

DETECTORES DE RADIACIÓN CÓSMICA

Cosmic Radiation Detectors

David Cabrera Martínez¹, Diego González Sandoval², José Abraham Arredondo Quintanilla³, Salvador Orlando Aguilar Castro⁴, Sebastián Gómez Bernal⁵, Víctor Manuel González Aguayo⁶, J. Felix⁷

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Laboratorio internacional de partículas elementales, departamento de física, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato

d.cabrera.martinez@ugto.mx¹, d.gonzalezsandoval@ugto.mx², ja.arredondoquintanilla@ugto.mx³, so.aguilarcastro@ugto.mx⁴, s.gomezbernal@ugto.mx⁵, vm.gonzalezaguayo@ugto.mx⁶, felix@fisica.ugto.mx⁷

Resumen

La detección de radiación -natural, artificial, inducida, o cósmica- se realiza mediante la captura y amplificación de señales eléctricas iniciadas por iones o fotones que la radiación incidente produce dentro de algún material, como gas (aire, Argón), líquido (agua, aceite), o sólido (acrílico, hielo). Para detectar y estudiar la radiación cósmica, y comparar las técnicas de detección, desarrollamos tres tipos de detectores: uno basado en una barra de acrílico, de 10.16 cm de diámetro y 60.09 cm de longitud -la radiación cósmica se detecta por los fotones que la radiación cósmica produce en la barra de acrílico-; otro basado en tres tubos de Cobre de 5 cm de longitud, 1.27 cm de diámetro, y 0.5 cm de espesor, dispuestos en forma de triángulo de Pascal, y llenos de gas (aire) -la radiación incidente se detecta por los iones que produce al incidir sobre los tubos de Cobre-; y otro basado en un cascarón esférico de acero inoxidable de 15 cm de radio y 1 mm de espesor, lleno de gas (aire), o líquido (agua con CO₂, o detergente, disueltos) -la radiación se detecta por los fotones que produce al incidir sobre el gas o el líquido-. Presentamos los detalles técnicos de estos detectores, sus características físicas, y resultados físicos preliminares.

Palabras clave: Radiación cósmica, detectores, fotón, ion.

Introducción

Desde el descubrimiento de los Rayos Cósmicos, en 1912 por Víctor Hess¹, hasta estos días, ha surgido la necesidad de construir detectores de radiación cósmica cada vez más sofisticados, con el fin de hacer mediciones de procesos y patrones de decaimientos muy rápidos, y con una menor incertidumbre en sus procesos de detección, incluyendo neutrinos y otras partículas y procesos muy raros y muy rápidos.

Los rayos cósmicos son partículas elementales energéticas y núcleos cayendo abruptamente sobre la tierra; éstos mismos se generan de manera primaria por cuerpos cósmicos como las estrellas y de manera secundaria por la colisión con polvo cósmico. Los rayos cósmicos pueden ser medidos directamente con detectores en el espacio exterior, o en globos. Se mide su energía, el flujo, las interacciones de los rayos cósmicos primarios con la atmosfera, el tipo de partícula, la trayectoria, la carga eléctrica, etc.

Aparte de estudiar los rayos cósmicos, en estos días también se estudian las posibles aplicaciones tecnológicas en las aplicaciones en otras ciencias, como la física atmosférica, la solar, la astrofísica, etc.

A lo largo de la historia, desde entonces, se han construido detectores que se basan en principios físicos elementales -ya sea ionización o fotonización de medios o ambos-, desde una cámara de niebla como la de Wilson, cámara de Glaser, quien usó un líquido en un estado de temperatura cercano al de ebullición, cámaras de ionización, cámaras proporcionales; todos ellos basados en materiales semiconductores, de aislantes -plásticos centelladores, o de agua- u otros materiales. Estos detectores tienen algo en común: se

¹ Víctor 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].

basan en el principio de ionización -detección de iones-, o fotonización -detección de fotones emitidos por un medio material-. Actualmente sólo podemos detectar la radiación cósmica de estas dos maneras. En este trabajo se combinan y se desarrollan estas dos formas de detección de radiación.

Planeamos, diseñamos, construimos y caracterizamos tres prototipos. El primero, basado una barra cilíndrica de poli metacrilato de metilo $((C_5O_2H_8)_n)$ que por simplicidad nos referiremos a él como acrílico; el segundo, basado en cascarón esférico de acero inoxidable, donde se puede variar su contenido y hacer pruebas de detección con distintos medios materiales; el tercero, basado en tres tubos de Cobre comerciales dispuestos en un triángulo de Pascal.

Planeación y diseño

Detector a base de una barra de acrílico

El diseño del detector a base de una barra de acrílico consta de una barra con sección transversal circular de diámetro 10.16 cm y de longitud 60.09 cm con soportes de dos piezas en cada extremo diseñados en 3D en el software SketchUp e impresos en impresión 3D por una impresora Creality modelo CP-01. Los soportes llevan una tapa con un orificio concéntrico para un diodo LED, además de una abrazadera al centro de la sección longitudinal de la barra con un orificio destinada para sujetar otro diodo LED que servirá para la calibración relativa. Todo está sujetado por tornillos, en el mismo diseño está considerado un forro de papel fieltro color negro para absorber fotones y disminuir el ruido provocado por las reflexiones internas de fotones. Todo el detector tiene una cubierta de cinta de aluminio para aislarlo electromagnéticamente. Ver Figuras 1-4.

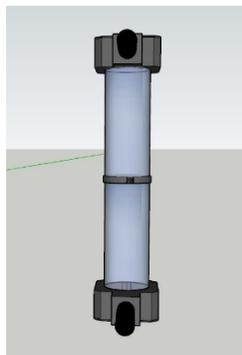


Figura 1: Vista Frontal.

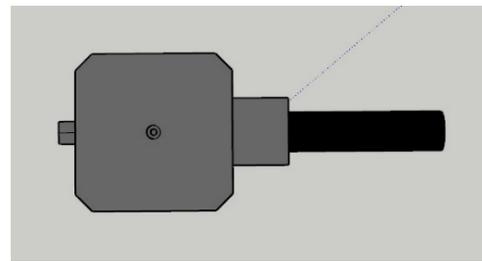


Figura 3: Vista Superior.

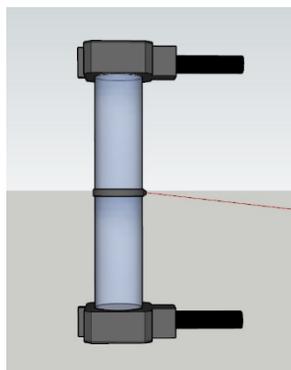


Figura 2: Vista Lateral Izquierda.

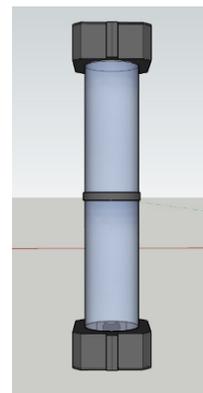


Figura 4: Vista Trasera.

Detector a base de cascarón esférico de acero inoxidable

El detector esférico es un detector de partículas de altas energías de propósitos generales, sin embargo, su característica principal es la capacidad de modificar el medio de detección, su geometría que puede almacenar mejor los líquidos es la esfera, Para ser removido con facilidad se colocan las dos semiesferas en una que puede deslizarse por una estructura cuadrada de aluminio de 30 cm de lado y 60 de altura. En una semiesfera tiene una llave para drenar líquidos, En la otra se instalaron dos bases para tubos fotodetectores uno a cero grados en dirección al centro de la tierra, y otra a 45 grados. Ver Figura 5.

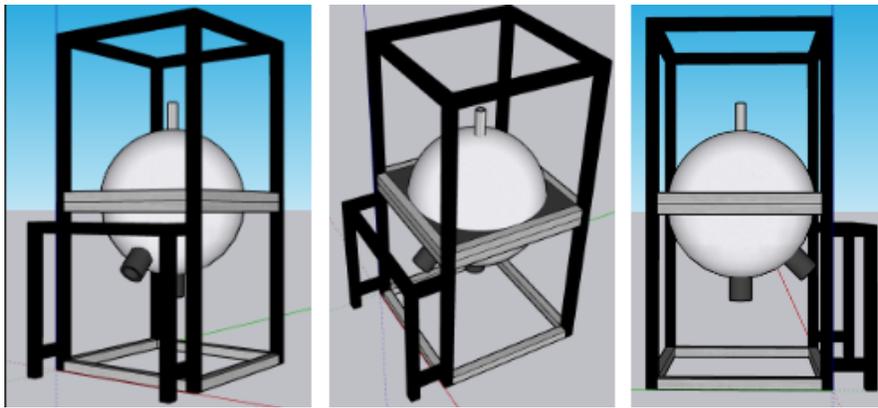


Figura 5. Perspectiva isométrica y lateral del detector esférico.

Detector a base de 3 tubos de cobre

El diseño de la base del detector fue realizado en el software SketchUp e impreso en 3D por una impresora Creality modelo CP-01. Ver Figura 6.

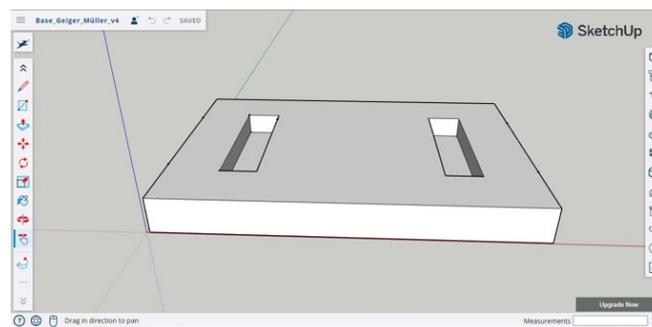


Figura 6. Vista en perspectiva de la base.

El diseño consiste en una base de 10.720 cm x 7.408 cm x 1.118 cm la cual cuenta con dos perforaciones de 1.15 cm x 4.15 cm x 0.820 cm con una distancia de separación entre ellas de 5.283 cm, en estas perforaciones se insertarán los cabezales.

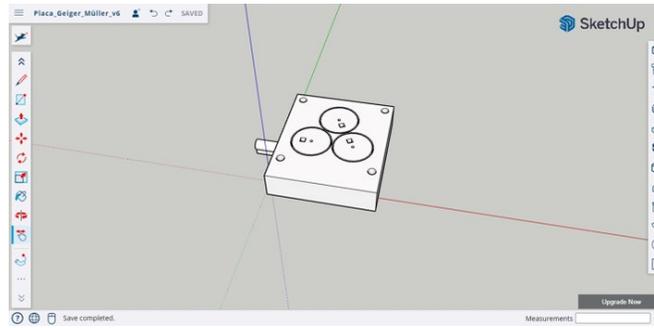


Figura 7. Vista en perspectiva del cabezal.

Los cabezales tienen unas dimensiones de 4.265 cm x 1.115 cm x 4.825 cm; en una de las caras del cabezal se encuentran 3 perforaciones en forma de circunferencia con una disposición de triángulo de Pascal donde sus dimensiones son de 1 cm para la circunferencia interna y para la circunferencia externa de 1.1 cm, en estas perforaciones se insertarán los tubos de cobre. Los tubos de cobre que se insertarán en las perforaciones antes mencionadas tienen unas dimensiones de 5.4 cm de largo y de $\frac{1}{2}$ in de diámetro. Ver Figura 7.

Se tiene una entrada de gas en la parte inferior izquierda la cual tiene dimensiones de 0.358 cm de diámetro y de 0.5 cm de largo, esta entrada se conecta directamente con el primer tubo, posteriormente el flujo del gas va hacia al segundo cabezal ubicado en el otro extremo, ahí hay una interconexión dentro del cabezal con el tubo de la parte superior y nuevamente el flujo de gas se direcciona hacia el cabezal de la entrada de gas, por último la dirección del gas pasa por el tubo restante y el flujo se dirige hacia la salida en el segundo cabezal.

Este cabezal también tiene una pequeña perforación en el centro de cada circunferencia que atraviesa todo el cabezal donde se colocará una fibra que irá de un cabezal a otro, esta será soldada a un alambre de 1.4 cm con un pequeño tope a 0.4 cm; este alambre es el que hará contacto sobre un pin colocado en una tarjeta electrónica.

La tarjeta electrónica consistirá en un circuito RC, en la parte de la entrada se tienen 3 pines los cuales se conectan con la fibra, estos pines se conectan a una resistencia de $2k\ \Omega$ la cual está en paralelo con un conector de HV, en la otra parte del circuito se encuentra la salida de las fibras a otros 3 pines, estos tienen un capacitor de 10 pF y una resistencia de $560\ \Omega$ y finalmente estas resistencias hacen conexión con el conector 5-1814832-1 TE Connectivity AMP Connectors.

El diseño de la tarjeta electrónica será hecho de forma digital de modo que imprimiéndolo en una hoja de papel pueda ser pegado en una plaquita, con un cutter se removerá la parte del circuito que no nos interesa dejando solo las pistas, posteriormente será colocado en cloruro férrico para remover el cobre de estas dejando las pistas donde se colocarán los componentes eléctricos. Ver Figura 8.

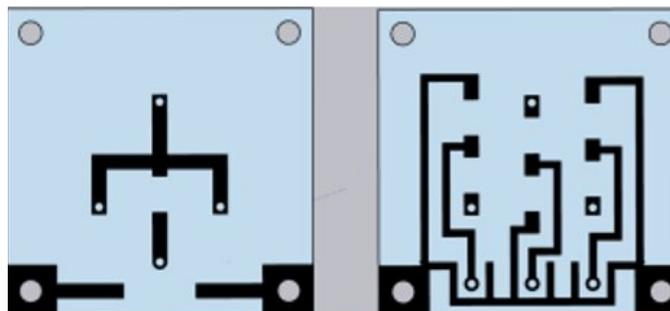


Figura 8. Diseño de la tarjeta electrónica, del lado izquierdo se encuentra el circuito de la entrada y del lado derecho se encuentra el circuito de salida.

Construcción

Detector a base de una barra de acrílico

Se imprimieron en 3D los soportes para los tubos fotomultiplicadores y el soporte para un diodo LED, además de las respectivas tapas de los soportes con un área destinada para colocar diodos LED. Cortamos tornillos a la medida de cada uno de los orificios y colocamos las tuercas.

Comenzamos limpiando la barra de acrílico con agua y jabón líquido, sin embargo, también se utilizó alcohol isopropílico ya que había algunos residuos de la cubierta que tenía en la versión anterior. Después se trazaron las secciones para los tubos fotomultiplicadores, utilizamos un nivel, una escuadra y un vernier. La metodología fue la siguiente: Se trazo el centro de los puntos anteriores para tener un punto de referencia que fuera tangencial a la mesa de trabajo.

- Se giró la barra procurando que el punto estuviera en contacto con la mesa.
- Para asegurarnos que la barra estuviera en la posición correcta lo verificamos con un nivel, después se utilizó la herramienta que utilizamos para incidir a diferentes ángulos los láseres utilizados. Se colocó un punto en el extremo superior de la barra.
- Para corroborar que el punto estuviera alineado, utilizamos la escuadra, si el punto estaba alineado entonces debía coincidir con la marca puesta en la cinta.
- Se repitió con los otros puntos de las caras planas de la barra.

Una vez se marcaron los puntos, se utilizó un vernier para comprobar que las medidas fueran correctas, y se procedió a hacer unas plantillas con las que delimitó las zonas de los tubos fotomultiplicadores.

También se trazaron las líneas a lo largo de la barra, con el fin de colocar la zona para el soporte con el diodo led. Se utilizó una plantilla que fue hecha a partir de una hoja milimétrica, y se comprobó que estuviera nivelado.

Procedimos haciendo una cubierta de papel fieltro, se cortó al ras de las caras planas de la barra procurando no dañar las superficies. Cortamos los orificios para los tubos fotomultiplicadores y para el diodo LED que se colocó en el centro, y fijamos la cubierta con cinta adhesiva tratando de ajustarla lo más posible a la barra. Después, cubrimos con el mismo papel fieltro las caras planas, para hacer esto nos apoyamos de plantillas diseñadas al tamaño específico de las caras, en estas plantillas de dejó un orificio destinado para permitir el paso de la señal emitida por diodos LED.

Tras haber hecho lo anterior, nos dispusimos cubrir la barra con cinta de aluminio, para las áreas de los orificios se hicieron plantillas para evitar rayar la barra. El modo de cubrir la barra fue por tiras empalmadas 1 cm una sobre otra. Cubrimos los soportes para los tubos fotomultiplicadores, las tapas y el soporte central para el diodo LED, los montamos y cubrimos las superficies de contacto de los soportes con la barra y los tornillos de las bases, asegurándonos de que no hubiera zonas que permitan el paso de fotones.

Por último, montamos los tubos fotomultiplicadores, conectamos las fuentes, interconectamos las tierras, definimos los canales de detección en el osciloscopio y comenzamos a tomar datos. Ver Figura 8.



Figura 9. Detector de radiación cósmica a base de una barra de polimetacrilato de metilo.

Detector a base de cascarón esférico de acero inoxidable

La construcción del prototipo esférico inicio con darle mantenimiento al detector esférico ya que estaba sucio, primero limpiamos las barras metálicas de pegamento epoxico, luego los cascarones esféricos metálicos se limpiaron y se ligaron para una mayor detección de fotones. Una vez que limpiamos todo el detector empezamos con el armado de la base de la semiesfera en donde está la llave, pero para tenerlo fijo hicimos las bases en sketchup para luego imprimirlas en una impresora 3D, luego esas bases las pegamos con epoxico a las barras metálicas para después pegar la semiesfera a esta base con más epoxico. Sellamos las semiesferas en donde se pueden colar fotones con cinta de aluminio, antes de unir las semiesferas nivelamos la semiesfera ya armada ya que no estaba bien nivelada para después cubrir de aluminio el empaque de neopreno que se encargara de sellar el espacio entre las semiesferas, montamos la semiesfera y al momento de llenarla de agua se empezó a filtrar el agua entonces sellamos con cera esas fugas y se cubrió con aluminio las bases entre las semiesferas. Una vez que terminamos de armar la esfera colocamos los vetos arriba y abajo del prototipo los cuales llevan los fotomultiplicadores, en la parte de abajo colocaremos el fotomultiplicador en 2 tubos los cuales están a un ángulo de 0° y un ángulo de 45° con respecto a la dirección radial al centro de la tierra. Ver Figura 10.



Figura 10. Detector a base de una esfera metálica.

Detector a base de 3 tubos de cobre

Se comenzó realizando las perforaciones con un Dremel para las fibras y para los tornillos que sujetan la tarjeta electrónica al cabezal, el siguiente paso fue recubrir las pistas con estaño, posteriormente se soldaron los pines, capacitores, resistencias y conectores; para el conector de HV fue necesario realizar una plataforma para poder colocarlo, así mismo esta plataforma fue recubierta con estaño y se le realizaron las perforaciones correspondientes con un Dremel; una vez con los componentes soldados se le aplicó aislante eléctrico para evitar que las conexiones una vez conectadas a un voltaje hicieran un “puente eléctrico”. Ver Figura 11.



Figura 11: Tarjetas electrónicas.

Se realizó la construcción de los alambres que sirven como tope soldándolos a la fibra metálica estos fueron colocados en los orificios correspondientes al igual que se insertaron los tubos de cobre al cabezal de los alambres. Antes de colocar el segundo punto de soldadura en el otro extremo de la fibra se les colocó una pesa de 200 g ya que es necesario que estos se encuentren tensos, este paso se realizó para las 3 fibras.

Una vez tensados se soldó un alambre por fibra en los orificios restantes y también se colocó en cada alambre soldadura epóxica para sellar el orificio. Ver Figura 12.

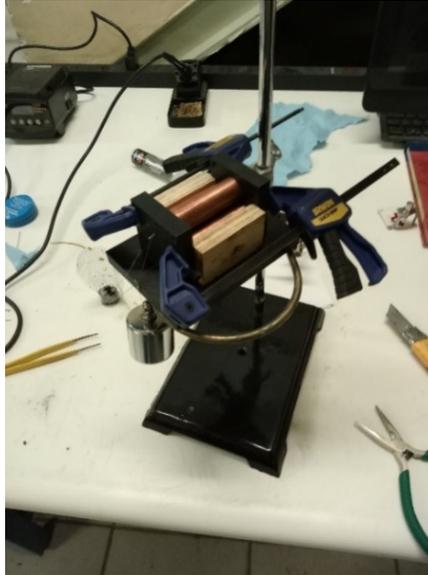


Figura 12. Colocación de la fibra metálica con una masa de 200 gramos.

Por último, se colocaron las tarjetas electrónicas en la parte de cada cabezal y se colocaron los tornillos correspondientes. Ver Figura 13.

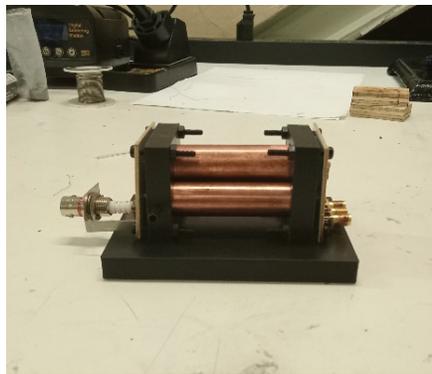


Figura 13. Montaje final del detector.

Caracterización

Detector a base de una barra de acrílico

Se hizo la caracterización de la densidad, índice de refracción y coeficiente de atenuación.

Para la densidad de la barra, se midió su longitud, diámetro de su sección transversal circular y su masa. Dada la geometría de la barra, su volumen está expresado como

$$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 (L)$$

Y la densidad:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2(L)} = \frac{m}{\frac{\pi D^2 L}{4}} = \frac{4m}{\pi D^2 L}$$

La respectiva expresión para describir propagación de error es

$$\Delta\rho = \frac{4m}{\pi L D^2} \sqrt{\left[\frac{1}{m^2}(\Delta m)^2 + \frac{1}{L^2}(\Delta L)^2 + \frac{1}{D^2}(\Delta D)^2\right]}$$

Las dimensiones son las siguientes: $L = 60.90 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$, $D = 10.161 \text{ cm} \pm 0.005 \text{ cm}$, $\text{Peso} = 5680 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$, $\rho = 1.150 \text{ g/cm}^2$, $\Delta\rho = 0.002 \text{ g/cm}^2$.

Para la caracterización del detector un parámetro muy importante es el del índice de refracción de la barra de acrílico. Se usaron rayos láser de tres longitudes de onda diferentes y nos basamos en el siguiente esquema, ver Figura 13, para la medición del índice de refracción:

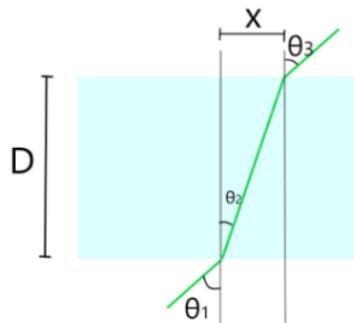


Figura 14: Esquema del sistema de referencia para medición del índice de refracción.

La expresión para el índice de refracción entonces es

$$n_2 = n_1 \frac{\sin(\theta_1)}{\sin\left(\arctan\left(\frac{x}{D}\right)\right)}$$

Y la expresión para medir el error es

$$\Delta n_2 = n_2 \sqrt{\left[\cos^2(\theta_1) \left(\frac{\Delta\theta_1}{\sin(\theta_1)}\right)^2 + \left(\frac{D^2}{x^2+D^2}\right)^2 \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{D^2}{x^2+D^2}\right)^2 \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2\right]}$$

Se hizo una primera medición desde la cara plana de la barra de acrílico tomando como D la longitud de la barra $L = 60.9 \text{ cm}$. Ver Figura 15.

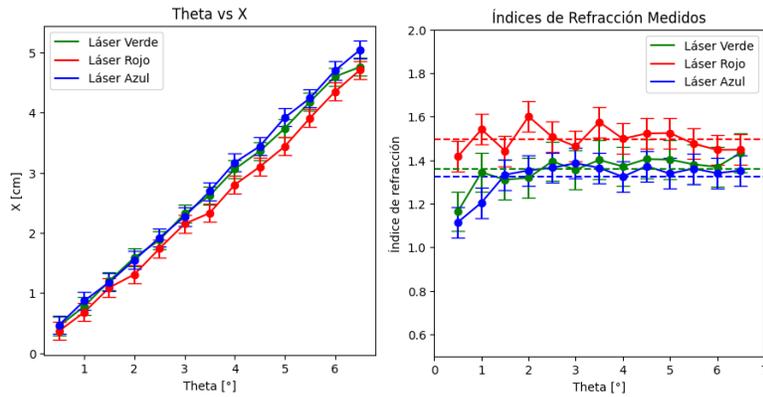


Figura 15: Resultados de la medición del índice de refracción -primera medición-.

Y una segunda medición tomando a D como el Diámetro de la barra, haciendo incidir el láser justo en el centro de su longitud, variando esta vez con ángulos más grandes. Ver Figura 16.

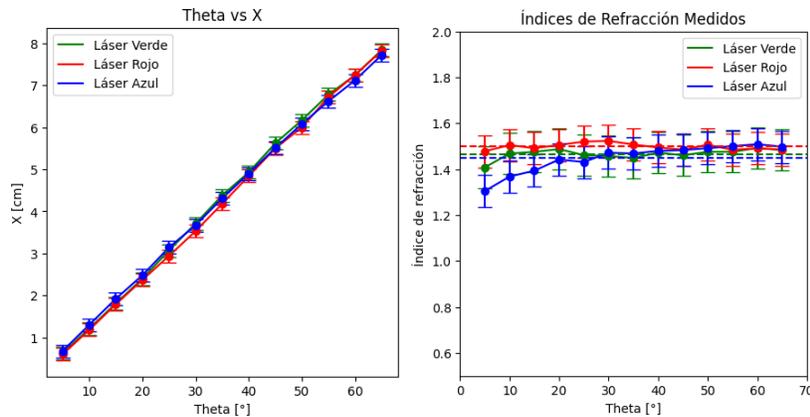


Figura 16: Resultados de la medición del índice de refracción -segunda medición-.

Dado que las mediciones se intersecan unas con otras con sus barras de error, son estadísticamente equivalentes; entonces se hizo el promedio del índice de refracción sobre todas las mediciones. Los resultados son los siguientes: $n_2 = 1.471$, $\Delta n_2 = 0.07$.

Se hizo pulsar el LED en la posición central con un generador de funciones Tektronix AFG3101 a una frecuencia de 1000 Hz y una alimentación Vpp de 2.35 V. Con esto se prueba que el detector funciona. Ver Figura 17.

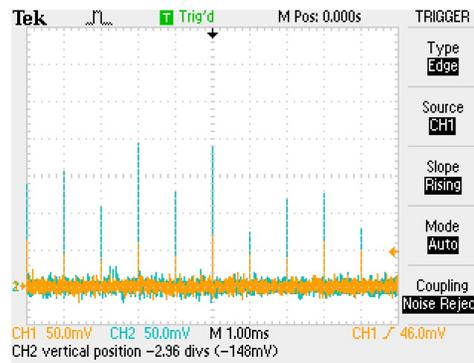


Figura 17. Medición de las amplitudes del LED central pulsado a 1 KHz con función exponencial decayente.

Otro parámetro importante con el que caracterizamos la barra fue el coeficiente de atenuación y para esta medición primero se hizo una calibración relativa de las amplitudes de ambos tubos fotomultiplicadores Hamamatsu modelo H10493-013 alimentando al LED en el centro de la longitud de la barra con una señal exponencial decayente a 1 kHz y Vpp de 2.35 V. Para el PMT-1: V(+)=12.0 V, V(-)=-12.0V y Vctrl=0.95 V. Para el PMT-2: V(+)=11.9 V, V(-)=-11.9V y Vctrl=0.86 V. Se obtuvieron los siguientes gráficos. Ver Figura 18.

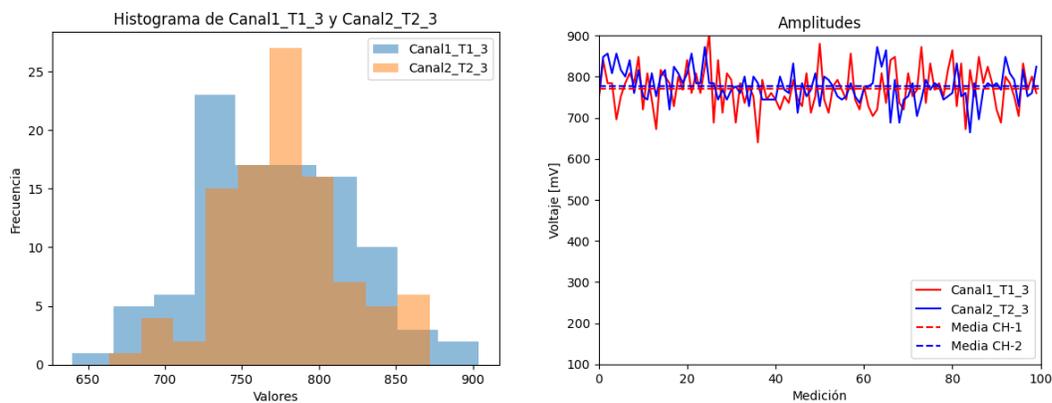


Figura 18: Resultados de la medición de la atenuación de las señales luminosas en la barra de acrílico.

Se observa el histograma con una distribución de los datos aproximadamente normal y las medias son estadísticamente las mismas ya que tienen una desviación estándar de 41.0mV.

Con esta calibración se usó el mismo LED alimentado con los mismos parámetros, pero esta vez en la posición superior para medir cuánto se atenúa en el PMT-2 con respecto al PMT 1 midiendo sus amplitudes en el osciloscopio

$$\mu = \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \right) \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right).$$

La expresión para medir los errores es

$$\Delta\mu = \mu \sqrt{\frac{1}{(x_2 - x_1)^2} [(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2] + \frac{1}{\ln^2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)} \left[\left(\frac{\Delta I_1}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2} \right)^2 \right]}.$$

Para la medición de cuánto se atenúa la luz en la barra de acrílico. Resultados de las mediciones son las siguientes: $\mu = 0.0052 \text{ cm}^{-1}$. $\Delta\mu = 0.0014 \text{ cm}^{-1}$.

Detector a base de cascarón esférico de acero inoxidable

Para comprobar que las señales que estaban siendo detectadas eran producidas por luz, se insertó un led en la esfera y se indujeron señales de tipo exponencial decauyente. Ver Figura 19 y 20.

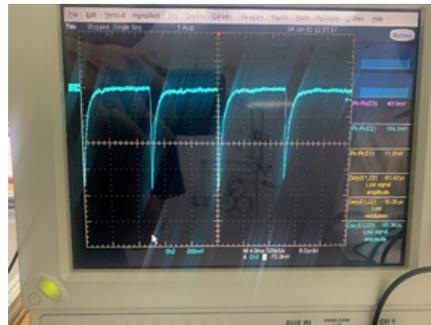


Figura 19: Señal detectada.



Figura 20: Señal inducida.

Detector a base de tres tubos de cobre

El prototipo se caracterizó utilizando un generador de funciones Tektronix AFG3101 con el cual se emitió una señal exponencial decreciente, la cual se podía visualizar en un osciloscopio Tektronix TDS1001C-EDU.

El montaje experimental es el siguiente. Ver Figura 21.

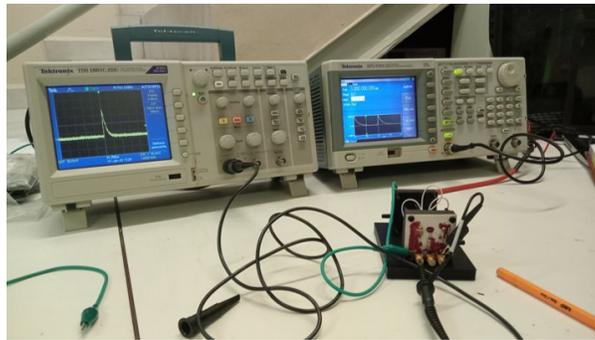


Figura 21. Diseño de la tarjeta electrónica, del lado izquierdo se encuentra el circuito de la entrada y del lado derecho se encuentra el circuito de salida.

Los datos obtenidos para los 3 canales, donde los datos del generador de funciones son iguales para todos los canales, son los siguientes, Ver Tabla I:

	Amplitud	Frecuencia
Generador de funciones	2.0 V	1.0 kHz

	Amplitud	Frecuencia	Tiempo de respuesta	Tiempo de pico a pico
Canal 1	~170 mV	1.0 kHz	250 ns	~180 ns
Canal 2	~172 mV	1.0 kHz	250 ns	~182 ns
Canal 3	~1.06 V	1.0 kHz	250 ns	~260 μ s

Tabla I: Señales inducidas en el detector a base de tres tubos de Cobre.

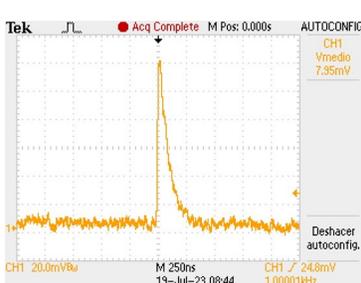


Figura 22. Señal captada en el canal 1.

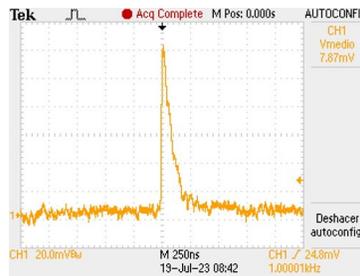


Figura 23. Señal captada en el canal 2.

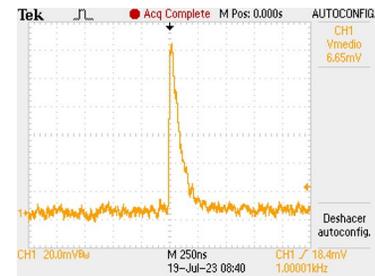


Figura 24. Señal captada en el canal 3.

Como se puede observar en el canal 3 hay una discrepancia muy grande en amplitud y tiempo de respuesta respecto a los canales 1 y 2 los cuales son casi idénticos. Ver Figuras 22-24.

Se desmontó todo el prototipo y se revisó la continuidad eléctrica y el soldado de los componentes; en el canal 3 donde se encontró un error al soldar el conector de lectura el cual fue inmediatamente corregido.

Nuevamente se caracterizó el sistema, con los resultados son los siguientes, ver tabla II:

	Amplitud	Frecuencia
Generador de funciones	2.0 V	1.0 Hz

	Amplitud	Frecuencia	Tiempo de respuesta	Tiempo de pico a pico
Canal 1	~240 mV	1.0 Hz	500 ns	~362 ns
Canal 2	~246 mV	1.0 Hz	500 ns	~360 ns
Canal 3	~240 mV	1.0 Hz	500 ns	~364 μ s

Tabla II: Resultados de la caracterización del detector basado en tres tubos de Cobre, segunda caracterización .

Ver Figuras 25-27.

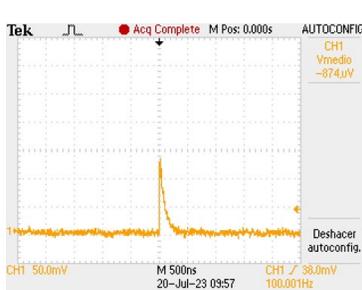


Figura 155: Señal captada en el canal 1.



Figura 26: Señal captada en el canal 2.

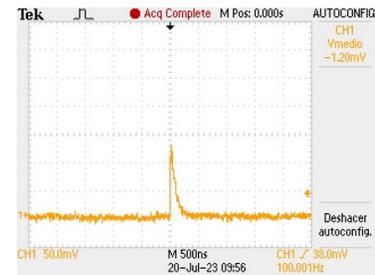


Figura 27: Señal captada en el canal 3.

Con esta simulación podemos corroborar que el circuito eléctrico funciona adecuadamente por lo que podemos colocar la fibra metálica dentro de los tubos de cobre y posteriormente usar la fuente de HV para la toma de datos.

Toma de datos

Detector a base de una barra de acrílico

Se recopilaban datos durante 10 minutos cada hora, comenzamos a tomar datos a las 16:22 con una media de 3 cuentas de radiación cósmica por segundo. Ver Figuras 28-32.

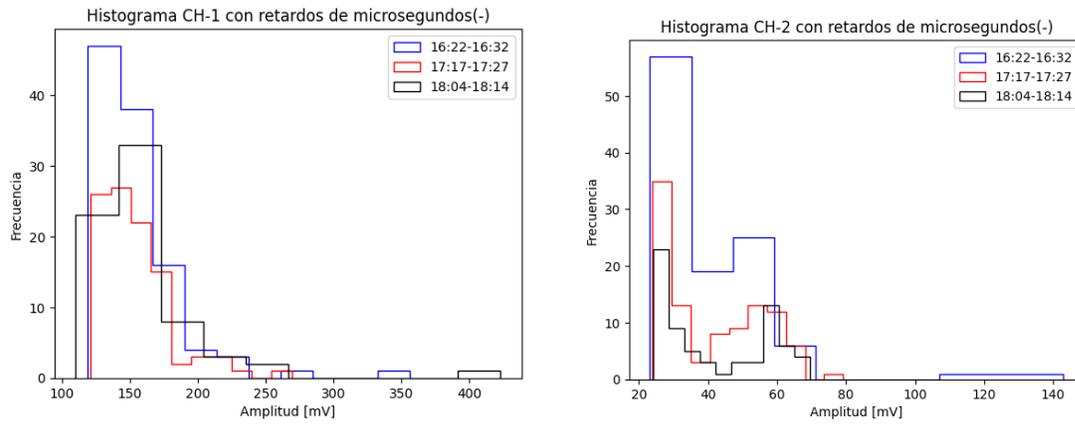


Figura 28: Frecuencia de señales como función de las amplitudes para daca canal.

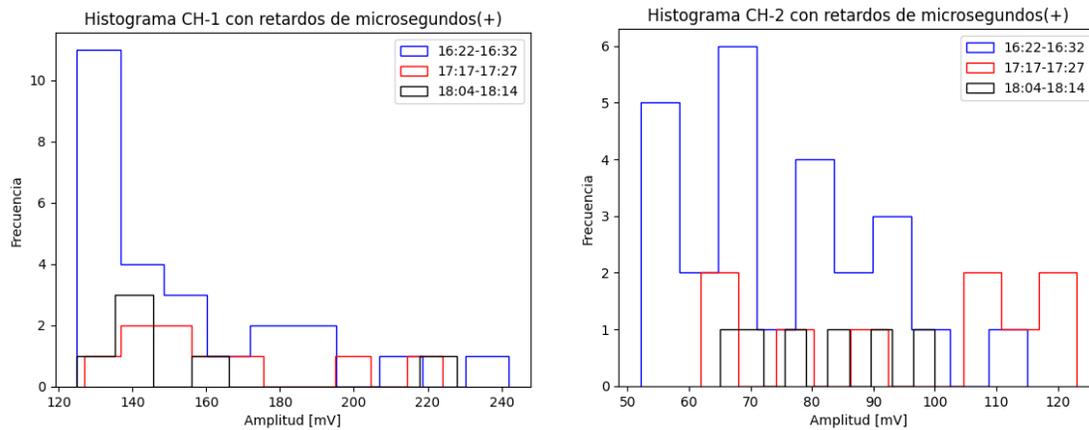


Figura 29: Frecuencia de las señales como función de las amplitud.

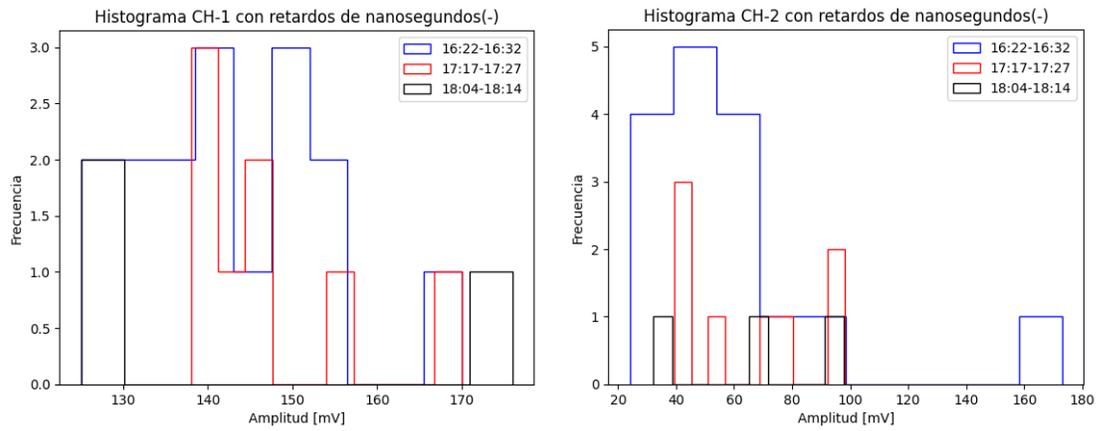


Figura 30: Frecuencia de las señales como función de la amplitud.

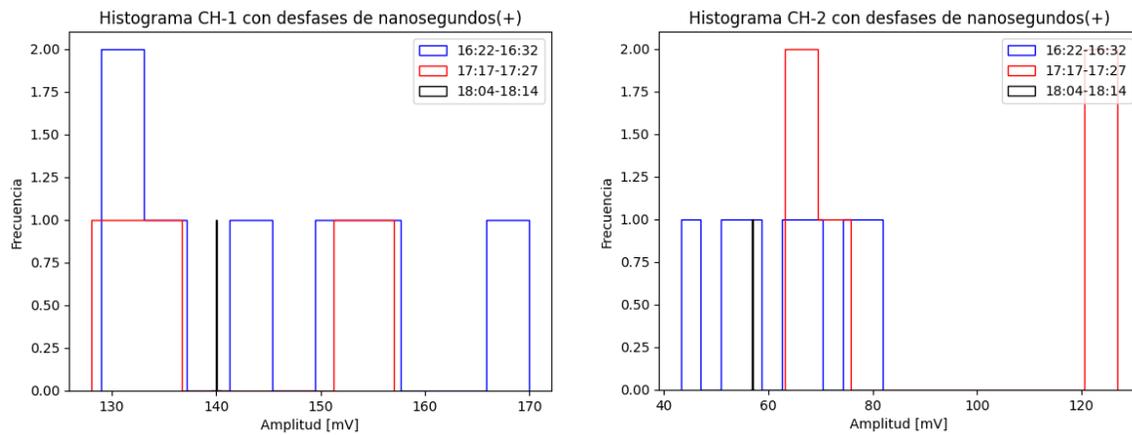


Figura 31: Frecuencia de las señales como función de la amplitud.

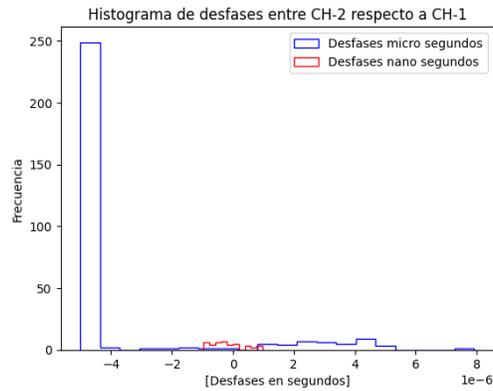


Figura 32: Frecuencia de las señales como función del tiempo de retardo. Hay muchas señales incidiendo de arriba hacia abajo, tiempos negativos, que de abajo hacia arriba, tiempos positivos. Los eventos con tiempos de desfase cercanos a cero se interpretan como señales coincidentes.

Detector a base de cascarón esférico de acero inoxidable

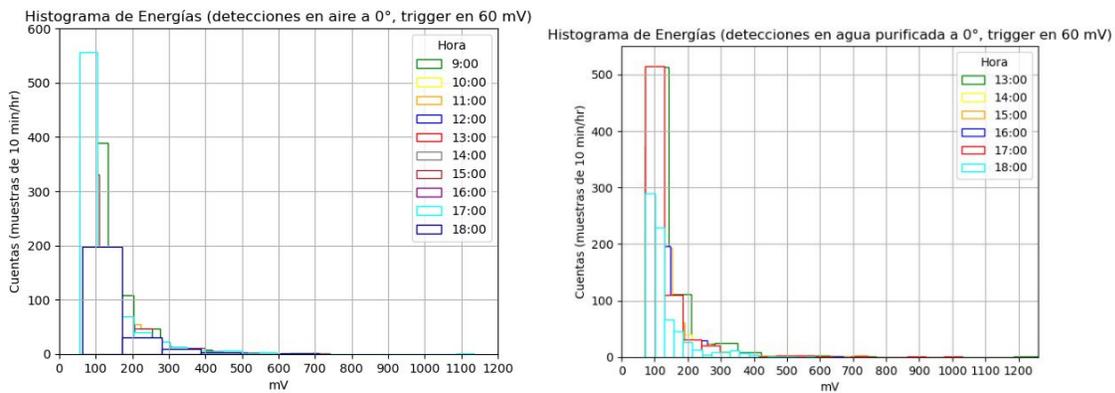


Figura 33: Cuentas como función de la amplitud.

Detector a base de tres tubos de cobre

A continuación, se muestra el montaje experimental para la toma de datos.



Figura 34. Montaje del detector.

Las señales que se obtienen son similares a las obtenidas en las Figuras 22-27.

Conclusiones

Planear, diseñar, construir y operar prototipos de creación propia tiene enormes ventajas, ya que de esta manera se tiene total control sobre las variables y parámetros necesarios para que cada diseño tenga una particularidad, como medir el sentido o dirección de una cuenta de radiación cósmica.

En particular con el detector a base de una barra de acrílico se logró caracterizar, mostrar que funcionaba, y operarlo para una toma de datos de los cuales se puede concluir que hay muchas incidencias con amplitudes más grandes en el canal uno que corresponde al PMT-1 con retardos de microsegundos, unas pocas más con retardos de nanosegundos y el signo del retardo corresponde a la dirección de la partícula, es decir de arriba hacia abajo o del centro de la Tierra hacia arriba, estos últimos siendo los eventos más raros registrados. Usar Acrílico tiene ventajas significativas, ya que no se requiere un mantenimiento constante en su interior y no hay fugas de ninguna sustancia.

Para el detector a base de un cascarón esférico de acero inoxidable se hizo también una gran colección de datos y pruebas para dos distintos materiales: aire y agua, se observó que en general en el agua hay mayores amplitudes en las señales del tubo fotomultiplicador y esto tiene total correlación con la densidad del medio material con el que interactúa la radiación cósmica, si es más denso el material más energía deposita la partícula, por tanto se producen más fotones y la amplitud en la señal de salida de los tubos fotomultiplicadores es mayor.

Finalmente, con el detector a base de tres tubos de cobre con una disposición en triángulo de Pascal, se probó que el circuito funcionará, el diseño permite llenar de un tipo de gas y cambiarlo para hacer pruebas, sin embargo, para el uso que se le dio en este prototipo fue solamente de aire, a diferencia de los detectores anteriores, este detector funciona con ionización de las moléculas del aire. Algunas mejoras podría tener este prototipo sería colocar una segunda tarjeta electrónica en la cual estén puestos los alambres que se encuentran soldados a la fibra metálica, por lo que esta tarjeta electrónica estaría entre la tarjeta electrónica del circuito donde van componentes electrónicos y los cabezales, otra mejora sería poner dos vetos detectores, uno sobre los tubos de cobre y otro debajo de los tubos de cobre, esto permitiría saber con mayor precisión desde dónde inciden los rayos cósmicos y ayudaría a saber también el ángulo con el que inciden.

Los estudios de los rayos cósmicos que se pueden realizar con estos detectores son numerosos: eficiencia de los materiales en la detección de los rayos cósmicos, traza de ángulos de incidencia, determinación de la energía de los rayos cósmicos, determinación del flujo de rayos cósmicos, etc.

Bibliografía/Referencias

Particle Data Group and others, Review of Particle Physics, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2022, Issue 8, August 2022, 083C01, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>.