

Detección y estudio de fotones producidos en aluminio por incidencia de rayos cósmicos

Detection and study of photons produced in aluminium by incidence of cosmic rays

Carlos Pinedo Guadarrama¹, Luis Alberto Torres Luna² y Julián Félix Valdez³

^{1,2,3} Laboratorio Internacional de Partículas Elementales. Departamento de Física. División de ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato.

c.pinedoguadarrama@ugto.mx¹, la.torresluna@ugto.mx², felix@ugto.mx³

Resumen

La detección de rayos cósmicos, de radiación ionizante en general, comúnmente la realizamos mediante materiales ionizables -que se producen iones en él- y fotonizables* -que se producen fotones en él-, a partir de los cuales se construyen los detectores de radiación. Porque todo material tiene en cierta medida estas propiedades, prácticamente podemos usar cualquier material para detectar radiación ionizante.

En este estudio, presentamos la planeación, el diseño, la construcción, la caracterización y la operación de un detector de rayos cósmicos basado en un bloque de Aluminio de 10 cm x 10 cm x 20 cm al que se le anclan sendos tubos fotomultiplicadores marca Hamamatsu H10493-12, en una de las caras rectangulares del bloque de Aluminio y separados 12.5 cm, centro a centro. En la parte superior e inferior, sobre una estructura de 24 cm x 24 cm x 50 cm, colocamos un plano detector (con volumen de 10 cm x 10 cm x 1 cm) construido a base de 10 tubos Geiger-Müller de 11 cm de largo y 1 cm de diámetro, protegidos con láminas de acrílico de 2 mm de espesor. El bloque de Aluminio se coloca sobre el plano inferior coaxialmente con los dos planos detectores.

Usando los planos detectores como un telescopio, determinamos que el flujo de los rayos cósmicos es $[2.09 \pm 0.03 \text{ partículas cósmicas}] \text{ sr}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, que concuerda bien con el resultado mundialmente aceptado.

Usando los planos detectores como vetos para la radiación cósmica, determinamos que se producen fotones en el bloque de Aluminio, que posiblemente están polarizados -quizá producidos por efecto Cherenkov o por excitación desexcitación de los átomos- por incidencia de rayos cósmicos. El número de fotones producidos depende proporcionalmente con la distancia recorrida por la radiación incidente en el bloque de Aluminio, de acuerdo con los resultados de la simulación del proceso usando GEANT4.

Presentamos detalles técnicos de la planeación, el diseño, la construcción, la caracterización, y la operación del detector de rayos cósmicos, y los resultados físicos preliminares obtenidos.

Palabras claves: rayos cósmicos; detector; aluminio; fotón.

Introducción

A lo largo de más de 100 años, la detección y estudio de partículas provenientes del espacio exterior - radiación cósmica- se ha usado preponderantemente para expandir las fronteras en la física de partículas elementales y el conocimiento del universo; y en nuestros días, existe la posibilidad de usar este conocimiento para validar modelos físicos, estudiar eventos astrofísicos, realizar descubrimientos en física básica, y desarrollar tecnologías aplicables en muchos campos de interés actuales -medicina, comunicaciones, seguridad portuaria, etc.-.

Los rayos cósmicos son partículas de altas energías que impactan en las partes altas de la atmósfera terrestre causando cascadas de partículas secundarias (*air showers*) -muones, piones, electrones, protones, neutrinos, fotones, etc- que pueden ser detectadas en la superficie de la tierra. Este fenómeno depende de la masa, de la energía y del tipo de partícula que impacta con la atmósfera terrestre (Gaisser, T. K., 1990). La detección de rayos cósmicos, radiación ionizante en general, es posible mediante el uso de diversos fenómenos físicos, tales como el efecto fotoeléctrico, el efecto Cherenkov, centelleo y la ionización.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

El efecto fotoeléctrico sucede cuando un fotón, al incidir sobre un metal, ioniza el metal y, si el fotón tiene más energía que la función de trabajo de extracción del metal, el electrón libre puede salir del metal; o bien, solamente desplazarse dentro de éste, si no se supera la energía de la función de trabajo del material (A. Einstein, 1905).

Cuando una partícula con carga eléctrica no nula atraviesa un material con índice de refracción η y con velocidad v_p superior a la velocidad de fase de la luz en el medio, $v = c/\eta$, entonces el campo eléctrico de la partícula polarizará eléctricamente las moléculas del material por donde se desplaza, y, a medida que la partícula avanza por el material, las moléculas que queden detrás del camino de la partícula volverán a su estado fundamental, emitiendo fotones o luz coherente (con la misma frecuencia, longitud de onda y fase), dirigida en cierto ángulo específico, y polarizada en cierto plano. Este fenómeno es denominado como efecto Cherenkov (Cherenkov, 1934).

Cuando la radiación ionizante interactúa con la materia, las moléculas del material se excitan y éstas, al regresar a su estado fundamental, emiten fotones -centelleo del material-; a diferencia del efecto Cherenkov, el centelleo no requiere que una partícula supere la velocidad de la luz en el medio material para que ésta pueda excitar las moléculas (Tavernier, 2010). De igual forma, también pueden producirse fotones por la excitación-desexcitación de átomos, en donde un átomo obtiene energía suficiente para acceder a un mayor nivel de energía, y cuando regresa a su estado fundamental se genera un fotón emitido en cualquier dirección posible (Tavernier, 2010).

Para detectar fotones, e indirectamente la radiación ionizante, o fotonizante, se usan los tubos fotomultiplicadores (PMT). Estos dispositivos amplifican el pulso eléctrico generado por el efecto fotoeléctrico de un solo fotón al menos, dentro de la ventana óptica del PMT; la corriente eléctrica se multiplica millones de veces en los dinodos dentro del tubo fotomultiplicador hasta poder obtener una señal que puede ser registrada, la señal de salida es directamente proporcional a la señal de entrada (Hamamatsu Photonics K. K., 2017).

Para detectar iones, e indirectamente la radiación ionizante o fotonizante, se usan los tubos Geiger-Müller, diseñados por Hans Geiger y Walther Müller. En estos dispositivos, cuando una partícula atraviesa el gas dentro del tubo, se producen iones que, con el campo eléctrico aplicado positivo -o negativo-, son atraídos al filamento coaxial al tubo, y amplificados por acción del campo eléctrico, para que finalmente, el paso de la partícula sea detectado a través de un pulso eléctrico medido con un osciloscopio o un sistema de adquisición de datos (N. Warmoltz, 1952).

En todos los casos anteriores, cuando una partícula con carga eléctrica atraviesa un medio material pierde energía debido a interacciones con los átomos -los núcleos o los electrones- o moléculas de éste en efectos como la producción de radiación Bremsstrahlung, Cherenkov, centelleo, excitación atómica, excitación molecular, ionización de átomos, etc. (Salvat, F., 2022, Bethe, H, 1930). Esta pérdida de energía depende no sólo de las propiedades de la partícula misma, como su masa, espín o su velocidad, sino también de las propiedades del medio material que atraviesa, como su densidad, la energía de excitación media de sus átomos, la energía de sus electrones en los orbitales, número y masa atómicos de sus átomos constituyentes (considerando un material constituido de un solo tipo de átomo) (Groom, D. E., & Klein, S. R., 2000). Desde la perspectiva de la partícula ionizante, la energía depositada por la partícula está descrita en el modelo de Bethe-Bloch, que toma en cuenta efectos cuánticos y relativistas de las interacciones entre la partícula incidente y el medio. Ecuación 1.

$$\langle \frac{dE}{dx} \rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{2C_e}{Z} + S \right] + k \int_{\ln \epsilon_1}^{\ln \epsilon_{\max}} \epsilon^2 (\sigma(E, \epsilon) - \sigma_{BB}(E, \epsilon)) d(\ln \epsilon). \dots (1)$$

Ecuación 1. Pérdida de energía por unidad de distancia recorrida por la partícula ionizante y fotonizante, en el medio, normalizada a la densidad del material, en el modelo de Bethe-Bloch (Kelner, S. R., Kokoulin, R. P., & Petrukhin, A. A., 1997). La definición de cada término se da en las referencias mencionadas. Ecuación tomada de (Kelner, S. R., Kokoulin, R. P., & Petrukhin, A. A., 1997).

Este parámetro, $\langle \frac{dE}{dx} \rangle$, se conoce como potencia de frenado, y es medida en $\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}$ (H. Bethe, 1930). Pero no confundirse, no tiene unidades de potencia; es la energía cedida al material, o perdida, por la partícula incidente, por unidad de distancia atravesada por la partícula en el material, normalizada a la densidad del material.

En este trabajo reportamos los estudios realizados en la detección de los rayos cósmicos, partículas provenientes del espacio exterior, o de las capas altas de la atmósfera terrestre, altamente ionizantes, que

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

llegan a los detectores emplazados en la superficie de la tierra. Usamos 2 planos de detección construidos a base de tubos Geiger-Müller, y un bloque de Aluminio con sendos PMTs anclados a su superficie. Medimos el flujo de rayos cósmicos en León Guanajuato -en el laboratorio internacional de partículas elementales de la Universidad de Guanajuato-, y mostramos que producen fotones en el bloque de Aluminio al incidir sobre él.

Planeación

Con el detector de rayos cósmicos planeamos detectar fotones producidos en el Aluminio, a distintas distancias de penetración de la radiación, para verificar las predicciones mediante la ecuación Bethe-Bloch (Ecuación 1), para las partículas más comunes presentes en los rayos cósmicos -muones-. Un bloque de aluminio de 20 cm de altura y 10 cm x 10 cm de base, con al menos dos canales de detección de fotones, a base de sendos PMT, es suficiente. Para la validación lógica del paso de radiación cósmica por el bloque de Aluminio, y asegurar que los fotones fueron producidos por el paso de una partícula cósmica ionizante y fotonizante, usamos dos vetos detectores creados a partir de tubos Geiger-Müller colocados en los extremos superior e inferior de la barra de aluminio, separados no más de 50 cm, y con un área de 10 cm x 10 cm. La ventana en el tiempo de coincidencia lógica de las señales debe ser del orden de 2 microsegundos.

Con este mismo detector, podemos medir el flujo de rayos cósmicos por unidad de ángulo sólido en diferentes tiempos y posiciones sobre la superficie de la tierra.

Por lo anterior, el detector de radiación cósmica debe ser portátil, compacto, de dimensiones pequeñas y manejables, hecho con materiales comunes, y lo más económicamente posible.

Diseño

El detector se compone de cuatro canales de detección: dos canales de detección corresponden con los tubos fotomultiplicadores (PMTs), tipo Hamamatsu de 36 mm de diámetro, anclados mediante impresos plásticos 3D (ver Figura 1) en una de las caras rectangulares de un bloque de Aluminio de 10 cm x 10 cm x 20 cm y separados a una distancia de 12.6 cm centro a centro; dos canales de detección que corresponden con los dos vetos detectores de 10 cm x 10 cm x 1 cm, a base de tubos Geiger-Müller de vidrio, colocados arriba y abajo del bloque de Aluminio, son armados sobre marcos de plástico impresos en 3D de 15 cm x 15 cm x 1 cm, son soportados y protegidos por láminas de acrílico o de Aluminio de 2 mm de espesor (ver Figura 2); estos planos se colocan arriba y debajo de una estructura, paralelepípedo, construida con extrusiones de aluminio de 2 cm x 2 cm de sección transversal (ver Figura 3, izquierda), los entrepaños están separados 14 cm unos de otros, la altura total es de 50 cm, y base mide 24 cm x 24 cm. El diseño completo del detector se muestra en la Figura 3, derecha.

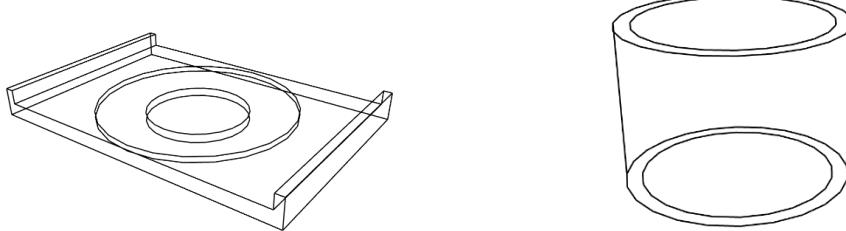


Figura 1. Diseño 3D del anclaje para los PMT. La pieza izquierda y la derecha se pegan coaxialmente para formar una sola pieza, y sirve para anclar al bloque de Aluminio el PMT. También tiene un bajo relieve para colocar filtros ópticos o polarizadores, representado por la circunferencia más exterior. Figura propia.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

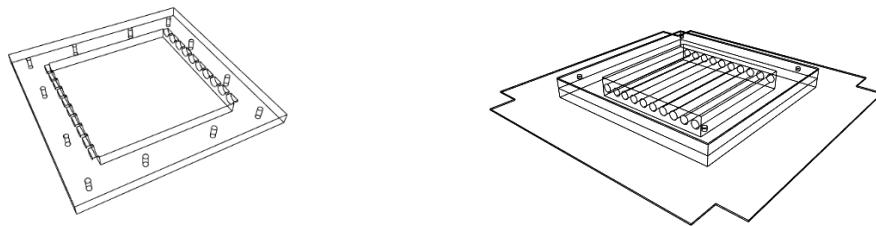


Figura 2. La pieza izquierda es el diseño 3D de la base para los tubos Geiger-Müller; la pieza de la derecha es diseño del plano detector a base dos piezas, como la de la izquierda, puestas para aprisionar los tubos en un marco y conectarlos eléctricamente, y una base para soportar el marco y los tubos en el soporte de extrusiones de Aluminio. Figura propia.

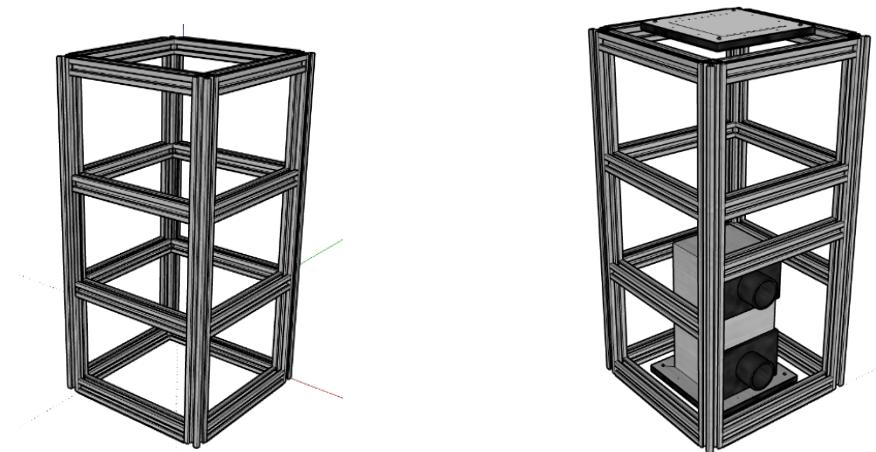


Figura 3. Diseño 3D de la estructura de soporte para el detector, izquierda; diseño completo, derecha, a base de extrusiones de Aluminio. Figura propia.

Las tarjetas electrónicas de alimentación y lectura de los planos vetos se colocan adyacentes a estos planos. El diagrama del circuito electrónico se muestra en la Figura 4.

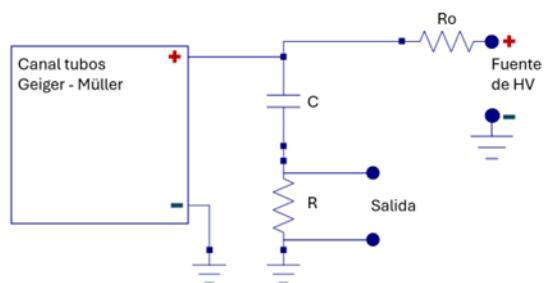


Figura 4. Diseño del circuito electrónico para alimentar los planos vetos y leer las señales. Figura propia.

Construcción

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

La construcción, caracterización y operación la realizamos en el laboratorio internacional de partículas elementales de la Universidad de Guanajuato (<https://laboratoriointernacionaldeparticulaselementales.net/>).

En la Figura 5 mostramos el soporte, a base de extrusiones de Aluminio, construido.



Figura 5. Fotografía del soporte construido a partir de extrusiones de Aluminio. Foto propia.

Las bases para los planos vetos y los anclajes para los PMTs las imprimimos en una CREALITY CP-01 en plástico PLA. Las láminas protectoras, de acrílico o de Aluminio, las cortamos usando una sierra cinta (Ver Figura 6).



Figura 6. Fotografía de las láminas de Aluminio para la parte superior y la parte inferior de los planos de detección a base de tubos Geiger-Müller.
Foto propia.

Los 10 tubos Geiger-Müller por plano (ver Figura 7) fueron colocados y soldados en el módulo para formar un solo canal de detección de 10 cm x 10 cm x 1 cm.

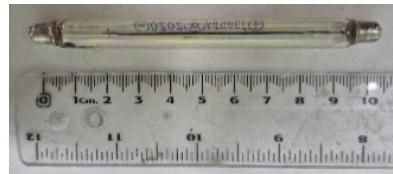


Figura 7. Fotografía de un tubo Geiger-Müller. Foto propia.

Los planos detectores se unieron a las láminas protectoras usando tornillo de 3 mm de diámetro y 40 mm de largo. Un plano veteo detector ya construido, junto con la tarjeta electrónica, se muestra en la Figura 8.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

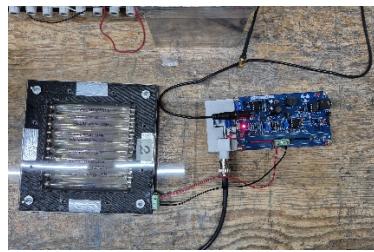


Figura 8. Fotografía del plano a base de tubos Geiger – Müller ensamblado, con la tarjeta electrónica de alimentación, y de lectura, y funcionando.
Foto propia.

Los anclajes ya unidos al bloque de Aluminio y aislados ópticamente del exterior mediante cinta de Aluminio, se muestran en la Figura 9. Los PMTs se colocan en los tubos de los anclajes y se aíslan con cinta de Aluminio.



Figura 9. Fotografía de los anclajes para los PMTs colocados en el bloque de Aluminio y aislados ópticamente con cinta de Aluminio. Foto propia.

El detector completo, ya construido, se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Fotografía del detector construido completamente. Foto propia.

Caracterización

Realizamos pruebas mecánicas a todos los componentes. Inspeccionamos y probamos todos los puntos de soldadura y aseguramos que estuvieran bien hechas y las conexiones eléctricas bien logradas. Inspeccionamos todos los cables de alimentación y de señal.

Ensamblamos el sistema de detección como se muestra en el diagrama de la Figura 11.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

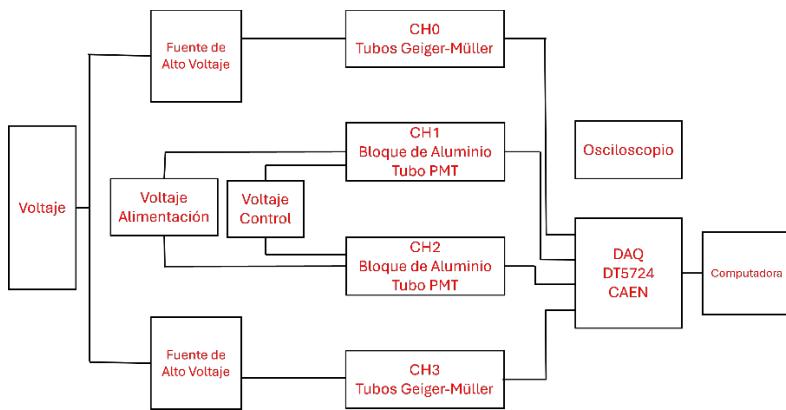


Figura 11. Diagrama de conexión a bloques del sistema experimental. Figura propia.

Los voltajes requeridos para los fotomultiplicadores, de acuerdo con la hoja técnica proporcionada por el fabricante para dicho modelo (<https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/pmt/pmt-module/voltage-output-type/H10493-002.html>), Tabla 1, y señales registradas en el osciloscopio, Tabla 2:

Tabla 1. Voltajes de alimentación y control para el fotomultiplicador Hamamatsu H10493. Tabla propia.

Fotomultiplicador	Voltaje de Alimentación	Voltaje de Control
H10493	± 12 V	0.75 V – 0.95 V

Los planos detectores vetos se alimentaron con 310 V, con fuentes separadas.

Obtuvimos las siguientes señales, ver Figura 12, registradas en un osciloscopio Tektronix TDS 1001C – EDU (<https://www.tek.com/en/datasheet/tds1000c-edu-digital-oscilloscope-series-datasheet>).

Tabla 2. Señales registradas en el osciloscopio, y capturas de pantalla, para los PMTs anclados al bloque de Aluminio. Tabla y figuras propias.



Las amplitudes y tiempos de decaimiento de las señales son similares, y del orden de 100 mV, o más, y 1 ms, respectivamente, perfectamente registrables con el sistema de adquisición de datos marca CAEN, DT5724 (<https://www.caen.it/products/dt5724/>).

Las señales registradas en los vetos detectores son las siguientes, Tabla 3:

Tabla 3. Captura de pantalla de las señales producidas en los planos vetos detectores. Tabla y figuras propias.

Veto 1	Veto 2

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.



Las señales obtenidas no tienen la misma amplitud, pero sí el tiempo de decaimiento. Con las fuentes de alimentación separadas, igualamos las amplitudes aplicando voltajes apropiados.

Concluimos con estas pruebas que el sistema de detección funciona correctamente, dentro de lo planeado, y queda listo para tomar datos.

Simulación del Detector

Simulamos con GEANT4 (Geant4 Collaboration, 2019) el funcionamiento del detector a base del bloque de Aluminio. Básicamente la pérdida de energía por unidad de distancia recorrida por la partícula incidente en el bloque de Aluminio. En la interacción partícula-bloque de Aluminio, están involucrados varios procesos físicos: ionización atómica, excitación/desexcitación atómica, Bremsstrahlung, aniquilación partícula-antipartícula, producción de rayos delta y radiación Cherenkov, principalmente.

Simulamos la incidencia de 100 muones disparados perpendicularmente hacia la cara superior del bloque, con energía de 4 GeV, registrando su pérdida de energía, posición y desplazamiento respecto al paso anterior por cada paso; además registramos la energía, posición y el proceso de producción de los fotones producidos que salían de la barra hacia la región en contacto óptico con los tubos PMT.

Adquisición de Datos

Adquirimos los datos producidos en el sistema ensamblado como se muestra en el Figura 12, y distribuidos como en la Tabla 4. Esta adquisición de datos fue realizada con un equipo CAEN DT5724 automatizado para la adquisición de datos del detector construido (<https://www.caen.it/products/dt5724>).

Tabla 4. Conexiones por canal del dispositivo CAEN DT5724. Tabla propia.

CH0	CH1	CH2	CH3
Veto 1 (Superior)	Veto 2 (Inferior)	PMT 1 (Superior)	PMT 2 (Inferior)

Bajo esta configuración pudimos comparar las señales detectadas y obtener resultados sobre las diferencias temporales entre mediciones, mediciones de energía y asegurar la coincidencia lógica entre señales.

Las gráficas mostradas en la sección de resultados fueron realizadas con el Software ROOT (<https://root.cern>).



*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

Figura 12. Fotografía del detector construido, ensamblado y conectado al dispositivo CAEN. Foto propia.

Resultados

Obtuvimos las predicciones sobre la pérdida de energía de los muones atravesando 20 cm de Aluminio y el espectro de longitud de onda de los fotones emitidos. Usando G4EmCalculator y de manera paralela a la simulación, predijimos, numéricamente, usando la ecuación 1 la potencia de frenado del Aluminio siendo incidido por un muon de 4 GeV, obteniendo aproximadamente un valor de 4 MeV/cm (ver Figura 13), con una excelente similitud entre las predicciones y Monte Carlo.

En la Figura 13 mostramos la energía depositada por cien muones en la barra de aluminio, cada partícula deposita alrededor de 80 MeV después de haber recorrido los 20 cm de la barra de aluminio, que es lo predicho por el modelo de Bethe-Bloch. Cada línea representa una ejecución de la simulación.

En la Figura 14 mostramos el espectro de longitud de onda, medida en nanómetros, de los fotones emitidos en la barra, que fueron generados por el paso de rayos cósmicos, estos fotones entran en el rango de la luz UV cercana y el infrarrojo cercano. La mayoría de los fotones generados proviene de la radiación Cherenkov dentro del Aluminio, el resto se produjo por Bremsstrahlung (radiación de frenado) y aniquilación electrón-positrón, representando una mínima cantidad de los fotones producidos en el UV cercano.

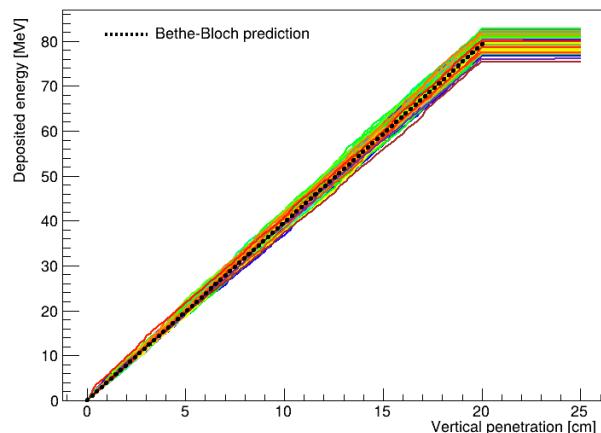


Figura 13. Energía depositada por cien muones en la barra de aluminio considerando efectos Cherenkov y excitación/desexcitación atómica. Comparación entre las predicciones en el modelo teórico de Bethe-Bloch -línea punteada-(usando valores tabulados de la potencia de frenado en aluminio (Groom, D. E., Mokhov, N. V., & Striganov, S. I., 2001)) y los resultados obtenidos de la simulación con GEANT4 -región multicolor de bandas-. Figura propia.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

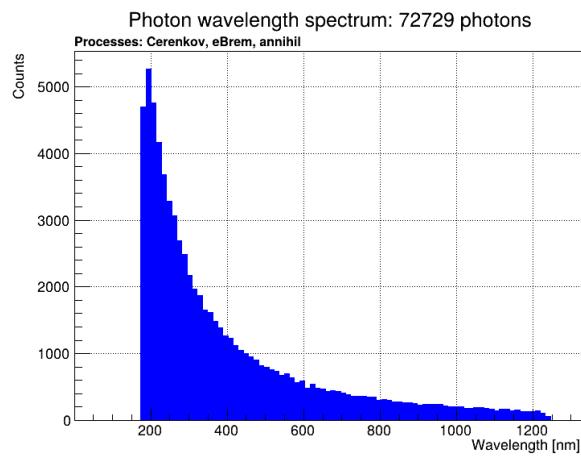


Figura 14. Histograma del espectro de longitud de onda de los fotones emitidos por la barra debido al paso de rayos cósmicos, simulados con GEANT4. Los procesos de generación de los fotones incluyen radiación Cherenkov, Bremsstrahlung de electrones y aniquilación electrón-positrón.

Figura propia.

La distribución de las diferencias de tiempo entre el veto superior y el veta inferior la mostramos en la Figura 15. Son las coincidencias en una ventana de tiempo de 2.5 microsegundos. Son consistentes con la incidencia de rayos cósmicos, en un 66%.

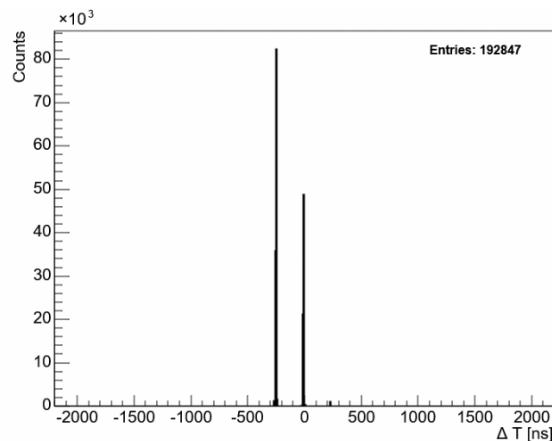


Figura 15. Histograma de diferencia temporal entre detecciones de señales, por método de coincidencias, usando los planos a base de tubos Geiger-Müller. Figura propia.

Se observan dos picos de coincidencias de diferencias temporales negativas. Uno del orden de nanosegundos, muy cerca de cero; y otro cerca de -250 ns. Estos picos son indicios del paso de muones a través del aluminio, coincidentes en el tiempo, que viajan desde la parte inferior hacia la superior del prototipo. La mayor parte de las coincidencias se encuentran alrededor de -250 ns de diferencia, mientras que el resto están alrededor de 0 ns. Esto puede deberse a la energía de las partículas incidentes, siendo aquellas, alrededor de -250 ns, menos energéticas o pseudo coincidencias, o producidas por ruido.

La distribución de la energía de las detecciones en ambos canales no mostró picos de energía, sino una distribución en forma de campana con la mayor parte sesgada hacia bajas energías. Figura 16..

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

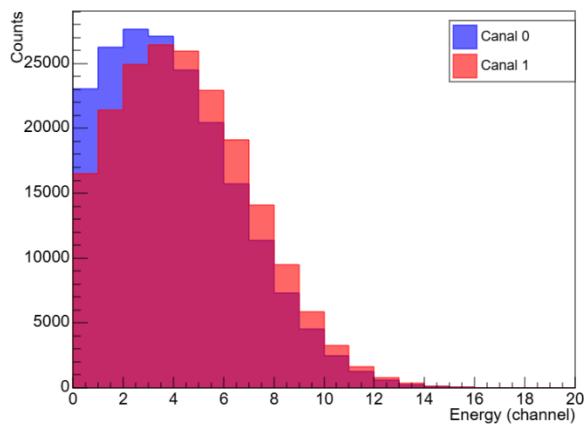


Figura 16. Histograma de energía, unidades arbitrarias, de las señales detectadas usando tubos fotomultiplicadores. Figura propia.

Medimos el flujo de rayos cósmicos en el detector usando la Ecuación (2).

$$J = \frac{N}{At\Omega}. \quad (2)$$

Ecuación 2. Definición de flujo de partículas usada para medir el flujo de rayos cósmicos. Ecuación propia.

Donde N es el número de partículas cósmicas incidentes, A es el área de detección, t el tiempo de exposición y Ω el ángulo sólido subtendido por el detector. En la Tabla 5 resumimos las mediciones realizadas:

Tabla 5. Mediciones de Flujo de rayos cósmicos. Tabla propia.

Fecha	Eventos	Área (cm ²)	Tiempo (s)	Ángulo Sólido (sr)	Flujo (sr ⁻¹ cm ⁻² s ⁻¹)
02/07/2025	70,141	100	3600	0.25	0.81±0.03
22/07/2025	290,800	100	3600	0.25	3.37±0.03

El error de la medición se obtuvo suponiendo una geometría euclíadiana y que, además, la mayor parte del error del flujo viene del ángulo sólido, siendo así que la incertidumbre está por los Ecuación (3).

$$\Delta J = \frac{\partial J}{\partial \Omega} \Delta \Omega, \quad (3)$$

Ecuación 3. Error del flujo de rayos cósmicos. Ecuación propia.

Mostramos la deducción en el Apéndice.

La distribución de señales, observadas, y consistentes con fotones producidos en el bloque de Aluminio es plana. Quizá domine el fondo de ruido.

Conclusiones

Planeamos, diseñamos, construimos, caracterizamos y operamos un mini detector de rayos cósmicos a base de dos planos de tubos Geiger-Müller y un bloque de Aluminio con dos PMTs adheridos, de 4 canales de detección en total.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

Simulamos el paso de muones a través del bloque de Aluminio. La distribución de la pérdida de energía por unidad de distancia recorrida observada coincide muy bien las predicciones obtenidas en el modelo de Bethe-Bloch.

Medimos el flujo de rayos cósmicos en León Guanajuato, y obtuvimos en promedio ~ 2.09 rayos cósmicos/(sr cm² s), en buena concordancia con el valor mundialmente aceptado.

Detectamos señales producidas en el bloque de Aluminio, fotones, consistentes con el paso de partículas cósmicas, en su mayoría posiblemente muones.

Referencias

- Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17(6), 132–148. Recuperado de [Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt - Einstein - 1905 - Annalen der Physik - Wiley Online Library](#).
- Cherenkov, P. A. (1934). Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding That of Light. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. Recuperado de [Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light | Phys. Rev.](#)
- Tavernier, S. (2010). Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics. Springer. Recuperado de [Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics | SpringerLink](#).
- H. Bethe (1930), Zur theorie des durchgangs schneller korpuskularstrahlen durch materie, *Annalen der Physik*, 397 – 325. Recuperado de [Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie - Bethe - 1930 - Annalen der Physik - Wiley Online Library](#).
- Hamamatsu Photonics K. K. (2017). PHOTOMULTIPLIER TUBES Basics and Applications. Recuperado de https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99 SALES LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4E.pdf.
- Warmoltz, N. (1952). Geiger-Müller counters. *Philips Technical Review*, 13(10), 282–292. Recuperado de [PTechReview-13-1951_52-282.pdf](#)
- Gaisser, T. K. (1990). Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge, Cambridge University Press. Recuperado de [Cosmic Rays and Particle Physics - Thomas K. Gaisser - Google Libros](#)
- Groom, D. E., & Klein, S. R. (2000). Passage of particles through matter. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, 15(1-4), 163-173. Recuperado de [Passage of particles through matter | The European Physical Journal C](#)
- Groom, D. E., Mokhov, N. V., & Striganov, S. I. (2001). Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78(2), 183-356. Recuperado de [MUON STOPPING POWER AND RANGE TABLES 10 MeV–100 TeV - ScienceDirect](#)
- Salvat, F. (2022). Bethe stopping-power formula and its corrections. *Physical Review A*, 106(3), 032809. Recuperado de [Bethe stopping-power formula and its corrections | Phys. Rev. A](#)
- Kelner, S. R., Kokoulin, R. P., & Petrukhin, A. A. (1997). Bremsstrahlung from muons scattered by atomic electrons. *Physics of Atomic Nuclei*, 60. Recuperado de [On Bremsstrahlung from muons scattered by atomic electrons; O tormoznom izluchenii myonov na atomnykh elektronakh \(Journal Article\) | ETDEWEB](#)
- Geant4 Collaboration. (2019). Book for application developers. URL. Recuperado de https://geant4.web.cern.ch/documentation/pipelines/master/bfad_html/ForApplicationDevelopers, 10, 5-2.

Apéndice

Presentamos el desarrollo propio de la expresión para error sistemático del flujo de rayos cósmicos utilizada en los resultados. Consideramos al flujo de RC como función de cuatro parámetros, $J = J(N, A, t, \Omega)$ -N, número de partículas incidentes; A: área efectiva del detector; t: tiempo de exposición; Ω : ángulo sólido

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

subtendido por el detector-, por lo tanto, usando norma euclíadiana, y que cada parámetro tiene un error asociado, ΔJ es, Ecuación 4.

$$\Delta J^2 = \left(\frac{\partial J}{\partial N} \Delta N \right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial A} \Delta A \right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial t} \Delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial \Omega} \Delta \Omega \right)^2. \quad (4)$$

Asumiendo que la mayor parte del error del flujo proviene de la medición del ángulo sólido, los errores del resto de parámetros son despreciables en comparación con $\Delta \Omega$, entonces $\Delta J = \frac{\partial J}{\partial \Omega} \Delta \Omega$.

Primero obtenemos la medición del ángulo sólido a partir de su definición, Ecuación 5.

$$\Omega = \int d\Omega = \iint \frac{dS}{r^2}. \quad (5)$$

Donde dS es el elemento diferencial de área que subtiende el elemento diferencial de ángulo sólido $d\Omega$. Aproximamos el ángulo sólido de nuestra geometría como dos casquetes polares, por lo que es conveniente usar coordenadas esféricas donde $dS = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$, $\varphi \in [0, 2\pi]$ y $\theta \in [0, \vartheta]$. Entonces, tenemos la Ecuación 6.

$$\Omega = 2 \iint \sin \theta d\theta d\varphi = 2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\vartheta} \sin \theta d\theta = 4\pi(1 - \cos \vartheta). \quad (6)$$

El ángulo ϑ se obtiene a partir de las medidas l , semi lado del plano veta detector, y D , semi separación entre planos veta detectores, como $\vartheta = \tan^{-1} \frac{l}{D} = 11.38^\circ$, en nuestro sistema de detección. Por tanto, se tiene que $\Omega = 0.25$ sr como se mencionó en los resultados. Para medir ΔJ requerimos obtener $\Delta \Omega$, cuya expresión por definición es, Ecuación 7.

$$\Delta \Omega = \frac{\partial \Omega}{\partial \vartheta} \Delta \vartheta = 4\pi \sin \vartheta \Delta \vartheta. \quad (7)$$

Dado que el ángulo ϑ depende de las medidas l y D , $\vartheta = \vartheta(l, D) = \tan^{-1} \frac{l}{D}$, entonces $\Delta \vartheta$ es, Ecuación 8.

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta^2 &= \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial l} \Delta l \right)^2 + \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial D} \Delta D \right)^2 = \left(\frac{D}{l^2 + D^2} \Delta l \right)^2 + \left(-\frac{l}{l^2 + D^2} \Delta D \right)^2 = \left(\frac{Dl}{l^2 + D^2} \frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{lD}{l^2 + D^2} \frac{\Delta D}{D} \right)^2 \\ &= \left(\frac{Dl}{l^2 + D^2} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Entonces, la expresión para $\Delta \Omega$ es, Ecuación 9.

$$\Delta \Omega = 4\pi \sin \vartheta \left(\frac{Dl}{l^2 + D^2} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Desarrollando $\frac{\partial J}{\partial \Omega}$ en ΔJ , se tiene, Ecuación 10.

$$\frac{\partial J}{\partial \Omega} = \frac{\partial}{\partial \Omega} \left(\frac{N}{At\Omega} \right) = -\frac{N}{At\Omega^2} = -\frac{J}{\Omega}. \quad (10)$$

Por lo anterior, si $\Delta J = \frac{\partial J}{\partial \Omega} \Delta \Omega = J \frac{\Delta \Omega}{\Omega}$, entonces el error sistemático del flujo de RC está dado por, Ecuación 11.

$$\Delta J = \frac{J}{\Omega} \frac{4\pi \sin \vartheta Dl}{l^2 + D^2} \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2}. \quad (11)$$

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.

Si tomamos $l = 5$ cm, $D = 25$ cm, $\Delta l = \Delta D = 0.1$ cm (en consecuencia $\vartheta = 11.38^\circ$), entonces usando la expresión mostrada anteriormente para ΔJ , con $J = [0.81$ partículas cósmicas] $\text{sr}^{-1}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ y $\Omega = 0.25$ sr, tenemos que $\Delta J = [0.03$ partículas cósmicas] $\text{sr}^{-1}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$.

*Fotonizable. Término con el que describimos la propiedad del material de que se produzcan fotones en su interior por acción de la radiación externa; no aceptado oficialmente. Este término es análogo al término ionizable: propiedad del material de que en su interior se produzcan iones por acción de radiación externa; término aceptado oficialmente.