

EL DESCUBRIMIENTO DE LAS OSCILACIONES DE LOS NEUTRINOS

DISCOVERY OF NEUTRINO OSCILLATIONS

TAKAAKI KAJITA

Institute for Cosmic Ray Research
University of Tokio
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa
Chiba Prefecture - Japan

Es un honor poder dar esta charla y quiero agradecerles por organizar este maravilloso evento.

Ahora hablaré un poco sobre el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos. Aquí presento un resumen acerca de la charla; con una muy breve introducción sobre qué son los neutrinos. Luego hablaré sobre el déficit de los neutrinos atmosféricos, luego sobre el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos, y antes de terminar, quiero añadir algunas cosas más sobre las oscilaciones de los neutrinos; y luego presentaré un resumen de toda la charla.

Ahora quiero decirles qué son los neutrinos, así que si no entienden qué son los neutrinos desde un principio, no van a entender nada de la charla. Los neutrinos son partículas elementales, como lo son los electrones o los quarks. Los neutrinos no tienen carga eléctrica. Existen tres tipos de neutrinos: los neutrinos electrónicos, los neutrinos muónicos y los neutrinos tauónicos. Los neutrinos se producen en varios lugares como la atmósfera de la tierra, el centro del Sol, y otros sitios. Los neutrinos pueden penetrar fácilmente a través de la Tierra e incluso el Sol. Por ejemplo, los neutrinos producidos al otro lado de la Tierra pueden fácilmente penetrar la Tierra.

Sin embargo, los neutrinos interactúan con la materia muy raras veces. Por ejemplo, un neutrino muónico produce un muón, y un neutrino electrónico produce un electrón. En el muy exitoso Modelo Estándar de las partículas, se asume que los neutrinos no tienen masa. Sin embargo, los físicos se han estado preguntando si realmente los neutrinos no tienen masa.

Esta es la introducción a los neutrinos y ahora pasaré al déficit de los neutrinos atmosféricos. Antes de discutir acerca de los neutrinos atmosféricos como tales, quiero recordar un poco la historia de los neutrinos atmosféricos. En los años 70s se propusieron nuevas teorías que unificaban las fuerzas fuerte, débil y electromagnética. Esta es una teoría bastante convincente. Estas teorías predicen que los protones y los neutrones deberían decaer con una vida media de cerca de 10²⁸ a 10³² años. Por supuesto, estos números representan tiempos muy largos. Pero, si hacemos un experimento con mucho cuidado, es posible medir estas vidas medias de los protones y los neutrones. Las implicaciones físicas de detectar

el decaimiento de los protones son muy importantes. La identificación de los decaimientos de protones es similar a la identificación de fósiles. Por lo tanto, varios experimentos para buscar el decaimiento del protón empezaron en los años 80s. Uno de esos experimentos era el de Kamiokande. Este es un dibujo del experimento Kamiokande. Es un experimento de 3 KTon de agua, basado en el efecto Cerenkov. Si una partícula con carga se produce dentro del agua, entonces se producen fotones de Cerenkov. Seguidamente, esos fotones se detectan con los fototubos multiplicadores.

Por supuesto, para detectar el decaimiento de los protones, es necesario construir un detector. Por lo tanto, en 1983 iniciamos la construcción del detector Kamiokande. Esta foto fue tomada una mañana de la primavera del año 1983. La foto fue tomada justo antes de entrar a la mina. Y pueden ver, aquí está el Prof. Koshiba, quien ganó un Premio Nóbel en 2002. Aquí me pueden ver, acá atrás, y también pueden ver al Prof. Takita, cuando era más joven.

En este experimento Kamiokande observamos muchos eventos asociados a neutrinos. Los neutrinos atmosféricos se producen gracias a las interacciones de los rayos cósmicos en la atmósfera. Cuando un rayo cósmico interactúa con la atmósfera se producen piones que decaen en muones, que decaen en electrones. En esta cadena de decaimiento se producen dos neutrinos muónicos y un neutrino electrónico, y es posible observar estos neutrinos por debajo de la tierra.

Quiero mencionar ahora un poco de mi trabajo en los años 80s. Obtuve mi doctorado en marzo de 1986. Poco después de obtener el doctorado, inicié el trabajo de mejorar el software de análisis. Uno de los programas de análisis era para identificar el tipo de partícula. Particularmente, quería saber si un anillo Cerenkov era producido por un electrón o por un muón. Este es un anillo típico producido por un muón, y este otro es un anillo típico producido por un electrón. El nuevo software fue aplicado a eventos de datos reales. El resultado fue muy extraño: el número de eventos asociados a neutrinos muónicos fue mucho menor de lo que esperaba. Por supuesto que eso no puede ser cierto. Lo que primero que pensé es existían algunos errores en algún lugar, en la simulación, en la reducción de los datos o

en la reconstrucción de los eventos. Así que, nosotros (al decir nosotros quiere decir principalmente Prof. Takita y yo), iniciamos varios estudios para encontrar errores, al final del año 1986.

Así que nos pusimos a trabajar seriamente por cerca de un año, y nuestra conclusión fue que el déficit de neutrinos no podría deberse a algún problema grave en el análisis de los datos ni en las simulaciones. Así que decidimos publicar este resultado, y este es el resultado principal presentado en el artículo: noten que el número de eventos de neutrinos electrónicos está de acuerdo con lo que se esperaba. En cambio, si observamos el caso de los neutrinos muónicos, podemos ver que los datos reflejan un valor mucho menor al que se esperaba. Así que nuestra conclusión fue que ningún efecto sistemático del detector o alguna incerteza en los flujos de los neutrinos atmosféricos era responsable de este desacuerdo. Así que una de las conclusiones podría ser que la oscilación de los neutrinos podría explicar los datos. También quiero hablar un poco de mi recuerdo personal. Estaba muy emocionado por la posibilidad de que exista una oscilación de neutrinos con un gran ángulo de mezcla. Particularmente, parecía que los neutrinos muónicos parecían oscilar máximamente a otro tipo de neutrinos, que no era lo que se esperaba. De hecho, este gran ángulo de mezcla no era lo que se esperaba de trabajos anteriores. Por lo tanto, yo estaba muy emocionado y fue la motivación para estudiar de manera muy seria este fenómeno.

Ya que he mencionado las oscilaciones de los neutrinos, quiero explicar que son esas oscilaciones de los neutrinos. Si los neutrinos tienen masa, entonces los neutrinos pueden cambiar de tipo, de un tipo a otro. Por ejemplo, las oscilaciones pueden ocurrir entre neutrinos muónicos y neutrinos tauónicos. Por ejemplo, un neutrino muónico que se produce en ese punto, tiene este comportamiento (apunta a la gráfica) para su probabilidad de sobrevivencia, y en este punto, la probabilidad de seguir siendo un neutrino muónico es mínima; y al mismo tiempo, la probabilidad de aparición de un neutrino tauónico es máxima. Así que este es el fenómeno llamado oscilaciones de los neutrinos. Esta gente (fotografías de la derecha) predijo teóricamente este fenómeno. Quiero hacer notar que si la masa del neutrino es pequeña, la longitud de la oscilación se vuelve más grande. Por lo tanto, al medir la longitud de la oscilación, uno puede inferir la masa del neutrino.

Así que publicamos nuestros resultados en 1988. Afortunadamente, otro experimento, el IMB, publicó también resultados similares, tres años después.

Así que, dos experimentos observaron el déficit de los neutrinos atmosféricos. Sin embargo, la observación del déficit no es suficiente para concluir que existe la oscilación de los neutrinos. Necesitamos evidencia más fuerte de la oscilación de los neutrinos. Así que pensamos: qué deberíamos observar si realmente los neutrinos oscilan. Para algunas masas de los neutrinos, como los neutrinos que provienen del tope de la atmósfera hasta nuestro detector, no tienen suficiente tiempo como para oscilar. Por otra

parte, los neutrinos producidos al otro lado de la Tierra pueden tener suficiente tiempo para oscilar. Por lo tanto, deberíamos de ver una asimetría significativa entre el flujo de los neutrinos que vienen de arriba, comparada con el flujo de los neutrinos que vienen de abajo. Así queríamos observar esta asimetría, pero, desafortunadamente, el detector de Kamiokande no era lo suficientemente grande. Necesitábamos un detector mucho más grande, que pasó a ser el Super Kamiokande

Ahora hablaré sobre el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos. El Super Kamiokande es una versión mucho más grande del detector de Kamiokande. El diámetro del Super Kamiokande es de 39 m y su altura es de 42 m, y contiene 50 mil toneladas de agua pura. Esta es una colaboración internacional, y los actuales países que participan del experimento están presentados aquí.

Como ya dije, Super Kamiokande es un detector mucho más grande que el Kamiokande, y por lo tanto necesitábamos mucha más gente para construirlo. Esta es una foto tomada en la primavera de 1995. En el 95, trabajamos prácticamente todos los días en la mina, y esta foto presenta el número típico de personas que estaban en la mina. Quiero mencionar que la mayor parte de esta gente son físicos o estudiantes de postgrado.

Este es el interior del Super Kamiokande, cuando prácticamente concluimos la construcción, y pueden notar cuán grande es este detector si se fijan en las tres personas que se encuentran en el bote.

Así que este detector funcionaba muy bien desde el principio. Este (a la izquierda) es el patrón típico de una interacción de un neutrino muónico, y este (a la derecha) es otro patrón típico de una interacción de un neutrino muónico, pero la energía es mucho mayor. Así que en el Super Kamiokande se analizaron muchos tipos de eventos de neutrinos. Así que la colaboración de muchos participantes ha sido muy importante para alcanzar los resultados; y particularmente el trabajo duro de muchos colaboradores jóvenes ha sido muy importante.

Ya que el detector funcionó muy bien, después de dos años obtuvimos el primer resultado importante. Esta diapositiva en particular fue presentada en la conferencia Neutrino, en el año 1998. La imagen superior es para neutrinos electrónicos, y la imagen inferior es para neutrinos muónicos. La gráfica presenta los eventos en función del coseno del ángulo cenital, donde uno representa a los neutrinos que provienen de encima; por otro lado, los neutrinos que vienen del otro lado de la Tierra están alrededor de -1 . Pueden ver que las cajitas son las predicciones de las simulaciones y los puntos representan los datos. Pueden observar que los eventos observados en la dirección de abajo hacia arriba, es prácticamente la mitad de lo que se predecía. Esto era exactamente lo que queríamos observar. Combinando estos datos con otros datos, llegamos a la conclusión que los neutrinos oscilan. Así que el resultado del Super Kamiokande fue aceptado por la comunidad de físicos.

Ahora quiero hablar un poco más acerca de las oscilaciones de los neutrinos. De hecho, existía un problema famoso relacionado con los neutrinos solares. El experimento Homestake observó neutrinos solares, pero a un flujo de un tercio de lo que se esperaba de la teoría. Este problema existía incluso desde finales de los años 60s. Este problema fue confirmado por los experimentos que siguieron a este en las décadas siguientes. Pero no podían concluir que este déficit de los neutrinos solares se debía a las oscilaciones de los neutrinos.

Así que, finalmente obtuvimos la respuesta a este problema en este siglo. El problema fue en esencia resuelto por el experimento SON en Canadá. En este experimento pudieron medir el flujo de neutrinos electrónicos, y de manera independiente medir el flujo total de neutrinos. Estos son los datos de ese experimento, y se puede ver que el flujo total de neutrinos en la barra inferior y el flujo de neutrinos electrónicos es básicamente un tercio del flujo total. Así que, con esta observación se pudo concluir que el problema de los neutrinos solares se debía a las oscilaciones de los neutrinos.

Hasta este momento he discutido los resultados del experimento Super Kamiokande y del experimento SNO. Así que sabemos que los neutrinos tienen masa. Pero, por qué son importantes las masas de los neutrinos? Con esta diapositiva quiero explicar por qué las pequeñas masas de los neutrinos son importantes. En esta gráfica podemos ver las masas de las partículas de diferentes generaciones. Así que queríamos comparar las masas de los neutrinos con las de esta figura. Antes de mostrarles el resultado de la comparación, quiero mencionar que la escala del eje inferior entre cada una de sus divisiones, una diferencia de un factor de cien. Ahora les muestro las masas de los neutrinos que están a la izquierda. Está claro que las masas de los neutrinos son mucho, mucho menores que las masas de las otras partículas.

Así podemos ver que las masas de los neutrinos son aproximadamente diez millardos de veces más chicas que las masas correspondientes de los quarks y de los leptones cargados. Pensamos que estas pequeñas masas de los neutrinos son la clave para entender la naturaleza a las escalas más pequeñas y a las escalas más grandes. Por lo tanto, estamos muy emocionados con las masas de los neutrinos.

En esencia, he concluido, pero antes de realmente concluir, quiero mencionar algunas otras cosas: Como mencionó el Prof. Takita, la colaboración entre Bolivia y Japón en el área de los rayos cósmicos comenzó en el año 1962. En 1982, se firmó el acuerdo actualmente vigente entre el ICRR - U.Tokio y el IIF - UMSA. Desde entonces, varios experimentos han sido realizados. El año pasado, uno de los experimentos principales, el BASJE concluyó sus operaciones, ahora estamos entrando en una nueva etapa. Ahora, la colaboración entre Bolivia y Japón entra en una nueva etapa con el nuevo experimento denominado ALPACA.

Ahora voy a resumir mi charla. Un déficit inesperado del flujo de neutrinos muónicos provenientes de la atmósfera fue observado en el experimento Kamiokande en el año 1988. Seguidamente, en 1998, el experimento Super Kamiokande descubrió las oscilaciones de los neutrinos, que demuestra que los neutrinos tienen masa. El descubrimiento de una de los neutrinos diferente de cero abrió una nueva ventana para el estudio de la física, más allá del modelo estándar de las partículas elementales; probablemente relacionado con una teoría de gran unificación de las interacciones elementales. Y este es el principal mensaje que quiero dar: la investigación científica está llena de emociones, y espero que muchos de ustedes trabajen en los diferentes campos de la ciencia.

Muchas gracias por su atención.