

Detector de Radiación Cósmica a Base de una Barra de Acrílico

Salvador Orlando Aguilar Castro¹, Víctor Manuel González Aguayo², Julián Felix Valdez (Asesor)³

¹División de Ciencias e Ingenierías UG
so.aguilarcastro@ugto.mx¹

²División de Ciencias e Ingenierías UG
vm.gonzalezaguayo@ugto.mx²

³División de Ciencias e Ingenierías UG
felix@ugto.mx³

Resumen

Las técnicas de detección de radiación están en constante evolución y mejora por la importancia que tienen en la ciencia y la tecnología. Reportamos la planeación, el diseño, la construcción y la caracterización de un detector a base de una barra cilíndrica de acrílico de 61 cm de longitud y 10 cm de diámetro. Se usan dos tubos fotomultiplicadores colocados en los extremos de la barra. Se logran detectar señales consistentes con rayos cósmicos incidentes desde arriba y desde abajo del detector. El detector es completamente novel, sin reportes en la literatura de detector similar. Tiene muchas ventajas sobre los detectores convencionales. Reportamos detalles técnicos y resultados físicos preliminares.

Palabras clave: detección; rayos cósmicos; partícula; señal; efecto Cherenkov, centelleo, efecto fotoeléctrico.

Introducción

Desde el descubrimiento de los Rayos Cósmicos en 1912 por Victor Hess¹ hasta la actualidad, ha surgido la necesidad por construir nuevos detectores de radiación cada vez más sofisticados ya sea para la medición de procesos de detección muy rápidos y con una menor incertidumbre en su mismo proceso de detección o para la detección de partículas con más dificultad de detectar como son los neutrinos.

A lo largo de la historia, desde entonces, se han construido detectores que se basan en principios simples, desde una cámara de niebla como la de Wilson, cámara de Glaser, quien usó un líquido en un estado cercano al de ebullición, cámaras de ionización, cámaras proporcionales, el uso de materiales semiconductores y el uso de plásticos centelladores, estos detectores mencionados tienen algo en común: se basan en el principio de ionización o detección de fotones emitidos por un medio material. En este trabajo concierne sólo en el uso de plásticos centelladores para la detección de radiación cósmica. Planeamos, diseñamos, construimos y caracterizamos un prototipo con una barra cilíndrica de poli metacrilato de metilo (($C_5O_2H_8$)_n) que por simplicidad nos referiremos a él como acrílico.

Pierre Auger en el año de 1938 descubre los chubascos de aire, los cuales son radiación cósmica secundaria proveniente de la colisión de una cuenta de radiación cósmica primaria muy energética con moléculas de aire, cuya radiación secundaria también es muy energética del orden de TeV, es decir millones de veces más que las que se pueden producir en los aceleradores de partículas más modernos.

Hess observó que en detectores separados se producía la misma detección al mismo tiempo, radiación a la que llamó “chubascos de partículas cósmicas”[5].

¹ Victor Hess descubrió por primera vez los Rayos cósmicos a 5000 metros sobre el nivel del mar, con el uso de un globo aerostático y un electroscopio, fenómeno al que llamó por primera vez como: “Radiación penetrante proveniente del espacio” [3].



Figura 1. Producción de chubascos de partículas.

Conceptualización

Rayos Cósmicos

En agosto de 1912, Victor Hess hizo un vuelo en globo en el que midió la tasa de ionización en la atmósfera y descubrió que aumentaba unas tres veces con respecto a la del nivel del mar -ascendió 5300 metros-, y llegó a la conclusión de que la radiación entraba en la atmósfera desde arriba, fue así como descubrió los rayos cósmicos.

La radiación cósmica primaria es la que llega directamente del espacio exterior a la Tierra y es principalmente compuesta como sigue:

- 89 % protones, núcleos de Hidrógeno
- 10 % núcleos de helio
- 1 % núcleos pesados

Cuando los rayos cósmicos llegan a la Tierra, chocan con los núcleos de los átomos en la atmósfera superior, dando origen a más partículas, principalmente piones. Los piones cargados pueden decaer rápidamente en muones, que, a diferencia de los piones, éstos no interactúan fuertemente con la materia y pueden viajar a través de la atmósfera para penetrar bajo tierra. La tasa de muones que llegan a la superficie de la Tierra es tal que aproximadamente uno por segundo atraviesa un volumen del tamaño de la cabeza de una persona [6].

Los rayos cósmicos se pueden detectar en la atmósfera, donde puede estar presente radiación cósmica primaria como piones, núcleos, protones, muones y electrones, así como secundaria, de la cual depende de la altura en que se encuentre, entre más altura existe menor probabilidad de encontrar radiación cósmica secundaria. La radiación cósmica secundaria es la radiación producida por la interacción de la radiación primaria con el aire. Figura 1.

En su mayoría, entonces, la radiación cósmica detectada en la superficie de la Tierra se trata de radiación cósmica secundaria donde los muones son los tipos de partículas cargadas eléctricamente más abundantes y con energías muy variadas que van desde un promedio de energía de 2.4 GeV hasta casos más energéticos y raros de 1 TeV , también llegan piones, electrones, núcleos pesados, neutrinos. Es toda esta la radiación de interés a detectar puesto que el detector se construyó al nivel del suelo terrestre.

También se puede hacer detección en las profundidades de la Tierra y puesto que los neutrinos tienen muy poca interacción con la atmósfera y la corteza terrestre y muones muy energéticos, son estos dos tipos de partículas las cuales se pueden detectar bajo tierra [1].

Efecto Auger

Las partículas de rayos cósmicos golpean la atmósfera de la Tierra produciendo colisiones con las moléculas de aire, las cuales inician cascadas de partículas secundarias. Estos chubascos, generalmente, contienen millones de partículas que caen a la Tierra en un área grande. Un rayo cósmico de 10^{20} eV puede producir cascadas con millones de partículas que pueden cubrir un área de 16 km^2 [5].

Pierre Auger descubrió que, si se colocan dos detectores de partículas separados por a varios metros de distancia, es posible tener eventos de detección simultáneos, es decir, encontró que hay partículas distribuidas en el espacio y que se pueden detectar al mismo tiempo, a esta actividad se le conoce como Efecto Auger.

Efecto Cherenkov

Una manera de detectar los rayos cósmicos es mediante la detección de fotones producidos por centelleo y efecto Cherenkov. El efecto Cherenkov es un tipo de radiación de fotones producidos por la excitación de dipolos eléctricos polarizados por una partícula que ha depositado energía en el medio, y que se mueve en el medio a una velocidad más rápido que la luz en ese mismo medio; esto no contradice con la teoría de la relatividad especial de Einstein. Figura 2.

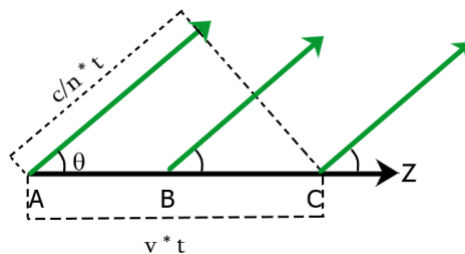


Figura 22. Efecto Cherenkov por una cuenta de rayo cósmico cargado eléctricamente.

De la Figura 2. c es la velocidad de la luz en el vacío, v es la velocidad de la cuenta de rayo cósmico en el medio y n es el índice de refracción del medio.

Entonces por definición del índice de refracción en los términos antes mencionados es

$$n = \frac{c}{v}$$

Entonces la velocidad de la partícula en un medio con índice de refracción n es

$$v = \frac{c}{n}$$

De esta última expresión podemos notar que entre más grande sea el valor de n más lenta viaja la radiación de fotones en el medio.

Pavel A. Cherenkov también teorizó una manera de saber el ángulo θ con el que se emiten los fotones en la traza de un rayo cósmico el cual es

$$vt \cos \theta = \frac{c}{n} t.$$

Entonces, despejando $\cos \theta$

$$\cos \theta = \frac{c}{v n}$$

De esta expresión podemos observar que, entre más grande sea el índice de refracción, el valor del coseno decrece en función del índice de refracción en un intervalo para θ de $(0 - \frac{\pi}{2})$.

Detección usando plásticos centelladores

La técnica de detección usando materiales centelladores no es nueva, laboratorios y proyectos serios como HAWC ya han usado agua para realizar detecciones.

Existen tres tipos de centelladores orgánicos, plásticos, cristalinos y líquidos. Aunque los plásticos y cristalinos se encuentran en un estado sólido los plásticos tienen una estructura amorfa y es el tipo de material utilizado en este detector.

El medio material utilizado para este detector, en específico es poli metacrilato de metilo $((C_5O_2H_8)_n)$. Las características de este material que hay que considerar como importantes son el índice de refracción $n = 1.5$, su densidad $\rho = 1.18$ y una transmisión de la luz visible de 92% [7].

El uso de este material tiene ventajas sobre el agua para la detección de rayos cósmicos, la primera ventaja evidente es que el acrílico requiere de nulo mantenimiento por bacterias y cualquier tipo de vida que en el agua sí se producen y que son indeseables, en segundo lugar su densidad es 18% mayor que la del agua y con moléculas más complejas lo que implica que existe una mayor probabilidad de que una cuenta de rayo cósmico excite una molécula del acrílico o incluso la colisione produciendo electrones de Compton y en tercer lugar es que el índice de refracción de este acrílico es mayor que el del agua ($n_a = 1.33$). Debido a la descripción hecha por Cherenkov para el ángulo formado en la emisión de fotones, cuando el valor del índice de refracción crece, el valor del coseno del ángulo decrece y si se tiene un intervalo para θ de $(0 - \frac{\pi}{2})$ significa que el ángulo con respecto a la traza de rayo cósmico aumenta produciendo conos de fotones emitidos con un radio mayor, así mismo los fotones estarán produciéndose en un área mayor. Figura 3.

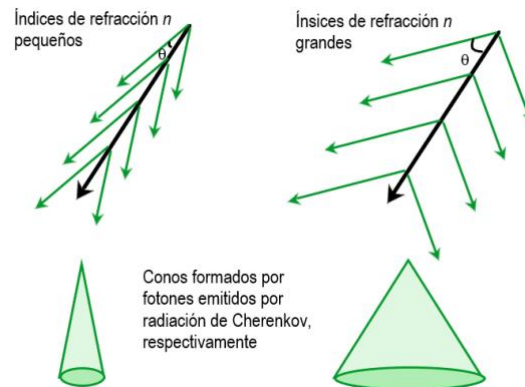


Figura 33. Comparación de conos de fotones generados por efecto Cherenkov con distintos índices de refracción.

De la misma forma dado que por definición en índice de refracción $n = \frac{c}{v}$ se tendrá que el efecto Cherenkov, se producirá a velocidades más bajas de partículas de rayos cósmicos en el acrílico que en el agua, lo cual nos da un rango más amplio de detección.

Efecto Fotoeléctrico

Los tubos fotomultiplicadores funcionan con el principio del efecto fotoeléctrico, el cual consiste en considerar a los fotones y electrones como un corpúsculo en donde la colisión de un fotón con un metal. Partiendo también del principio de la conservación de la energía donde la energía total es

$$E_T = E_c + E_\phi.$$

Donde E_c es la energía cinética con la que sale el electrón y E_ϕ es la energía necesaria para arrancar un electrón de la superficie de un metal.

Entonces

$$E_c = E_T - E_\phi.$$

Ésta será la energía cinética del electrón emitido.

Dado que los procesos están cuantizados la energía de un fotón estaría dada por

$$E = h\nu.$$

Entonces la energía cinética estaría dada por

$$E_c = h\nu - E_\phi.$$

En donde podemos observar que existe una frecuencia mínima en el fotón incidente para que éste pueda arrancar a un electrón de un metal [8].

Un tubo fotomultiplicador tiene un arreglo de dinodos metálicos a los que, si se les aplica una diferencia de voltaje, se aceleran los fotoelectrones, produciendo cada vez más electrones secundarios, hasta que se obtienen los suficientes como para generar una señal de voltaje. Figura 4.

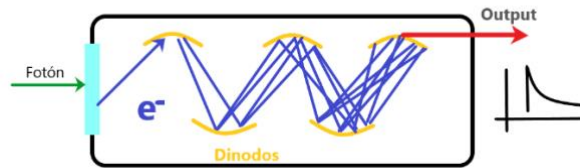


Figura 4: Tubo fotomultiplicador.

Diseño

El diseño del detector es original y consiste en una barra de acrílico con dimensiones de $61\text{cm} \pm 0.1\text{cm}$ y una sección transversal de $10\text{cm} \pm 0.1\text{cm}$ de diámetro y dos tubos fotomultiplicadores marca y modelo Hamamatsu® H10593-012. Figura 5.

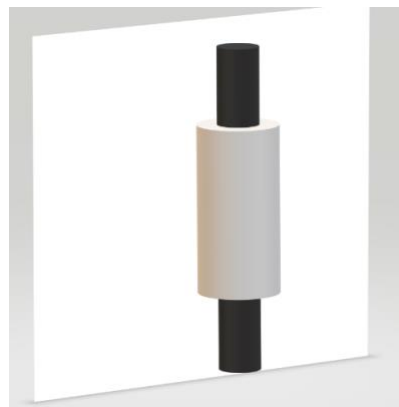


Figura 5. Modelo base del detector.

A medida que se iba avanzando en la recopilación de información, entraba en discusión el modelo, al que se actualizaban cambios hasta llegar al diseño final. Figura 6.

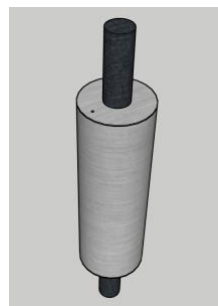


Figura 6. Modelado 3D diseñado en SketchUp. El cilindro gris representa la barra de acrílico. Los cilindros negros, los tubos fotomultiplicadores que se van a usar.

En el modelo final se aprecian los cambios visuales y dimensionales que se harán durante el proceso de construcción, tomando en cuenta las dimensiones correctas.

Construcción

Toda la construcción se llevó a cabo en el Laboratorio de Partículas Elementales en la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato. Comenzamos desarrollando la barra de acrílico de su recubrimiento de fábrica para limpiarla. Para el proceso de limpieza utilizamos jabón común para manos y agua. Para cada sustancia a la que fue sometida la barra de acrílico se hicieron pruebas para observar si había alguna reacción contraproducente al objetivo que nos propusimos. En la hoja técnica del poli metacrilato de metilo indica que tiene poca reacción con los alcoholes por lo que no se usó ningún tipo. Después se le hizo un recubrimiento temporal con hojas de papel y cinta para que no se dañe o contamine. Figura 7.



Figura 75. Barra de acrílico después de un proceso de limpieza con agua y posteriormente con el recubrimiento temporal.

Una vez que la barra de acrílico quedó limpia y con recubrimiento fue necesario fabricar un soporte para sujetarla. Se fabricó en el laboratorio un soporte a base de un trozo rectangular de madera con un orificio aproximado a un círculo con un diámetro de $11.7\text{cm} \pm 0.5\text{ cm}$ al que finalmente se le dio un acabado de color negro por propósitos estéticos. Figura 8.



Figura 86. Trazos en la tabla designada para ser el soporte de la barra de acrílico y a la derecha el acabado final de la misma.

Se instaló con ayuda de pinzas opresoras para que la barra de acrílico quedara sujeta y fija a la mesa de trabajo y proceder a lijar las asperezas de los extremos de la barra de acrílico. Se hizo una cubierta extra con capas de hojas de papel en donde el soporte ejercería presión a la barra para.

Pulir las caras circulares de la barra con lijas 320, 1500 y 2500, en ese orden.

Se aplicó un compuesto en forma de pasta especial (Turtle WAX®) para pulir con la que se le dio el terminado final. Figura 9.



Figura 97. Barra de acrílico montada para ser pulida en sus caras circulares y a la derecha el acabado final.

Retiramos la cubierta, fue necesario limpiar nuevamente la barra con el mismo procedimiento. Una vez que nuestro material estuvo limpio, colocamos una cubierta de papel lo más aproximado al color negro y le realizamos los recortes necesarios para que quedara a ras en ambos extremos de la barra de acrílico. Figura 10.



Figura 108. Barra de acrílico con una cubierta de papel negro (no se alcanza a apreciar el color negro debido a que sólo una de sus caras es de este color).

Colocamos unas cubiertas circulares de acrílico con un corte circular al centro, de igual forma, para empotrar el tubo fotomultiplicador. En una de estas cubiertas agregamos un diodo LED de 3 mm con emisión de luz en el espectro verde, que opera con 3 V-5 V y una corriente de 20 mA según su hoja de datos por el fabricante, con una resistencia en serie de 1000Ω y tolerancia de $\pm 5\%$ según su código de colores, el cual nos va a ayudar a calibrar los fotomultiplicadores que vamos a utilizar. Para fijar estas cubiertas usamos tiras de cinta de aluminio cuidando de que no se cubrieran los espacios reservados para los tubos fotomultiplicadores. También se aisló electromagnéticamente toda la superficie de la barra restante cuidando de no dejar orificios por donde se cuele algún fotón no deseado. Figura 11.



Figura 119. Caras circulares aisladas electromagnéticamente. Se puede observar cómo sobresalen 2 cables, los cuales permiten conectar el LED para calibrar los tubos fotomultiplicadores, abajo la barra acrílica aislada electromagnéticamente en toda su superficie a excepción de los orificios reservados para la ventana óptica de los tubos fotomultiplicadores.

Agregamos tiras de esponja de relleno en el orificio para que hiciera presión con la barra de acrílico, además, en el soporte se hizo una perforación para poner una barra roscada para poder apretar con unas tuercas y unas arandelas. Posterior a ello, se introdujo la barra de acrílico y se aseguró con una abrazadera de metal.

Al término de lo anterior, colocamos los tubos fotomultiplicadores, los pegamos y al mismo tiempo aislamos electromagnéticamente con cinta de aluminio.

Finalmente se realizaron las conexiones correspondientes según el manual y la hoja de datos de los tubos fotomultiplicadores y respetando el código de colores, los cuales son los siguientes:

Rojo→Voltaje positivo +15V máximo, verde→voltaje negativo -15V máximo, negro→GND, blanco→Voltaje de control +1.4V máximo.

Para alimentar los voltajes de operación positivo y negativo se usó una fuente de voltaje modelo TENMA 72-8335 para cada tubo y para el voltaje de control (cable blanco) se usó una fuente de voltaje modelo GWINSTEK GPE-4323 haciendo uso de dos canales, uno para cada tubo fotomultiplicador. Las salidas de señales de cada tubo fotomultiplicador fueron a dos canales de un osciloscopio modelo Tektronix TDS 2022C, respectivamente. Figura 12.



Figura 1210. Sistema montado a la mesa de trabajo, a la derecha con las conexiones correspondientes.

Descripción del funcionamiento

El diseño, geometría, posición y orientación del detector nos da ventajas a la hora de realizar e interpretar las detecciones. En una primera configuración si colocamos el detector de una manera vertical se puede aproximar la posición en el eje x de la barra de acrílico en la que incidió una cuenta de rayo cósmico midiendo las diferencias de tiempo Δt con la que se obtienen las señales.

Entonces si la velocidad de la luz en el acrílico es menor que la velocidad de la luz en el vacío por lo que se tendrá una c' , un t_0 del instante que incide el rayo cósmico, un t_1 de la primera detección del tubo fotomultiplicador más cercano a la incidencia del rayo cósmico y un t_2 de la detección en el segundo tubo fotomultiplicador, luego por definición:

$$c' = \frac{x}{t_1 - t_0} = \frac{L - x}{t_2 - t_0}.$$

Y

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

$$t_1 - t_0 = \frac{x}{c'}, \quad t_2 - t_0 = \frac{L - x}{c'}.$$

Despejando a x obtenemos:

$$x = \frac{L - c' \Delta t}{2}.$$

Dado que conocemos el índice de refracción y que $c' = \frac{c}{n}$:

$$x = \frac{L - \frac{c}{n} \Delta t}{2} = \frac{nL - c \Delta t}{2n}.$$

Cuya incertidumbre estará dada por

$$\Delta x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial x}{\partial y_i} \right)^2 (\Delta y_i)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial L} \right)^2 (\Delta L)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial (\Delta t)} \right)^2 (\Delta \Delta t)^2}.$$

Y las incertidumbres en los ejes y , z

$\Delta y = \Delta z = R$ son del orden del radio de la sección transversal de la barra de acrílico.

Las señales esperadas para observar en osciloscopio es una señal pequeña que corresponde a la señal del tubo fotomultiplicador más cercana a la incidencia del rayo cósmico y una señal con mayor amplitud y desfasada con un retraso de Δt con respecto a la señal del tubo fotomultiplicador más alejado. La razón de tener una mayor amplitud corresponde a que por el mismo retraso hubo mayor colección de fotones entonces se tiene una señal de mayor amplitud. Figura 13.

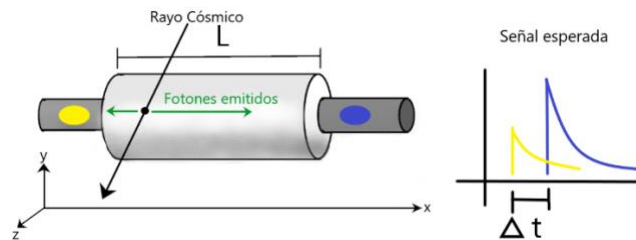


Figura 1311. Configuración del detector horizontal y señales esperadas.

De otra manera, si tenemos una configuración con el detector colocado de manera horizontal se podrá saber información como la dirección con la que incide la partícula si incide de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba que sería un evento muy raro, pero no imposible.

En un primer caso, si la partícula incidió de arriba hacia abajo en la barra de acrílico se interpreta que

$$\Delta t = t_2 - t_1 > 0.$$

Y para el segundo caso

$$\Delta t = t_2 - t_1 < 0.$$

Debido a que se conoce el índice de refracción, se puede saber cuál es el retraso máximo para una señal, es decir se puede conocer Δt máxima

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L}{c'} = \frac{nL}{c}$$

Sustituyendo los parámetros conocidos

$$\Delta t = \frac{(0.6\text{m})(1.5)}{3 \times 10^{-10} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 30 \times 10^{-10} \text{s} = 3.0 \text{ ns}$$

El retardo máximo para una partícula que incidió de manera vertical en la barra de acrílico es de aproximadamente 3 nano segundos, el signo dependerá del sentido de incidencia del rayo cósmico. Este retardo puede ser medido con más precisión con un osciloscopio con mayor capacidad y la interpretación para desfases y amplitudes de señales es la misma que en la configuración horizontal. Figura 14.

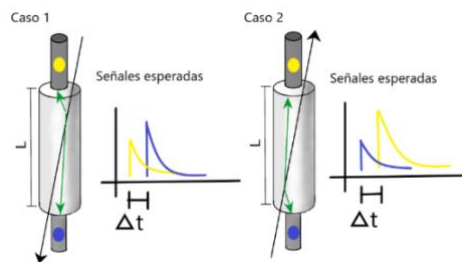


Figura 1412. Configuración del detector en vertical y señales esperadas.

Caracterización y operación

Después de conectar los dispositivos del detector, calibramos los tubos fotomultiplicadores con el uso del diodo LED, para ello se realizaron las siguientes pruebas:

Señal exponencial decadente

Para la calibración utilizando este tipo de señal, se usó un generador de señales *Tektronix AFG 3101* con una frecuencia de 100 Hz y un voltaje de 4.7 Volts y se alimentó al diodo LED cuya luz incide dentro de la barra de acrílico. Se ajustaron los parámetros de operación de las fuentes que alimentan a los tubos fotomultiplicadores con los siguientes valores:

Tubo fotomultiplicador del canal 1

La fuente de voltaje tuvo los siguientes valores para esta prueba de calibración:

- Voltaje de entrada: +8.9 V y -8.9 V.
- Voltaje de control: 1.1 V

Tubo fotomultiplicador del canal 2

La fuente de voltaje tuvo los siguientes valores para esta prueba de calibración:

- Voltaje de entrada: +8.8 V y -8.8 V.
- Voltaje de control: 0.8 V.

Con los parámetros anteriores se realizaron las siguientes observaciones, Figura 15:

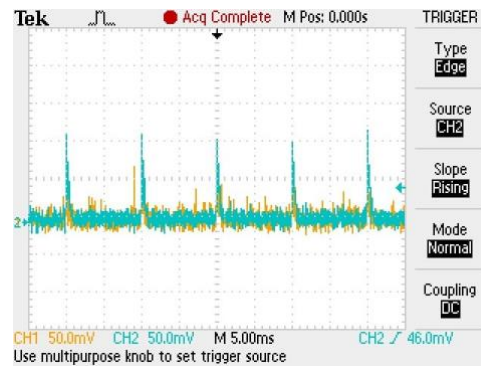


Figura 1513. Señal exponencial decadente a una frecuencia de 1kHz. Es notable hay una diferencia entre las amplitudes de señales de ambos canales por lo que al estar en un rango aproximado una de la otra, tomamos esta prueba como válida.

Señal cuadrada

Nuevamente usamos el generador de señales *Tektronix AFG 3101* con una frecuencia de 1 kHz y un voltaje de 4.8 V. Se ajustaron los parámetros de operación de las fuentes que alimentan a los tubos fotomultiplicadores con los siguientes valores:

Tubo fotomultiplicador del canal 1

La fuente de voltaje tuvo los siguientes valores para esta prueba de calibración:

- Voltaje de entrada: +13 V y -13 V.
- Voltaje de control: 1 V

Tubo fotomultiplicador del canal 2

La fuente de voltaje tuvo los siguientes valores para esta prueba de calibración:

- Voltaje de entrada: +8.9 V y -8.9 V.
- Voltaje de control: 0.8 V.

Observando lo siguiente, Figura 16:

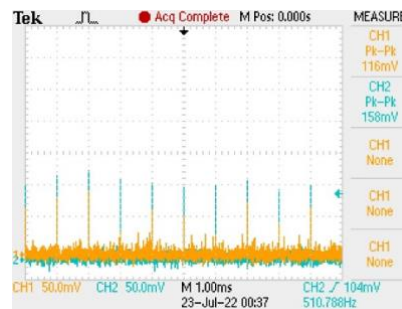


Figura 1614. Señal cuadrada a una frecuencia de 1 kHz y un voltaje de 4.7 V. Se muestran datos como las amplitudes en ambos canales, las cuales nos indican que están similares en amplitud.

El propósito de hacer estas pruebas de calibración con la luz que se le hizo incidir con un diodo LED verde fue para asegurarnos de que los tubos fotomultiplicadores funcionaban correctamente y tener una configuración en los voltajes donde el valor de la amplitud de las señales de salida de ambos tubos fueran lo más cercanas posibles.

Resultados

Las observaciones realizadas son las siguientes, Figura 17-20:

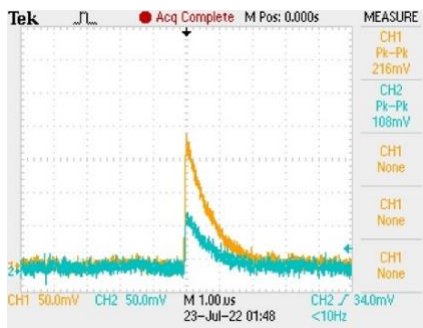


Figura 1715. Detección de una partícula que incidió por la cara de abajo del detector.

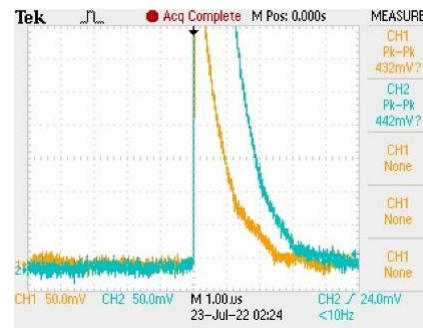


Figura 1917. Mismo caso de detección que en la figura 18, sin embargo, las amplitudes que se registraron fueron de una partícula con mucha energía.

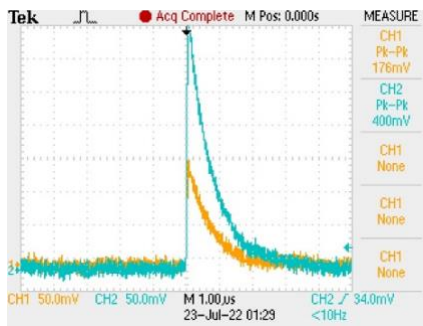


Figura 1816. Detección de una partícula que incidió por la cara de arriba del detector.

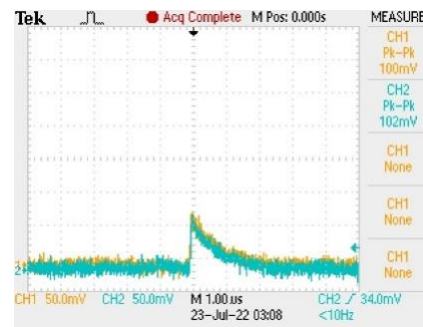


Figura 2018. Detección de una partícula que comenzó a interactuar en un punto cercano al centro del detector.

En la Figura 17 se observa un fenómeno que no es muy común, ya que las partículas que normalmente inciden de abajo hacia arriba son muones, sin embargo, estos muones son producto de la incidencia de neutrinos en la Tierra.

Las Figuras 18 y 19 podemos interpretarlas como partículas que incidieron de arriba hacia abajo en nuestro detector, lo que las caracteriza es la amplitud de la señal que se generó, en el caso de la primera, se registró una señal con 176 mV de amplitud en el canal 1, correspondiente al tubo fotomultiplicador de la parte de arriba del detector. En el canal 2 una señal de 400 mV de amplitud, mostrándonos que la partícula depositó gran parte de su energía en los últimos centímetros del detector. En el caso de la segunda podemos notar amplitudes de 432 mV y 442 mV en los canales 1 y 2 respectivamente, registro que podemos interpretar como una partícula que incidió con una energía muy alta y a una gran velocidad.

La Figura 20 nos da registro de una partícula que interactuó en un punto cercano al centro del detector, uno de los casos posibles para esta observación es que lo que incidió en el detector fue radiación gamma.

Se cambió el osciloscopio con el que estábamos realizando las observaciones previas por un Tektronix TDS5104B, con el cual pudimos observar los tiempos de llegada de las señales. Para estos registros la señal del canal 1 corresponde al tubo fotomultiplicador de abajo y la señal del canal 2 al de arriba.

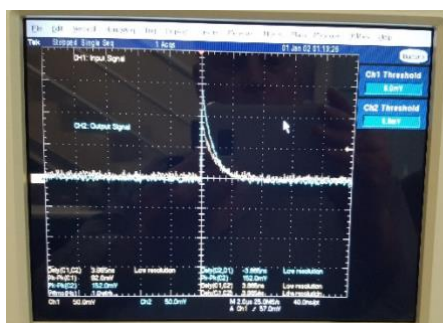


Figura 21. Señales registradas con 3.8 nano segundos de diferencia entre ellas.

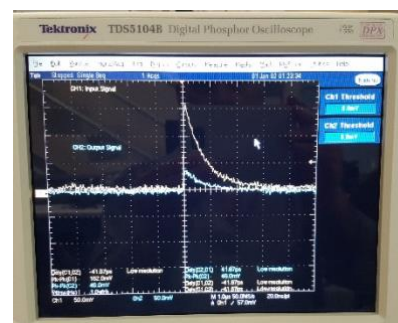


Figura 22. Señales registradas con 41.6 pico segundos de diferencia entre ellas.

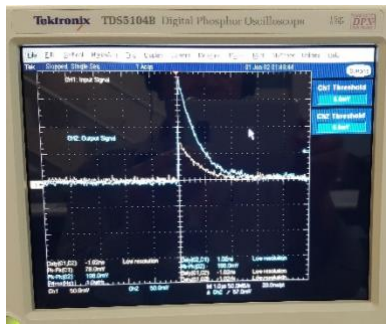


Figura 23. Señales registradas con 1 nano segundo de diferencia entre ellas.

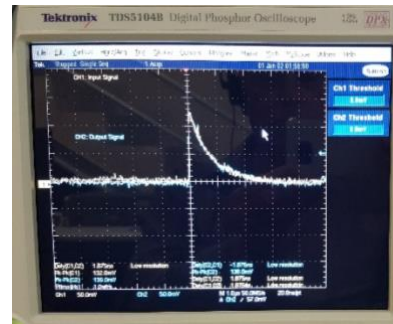


Figura 24. Señales registradas con 1.8 nano segundos de diferencia entre ellas.

En la figura 21 podemos notar que la primera señal registrada fue en el tubo fotomultiplicador de arriba y la segunda señal en el de abajo con un retraso de casi 3.9 ns. En el caso de la figura 22 se observó primero la detección en el canal 2 con una amplitud de 46 mV y en el canal 1 una amplitud de 162 mV con un retraso de 41.67 ps, este evento es de los más rápidos que se registraron.

En la figura 23 se encuentra el registro con el retraso más prolongado que se pudo captar siendo este de 1 ns entre 2 señales, la del canal 1 de 78 mV y la del canal 2 de 198 mV. Ahora bien, el segundo registro más prolongado fue el de la figura 24, con 1.8 ns, además se observa un evento similar al de la Figura 20.

Conclusiones

Por las fuentes de primera mano como Pavel A. Cherenkov, Pierre Auger, The Particle Data Group, The Auger Observatory, etc. así como el pensamiento en primeros principios, se pudo obtener un diseño, construcción, caracterización y toma de mediciones de señales que corresponden a radiación cósmica, y no sólo se logró una buena detección, con este diseño se logra mejorar la manera de detectar rayos cósmicos, el uso de un plástico centellador tiene sus considerables ventajas contra el agua y la disposición de dos tubos fotomultiplicadores aumenta las capacidades de este detector, que aún se puede mejorar considerablemente agregando elementos como una caja metálica que lo blinde aún más electromagnéticamente y un par de veto detectores que confirmen una detección. Con las mediciones obtenidas a la par con los demás detectores construidos se logró observar un poco acerca de la distribución espacial de los rayos cósmicos con lo que se cumple el objetivo de este proyecto.

El interés de analizar los rayos cósmicos radica en su naturaleza, además de los métodos que se utilizan para detectarlos, en nuestro caso la implementación de un detector a base de poli metacrilato de metilo.

Como se pudo observar en las gráficas, la interpretación que se le puede dar a las observaciones realizadas es que hay radiación cósmica que incide tanto en un movimiento de caída como en movimientos ascendentes, además de que al tener 2 tubos fotomultiplicadores y mostrar los cortos tiempos del registro de las señales en los osciloscopios reducimos la posibilidad de tener eventos fuera del tema que se está analizando.

Agradecimientos

A todo el equipo de este proyecto por su paciencia, apoyo y compromiso y así como a la Universidad de Guanajuato por brindarnos el lugar, recursos, material y herramientas necesarias para poder llevar a cabo esta etapa del proyecto.

Referencias

- P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 083C01 (2020).
- Cerenkov, P. A. (1958). Radiation of particles moving at velocity exceeding that of light, and some possibilities for their use in experimental physics. The Nobel Foundation.
- Victor F. Hess – Nobel Lecture. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Thu. 14 Jul 2022. Recuperado de: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1936/hess/lecture/>
- Félix. J. (2003). Notas Para una Introducción a las Bases Experimentales de la Mecánica Cuántica. Universidad de Guanajuato.

Pierre Auger Observatory. (2021). A Timeline of High-Energy Cosmic Rays History. Recuperado de: <https://www.auger.org/outreach/cosmic-rays/timeline-cosmic-rays>

CERN. (S.F). Cosmic rays: particles from outer space. Recuperado de: <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>

Bolívar, Gabriel. (18 de enero de 2021). Polimetilmetacrilato. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/polimetilmetacrilato/>.

Einstein, A. (1905). The 1921 Nobel Lecture on Physics. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/>