

CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DE LA RESPUESTA DEL LÍQUIDO CENTELLEADOR DEL EXPERIMENTO DE NEUTRINOS DOUBLE CHOOZ

F.J.Valdivia¹, A.Cabrera² y D.Motta³

¹Departamento de Investigación Básica/División de Física de Altas Energías. CIEMAT.
Avda. Complutense 22 28040 Madrid

²Laboratoire d'Astroparticule et Cosmologie

10, rue Alice Domon et Léonie Duquet 75205 Paris cedex 13

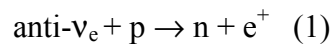
³DSM/Dapnia/Service de Physique des Particules. CEA/Dapnia Saclay
91191 Gif-sur-Yvette cedex

francisco.valdivia@ciemat.es

Resumen: El objetivo de este trabajo es la caracterización del comportamiento temporal de la emisión de luz que producen rayos γ 's al interaccionar en el líquido centelleador utilizado en el experimento Double Chooz (DC). La adquisición de los datos se lleva a cabo a partir de un espectrómetro Compton modificado (localizado en el laboratorio CEA/Dapnia en Saclay) para medir el perfil temporal de dicha emisión, la cual es caracterizada por una función de densidad de probabilidad (FDP). Una serie de exponenciales se ajustan a la FDP obteniéndose los tiempos de desexcitación característicos del líquido. Este estudio es crítico para la precisa caracterización de las deposiciones de energía de anti- ν_e 's y para la definición del sistema de adquisición de datos de DC. Además los resultados obtenidos serán introducidos en la simulación Monte Carlo de dicho experimento permitiendo así un estudio detallado de sus errores sistemáticos.

1. Introducción

El ángulo θ_{13} es un parámetro todavía desconocido de la matriz de mezcla que describe el fenómeno de las oscilaciones de neutrinos [1]. Su medida precisa puede obtenerse mediante experimentos que usan reactores nucleares como fuente de anti- ν_e 's. El experimento más avanzado dentro de este campo es Double Chooz en Francia [2]. El material que detecta la deposición energética de estas partículas es líquido centelleador dopado con Gd, siendo la reacción de detección de tales sucesos la desintegración β inversa



en la que el positrón deposita su energía cinética y además se aniquila con un electrón depositando 1.022 MeV en forma de un par $\gamma\gamma$, mientras que el neutrón es capturado $\sim 30 \mu\text{s}$ después ($\sim 120 \mu\text{s}$) en Gd (H) produciendo una cascada de γ 's, que deposita una energía total de 8 MeV (2.2 MeV).

La FDP de la desexcitación molecular causante de la fluorescencia del líquido centelleador se puede ajustar a la siguiente función (no es la única posibilidad)

$$P(t) = \sum_i (a_i/\tau_i) e^{-t/\tau_i} \quad (2)$$

donde $\sum_i a_i = 1$ (siendo a_i el peso de la componente i) y τ_i son tiempos empíricos (obtenidos por el ajuste, sin sentido físico a priori), que cubren un rango de 1-300ns aprox. El valor de τ_1 puede asociarse al tiempo de desexcitación del primer estado singlete excitado de las moléculas de líquido centelleador mientras que el resto de componentes están asociadas (aunque no se corresponden necesariamente) a desexcitaciones de estados triplete que conllevan procesos de interacción entre dos moléculas [3].

El objetivo de este trabajo es medir estos valores de tiempo para caracterizar la respuesta de desexcitación luminosa del líquido centelleador de DC y mejorar así la exactitud de cálculo de las deposiciones de energía en su Monte Carlo.

2. Método experimental

La forma de estudiar la respuesta de un líquido centelleador con el tiempo consiste en obtener la función de probabilidad con la cual cada fotón de desexcitación es emitido por el centelleador cuando un rayo γ deposita su energía en él. Para ello medimos la diferencia entre el tiempo de deposición energética del suceso (t_i) y el tiempo en que cada fotón es emitido (t_f) en la desexcitación molecular. Por tanto utilizaremos dos fotomultiplicadores, uno expuesto a alta luminosidad (FAL) que recibirá una gran cantidad de luz de la muestra, con el cual se aproximará el momento de la deposición inicial y otro a baja luminosidad (FBL) para medir cada fotón de desexcitación molecular, trabajando por lo tanto en un régimen poissoniano sub-1 fotoelectrón de media. Los valores concretos de t_i y t_f para cada suceso se obtienen durante el análisis posterior a las medidas experimentales a través de un algoritmo. Las fluctuaciones temporales intrínsecas a la limitada respuesta temporal del FAL se hacen despreciables gracias al alto número de fotones moleculares que mejoran el conocimiento de t_i . Las del FBL son deconvolucionadas durante el ajuste de la PDF obtenida.

2.a. Montaje experimental

Se analizaron dos muestras, una con el objetivo de verificar la exactitud del montaje y otra para caracterizar la respuesta del blanco del detector. La muestra de referencia (BC505, Bicron Corporation, St. Gobain Crystals) es de composición desconocida pero su respuesta temporal fue proporcionada por el fabricante. La segunda muestra corresponde a la que va a ser utilizada como blanco en DC. Esta última se compone de una mezcla al 20/80 en volumen de PXE/dodecano al que se le añade Gd (Gd-dpm), PPO como flúor primario y bis-MSB como cambiador de longitud de onda.

Para obtener la deposición inicial de energía necesitamos un fotomultiplicador (Photonis XP4312 de ventana frontal) que presente la máxima aceptación posible frente a la muestra de líquido centelleador, en condiciones de alta iluminación. La señal de desexcitación es detectada en un fotomultiplicador (Hamamatsu R6353P de ventana lateral) de rápida respuesta y lo más libre posible de corriente oscura. Como fuente radioactiva para excitar el líquido se necesita ^{22}Na , siendo la zona energética usada concretamente la que rodea el límite Compton del pico de 1.27 MeV debido a la desexcitación del ^{22}Ne que sigue a la desintegración β^+ del ^{22}Na .

En el montaje electrónico se usa una ventana de amplitudes para asegurar la condición de baja iluminación del fotomultiplicador FBL y obtener mayor estadística que en el caso de usar un espectrómetro Compton [4] con ángulo fijo. Para construir la ventana de amplitudes del FAL se utilizaron discriminadores en anticoincidencia para la deposición inicial de energía (restringiendo así el rango energético e iluminación del experimento). Se utilizó un

discriminador en la señal del FBL para evitar falsos disparos causados por ruido electrónico en la señal del FBL. La señal detectada en el FAL abre una ventana temporal de 1 μ s que queda a la espera de recibir una señal del FBL que dispara el sistema de adquisición de datos (señales en coincidencia [5]). Posteriormente, a partir de un algoritmo se obtienen los valores del tiempo en el que se detecta la deposición inicial de energía del rayo γ (t_i) y el tiempo en el que se detecta el fotón proveniente de la desexcitación particular de una molécula del líquido (t_f). Por lo tanto, $t_f - t_i$ ofrece, salvo una constante introducida por el montaje, el tiempo de desexcitación de las moléculas del centelleador y la FDP a ajustar será el histograma normalizado de dicha variable.

2.b. Selección de datos

Se seleccionaron aquellos sucesos que no llevaran a ambigüedad en la definición de t_i y t_f , es decir, se usaron los sucesos que presentaban una sola señal en el FAL y una sola señal en el FBL. El porcentaje de sucesos seleccionados en ambos casos (BC505 y blanco de DC) supera el 85 % sobretodo gracias al bajo ruido del FBL.

3. Resultados y conclusiones

Las figuras 1 izquierda y derecha nos muestran la distribución de carga depositada en ambos fotomultiplicadores (FAL y FBL) una vez que se seleccionaron los sucesos de interés. Como era de esperar, la gran mayoría de los sucesos seleccionados produjeron una elevada deposición de carga en el FAL y una baja deposición de carga en el FBL. En la figura 1 izquierda se aprecia la ventana de amplitudes que se impuso a las señales que debían detectarse en el FAL. La carga depositada fuera de la ventana se debe a que el corte de adquisición fue hecho en amplitud, no en carga. En la figura 1 derecha se ve la bondad del ajuste a una gaussiana de las deposiciones de carga detectadas por el FBL. Los sucesos causantes de la pequeña cola del pico de 1 fotoelectrón han sido estudiados y se ha comprobado que realmente se debe a la naturaleza no gaussiana de la generación de fotoelectrones.

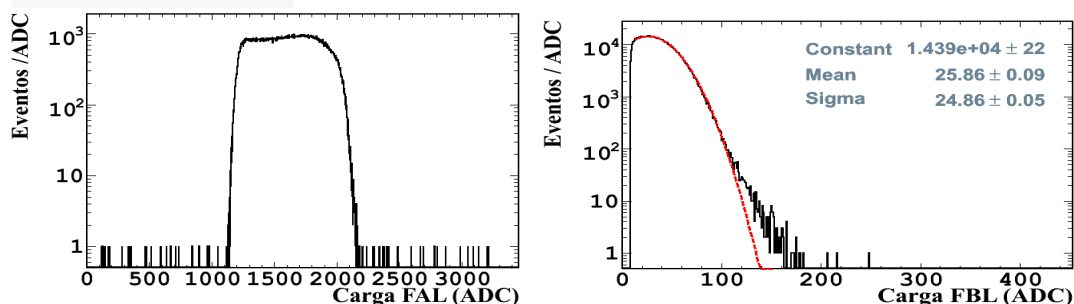


Figura 1. Distribución de carga de los fotomultiplicadores FAL y FBL. La descripción de los detalles se encuentra en el párrafo anterior. Las unidades ADC (conversión analógica-digital) son arbitrarias.

La figura 2 izquierda representa el ajuste (línea roja) de la FDP temporal de una muestra usada como prueba del correcto funcionamiento del montaje experimental. Se ajustaron sólo 3 exponenciales debido a la menor estadística utilizada. El tiempo de desexcitación más rápido se estimó en 2.4 ns, que se aproxima bastante bien a la prescripción dada por el fabricante (2.5 ns según SGC BC505 Data Sheet.pmd de Saint Gobain Crystals).

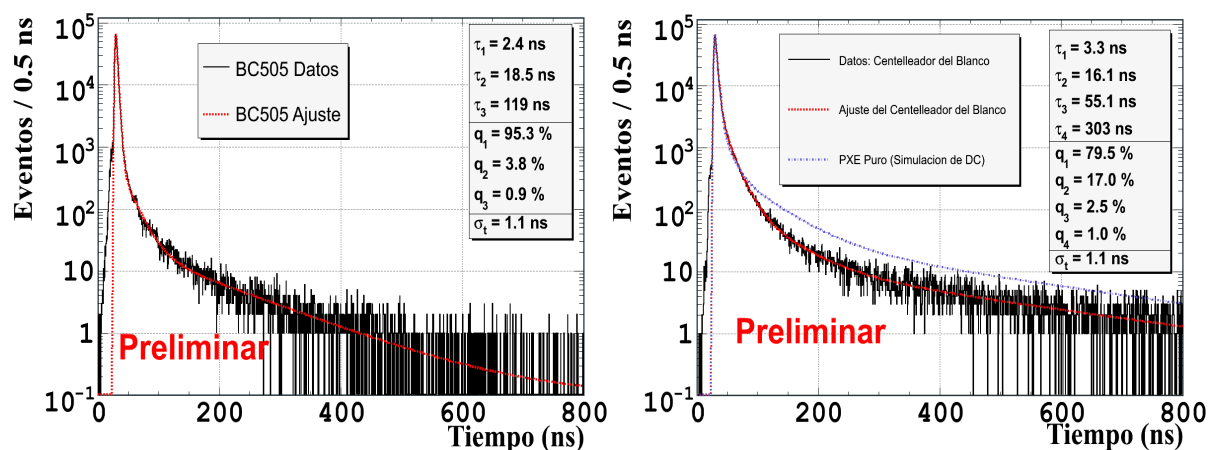


Figura 2. PDF's ajustadas con MINUIT (CERN Program Library Long Writeup D506) de dos muestras de líquido centelleador: una cedida por BICRON Corporation (izq.) y otra del blanco del detector DC (der.).

La figura 2 derecha representa el ajuste (línea roja) para una muestra del líquido centelleador que se usará en el blanco de los detectores del experimento DC. Se observan hasta 4 exponenciales siendo, tal como se esperaba, el tiempo de desexcitación más corto el que más influye en la respuesta luminosa del líquido. Se aprecia en esta gráfica que la respuesta luminosa del líquido medido es más rápida que la introducida en la simulación de DC con anterioridad (línea azul).

El resultado de este trabajo ha permitido verificar la bondad del montaje experimental y hacer una estimación preliminar de los valores de los tiempos y sus contribuciones a la distribución temporal de la desexcitación de las moléculas del líquido. Estos nuevos valores han sido incorporados a la simulación y confirman el actual diseño de adquisición de datos de DC. En el futuro se diseñará un nuevo algoritmo más preciso para obtener los valores de tiempo de detección de las señales t_i y t_f tal como se hará en el experimento DC. Estas medidas forman parte de un programa más general en el cual se pretende medir, mediante el mismo procedimiento experimental, los tiempos característicos de la FDP temporal de los diferentes líquidos centelleadores que se utilizarán en DC. Se obtendrá así una simulación completa del comportamiento temporal de las señales que se espera observar en dicho experimento así como evaluar de forma realista la precisión de la Monte Carlo de Double Chooz.

Bibliografía

- [1] F. Boehm & P. Vogel, *Physics of Massive Neutrinos*, 2nd edition, Cambridge University Press, 1992
- [2] F. Ardellier et al., Double Chooz: A Search for the Neutrino Mixing Angle θ_{13} , hep-ex/0606025, 30 Octubre 2006
- [3] D. Motta, Feasibility Analysis and Prototype Measurements of a Novel Approach for the Real-Time Spectroscopy of Low Energy Solar Neutrinos, <http://www.ub.uni-heidelberg.de/archiv/4612/>, 10 Mayo 2004
- [4] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 2nd edition, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1989
- [5] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*, 2nd revised edition, Springer-Verlag, 1994