



Construcción y caracterización de detectores auxiliares para la calibración de un observatorio de rayos gamma

G. Barboza¹, T. Codina¹, A. Pichel² & A.C. Rovero²

¹ *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina*

² *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, UBA-CONICET, Argentina*

Contacto / anapichel@iafe.uba.ar

Resumen / Los arreglos de detectores utilizados en astronomía gamma deben ser calibrados; una forma es mediante el uso de detectores auxiliares. Se construyeron dos detectores auxiliares de partículas con un área de $20 \times 20 \text{ cm}^2$, utilizando barras plásticas de centelleo, cada una con dos fibras ópticas “wavelength shifter” que llevan la luz a un fotomultiplicador que registra los pulsos de luz producidos por una partícula cargada que pasa por la barra de centelleo. El comportamiento de cada detector se estudió por separado, analizando su homogeneidad y la respuesta de la electrónica. Luego, colocando los detectores en coincidencia, se estudió el flujo de partículas atmosféricas y su dependencia con el ángulo cenital.

Abstract / Detector arrays used in gamma-ray astronomy must be calibrated; one way is by using auxiliary detectors. We built two auxiliary particle detectors with an area of $20 \times 20 \text{ cm}^2$, using plastic scintillator bars, each one with two optical “wavelength shifter” fibers that guide the light to a photomultiplier, which in turn records the light pulses produced by a charged particle passing through the scintillator bar. The behavior of each detector was studied separately, analyzing its homogeneity and the response of the electronics. Then, by operating both detectors in coincidence, the flux of atmospheric particles and its dependency with the zenith angle were studied.

Keywords / rayos cósmicos – centelladores de muones – instrumentación astronómica, métodos y técnicas

1. Introducción

La astronomía gamma estudia los fenómenos más energéticos del Universo mediante el registro de los fotones gamma que llegan a la Tierra. Según la energía de estos fotones los instrumentos que los detectan pueden estar montados en satélites (como *Fermi-LAT*) o en arreglos de detectores en tierra. Los rayos gamma de mayor energía producen cascadas de partículas en la atmósfera terrestre que, a su vez, producen radiación Cherenkov en el rango óptico-UV. Los observatorios en tierra que utilizan arreglos de telescopios Cherenkov actualmente en operación son: VERITAS (EEUU), MAGIC (Canarias) y HESS (Namibia).

Hay otra forma de registrar los fotones gamma sin utilizar telescopios, es por medio de arreglos de detectores de partículas en la superficie terrestre, los cuales registran directamente las componentes cargadas de las cascadas. Los más utilizados son los *Water Cherenkov Detectors* (WCD): tanques de agua con detectores sensibles que registran la luz Cherenkov producida por partículas cargadas relativistas que lo atraviesan. Los trabajos pioneros en astronomía gamma utilizando este tipo de instrumentos fueron los de Milagro Gamma-ray Observatory, en EEUU (Abdo et al., 2012). Con esa base, se construyó el observatorio HAWC en México, el cual consistente en un arreglo de 300 WCD a 4100 m de altitud, con resultados sorprendentes (v.g., Abeysekara et al., 2017). Actualmente, la comunidad internacional está planeando la implementación de su contraparte en el hemisferio sur (Southern Gamma-ray Survey Obser-

vatory, SSGO), desde donde se podrá observar en plenitud la Vía Láctea y el Centro Galáctico.

No solo los rayos gamma producen cascadas de partículas en la atmósfera, sino también los rayos cósmicos (RC). Los RC son núcleos atómicos que vienen del espacio exterior viajando a velocidades relativistas; se trata mayormente de protones, aunque también núcleos más pesados, desde Helio hasta Hierro, y sus energías van desde alrededor de 1 GeV hasta cientos de EeV (10^{18} eV). Dependiendo de su energía, estos RC pueden haberse generado tanto dentro como fuera de nuestra galaxia, siendo su origen aún hoy en día un tema abierto en astrofísica, después de más de cien años de su descubrimiento.

El flujo de RC es órdenes de magnitud más elevado que la fuente gamma más intensa y, como se trata de partículas cargadas, sus trayectorias son desviadas por los campos magnéticos en su viaje a la Tierra, formando un fondo de radiación sobre el cual las fuentes gamma deben ser identificadas. Así, los componentes secundarios producidos en las cascadas atmosféricas constituyen el fondo de partículas que cualquier detector situado en la superficie de la Tierra registra en forma continua. Los componentes de una cascada producida por RC pueden verse en la Fig. 1, en donde se aprecia el desarrollo en la atmósfera y los flujos verticales de cada componente en función de la profundidad atmosférica. Se puede apreciar que a nivel del mar los “muones atmosféricos” son mayoría y, así, los que se utilizan para la calibración de instrumentos como los WCDs ya mencionados.

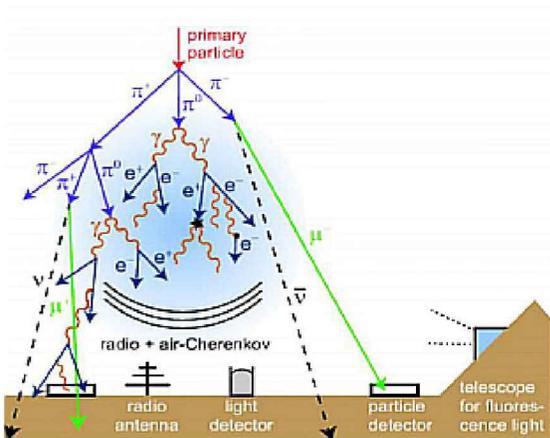


Figura 1: Desarrollo de cascada atmosférica hadrónica.

En estos detectores la señal obtenida es proporcional a la distancia recorrida por la partícula cargada dentro del tanque, de modo que la calibración consiste en caracterizar la señal del WCD para muones de trayectoria conocida. Para lograr esto se utilizan dos detectores auxiliares en coincidencia temporal, ubicados en la trayectoria deseada; cuando estos detectores registran el paso de un muón dentro de una ventana temporal dada (algunos ns), entonces se registra la señal del WCD y se estudian sus características.

El flujo de muones atmosféricos utilizables para este tipo de calibración está modulado por el espesor de la atmósfera en función del ángulo cenital de incidencia del muón. A los flujos verticales mostrados en la Fig. 1, se le debe agregar este efecto para obtener el flujo a un ángulo cenital dado (Rossi, 1964), siendo :

$$I(\theta) = I(0) \cos^2(\theta), \quad (1)$$

en la cual $I(0) = 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

En este trabajo describimos el diseño, construcción y caracterización de dos detectores auxiliares, del tipo comúnmente llamado “paleta centelladora”, un detector pequeño que consta de un centellador plástico con un detector óptico adosado que registra los pulsos de luz producidos por una partícula cargada que lo atraviesa.

2. Diseño experimental y construcción

Cada detector fue construido utilizando centelladores de plástico orgánico de $20.5 \text{ cm} \times 4.1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ y un PMT Hamamatsu de 16 píxeles (H8711-06), montado sobre una placa electrónica con la fuente de alto voltaje. Fue diseñado con una distribución de 2 capas superpuestas de 5 barras centelladoras cada una, haciendo una superficie detectora de aproximadamente $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Las barras poseen una ranura sobre una de las caras en la cual se colocaron dos fibras ópticas acopladas con grasa óptica; las fibras son del tipo “waveshifter”, que es necesario para que las mismas puedan absorber los fotones producidos en los centelladores y, convertidos a una longitud de onda adecuada, transportarlos hacia el PMT sin ser atenuados. Las diez fibras fueron dirigidas hacia un colector, o “cookie” (Fig. 2). Para alojar el PMT con

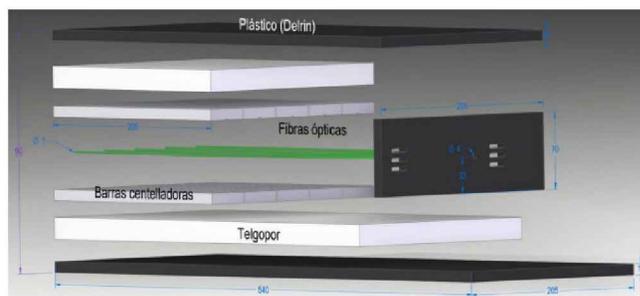


Figura 2: Esquema del recinto construido para contener a las placas centelladoras y fibras. De arriba hacia abajo: Plástico, telgopor, barras, fibras, barras, telgopor y plástico.

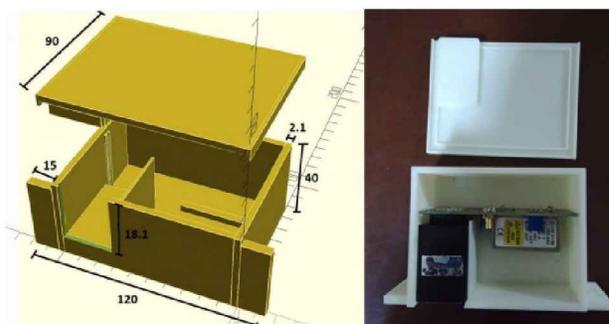


Figura 3: Plano y foto de la caja impresa en 3D. El PMT y la electrónica se ven ubicados en su lugar.



Figura 4: Un detector una vez terminada su construcción.

la electrónica y poder ubicar un pixel dado frente al cookie, se diseñó e imprimió una caja en 3D (Fig. 3), que va anclada frente al cookie. El diseño de la caja incluyó un sistema de rendijas que permite un movimiento X-Y entre el cookie y los píxeles del PMT, el cual permite utilizar cualquiera de éstos si fuese necesario. Luego de cerrar las partes, se recubrió el detector con dos capas de aluminio y posteriormente con tela “blackout”, dejando los orificios necesarios para la salida de las fichas BNC y de alimentación de 12 V. De esta forma el detector queda sellado a la luz completamente y resulta sencillo de manipular (Fig. 4).

3. Resultados y discusión

Como primer paso para caracterizar al detector se colocaron ambas paletas una sobre la otra distanciadas por 88 cm de altura. Para los pulsos de las paletas (ancho $\sim 10 \text{ ns}$) se registraron las coincidencias utilizando el método Setup & Hold de un osciloscopio Tektronik DPO3054 (ventana de 30 ns). Así, se obtuvo la curva de

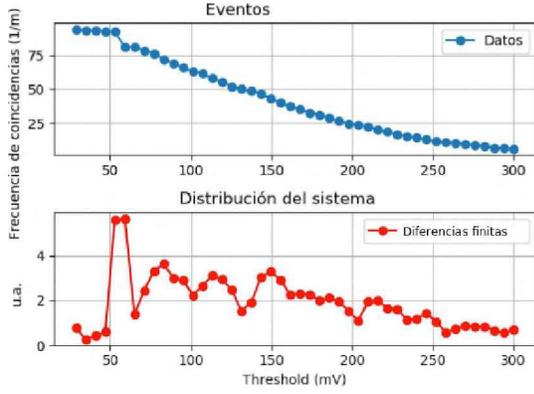


Figura 5: Paleta 1: Frecuencia integral de coincidencias en función del umbral (arriba); idem diferencial (abajo).

frecuencia de coincidencias en función del umbral (tensión de trigger) para cada paleta centelladora.

Para la curva característica de la paleta centelladora 1, se midió durante 3 días obteniendo 33 puntos para umbrales entre -20 mV y -300 mV con 2 horas y 15 minutos de estadística cada uno (ver Fig. 5). Esta figura muestra las tasas de conteo integrales, o sea para eventos que superen cierto umbral. Para poder comparar esto con lo esperado para un PMT debemos computar las tasas diferenciales, lo cual se muestra en la parte inferior de la misma figura, y representa la señal que se obtiene del PMT de un detector, que en teoría se obtiene de la convolución de las respuestas del PMT a la incidencia de fotoelectrones (electrones producidos en el fotocátodo del PMT). Considerando fluctuaciones, la curva está dentro de la distribución esperada y nos permite definir un umbral de operación, que tomamos en 60 mV.

Repetimos el procedimiento anterior para la segunda paleta centelladora, barriendo 23 puntos desde 10 mV hasta 250 mV, con estadística similar al caso anterior y obtuvimos las curvas de la Fig. 6. En este caso resulta evidente que para obtener la distribución esperada se debería aumentar la amplificación para que la curva se desplace hacia los valores superiores de voltaje umbral. Sin embargo, para lograr coincidencias entre los dos detectores auxiliares, basta operar a esta paleta con un voltaje umbral de 20 mV. Debemos mencionar aquí que el PMT de esta paleta tuvo que ser reemplazado por uno de características distintas (EMI 9781B), lo cual justifica las diferencias en las curvas de respuesta.

Medir el flujo total de muones correspondería a integrar la ecuación 1 sobre el área del detector inferior A_0 teniendo en cuenta su dependencia angular y su ángulo sólido Ω_0 , para detectores muy separados esto es esencialmente constante, y se puede calcular como:

$$I(t) = I(0) A_0 \Omega_0. \quad (2)$$

En nuestro caso particular se midió el flujo de muones para las paletas centelladoras a $\theta = 0$ separadas a 88 cm y 17 cm fijando umbrales de voltaje según lo mencionado anteriormente. Para 88 cm el resultado fue de (9.2 ± 0.6) eventos por minuto donde el error corresponde a fluctuaciones del valor medio (ver Fig. 7). Satisfactoriamente, dicho valor concuerda con lo predicho por la ecuación 2 al remplazar los valores $A_0 =$

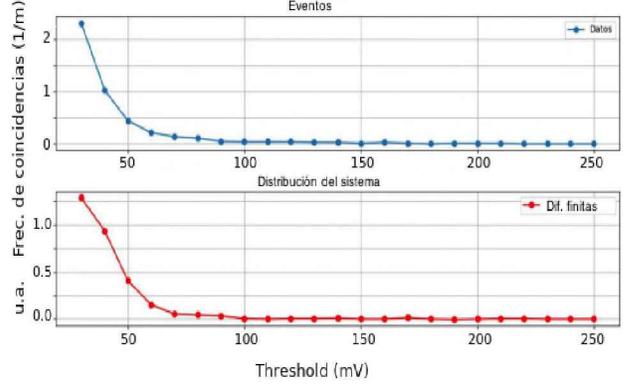


Figura 6: Paleta 2: Idem Fig. 5

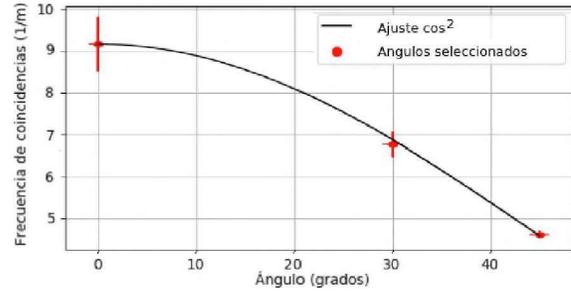


Figura 7: Distribución angular del flujo de muones medido con las paletas centelladoras separadas una altura de 88 cm.

420.25 cm² y $\Omega_0 = 0.054$, correspondientes a la configuración experimental, obteniéndose un flujo de 9.53 muones por minuto. Luego variamos el ángulo cenital a 30 y 45 grados (ver Fig. 7). Por otro lado, para una separación entre paletas de 17 cm, el valor del flujo obtenido fue de (76.2 ± 0.4) eventos por minuto, mientras que lo predicho teóricamente para los valores $A_0 = 420.25$ cm² y $\Omega_0 = 1.076$ es de 190 muones por minuto. El error es solo estadístico, pero la discrepancia viene porque la aproximación de la ecuación 2 no se cumple ya que se admiten incidencias de hasta 30° cenital.

Hemos construido dos detectores de muones de pequeñas dimensiones para ser utilizados como auxiliares en el proceso de calibración de detectores de partículas. En particular, se planea utilizarlos en la calibración de detectores WCD, los que serán incluidos en el futuro SGSO. El correcto funcionamiento de estos detectores auxiliares fue probado mediante mediciones en coincidencia, con lo cual se pudo reproducir el flujo conocido de muones a nivel del mar y su dependencia con el ángulo cenital.

Agradecimientos: Las barras, fibra y uno de los PMTs fueron provistos por el ITEDA. La caja fue impresa en el Dep. Física, FCEyN, UBA. El trabajo fue parcialmente solventado por ANPCyT.

Referencias

- Abdo A.A., et al., 2012, ApJ, 750, 63
 Abeysekara A.U., et al., 2017, ApJ, 843, 40
 Rossi B., 1964, *Cosmic Rays*