

Mini detector modular de rayos cósmicos

Mini modular cosmic rays detector

Jesús Leonardo Mendoza Ayala¹, Jessica Valeria Nila Ramírez², Anet Gabriela Nicasio Navarro³, Jonathan Francisco Rojas Martínez⁴, Atzelbi Guadalupe Ramírez Ruiz⁵, Jesús Alejandro Moreno Perales⁶ y J. Felix⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}División de ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato

jl.mendozaavala@ugto.mx¹, jv.nilaramirez@ugto.mx², ag.nicasionavarro@ugto.mx³, jf.rojasmartinez@ugto.mx⁴, ag.ramirezruiz@ugto.mx⁵, ja.morenonoperales@ugto.mx⁶, felix@ugto.mx⁷

Resumen

Los físicos han desarrollado la detección y el estudio de los rayos cósmicos (RC) por más de un siglo, con una amplia variedad de detectores basados en materiales muy diversos como agua, gases, hielo, y muchos otros. Con ellos, han obtenido información de los constituyentes y propiedades físicas de los rayos cósmicos -espectro de velocidad, espectro de energía, espectro de composición, distribución como función de latitud y la longitud, intensidad a diferentes alturas-. Con propósitos de investigación, docencia y divulgación en RC, planeamos, diseñamos, construimos, caracterizamos y operamos un detector de rayos cósmicos modular y reconfigurable a base de dos bloques de acrílico de 5 cm x 10 cm x 10 cm -que funcionan como detectores y como veto detectores, uno colocado en la parte inferior y otro en parte superior- separados de centro a centro 145 cm uno del otro, con un tubo fotomultiplicador EMI acoplado en cada uno de los bloques; y, tres tubos de PVC de 111 mm de diámetro interior y 2 mm de espesor, y 35 cm de largo, llenos de aire, apilados en forma de telescopio, cada uno de ellos con un tubo fotomultiplicador acoplado tipo RCA. Con este arreglo de detectores, determinamos que el rango de tiempos de vuelo de los rayos cósmicos es (5, 385) ns; el rango de velocidades de los rayos cósmicos es (0.038, 0.98) c; el rango de momentos de los rayos cósmicos, suponiendo que inciden muones, es (0.004, 0.52) GeV; y el rango de energías, suponiendo que son muones las partículas incidentes, es (0.106, 0.53) GeV; y la intensidad del flujo de partículas 1409 muones/(m² s). Presentamos los detalles de la planeación, del diseño, la construcción, la caracterización, y algunos resultados físicos preliminares.

Palabras claves: Rayos cósmicos, tubo fotomultiplicador, partículas, velocidad, energía, flujo, intensidad.

Introducción

La investigación sobre los rayos cósmicos ha sido una de las áreas claves en el desarrollo de la física de partículas y astro partículas. En agosto de 1912, el físico austriaco Víctor Hess realizó un vuelo histórico en globo donde a medida que ascendía, hasta alcanzar una altitud de 5300 metros sobre la superficie, medía la tasa de ionización de la atmósfera. Determinó que aumentaba tres veces más en comparación con la existente al nivel del mar. Concluyó que esta radiación estaba llegando a la atmósfera terrestre desde el espacio exterior. Descubrió los rayos cósmicos. Ganó el Premio Nobel de Física de 1936.

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía compuestas principalmente por protones y núcleos de Helio, núcleos atómicos pesados, además, electrones, antipartículas, y otras, provenientes del espacio exterior que, al impactar con la atmósfera terrestre, dan inicio a una serie de interacciones de altas energías conocidas como lluvias de partículas. Estas lluvias resultan en la producción de múltiples partículas secundarias, entre ellas los muones, que pueden ser detectados a nivel del suelo mediante diversos métodos. Estos muones son partículas similares a los electrones, pertenecen al mismo tipo de partículas, los leptones con carga eléctrica, con una masa aproximadamente 207 veces mayor que la masa del electrón, con vida media de aproximadamente 2.2 microsegundos, penetran profundamente en la materia ordinaria, por lo que son detectables a grandes profundidades bajo la superficie terrestre (Workman, R. L. et al, (Particle Data Group), 2023).

Los métodos más efectivos para la detección de estas partículas se basan en materiales centelladores y emisores de radiación Cherenkov. El centelleo se produce cuando una partícula cargada eléctricamente incidente excita los niveles moleculares y atómicos del material, las moléculas o los átomos al des excitarse emiten fotones de forma isotrópica; la radiación Cherenkov se produce cuando la partícula cargada eléctricamente atraviesa el material detector, con una velocidad mayor a la velocidad de la radiación

electromagnética en el medio, polariza los átomos alrededor de su trayectoria, y al pasar, los átomos se despolarizan coherentemente emitiendo fotones en una dirección preferente y de forma polarizada que depende del índice de refracción del medio (Gaisser, T. K., 1990). Cuando se detectan los fotones producidos de estas formas o por otras, se dice que se detecta la partícula incidente.

En los detectores de rayos cósmicos se usan tubos foto multiplicadores (PMT) para detectar esos fotones (Hamamatsu Photonics K.K. Editorial Committee, 2017). Son dispositivos para amplificar la incidencia de un fotón que resulta en la expulsión de un electrón, producido por efecto foto eléctrico justo en el interior de la ventana óptica. El electrón inicial se multiplica millones de veces en una serie de dinodos dentro del tubo fotomultiplicador hasta que se obtiene una señal medible con un osciloscopio. La señal de salida es proporcional a la señal de entrada (Flyckt, S. O. and Marmonier, C., 2002).

Los detectores expuestos en este trabajo se basan en los principios de detección anteriores. El sistema de detección se complementa con fuentes de alimentación, un sistema de adquisición de datos, y una mini computadora de control del sistema de detección. En las siguientes secciones ahondamos en detalles.

Planeación

Este detector de rayos cósmicos debe ser modular, reconfigurable, sencillo de operar, con diferentes materiales intercambiables, seguro, con capacidad de detección de los componentes de los rayos cósmicos más comunes -muones-, con dimensiones de orden de un metro, hecho con materiales comunes, con capacidad de operar con fluidos -agua, aire, aceite, etc.-, debe operar al menos con 5 canales de detección basados en tubos fotomultiplicadores -dos veto detectores, colocados en los extremos superior e inferior y tres recámaras en forma de tubos en donde se alojen las materiales de detección-. La separación mínima entre el veto detector superior e inferior debe ser de 120 cm. Debe tener cada sección un diodo emisor de luz (LED) para probar el funcionamiento de los PMT, y para calibración. Dependiendo de la configuración, este detector debe servir para medir tiempos de vuelo, velocidades, energías, tiempos de vida media, flujos, e intensidades de partículas cósmicas.

Diseño

El detector está compuesto por 5 módulos o secciones, dos exteriores iguales -uno arriba y otro abajo que funcionan como veto detectores- y tres interiores iguales, apilados en forma de telescopio; las secciones exteriores tienen colocados, en forma mecánica, cuatro PMT en forma de cruz a 90 grados; los interiores, dos perpendiculares a los tubos, y en la misma línea. Las tarjetas electrónicas, para alimentar los PMTs se encierran en cajas blindadas electromagnéticamente, en los extremos del PMT. En los extremos de los tubos del detector se colocan láminas de Al de 20 cm x 20 cm x 1.2 mm para unir y fijar las secciones. El diseño completo se muestra en la Figura 1, y se pueden apreciar detalles del diseño.

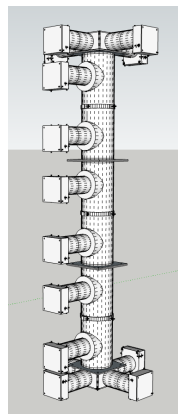


Figura 1. Diseño del detector modular completo. Vista en perspectiva.

Módulos contenedores de medios de detección (MCMD)

La parte interior del cuerpo del detector está hecho a base de 3 módulos tubulares. Cada módulo tubular es de 45 cm de longitud, de PVC de 4 pulgadas de diámetro 2 mm de espesor, preparado para contener líquidos y gases; con tapas inferior y superior; con dos perforaciones circulares de 5.1 cm de diámetro, a 11 cm de los extremos, sobre la misma línea, para colocar ventanas ópticas para acoplar los PMTs que se recubre con tubos de plástico impresos en 3D, al igual que la base de acoplamiento entre este tubo y el tubo de PVC, y la caja para colocar la electrónica de alimentación y lectura del PMT. Los MCMD llevan una perforación justo a la mitad del tubo para colocar el LED de 3 mm de diámetro, verde, para calibración y pruebas. Ver Figura 2a y 2b. Todo el módulo se forra con cinta de Aluminio, para evitar la entrada de fotones, y se pinta con color negro mate, para evitar reflexiones internas de los fotones.

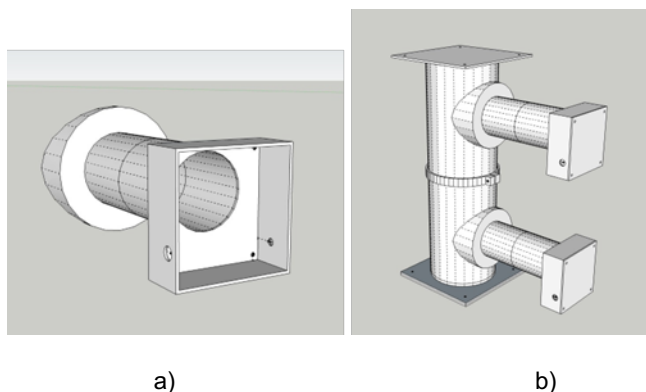


Figura 2. Detalles: a), tubo protector y caja de blindaje; b), módulo tubular.

Módulos discriminadores de señales (MDS)

Estos módulos, ubicados uno en cada extremo del detector, están compuestos de una pieza de acrílico de 10.16 cm x 10.16 cm x 5.08 cm, forrados por una caja de plástico hecha mediante impresión 3D; con 4 carcasas tubulares -también impresas en plástico mediante la técnica 3D- para colocar la ventana óptica de los PMTs en contacto con la pieza de acrílico, en cada una de sus caras laterales, y las cajas protectoras de la electrónica en los extremos. En la parte superior de la caja que encierra la pieza de acrílico, se hace una perforación de 3 mm de diámetro para colocar el LED de calibración y pruebas. Ver Figuras 3a, 3b, y Figura 4.

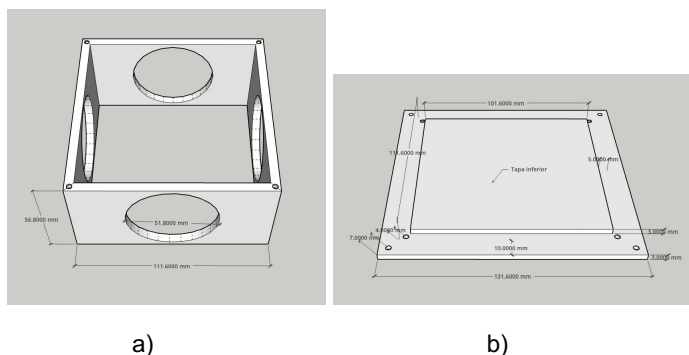


Figura 3. Diseño del MDS. Se muestran las dimensiones.

Estas piezas también se recubrieron externamente con cinta de aluminio; e interiormente, con pintura negra mate.

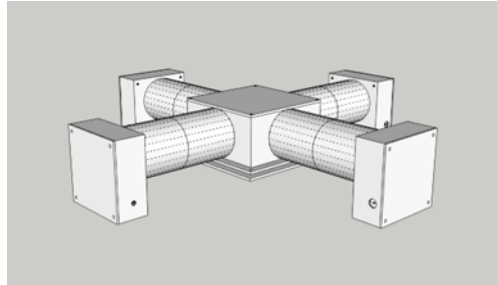


Figura 4. Diseño del módulo discriminador de señales (MDS) para conectar 4 PMTs.

Electrónica

El detector emplea dos elementos electrónicos esenciales, un circuito divisor de voltaje (CDV), para alimentar los dinodos de los PMTs; y un circuito de caracterización del detector (CCD), para probar y calibrar los PMTs, ambos diseños originales; los diagramas esquemáticos se representan en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

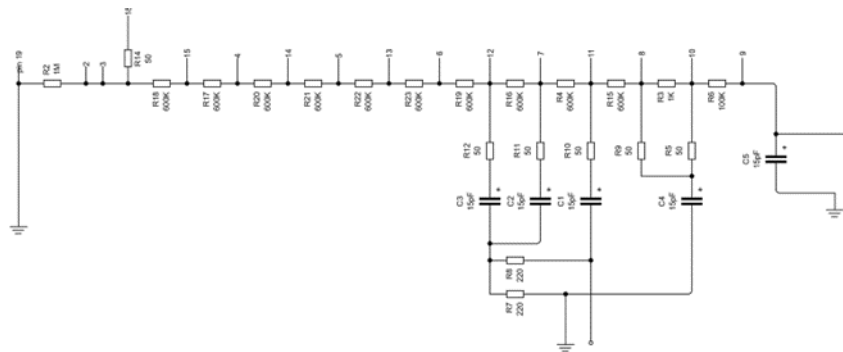


Figura 5. Circuito divisor de voltaje para la alimentación de los PMTs.

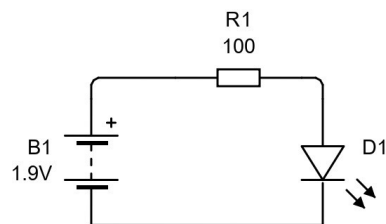


Figura 6. Circuito de caracterización de los PMTs compuesto por un LED y una resistencia de 100 Ω .

Construcción

Mostramos detalles de la construcción de las diferentes partes que conforman el detector.

Módulos discriminadores de señales (MDS)

Las cajas, los tubos laterales y las tapas, para los discriminadores de señales, se realizaron en una impresora 3D, en plástico, siguiendo el diseño mostrado en las Figuras 3a) y 3b); se soldaron los tubos a cada una de las caras laterales de las cajas con pegamento extra fuerte marca Gorilla, se pintó su interior de color negro mate, después coloca en el interior de la misma el bloque de acrílico. La parte final es recubrir con cinta de aluminio todo el exterior, como se muestra en la Figura 7.

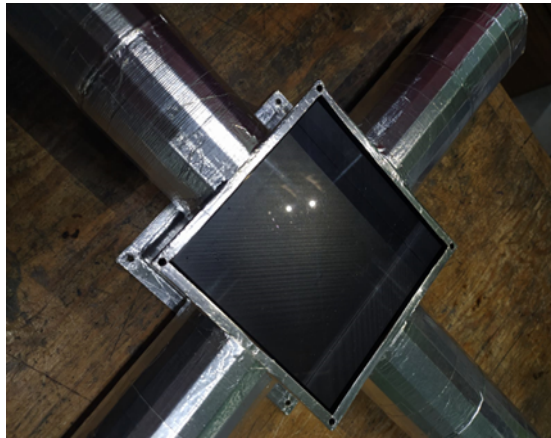


Figura 7. Módulo discriminador de señales.

Módulos contenedores de medios de detección (MCMD)

Para la construcción de los contenedores de medios también se imprimieron en 3D los tubos laterales para cada uno de éstos, siguiendo las medidas mostradas en las Figuras 2a y 2b. La tapa inferior del contenedor se unió con pegamento para PVC, la tapa superior quedó libre. Se pintó de negro el interior de cada uno de los contenedores y se cubrió el exterior con cinta de Aluminio. Un par de láminas de Aluminio-20 cm x 20 cm x 1.2 mm-, por cada contenedor, se soldaron a éstos en los extremos, para separar cada uno de los contenedores y los discriminadores de señales, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Módulos contenedores de medios de detección.

Circuito divisor de voltaje de los PMTs (CDV)

Para alimentar eléctricamente los PMTs construimos circuitos divisores de voltaje siguiendo el modelo mostrado en la Figura 5. Éste a su vez es energizado con una fuente de alto voltaje. Éste mismo circuito contiene la salida que va al osciloscopio, para leer la señal detectada. La construcción del CDV se realizó de dos formas: la primera, sobre una tarjeta electrónica impresa (PCB), que contiene el espacio para el socket donde va ensamblado el PMT; la segunda, soldada directamente sobre la base del socket del PMT e introducido dentro de una carcasa cilíndrica metálica. Figura 9a y 9b. Utilizamos dos tipos de tubos fotomultiplicadores: 3 PMT EMI modelo 9954B, de la marca ET Enterprise, que funcionan con voltaje positivo, y 2 PMT de la marca RCA, alimentados con voltaje negativo.

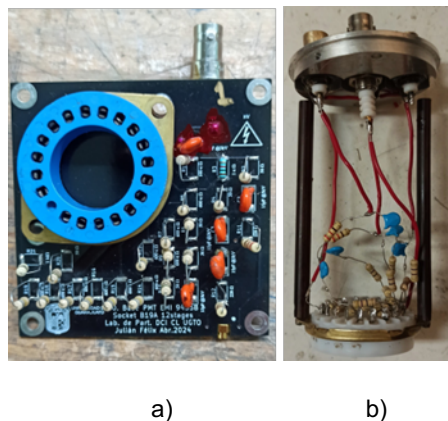


Figura 9. Circuitos divisores de voltaje utilizados en el detector; a) sobre una tarjeta electrónica, b) sobre el socket.

Circuito divisor de voltaje de los PMTs (CDV)

La caracterización del detector la hicimos, módulo a módulo, y siguiendo la misma metodología. Usamos un circuito compuesto por un LED y una resistencia, Figura 6, unido con silicón a la estructura de los módulos, con el LED introducido en los módulos de detección, como se muestra en las Figuras 10a y 10b.

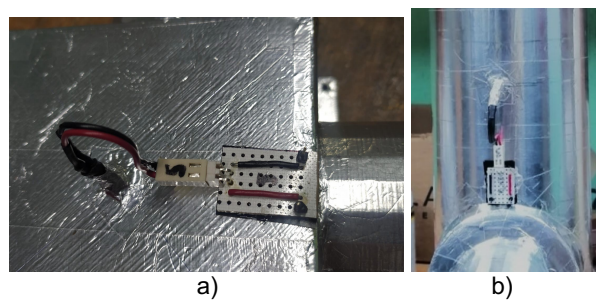


Figura 10. Montaje del CCD en los dos tipos de módulos del detector.

Caracterización

Mostramos detalles de la caracterización de las diferentes partes que conforman el detector.

Configuración de detección

El detector está diseñado para operar en diferentes configuraciones: en la cantidad de PMTs usados, en los medios materiales puestos en el interior de los tubos de PVC, y el arreglo lógico de los diferentes canales - por ejemplo, cualquier canal puede ser declarado el canal de inicio de la adquisición de datos-. Como pruebas preliminares de estudio usamos 5 PMTs, uno por cada módulo de detección. Las secciones restantes de todos los módulos en donde se podrían colocar PMTs se sellaron con papel Aluminio, para evitar la entrada de fotones al detector.

Selección de eventos de interés

El funcionamiento del detector sigue un proceso específico y detallado, con el cual sólo se tomarán en cuenta las partículas que llegan verticalmente al detector y lo cruzan de extremo a extremo, es decir, que éstas crucen el MDS en el extremo superior hasta el MDS del extremo inferior, dejando rastros en cada uno de ellos. Para las partículas de nuestro interés (muones) y los medios que utilizamos (acrílico y aire), siempre se cumple lo siguiente: la partícula genera una señal en el MDS superior; después de un tiempo específico $\Delta t \approx 4$ ns, ésta misma partícula debe de generar señal en los MCMD y, por último, en el MCS inferior. Si cumple con las condiciones anteriores, los datos se tomarán en cuenta, pero el resto que no cumpla con esta característica se desechará, ya que son partículas que decayeron en el interior o partículas que no cruzaron todo el detector, o señales generadas por ruido. Es posible definir varias condiciones lógicas para seleccionar diferentes eventos de interés.

Selección de fotones de interés

Dentro cada uno de los módulos, la detección de la radiación incidente se realiza aprovechando las propiedades de excitación de las moléculas de los medios del interior (acrílico o aire) posterior a su interacción con los RC. Esa desexcitación se da mediante dos procesos diferentes, cuya generación dentro del detector es probable: radiación Cherenkov, y radiación por centelleo; se generan por partículas incidentes; el proceso posterior a su generación es diferente. El efecto Cherenkov sucede únicamente cuando la partícula que excita el medio material se mueve más rápido que la velocidad de la luz en dicho medio y que, posterior a la excitación (polarización) del medio, los átomos polarizados, emitirán fotones en la dirección perpendicular a la cara de un cono (caracterizado por un ángulo específico medido desde la trayectoria de la partícula) generado por los frentes de onda de radiación electromagnética polarizada. En el proceso de emisión de fotones por centelleo, éstos se emiten con igual probabilidad en todos los ángulos posibles. Estos dos fenómenos se pueden usar, en conjunto, para proporcionar información detallada de las partículas incidentes (tiempos de vuelo, velocidad, energía, etc.), y la forma más sencilla y directa es asegurar que los fotones detectados sean los proyectados en la dirección colineal al PMT. Por lo que el interior de los módulos se pinta de color negro para absorber el resto de fotones que no cumplan esta condición de selección.

Pruebas de detección de los PMTs

Las pruebas de detección, a cada uno de los PMTs, es a través del LED que emite un pulso controlado de luz al ser conectado a un generador de funciones con los siguientes parámetros:

Tabla 1. Parámetros de configuración de alimentación del circuito LED con un generador de ondas.

color del LED	ciclo de trabajo	tipo de onda	frecuencia	amplitud
verde	1.5 %	pulso	1 kHz	1.9 Vpp

A cada PMT, o canal de salida (CH), se le asignó un número de acuerdo a su orden -CH1 es el PMT en el MDS superior; CH5, en el MDS inferior-, registrando el voltaje de operación donde mostraban tener un desempeño óptimo, visto en el osciloscopio.

Tabla 2. Valores de voltaje utilizados para cada PMT.

PMT	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
Voltaje (Vdc)	1300	-1000	-700	1300	1000

En este proceso de caracterización se controlan los parámetros que determinan la energía de los fotones y la frecuencia con la que son emitidos en cada pulsación. Por lo que, al conectar el osciloscopio al canal del módulo donde se está haciendo la caracterización, se recibe una señal resultante como las mostradas en la Figura 11, las cuales presentan estas características:

1. Señal con el led conectado: en el osciloscopio la señal está compuesta de picos de voltaje separados 1 ms, éste con valores de entre 8 y 10 mV en el caso de CH1, CH4 y CH5 y de entre 50 y 25 mV en el caso de CH2 y CH3.
2. Señal de un RC incidente: en el osciloscopio la señal está compuesta de un único pico de voltaje con decaimiento a cero en 150 ns y un valor en la amplitud (entre 10 y 250 mV) dependiente de la energía depositada por el RC en el material, que a su vez depende de la energía del RC incidente.
3. Señal con ruido: independientemente del tipo de PMT existe un ruido de entre 2 y 5 mV.

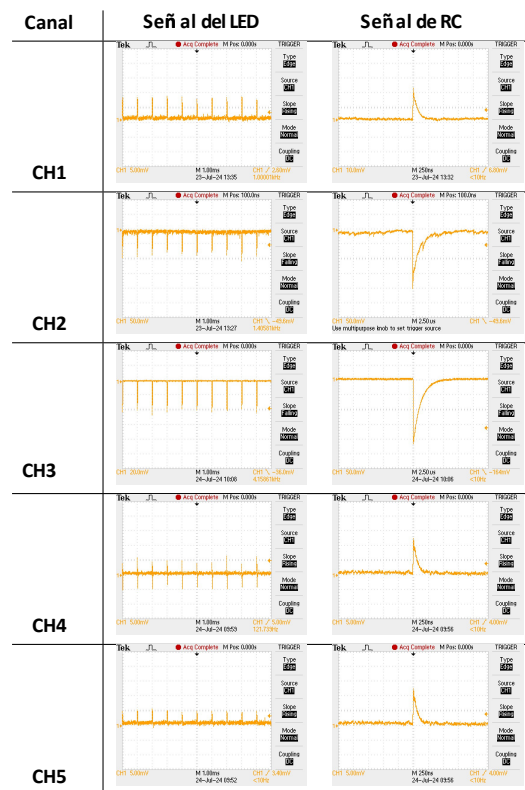


Figura 11. Señales obtenidas durante la caracterización de cada canal del detector, donde las imágenes de la segunda columna son la señal de un LED emitiendo luz y las imágenes en la tercera columna son las señales de un posible RC incidente.

Toma y análisis de datos

La toma de dato la hicimos con un Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) marca CAEN DT5724; es un digitalizar programable. Se grabaron los datos y automáticamente se graficaron usando la herramienta ROOT.

Los datos que se capturaron para el caso de estudio son los siguientes: el número de cuentas de eventos que se dan dentro del detector en un periodo determinado, el tiempo de tránsito de las partículas desde CH1 hasta el CH5. $t_{\text{tránsito}} = t_{\text{CH5}} - t_{\text{CH1}}$ (para t_{CH} el instante en el que se recibe una señal en cada canal asociado a un PMT).

Una vez capturados los datos, la velocidad de la partícula se determina por la expresión de la velocidad clásica:

$$v = d/t \quad (1),$$

donde para cada evento, el tiempo $t = t_{\text{vuelo}}$ y, en este caso, la distancia entre el punto medio de CH1 al punto medio CH5, $d = 1.45$ m. La energía E de la partícula que conforma el RC estará definida por su masa m , velocidad v , y la constante de la velocidad de la luz en el vacío, c :

$$\text{con } \gamma = 1/\sqrt{(1-v^2/c^2)} \quad (2).$$

$$E = \sqrt{((pc \gamma)^2 + (mc^2)^2)}.$$

Y considerando $c=1$, $p = mv$, momento de la partícula:

$$E = \sqrt{((mv \gamma)^2 + m^2)} \quad (3).$$

Para medir la intensidad de los rayos cósmicos es necesario definir un área específica A , por donde cruce los rayos cósmicos en número N , en un intervalo de tiempo t ; la intensidad está definida de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{N}{At} \quad (4),$$

el área está determinada por el área del MDS de forma cuadrada, el cual tiene 0.1 m de lado y, por su parte, el tiempo estará determinado por el tiempo total de captura de datos.

Para realizar la toma de datos, se utilizaron los canales 1 y 5 del detector únicamente, por lo que el resto de canales no lo activamos. Siendo alimentados por dos fuentes de alimentación distintas (con los voltajes de funcionamiento determinados en la caracterización, correspondientes a cada CH) y estando conectados a un sistema de adquisición de datos (DAQ) que registra los eventos ocurridos y los transfiere a una mini PC desde donde se pueden observar y guardar para hacer el análisis estadístico correspondiente. La configuración de las conexiones está representada en el esquema de bloques mostrado en la Figura 12.

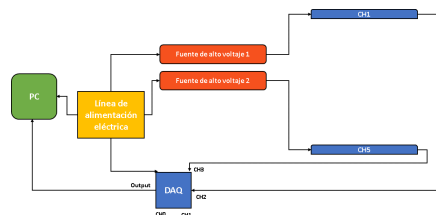


Figura 12. Esquema a bloques de conexión.

Tomamos datos durante 60 minutos dentro del laboratorio de partículas elementales, en un horario de 16:00 a 17:00 horas; un día soleado. Obtuvimos las siguientes dos gráficas para el canal 2 y 3 del DAQ (que corresponden al CH1 y CH5 del detector, respectivamente) Figuras 13 y 14. Mostramos la distribución del número de cuentas (registros de una señal) por cada intervalo de tiempo de 10 ns:

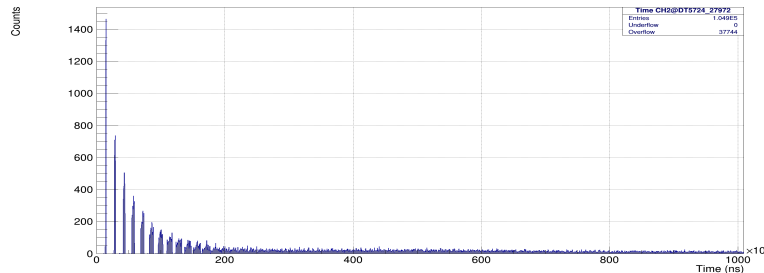


Figura 13. Distribución de cuentas en intervalos de tiempo de 10 ns en el canal 1 (CH1) del detector.

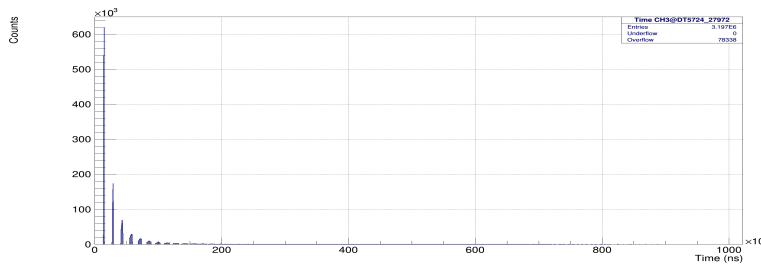


Figura 14. Distribución de cuentas en intervalos de tiempo de 10 ns en el canal 5 (CH5) del detector.

Observamos que hubo una mayor cantidad de eventos en intervalos pequeños de tiempo. En la parte superior derecha de las gráficas se encuentra una leyenda donde se muestra el número total de cuentas que registramos en cada canal; el canal CH5 registró un mayor número de mediciones. En este caso fue necesario establecer trigger (filtro) a la señal, para reducir el número de cuentas que registra y así hacer que los datos que registremos en ambos canales sean aproximadamente iguales. Para establecer el trigger se hizo un corte de los datos, por lo que tomando una muestra aleatoria de 100 segundos y obteniendo el promedio de cuentas que se hicieron en cada segundo, se realizaron 2 cortes donde, en uno, se retiró más cantidad promedio de cuentas que en el otro. Obtuvimos las siguientes gráficas para cada canal Figura 15 y 16.

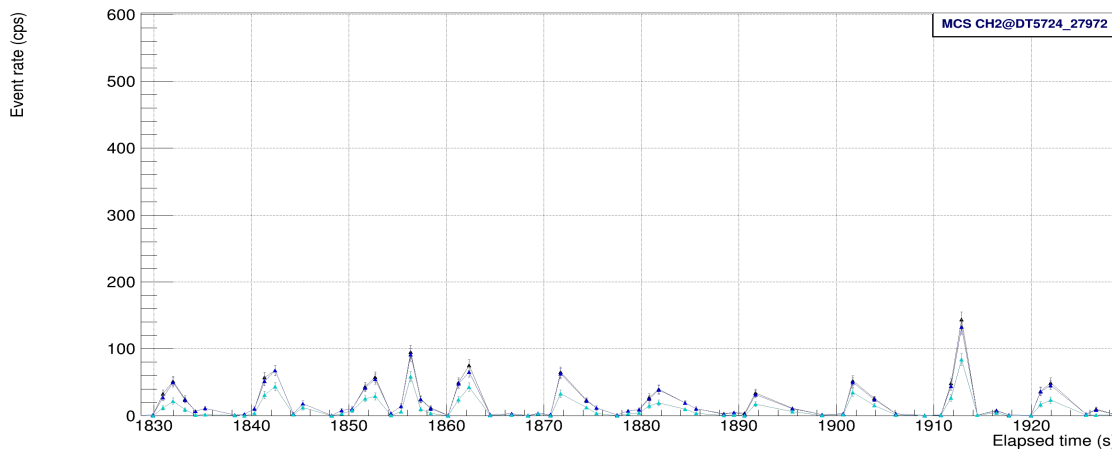


Figura 15. Distribución de los datos antes y después de los cortes en un intervalo aleatorio de 100 s, canal 1 (CH1).

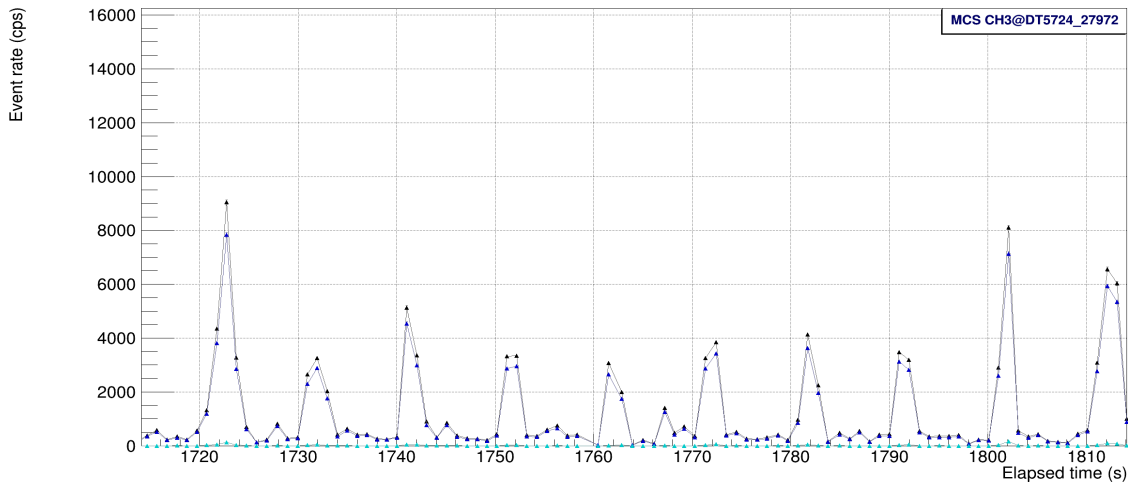


Figura 16. Distribución de los datos antes y después de los cortes en un intervalo aleatorio de 100 s, canal 5 (CH5).

Observamos que para el canal CH5, fue necesario hacer un corte mayor respecto al canal CH1, así que el trigger para el canal CH1 se estableció del 10 % y para el canal CH5 del 25 %. Con estos parámetros se pudo obtener una gráfica de la distribución del tiempo de vuelo, Δt , en cada 10 ns con el número de eventos que cumplen con esta condición Figura 17.

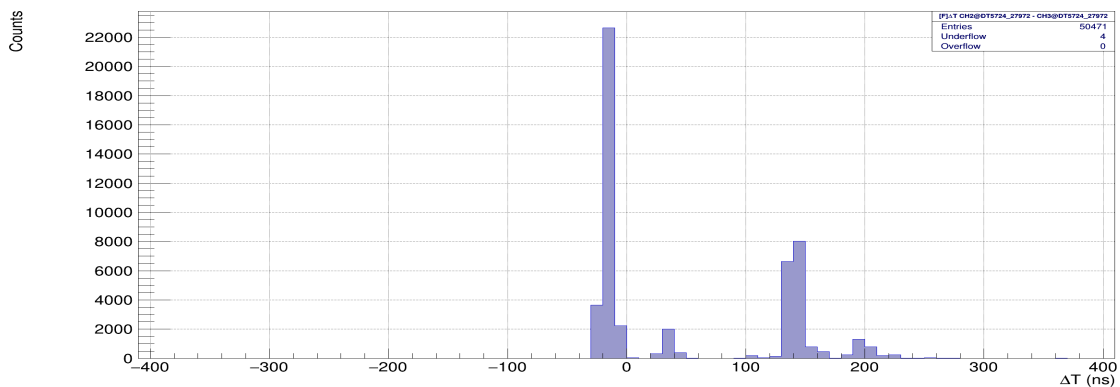


Figura 17. Distribución de tiempo de vuelo de la radiación incidente, cuentas por cada 10 ns.

Apreciamos de la gráfica obtenida, Figura 17, que no está centrada en 0. Lo que debería de cumplirse. Para explicar esto, consideramos que el tiempo de tránsito, tiempo que tarda en registrarse el fotón desde que es emitido en el interior del detector, genera una diferencia entre el tiempo de vuelo real y el registrado. Por lo tanto, bajo esta suposición, debemos medir la diferencia existente entre estos dos. Midiendo el tiempo de tránsito entre los canales 1 y 5 del detector, podemos medir esta diferencia mediante la siguiente expresión:

$$\Delta t_{reg} = \Delta t_{vuelo} + \Delta t_5 - \Delta t_1$$

Donde Δt_5 y Δt_1 son los tiempos de tránsito de cada canal correspondiente. Con estos valores se puede corregir el desplazamiento de la gráfica y generar una acorde con los valores reales. Si los tiempos de tránsito son iguales, o cero en el caso ideal, la diferencia de tiempo registrado es igual al tiempo de vuelo.

Otra característica notable de la distribución de los tiempos de vuelo son los cuatro máximos que se tienen en la gráfica. Corresponden a eventos de interés, ya sea producidas por ruido o por partículas que se mueven de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba o en forma lateral.

Tomamos datos al día siguiente, que fue un día densamente nublado, y los datos obtenidos están disminuidos dramáticamente. Cerca de 10 eventos en vez de los 50471 eventos obtenidos en día soleado. Al transcurrir día, por la tarde de 16 a 17 horas, se detectaron cerca de 50 eventos en vez de los 50471 obtenidos el día anterior. Esto posiblemente se deba a la influencia de las nubes sobre los rayos cósmicos, que son absorbidos por las nubes. En un tema de investigación posterior.

Resultados y discusión

De la Figura 17 obtenemos los límites del tiempo de vuelo mínimo y máximo de 5 ns y 385 ns, respectivamente; con esos valores en el tiempo de vuelo podemos medir la velocidad de las partículas; y suponiendo que son muones las partículas incidentes, medimos su momento y energía. Los resultados los resumimos en la Tabla 3, los errores estimados, en cada una de las mediciones, son del orden del 10% de la medida reportada.

Tabla 3. Resumen de resultados obtenido, los errores estadísticos y sistemáticos son del orden del 10% de valor reportado.

medida	tiempo de vuelo (ns)	velocidad (c)	momento (GeV)	Energía (GeV)
(límite inferior, límite superior)	(5, 385)	(0.98, 0.038)	(0.004, 0.52)	(0.106, 0.530)

Con área $A = 0.01 \text{ m}^2$, sección transversal de detección, un tiempo de toma de datos de 3600 s, y un número de cuentas de $N = 50741$ muones, la intensidad de partículas incidentes sobre el detector es de 1409 muones/($\text{m}^2 \text{ s}$). O cerca de 1 muon por 10 segundos en cada cm^2 . Son datos muy preliminares, todavía se requieren hacer algunas correcciones por diferentes factores como la aceptación del detector, la eficiencia de los PMTs, y otras. Pero en buena concordancia con los datos conocidos en la literatura mundial (Workman, R. L. et al, (Particle Data Group), 2023). Los errores -estadísticos y sistemáticos- asociados a esta medición son del orden del 10% de la medición reportada.

Comparando con los resultados reportado en la literatura, vemos que estos valores de tiempo de vuelo, velocidad, momento, energía, e intensidad están dentro del rango aceptable (Workman, R. L. et al, (Particle Data Group), 2023).

El proceso de creación, y pruebas del detector, es eficaz para desarrollar un dispositivo capaz de detectar rayos cósmicos de manera efectiva.

La caracterización podría extenderse aún más. La medición de los tiempos de tránsito de las señales en el detector antes de generar la señal sería un aspecto a considerar para mejorar los resultados. La medición de las eficiencias de detección de los medios también sería un extra que, sin duda, ayudaría a mejorar dichos resultados. Consideramos éstos buenos resultados finales.

Conclusiones

La construcción de un mini detector modular reconfigurable, como el que desarrollamos, representa un avance significativo en la tecnología de detección de rayos cósmicos. Siendo un modelo versátil y adaptable para diferentes propósitos, ofreciendo una nueva alternativa para la detección y medición de las características fundamentales de las partículas de origen cósmico, tales como su velocidad, energía, tiempos de vida media y flujo. Sin embargo, a pesar de haber obtenido resultados favorables dentro del

rango aceptable en comparación con estudios previos, es importante señalar que durante el proceso de creación y pruebas del detector se identificaron áreas de mejora. Por ejemplo, la medición de los tiempos de tránsito de los fotones en el detector antes de generar señal, así como la evaluación de las eficiencias de transmisión de los medios ionizantes, podrían ser pasos adicionales para mejorar significativamente los resultados. Aun así, considerando las limitaciones de tiempo, los resultados presentados son un buen punto de partida y un producto que puede servir como referencia para futuras investigaciones.

Planeamos, diseñamos, construimos, caracterizamos, y usamos un mini detector modular de rayos cósmicos para medir el tiempo de vuelo de los rayos cósmicos, el espectro de velocidades, de momentos, de energías, e intensidad, de los rayos cósmicos en el punto global (Coordenadas GPS: 21.15403500; -101.70652000) que corresponde a las coordenadas globales del laboratorio de partículas elementales de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León de la Universidad de Guanajuato, de 16 a 17 horas del 24 de Julio de 2024.

Los resultados coinciden bien con los reportes universales, pero son únicos porque es la primera vez que se miden estas variables de los rayos cósmicos en León Guanajuato.

El día siguiente, 25 de Julio del 2024 estuvo densamente nublado y los resultados reportados fueron muy inferiores a los reportados en la Tabla 3. Hay una influencia de las nubes en la incidencia de rayos cósmicos.

También en la primera vez que se reporta la influencia de las nubes en la incidencia de los rayos cósmicos.

Más estudios son necesarios.

Bibliografía/Referencias

- Hamamatsu Photonics K.K. Editorial Committee. (2017). *Photomultiplier tubes: Basics and Applications (4nd ed.)*. Hamamatsu Photonics K.K. Electron Tube Division.
- Flyckt, S. O. and Marmonier, C. (2002). *Photomultiplier tubes: principles and applications (2nd ed.)*. Photonics.
- Workman, R. L. et al, (Particle Data Group) (2023). *Prog. Theor. Exp. Phys. Data particle book (2nd ed.)*. Physical Review D. https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/contents_sports.html
- Gaisser, T. K. (1990). *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge, Cambridge University Press.