

Gadolinio en Super-Kamiokande y el inicio de nuevas observaciones

21 de agosto de 2020

Colaboración Super-Kamiokande

Acaba de finalizar la primera fase de introducción de Gadolinio (Gd), en el detector Super-Kamiokande (SK), iniciando así el experimento un nuevo período de observaciones.

Son 13 toneladas de sulfato de gadolinio octohidrato [$Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$] las que se han introducido en el tanque SK, en un proceso ininterrumpido de 24 horas al día, 7 días a la semana, desde el 14 de julio de 2020 hasta al 17 de agosto. Ello ha sido la culminación de casi 10 años de un intenso programa de I+D.

La adición de Gadolinio abre a Super-Kamiokande la posibilidad de descubrir el mar de neutrinos conocido como "neutrinos reliquia de supernova" producido por explosiones de supernovas que han ocurrido desde el comienzo del universo. Además, el Gadolinio mejora la capacidad de SK para observar el estallido de neutrinos de cualquier supernova que ocurra en nuestra galaxia y aumenta significativamente su sensibilidad a otros procesos fundamentales como la discriminación entre neutrinos y antineutrinos atmosféricos y la observación de neutrinos artificiales.

Detector Super-Kamiokande. El detector SK es un tanque cilíndrico de 39,3 m de diámetro por 41,4 m de altura lleno con 50.000 metros cúbicos de agua ultra pura y situado a 1.000 m bajo tierra en la mina Kamioka en la ciudad de Hida, prefectura de Gifu, Japón. Super-Kamiokande detecta interacciones de neutrinos en el agua usando aproximadamente 13.000 sensores ópticos (ver Figura 1). El detector se ha utilizado para estudiar la naturaleza de los neutrinos atmosféricos, solares y artificiales, en particular el fenómeno de oscilación de neutrinos (T. Kajita, Premio Nobel de Física 2015), desde 1996.

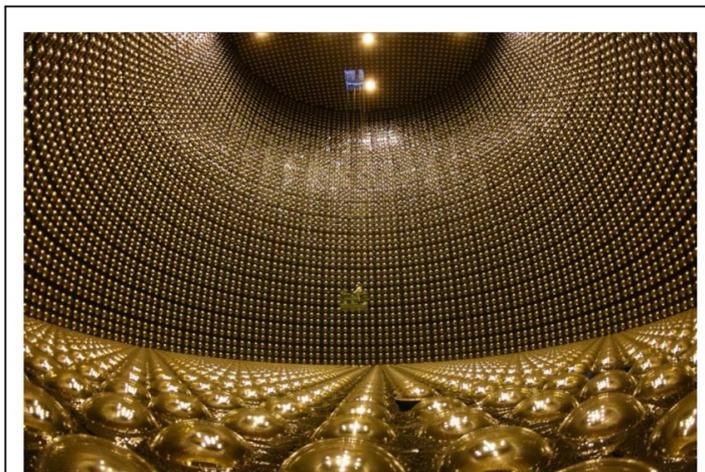


Fig.1 Super-Kamiokande detector

Neutrinos de explosiones de supernova. Las explosiones de supernovas ocurren en aquellas estrellas con una masa mayor que 8 veces la del sol, al alcanzar el final de su vida. Se encuentran entre los fenómenos más energéticos del universo. La energía liberada durante los primeros 10 segundos de la explosión equivale a 300 veces la energía total liberada por el sol durante toda su vida útil de 10 mil millones de años. Aproximadamente el 99% de la energía se emite en forma de neutrinos y el 1% restante se gasta en energía que rompe la estrella. La luz producida en la explosión representa solo el 0,01% de la energía total. En consecuencia, los neutrinos transportan mucha más información que la luz sobre la naturaleza de estas explosiones.

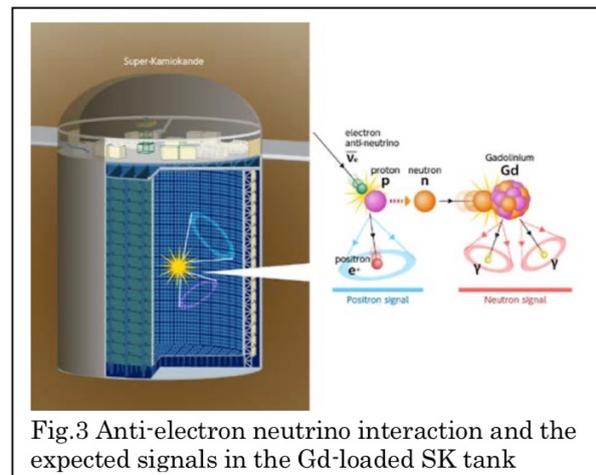
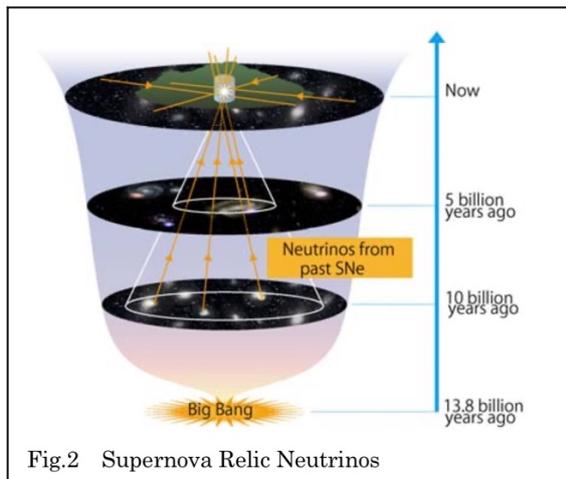
Hasta la fecha, neutrinos de supernovas solo se han observado una vez, tras la explosión SN1987A en la Gran Nube de Magallanes. El predecesor de Super-Kamiokande, el experimento Kamiokande, detectó 11 eventos de neutrinos en ese momento (M. Koshiba, Premio Nobel de Física 2002). Aunque el número de eventos observados fue pequeño, fueron suficientes para demostrar que la energía total estimada y la duración (aproximadamente 10 segundos) son consistentes con el mecanismo teórico básico de las explosiones de supernovas.

Las supernovas son un "laboratorio" ideal para verificar las leyes básicas de la física ya que su mecanismo convulsiona el comportamiento de la materia a densidades ultra-altas con la relatividad general. Por esta razón, se necesitan (muchos más) datos de estos neutrinos. El volumen de Super-Kamiokande es aproximadamente 15 veces mayor que el de Kamiokande y, en consecuencia, SK espera observar un número mucho mayor eventos de neutrinos (aproximadamente 8.000) de una supernova galáctica. Tal observación contribuiría significativamente a dilucidar el mecanismo de explosión. Sin embargo, las explosiones de supernovas en nuestra galaxia solo ocurren cada 30 ~ 50 años, de forma aleatoria, por lo que quizás solo se puedan observar una o dos (o ninguna) mientras SK está funcionando. Por tanto, para obtener más información sobre las explosiones de supernovas, es importante estudiar las que se producen en galaxias alejadas de la Vía Láctea.

Búsqueda de neutrinos reliquia de supernova. Hay cientos de miles de millones de galaxias en el universo y se estima del orden de una supernova cada segundo ocurriendo en algún lugar del universo. Dado que los neutrinos son emitidos en todas esas explosiones, éstos se difunden y se acumulan en el universo (Figura 2). Estos neutrinos se llaman "neutrinos reliquia de supernova" (SRN) o "Fondo difuso de neutrinos de supernova". De acuerdo con cálculos teóricos basados en nuestro conocimiento actual, habría miles de estos neutrinos pasando por un área del tamaño de una mano humana cada segundo. Esto corresponde a varias interacciones de neutrinos en el tanque SK cada año. Aunque tales interacciones han estado ocurriendo dentro del detector SK desde que comenzaron sus observaciones, eran indistinguibles del ruido y no se pudieron identificar hasta ahora.

En las supernovas se producen todos los tipos de neutrinos (tipo electrónico, tipo muón, tipo tau y sus anti-partículas). Los anti-neutrinos-electrónicos son los más reactivos con el agua del detector SK, interaccionando con un protón (los núcleos del hidrógeno en el H₂O) y produciendo un positrón y un neutrón. Hasta ahora, SK ha buscado SRN utilizando sólo la información de los positrones, ya que los neutrones no se podían detectar fácilmente. Como resultado, la sensibilidad de búsqueda ha estado limitada por decenas de miles de

interacciones de rayos cósmicos y neutrinos solares que producen una señal similar que tapa los pocos eventos SRN esperados cada año.



Mejora de medida por el Gadolinio. El Gadolinio tiene la mayor afinidad para captura de neutrones entre todos los elementos de la naturaleza, con la particularidad de una emisión de rayos gamma de energía significativa en el proceso de absorción. Con la adición de Gadolinio al agua de SK, los neutrones generados en las interacciones de anti-neutrinos SRN son capturado por núcleos de Gd, produciendo así rayos gamma observables como se muestra en la Figura 3. Tal interacción crea así una señal característica: primero, la luz Cherenkov emitida por el positrón dentro del tanque y luego, una fracción de milisegundo después, la luz Cherenkov de los rayos gamma producidos dentro de unos 50 cm del mismo lugar. Dado que las otras interacciones rara vez producen este tipo de señal, es posible aislar los eventos SRN. Esta es la razón por la que se agrega Gd a Super-Kamiokande. Para una concentración de 0,01%, el Gd capturará el 50% de los neutrones en SK. Este número pasa a ser 90% con una concentración de 0,1%.

El descubrimiento del SRN permitirá el estudio de las características generales de las explosiones de supernovas porque los neutrinos de un gran número de ellas contribuyen al SRN que llega ahora a SK. Además, la medida del espectro de energía del SRN nos permitirá estudiar la ocurrencia de supernovas a lo largo de la historia del universo. Por otro lado, en algunas supernovas, al colapsar el núcleo de la estrella masiva colapsa debido a la gravedad se puede formar un agujero negro, lo que impide que se emita luz. Sin embargo, incluso en esta situación se espera la emisión de una gran cantidad de neutrinos. Por lo tanto, comparar la intensidad de la señal SRN observada con la frecuencia de las supernovas observadas ópticamente proporciona información sobre la velocidad a la que se crean estos agujeros negros, lo que también aumentará nuestra comprensión del Universo. Finalmente, se cree que muchos de los elementos pesados que nos rodean se crearon durante reacciones de fusión dentro de estrellas masivas, durante explosiones de supernovas y durante la fusión de estrellas de neutrones (cuerpos celestes de alta densidad formados después de algunas explosiones de supernovas). Estudiar y profundizar en las explosiones de supernovas nos permitirá avanzar en nuestra comprensión al respecto.

Gadolinio y su manipulación segura. El Gadolinio es una “tierra rara” con número atómico 64. Además de su gran afinidad para la captura de neutrones, el Gd tiene un muy alto

momento magnético y se utiliza como agente de contraste en exploraciones de resonancia magnética (IRM). Existe de forma natural en suelo japonés en una concentración de aproximadamente 3 a 7 ppm (partes-por-millón). Aunque no hay en Japón regulaciones ambientales para Gd, dado que la concentración natural en el río Jinzu cerca de SK es muy pequeña, sólo 4 ~ 10 ppt río abajo de la ciudad de Kamioka, el Gd en SK debemos de manejarlo con cuidado. El tanque de SK fue renovado en 2018 por esta razón. Antes de esta remodelación, SK filtraba aproximadamente una tonelada de agua pura cada día de las 50,000 toneladas de agua en el tanque, por lo que se aplicó un agente impermeabilizante a todas las juntas de soldadura de los paneles de acero inoxidable que forman la pared del tanque (Figura 4). Desde entonces, no se han observado fugas significativas. Además, monitorizamos de forma continua los alrededores del detector para garantizar que no haya fugas al medio ambiente de agua con Gd.

Introducción de gadolinio. Tras la remodelación del tanque en 2018, se llenó y se hizo funcionar con agua hasta febrero de 2019. Durante este período, el sistema original de tratamiento de agua fue utilizado para hacer circular y purificar el agua. Al mismo tiempo, en paralelo, construimos el nuevo sistema de circulación y purificación para tratar el agua con Gd, que habíamos desarrollado durante el periodo de I+D y demostrado que proporcionaba el mismo nivel de pureza y transparencia que el sistema original, permitiendo al Gd permanecer disuelto en el agua SK (Figuras 5 y 6). El elemento más importante en este sistema es una resina de intercambio iónico especial desarrollada conjuntamente por el Universidad de Tokio y la compañía “Organo Corporation” para eliminar todas las impurezas iónicas en el agua excepto las relacionadas con Gd, Gd_3^+ y $(SO_4)_2^-$.

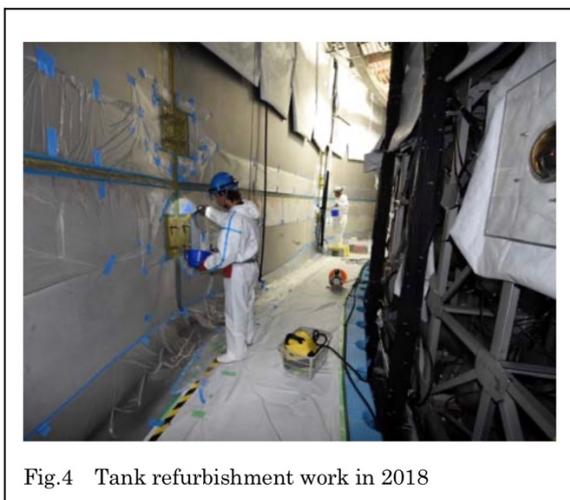


Fig.4 Tank refurbishment work in 2018

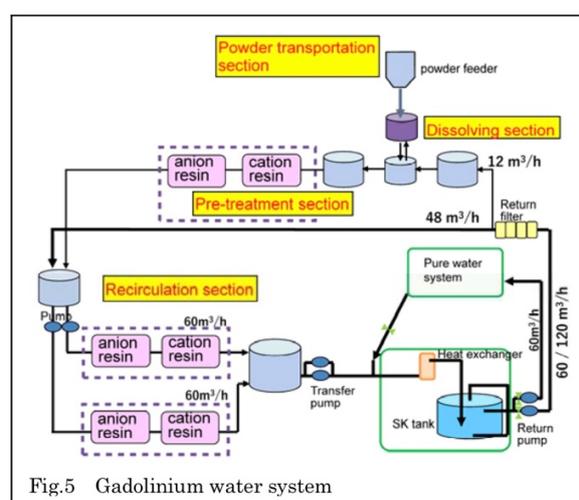


Fig.5 Gadolinium water system

Para este primer período de ejecución con Gd, se han introducido 13 toneladas de sulfato de gadolinio octohidrato [$Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$]. Esto corresponde a una concentración de 0.026% de [$Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$] en peso disuelto en 50.000 toneladas de agua pura, lo que equivale a una concentración de 0.01% de Gd en peso. Con el fin de preservar la capacidad de Super-Kamiokande para realizar medidas precisas de neutrinos solares y otras reacciones, el sulfato de gadolinio debe de tener niveles extremadamente bajos de impurezas radioactivas. Las técnicas para alcanzar tal pureza en producción han sido desarrolladas en colaboración con Nippon Yttrium Co., Ltd. (Japón).

El Gadolinio se carga en Super-Kamiokande usando el sistema que se muestra esquemáticamente en la Figura 5. Las Figuras 6 y 8 muestran el sistema real. La Figura 7 muestra la forma característica de polvo húmedo blanco de la sal de Gd. Para la disolución se envía un caudal de 60 toneladas/hora de agua pura desde el tanque SK al sistema de carga de Gd. El flujo se divide en dos corrientes, uno para purificación que opera a 48 toneladas/hora, y otra de 12 toneladas/hora para la disolución del $[Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O]$. Este último, una vez disuelto el Gd, se fusiona con la corriente de agua pura de 48 toneladas/hora y se envía al tanque SK usando la sección de "recirculación" (ver Figura 5).

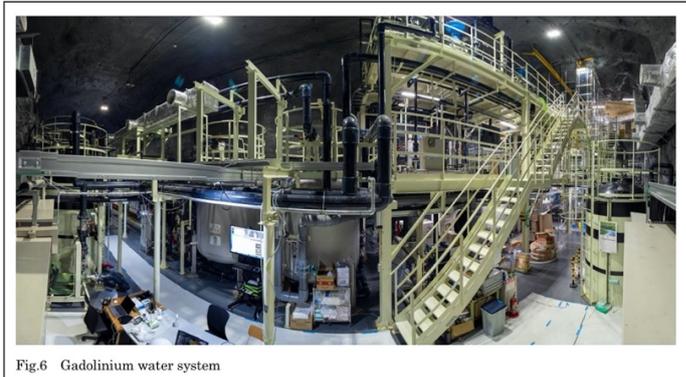


Fig.6 Gadolinium water system

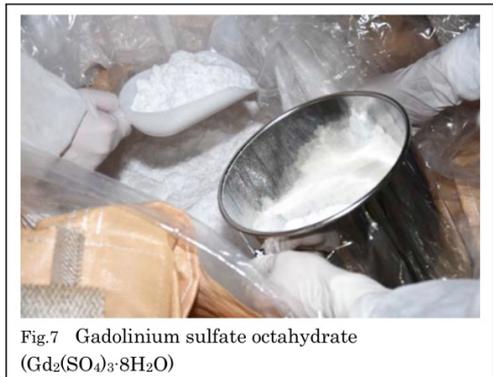


Fig.7 Gadolinium sulfate octahydrate ($Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$)

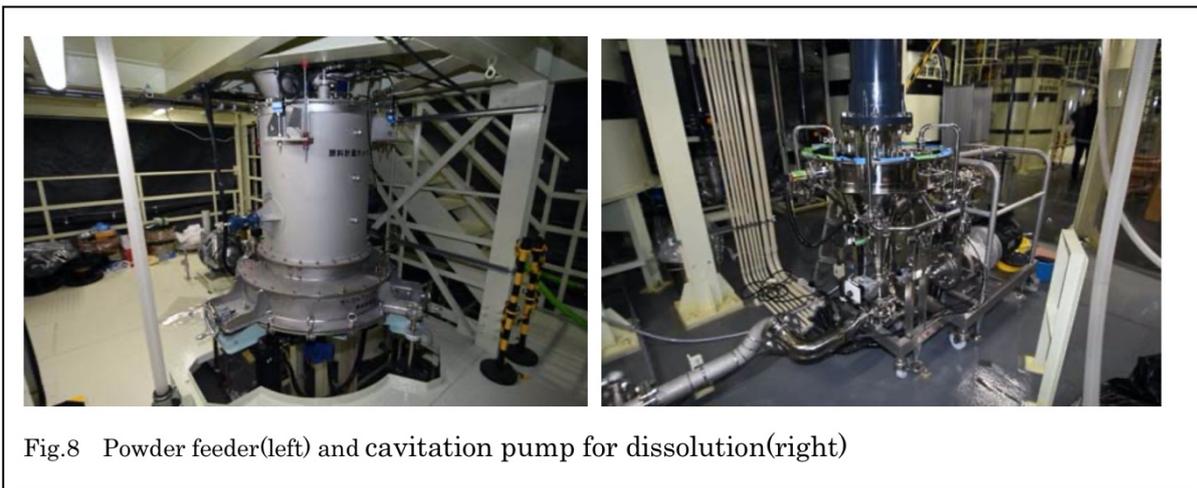
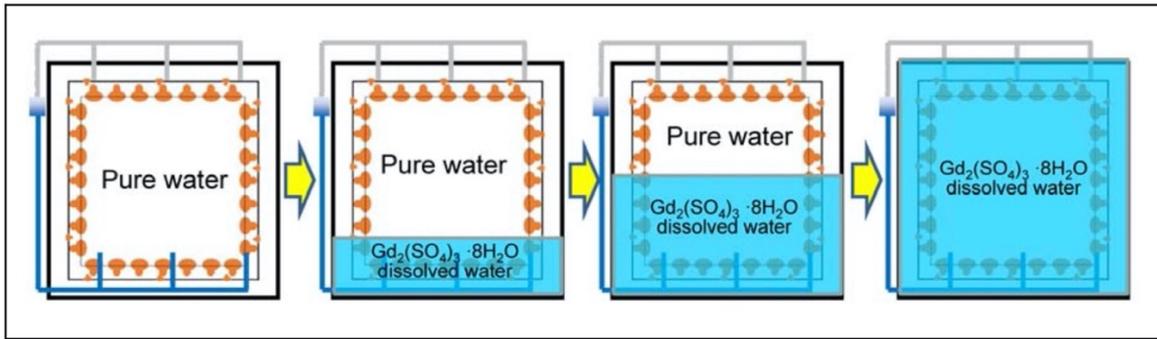


Fig.8 Powder feeder(left) and cavitation pump for dissolution(right)

La Figura 9 muestra esquemáticamente el proceso. Se extrae el agua pura desde la parte superior del tanque llevándola al sistema de carga de Gd y, desde este sistema, el agua con el Gd disuelto se envía de vuelta al tanque, pero a su fondo. Antes de iniciar la carga de Gd, la temperatura del agua en SK se elevó en aproximadamente $0,3^\circ C$ utilizando para ello el sistema de recirculación de agua pura. Por otro lado, el agua con Gd se ha introducido con una temperatura aproximadamente $0,3^\circ C$ más baja que la del agua del tanque. Debido a esta diferencia de temperatura, el agua con Gd disuelto fue llenando gradualmente el tanque desde el fondo como se muestra en la Figura 9, permitiendo la distribución completa del Gd en aproximadamente un ciclo de recirculación de aproximadamente 35 días.



La Figura 10 muestra la cantidad acumulada de $[Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O]$ según se ha ido añadiendo a lo largo del tiempo. La línea recta indica que el proceso de carga ha sido muy estable durante todo el período, completándose el 17 de agosto. La Figura 11 muestra cómo la concentración de Gd en el tanque ha ido cambiando diariamente, lo que indica que el Gd ha llenado el tanque gradualmente desde el fondo hasta la parte superior de SK, como se esperaba.

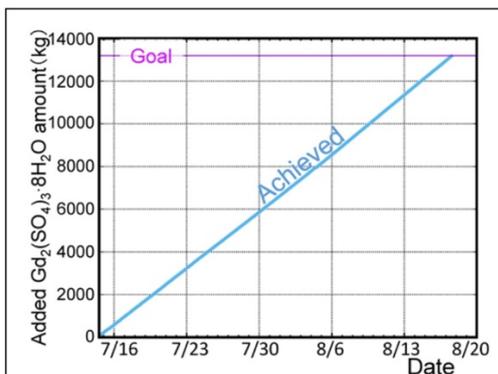


Fig.10 Cumulative amount of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ added over time

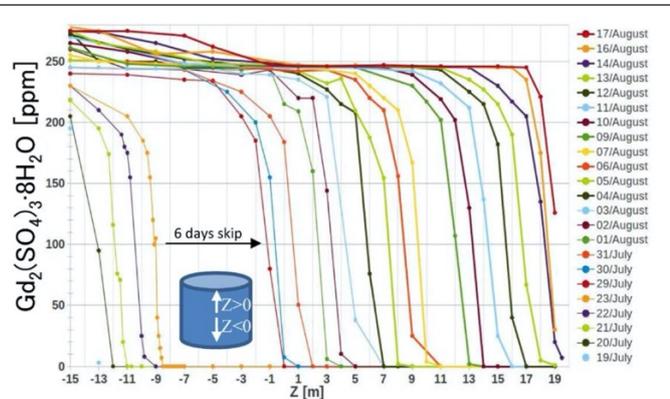


Fig.11 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ concentration in the tank changed daily

Planes futuros. La primera etapa de carga de Gd descrita aquí proporciona una concentración de Gd de 0.01% lo que resulta en una eficiencia de captura de neutrones del 50%. Durante los próximos años aumentaremos la concentración de Gd, lo que acelerará nuestro esperado descubrimiento de los neutrinos reliquia de supernova.