.). (2010). *Particle dark matter: Observations, models and searches*. Cambridge: University Press.
- Bilenky, S. (2010). Introduction to the physics of massive and mixed neutrinos. *Lecture Notes in Physics*, 817, 1–255. doi: 10.1007/978-3-642-14043-3
- Buchmüller, W., Di Bari, P., & Plümacher, M. (2005). Leptogenesis for pedestrians. *Annals of Physics*, 315, 305–351. doi: 10.1016/j.aop.2004.02.003
- Dell’Oro, S., Marcocci, S., Viel, M., & Vissani, F. (2016). Neutrinoless double beta decay: 2015 Review. *Advances in High Energy Physics*, 2162659. doi: 10.1155/2016/2162659
- DUNE Collaboration. (2015). Long-baseline neutrino facility (LBNF) and deep underground neutrino experiment (DUNE). Conceptual design report. Volume 2: The Physics Program for DUNE at LBNF. Consultado en: <http://arXiv.org/abs/1512.06148>
- Gariazzo, S., Giunti, C., & Laveder, M. (2016). *Neutrino unbound*. Consultado en: <http://www.nu.to.infn.it/>
- Horowitz, C. J., Coakley, K. J., & McKinsey, D. N. (2003). Supernova observation via neutrino-nucleus elastic scattering in the CLEAN detector. *Physical Review D*, 68, 023005. doi: 10.1103/PhysRevD.68.023005
- Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration. (2015). Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 053C02. doi: 10.1093/ptep/ptv061
- IceCube Collaboration. (2013). First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube. *Physical Review Letters*, 111, 021103. doi: 10.1103/PhysRevLett.111.021103
- Janka, H.-T. (2012). Explosion mechanisms of core-collapse supernovae. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62, 407–451. doi: 10.1146/annurev-nucl-102711-094901
- JUNO Collaboration. (2016). Neutrino physics with JUNO. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 43, 030401. doi: 10.1088/0954-3899/43/3/030401
- Koshiha, M. (1992). Observational neutrino astrophysics. *Physics Reports*, 220, 229–381. doi: 10.1016/0370-1573(92)90083-C
- Mirizzi, A., Tamborra, I., Janka, H.-T., Saviano, N., Scholberg, K., Bollig, R., ... Chakraborty, S. (2016). Supernova neutrinos: Production, oscillations and detection. *La Rivista del Nuovo Cimento*, 39, 1–112. doi: 10.1393/ncr/i2016-10120-8
- Scholberg, K. (2012). Supernova neutrino detection. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62, 81–103. doi: 10.1146/annurev-nucl-102711-095006
- Villaescusa-Navarro, F., Bull, P., & Viel, M. (2015). Weighing neutrinos with cosmic neutral hydrogen. *Astrophysical Journal*, 814, 146–165. doi: 10.1088/0004-637X/814/2/146

Georg G. Raffelt. Científico senior del Instituto Max Planck de Física en Múnich (Alemania). Su investigación se centra en las áreas de física teórica de astropartículas y cosmología. Una de sus especialidades son los neutrinos de supernovas y las oscilaciones de neutrinos en un medio denso.

³ <http://next.ific.uv.es/next/>