

UN EXPERIMENTO PARA OBSERVAR SI LOS NEUTRINOS MUÓNICOS OSCILAN A NEUTRINOS TAUÓNICOS

Antoni Brey
Julio 2001

INTRODUCCIÓN

Los experimentos destinados a observar oscilaciones entre familias de neutrinos se pueden llevar a cabo de varias maneras:

- 1- Utilizando una fuente generadora de neutrinos, donde fuera posible calcular con exactitud el flujo teórico emitido. Un detector distante de la fuente que evidenciara déficit en el flujo recibido podría indicar la existencia de oscilaciones a lo largo del recorrido de las partículas.
- 2- Utilizando una fuente generadora de neutrinos de una sola familia, y colocar dos detectores distantes situados en el haz de partículas, destinados a medir posibles disminuciones de flujos durante el recorrido.
- 3- Utilizando una fuente generadora de neutrinos de varias familias a través de algún proceso conocido que permita la predicción teórica de la relación entre partículas de cada familia. Una desviación de esta relación, si mostrara una dependencia de la distancia recorrida por las partículas, podría delatar oscilaciones en alguna especie de neutrino.

La dificultad para conocer flujos absolutos con exactitud sugiere la preparación de experimentos donde intervengan ratios entre familias de neutrinos. Algunos experimentos tipo Long Baseline que se están preparando en la actualidad pertenecen a esta categoría: se producen haces de neutrinos a partir de las cascadas de partículas generadas por protones de alta energía provenientes de aceleradores y se mide la relación entre familias en dos puntos alejados de la trayectoria.

También a esta categoría pertenecerían los experimentos que usan neutrinos atmosféricos, como los llevados a cabo por Super-Kamiokande y que constituyeron una de las primeras evidencias de oscilaciones. Los neutrinos atmosféricos son creados a partir de la colisión de los rayos cósmicos con los núcleos atómicos de las capas altas de la atmósfera. Las cascadas de partículas producidas por estas colisiones de muy alta energía contienen piones que producen muones y neutrinos muónicos.

Los muones decaen hacia electrones, anti-neutrinos muónicos y neutrinos electrónicos. La relación entre neutrinos muónicos y electrónicos producidos puede ser calculada con precisión en un amplio margen de energías.

El experimento con neutrinos atmosféricos consiste pues en la medida, lo más exacta posible, de la proporción entre neutrinos muónicos y electrónicos recibidos en un detector. Una medida que indicara una disminución de dicho ratio respecto al esperado por las predicciones teóricas podría revelar la existencia de oscilaciones entre las familias de neutrinos. La evidencia sería más fuerte si se demostrara una dependencia de esta disminución del ratio en función de la distancia recorrida por las partículas.

Observaciones:

- 1- Las interacciones donde intervienen neutrinos tienen una sección eficaz extremadamente baja.
- 2- Desconocemos la dirección exacta de los neutrinos producidos por las cascadas atmosféricas.

Por lo tanto, se necesita un gran “volumen detector” para intentar captar el mayor número de eventos posible.

La detección de los neutrinos se puede realizar de forma indirecta a través de los productos de su interacción con los núcleos de una gran masa de agua. Es lo que se conoce como detector tipo Cherenkov.

EL DETECTOR CHERENKOV

Un detector Cherenkov consiste en una cuba llena de agua rodeada de elementos captadores, habitualmente tubos fotomultiplicadores (PMT's). Los captadores detectan los fotones de efecto Cherenkov producidos por las partículas cargadas generadas en las colisiones con los neutrinos: a partir de una determinada energía (0,77 MeV para los electrones y 158,7 MeV para los muones) estas partículas cargadas se desplazan en el medio a una velocidad superior a la de la luz, que aquí es inferior a c en el vacío, pues se trata de un medio con índice de refracción n y la velocidad de la luz en él es c/n . Se emiten entonces fotones Cherenkov, dentro de un cono de luz cuyo eje viene dado por la trayectoria de la partícula y un ángulo de abertura cuyo coseno es inversamente proporcional a la velocidad de la partícula. El espectro de los fotones emitidos también es una función de la energía de la partícula, con el máximo alrededor de 400 nm (¡la luz Cherenkov es azulada!). En cada centímetro de avance una partícula cargada produce algunos cientos de fotones.

Los fotones producidos deben llegar en la mayor proporción posible a los PMT's que rodean la cuba. Una vez detectado el “anillo” de fotones es posible reconstruir la

trayectoria de la partícula cargada e identificarla, pues electrones y muones producen anillos diferentes (los anillos producidos por electrones son más anchos y difusos que aquellos producidos por muones).

ASPECTOS PRÁCTICOS

El mayor detector Cherenkov existente en la actualidad, utilizado para la detección de neutrinos, es Super-Kamiokande en Japón. Se trata de una cuba de 50.000 Tm de agua. Su complejidad sirve para ilustrar la multitud de aspectos que deben ser tenidos en cuenta para construir un detector eficiente.

Para detectar neutrinos es deseable disponer de un detector lo más aislado posible del efecto de otras partículas. Las principales fuentes de contaminación son:

- 1- los muones provenientes de las cascadas atmosféricas producidas por los rayos cósmicos
- 2- los rayos gamma y los neutrones desprendidos por las rocas del contorno
- 3- las emisiones debidas al gas radón del ambiente

Para minimizar cada uno de estos problemas se toman las siguientes medidas:

- 1- Enterrar el detector. SK se encuentra a 1000 m de profundidad, consiguiendo así reducir en un factor de 100.000 los muones externos que consiguen llegar al detector
- 2- Dividir el tanque detector en dos partes, una externa y una interna contenida en la anterior. La zona exterior absorbe los rayos gamma y los neutrones emitidos por las rocas del contorno y, si está dotada de elementos captadores, permite identificar muones provenientes del exterior
- 3- Depuración del aire de la mina para disminuir la concentración de radón.

Otro aspecto a tener en cuenta durante la construcción del detector es la pureza del agua. El líquido debe tener la máxima transparencia para que los fotones Cherenkov lleguen a los PMT's. Conseguir 50.000 Tm de agua ultra-pura no es una tarea sencilla.

Como elementos captadores se utilizan PMT's con el fotocátodo de bialkali, que tiene la máxima eficiencia cuántica (alrededor de 0,22) alrededor de los 400 nm, coincidiendo así con la máxima emisión de luz Cherenkov. El tamaño del fotocátodo debe ser lo mayor posible (en SK la zona sensible de cada PMT es de 460 mm de diámetro) pero teniendo en cuenta que el uso de PMT de gran tamaño incrementa el tiempo de tránsito de los fotoelectrones y también aumenta su dispersión. La amplificación conseguida por cada tubo debe ser calibrada individualmente y ajustada

a través de la fuente de alto voltaje que alimenta la cadena de diodos, en especial teniendo en cuenta que se trata de experimentos de larga duración. Para conseguir una respuesta uniforme de los PMT debe eliminarse el efecto del campo magnético terrestre. Ello se consigue utilizando bobinas activas que compensan en campo magnético externo en toda la cuba.

SK dispone de 11.146 PMT's de 20 pulgadas en la parte interior del detector, que cubren el 40% de la superficie del mismo, y 1.885 PMT's de 8 pulgadas en la parte exterior.

A partir de la señal de los PMT's se debe ajustar el disparo de la electrónica asociada para la detección de un evento real. En el experimento de SK la condición de disparo se determinó en la coincidencia de más de 30 PMT's en una ventana de 200 ns, graduados individualmente a $\frac{1}{4}$ de la señal típica producida por un fotoelectrón.

Esta condición de disparo produce una gran cantidad de eventos que deben ser registrados y estudiados posteriormente para discriminar los provenientes exclusivamente de la interacción con neutrinos. Se produce una reducción drástica de eventos útiles utilizando criterios como los siguientes: aceptar solamente eventos sin actividad en el detector exterior, imponer un límite inferior de fotones recogidos por todos los detectores, evitar los eventos con una concentración excesiva de fotoelectrones en un solo PMT o eliminar eventos con un intervalo de tiempo demasiado corto entre ellos. Con condiciones como las anteriores, en el experimento de SK se redujo el número de eventos útiles de 400 millones a 12.000 candidatos.

Gracias al conocimiento del instante de disparo de cada uno de los PMT que intervienen en un evento y de la intensidad de los disparos es posible reconstruir tanto la trayectoria como el vértice del cono de luz Cherenkov.

DETECCIÓN DE LAS OSCILACIONES

A partir de esta información recogida por el detector Cherenkov es posible calcular el ratio de anillos muónicos y electrónicos, que indica la proporción entre neutrinos de ambas familias. Debido al desconocimiento del flujo real de neutrinos y de la sección eficaz exacta de las interacciones, se construye un nuevo ratio a partir del anterior y una simulación teórica tipo Monte Carlo para cancelar estas fuentes de error sistemático, llamado R.

Valores de R inferiores al esperado indican una deficiencia de neutrinos muónicos que es atribuible a una oscilación de estos hacia neutrinos tauónicos, no detectados por el sistema. Además, el detector Cherenkov proporciona información sobre la dirección y sentido de los neutrinos captados, que permiten observar variaciones de

R en función de si los neutrinos provienen de la atmósfera sobre el detector o de la del lado contrario de la Tierra, así como dependencias de la inclinación de los rayos.

Este tipo de experimento fue realizado utilizando el detector Super-Kamiokande expuesto durante 535 días. Durante este tiempo recogió 4.353 eventos totalmente contabilizados cuyo estudio revela deficiencias de neutrinos muónicos atmosféricos y dependencias del ángulo azimutal que son consistentes con la hipótesis de oscilaciones de neutrinos muónicos a tauónicos, pero no a electrónicos ni a otros posibles neutrinos estériles.

REFERENCIAS ÚTILES

Abundante información sobre los detalles del detector Super-Kamiokande y los experimentos que allí se realizan está disponible en <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>

Como curiosidad para estudiantes habilidosos y aventureros, en la siguiente página web <http://students.washington.edu/roneill/Physics/cherenkov.htm> se describe la construcción de un detector Cherenkov “doméstico”.

Abundantes datos sobre radiación Cherenkov y neutrinos atmosféricos están disponibles en la web del CERN.

Una descripción detallada de los experimentos de medida del ratio entre neutrinos muónicos y electrónicos atmosféricos realizados Super-Kamiokande se puede encontrar en hep-ex/9803006 y hep-ex/9805006.

La interpretación de los resultados de este importante experimento, donde se relacionan con la hipótesis de oscilaciones de neutrinos muónicos a tauónicos, se puede encontrar en hep-ex/9807003.