

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN DETECTOR HÍBRIDO DE RAYOS CÓSMICOS DE 4 CANALES

Francisco Javier Rosas Torres

Universidad de Guanajuato
rosastf2012@licifug.ugto.mx

Julián Félix

Universidad de Guanajuato
felix@fisica.ugto.mx

Resumen

En el universo existen fuentes astrofísicas capaces de producir rayos cósmicos. Éstos son muy energéticos e interactúan con la atmósfera terrestre, formando otras partículas de menor energía. Se pueden detectar estas partículas de acuerdo a la interacción que tiene con el medio, ionización de un material y radiación Cerenkov. Se diseñó, construyó, probó y operó un detector híbrido de rayos cósmicos de 4 canales usando una barra de Cobre como material de detección, con un canal de detección por radiación Cerenkov y otro por ionización en ambas caras de menor área. Con los 4 canales será posible validar señales y se probarán nuevas técnicas de detección. Para operar los canales por radiación Cerenkov se utiliza un fotomultiplicador de Silicio Hamamatsu con la electrónica básica para activar el dispositivo, para los canales de ionización se elaboró un circuito RC con el cual se obtiene una señal analógica que se envía a un discriminador de señal y que funciona como un convertidor analógico-digital, ambos circuitos fueron diseñados en el Laboratorio de Partículas Elementales de la Universidad de Guanajuato. Se presentan detalles del diseño, construcción, prueba y operación de los canales de ionización.

Palabras Claves: Híbrido, ionización, radiación Cerenkov, rayos cósmicos.

Abstract

In the universe there are astrophysical sources with the capacity to produce cosmic rays. These are very energetic and interact with the upper terrestrial atmosphere, creating particles of lower energy. These particles can be detected according with the interaction with the medium, ionization of the material, and Cerenkov radiation. It was designed, constructed, tested, and operated a four channel hybrid cosmic ray detector based on a Copper bar as a detection material, with one Cerenkov channel and one ionization channel at both ends of the Copper bar. With the 4 channels, we can validate the signal and we can test new detection techniques. The Cherenkov channels are based on a Silicon Hamamatsu photodiode with the basic readout, and feed, electronics; the ionization channels are based on RC electronic circuit to get an analogic signal which was sent out to a discriminator, ADC circuit; both circuits were designed at Universidad de Guanajuato Laboratorio de Partículas Elementales. There are presented details of the design, construction, tests, and operations of the ionization channels.

Keywords: Hybrid, ionization, Cerenkov radiation, cosmic rays.

1. Introducción

Los rayos cósmicos fueron descubiertos por el físico Austriaco Víctor Hess en 1912, utilizando un globo aerostático y un electroscopio, realizó ascensos en globo para medir la radiación ionizante en la atmósfera, ya que anteriormente se creía que la radiación provenía de la Tierra. En 1911 subió a una altura de 1100 metros, pero no encontró grandes variaciones en la medición, en 1912 realizó un ascenso a 5300 metros durante un eclipse parcial de Sol y vio que la radiación ionizante en la atmósfera no disminuía, con esto determinó que las fuentes de radiación (rayos cósmicos) pueden provenir de otros lados y no sólo del Sol. Por este descubrimiento se le otorgó el Premio Nobel en física en 1936 [CERN, 2012].

Los rayos cósmicos se dividen en dos categorías, primarios, son partículas aceleradas provenientes de fuentes astrofísicas; y los secundarios, son partículas de menor energía generadas por la interacción de las partículas primarias en la atmósfera. Los rayos cósmicos pueden llegar del exterior del sistema solar,

viajando grandes distancias, al llegar al sistema solar las partículas de bajas energías son desviadas de su trayectoria, pero las de alta energía, o neutras, no se desvían [Cosmic rays, 2016].

Para detectar los rayos cósmicos existen diferentes técnicas, las cuales varían de acuerdo a la interacción que tienen las partículas con el material a utilizar. Uno de los métodos de detección es por radiación Cerenkov, esta radiación ocurre cuando una partícula viaja más rápido que la radiación electromagnética en un medio. Otra técnica de detección es por ionización de un material, esto ocurre cuando una partícula tiene la suficiente energía para ionizar un átomo del material, teniendo como resultado un ion y un electrón que generan un flujo de corriente. Se puede aumentar ese flujo de corriente si se encuentra inmerso en un campo eléctrico.

Para detectar la radiación Cerenkov se utilizan fotodiodos, los cuales funcionan transformando la luz recibida en voltaje.

El fotodiodo utilizado es un Hamamatsu modelo S12572-100P, ver tabla 1.

Tabla 1 Parámetros del fotodiodo Hamamatsu S12572-100P [Hamamatsu,2015].

Parámetro	Dato	Unidades
Área efectiva fotosensible	3 x 3	mm
Número de pixeles	900	-
Rango del espectro de respuesta	320 a 900	nm
Pico de sensibilidad de longitud de onda	450	nm
Tiempo de resolución	300	Ps

Para la detección de ionización se utiliza un circuito RC que acumula las cargas liberadas en el material. El circuito RC necesario para la detección de partículas por ionización consiste en un capacitor que acumula las cargas liberadas en el área de detección que se ionizó, con esto será posible detectar una señal con mayor amplitud y poder analizarla. El siguiente componente es una resistencia que acopla el circuito con la siguiente etapa electrónica. Es necesario colocar una resistencia conectada entre uno de los colectores de señal del detector y la tierra, con esto se evitan revotes de señal y se obtiene un pulso sin deformaciones. Los valores de estos tres componentes dependen del volumen del material de detección.

Para contar el número de señales que ocurren en un periodo dado, se deben discriminar los eventos que suceden en el detector. Para realizar esto, se utiliza un convertidor analógico – digital, el modelo que se utilizara en el detector es un CMP401/402 [Analog Devices, 2016], el cual opera con un voltaje de 3.3 V y +/- 5 V. Para operar el comparador, se deben introducir dos señales, una es la que sale del circuito RC y que es generada por el paso de una partícula en el detector. La otra señal con la que se compara es un “threshold trigger” el cual se ajusta con una resistencia variable y tiene un voltaje de 0 a 300 mV.

Para asignar un valor al trigger, se debe analizar el ruido que existe en el canal de la señal que se obtiene del circuito RC, y de acuerdo al grado de validez de señal que se desea obtener se asigna un trigger mayor.

A la salida del comparador se tiene una señal digital de 5 V cuando se tiene señal y de 0 V cuando no hay señal en el detector.

Lo siguiente es enviar la señal a un sistema de adquisición de datos para contar el número de señales. Con las cuentas de las señales se pueden hacer diferentes análisis de datos, por ejemplo: medir flujo de partículas y validar señales entre canales.

2. Métodos

Diseño

El diseño del detector consiste en un arreglo vertical de una barra de Cobre que está en medio de dos barras de plástico centellador. Las tres barras con una longitud de 1 metro. Para aislar de radiación electromagnética, las barras de plástico centellador están cubiertas con una caja de Aluminio. La barra de Cobre está cubierta con cinta aislante eléctrica, así es posible configurar la barra para estar inmersa en un campo eléctrico.

Cada barra de plástico centellador tiene un fotodiodo para detectar la radiación Cerenkov generada en el material. En la barra de Cobre se tiene dos canales de detección en las caras más pequeñas de la barra, uno por ionización de un material y el otro por detección de radiación Cerenkov, teniendo en total 4 canales de detección en la barra de Cobre.

Teniendo el arreglo vertical de las tres barras, será posible validar la señal obtenida en la barra de Cobre con la señal obtenida en los plásticos centelladores. Esto es posible, ya que las señales que se esperan detectar son generadas por rayos cósmicos, que provienen en su mayoría en una dirección perpendicular a la superficie de la tierra.

Al colocar dos técnicas de detección en la misma barra, es posible validar las señales de un canal con el otro, esto hace que el detector sea híbrido en técnicas de detección.

El desarrollo de este detector es innovador, debido a que se están implementando técnicas de detección que se han investigado en gases, para ionización, y en líquidos, gases y sólidos no conductores transparentes al espectro de luz visible, para la generación de radiación Cerenkov, pero en este detector se utiliza un material sólido que no es transparente al espectro de luz visible y que es conductor eléctrico.

Se utiliza Cobre como material de detección por su alta densidad (8.960 g/cm^3) y su nivel bajo de energía media de excitación (322.0 eV) [Particle Data Group, 2016].

Con el previo desarrollo de un detector de rayos cósmicos utilizando 3 barras de Cobre como material de detección [Rosas et al, 2017], se identificó que era posible obtener señales al usar Cobre. En el presente trabajo se utiliza sólo una barra de Cobre, pero agregando dos canales de detección en la misma barra y aumentando las dimensiones de la barra.

El diseño del detector se realizó usando el software SketchUp [SketchUp, 2016], en el cual se incluyen las tres barras de detección y una base de Aluminio para mantener en su lugar las tres barras. En la imagen del diseño las dos barras de plástico centellador se observan de color gris por la cubierta de Aluminio, la barra de Cobre se observa en color negro por la cinta aislante (ver figura 1).

En la cara más pequeña de la barra de Cobre se coloca una tarjeta con un fotodiodo Hamamatsu de Silicio [Hamamatsu, 2014] soldado en el centro, para el funcionamiento de los canales ópticos. En la parte superior e inferior de esta misma tarjeta, se colocan las conexiones para los electrodos que se conectaran a

alto voltaje, también estarán las conexiones para los colectores de señal de los canales de ionización. El diseño de la tarjeta se realizó usando el software OrCAD [OrCAD, 2016], cuenta con 4 capas, la capa superior tiene tres conectores para ensamblar con la tarjeta del circuito RC, en la capa inferior está el fotodiodo soldado y cuatro superficies de contacto que corresponden a dos electrodos y dos colectores, en las capas intermedias están las rutas que unen los conectores con las superficies de contacto con la barra, ver figura 2.

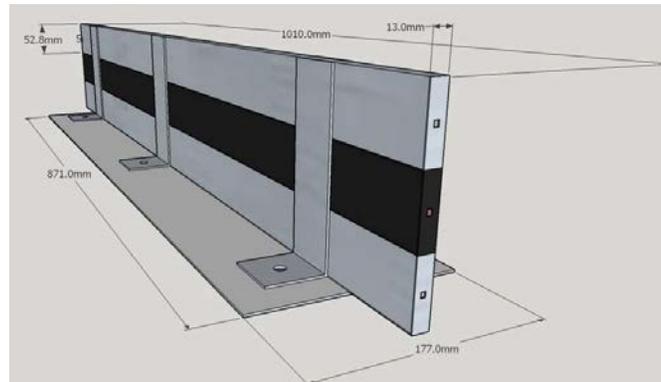


Figura 1 Diseño del detector en SketchUp.

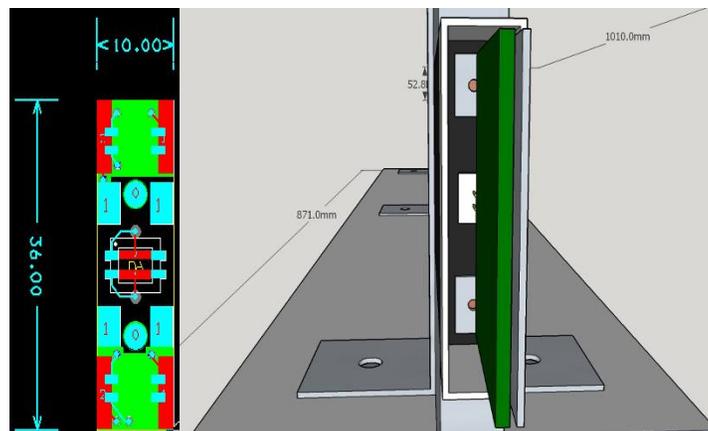


Figura 2 Diseño: tarjeta con fotomultiplicador, colectores y electrodos; y arreglo tarjetas.

En la tarjeta con el circuito RC, se tienen las conexiones necesarias para activar el campo eléctrico, activar el fotomultiplicador, convertir las señales analógicas en digitales y enviar la señal a un sistema de adquisición de datos. Esta tarjeta también se diseñó usando el software OrCAD, cuenta con 4 capas, la superior

tiene los diferentes componentes del circuito, la inferior es una capa de tierra, una de las capas intermedias tiene las rutas del circuito (rutas azules) y la otra tiene las rutas de alimentación de los diferentes voltajes usados en la tarjeta (rutas verdes), ver figura 3.

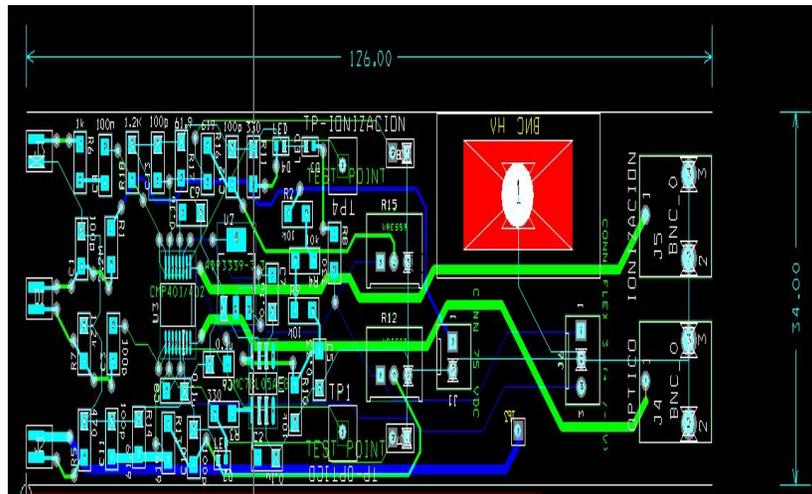


Figura 3 Diseño tarjeta con circuito RC.

Construcción

Se inició la construcción de la barra de Cobre. Las barras de plástico centellador serán actividades de futuros trabajos a realizar.

Se cortó y limpio la barra de Cobre hasta tener las siguientes dimensiones: 101 x 3.8 x 1.2 cm. Con esta longitud será posible tomar datos e identificar la diferencia de tiempo que hay entre que la señal llega a cada uno de los extremos de la barra de Cobre, y poder identificar en qué punto de la barra atravesó la partícula. Se realizaron tres orificios en las caras más pequeñas de la barra, dos de los orificios son para colocar tornillos y sujetar la tarjeta con el fotodiodo, el otro orificio (bajo relieve cuadrado) se realizó a mano y es para introducir el fotodiodo en la barra de Cobre. Al estar embebido en el material, se aísla el fotodiodo de la luz visible del exterior. Se planeó la posición de las perforaciones para los tornillos considerando que estuvieran los más alejados posible a los contactos eléctricos de alto voltaje, de este modo se evita la generación de arcos eléctricos entre los tornillos y los electrodos de alimentación del alto voltaje. La superficie del orificio para el

fotodiodo se pulió hasta eliminar todas las ralladuras en el material para que la superficie del material no tenga deformaciones al estar en contacto con la ventana del fotomultiplicador, ver figura 4.



Figura 4 Perforaciones barra de Cobre.

Después de tener los orificios terminados, se limpió la barra de Cobre para eliminar el polvo y otros contaminantes. Con la barra limpia, se procedió a configurar la barra para poder operar el alto voltaje que genera el campo eléctrico. Para esto se utilizó cinta aislante eléctrica de 2 pulgadas de ancho y cinta de Cobre de 1 pulgada. Al finalizar la configuración de la barra, se observan dos rectángulos de Cobre expuestos en las caras más pequeñas de las barras, en estos rectángulos se tendrá un contacto eléctrico para alimentar el alto voltaje, ver figura 5.

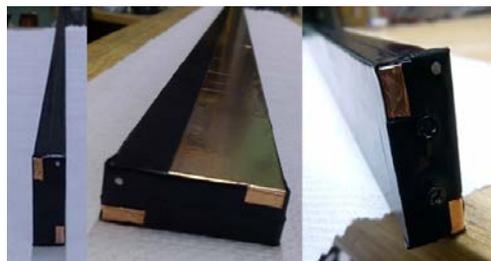


Figura 5 Barra de Cobre con contactos para alto voltaje.

Para activar los canales de ionización se construyó una tarjeta de prueba que se coloca en las caras más pequeñas de la barra de Cobre. Esta tarjeta consiste en 4 contactos eléctricos en uno de sus lados, dos de éstos se ponen en contacto eléctrico con la barra y dos con los electrodos. Después, del otro lado de la barra se sueldan 4 pines, uno para cada uno de los contactos. En la parte central la

tarjeta tiene dos perforaciones para poderse colocar en la cara de la barra usando tornillos. Los pines se conectan a cables que del otro extremo se colocarán a una fuente de alto voltaje y a un circuito RC, ver figura 6.

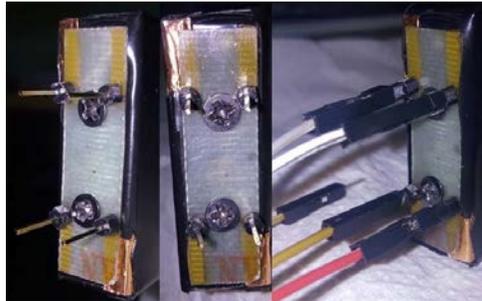


Figura 6 Tarjeta de pruebas.

La fuente de alimentación del alto voltaje es el modelo Ultravolt 3M24-P1 M SERIES [Advanced Energy Industries, 2016]. Con esta fuente es posible tener un voltaje de salida máximo de 3000 V, corriente directa.

El circuito RC consiste en dos resistencias y un capacitor. La función del capacitor es acoplar la señal de salida del canal de ionización con el sistema de adquisición de datos a utilizar, o con un osciloscopio.

El detector fue construido en el Laboratorio de Partículas Elementales de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León de la Universidad de Guanajuato [Laboratorio de Partículas Elementales, 2017].

Pruebas

Para realizar las primeras pruebas se conectó la fuente de alto voltaje Ultravolt a la tarjeta de pruebas. Para activar la fuente de alto voltaje se conecta a una fuente TENMA 72-8335A de dos canales de salida de 0 a 24 V y 0 a 1 A [Tenma, 2017], para alimentar con un voltaje fijo de 24 V y después colocar un voltaje de ajuste, con el cual se varia la salida de alto voltaje, teniendo una salida máxima de 3000 V alimentando con 5 V a la entrada de la fuente de alto voltaje. El voltaje de salida incrementa de manera lineal con respecto al voltaje de entrada.

Después de conectar la fuente, se conecta la tarjeta de prueba a un circuito RC en el cual se recibirán las señales que salen de la barra de Cobre. Para observar las

señales como un pulso con forma de exponencial que decae, es necesario configurar los valores de las resistencias y capacitores de manera correcta. Después de realizar variaciones en los valores de los componentes, se obtuvo la siguiente configuración, ver figura 7.

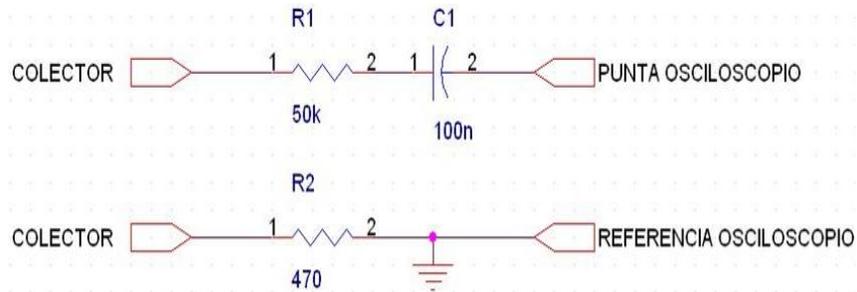


Figura 7 Esquemático del circuito RC de los canales de ionización.

La salida del circuito se conecta a un osciloscopio Tektronix TDS 1001C-EDU de 40 MHz y 500 MS/s [Tektronix, 2013], para identificar que el detector está funcionando y que se obtienen señales con forma apropiada para después poder ser contabilizadas.

Con un voltaje de entrada de 1900 V, se obtuvieron pulsos con un tiempo de descarga de 1 μ s y con una amplitud de 150 a 200 mV, las señales observadas son usando un trigger de 70 mV, ver figura 8.

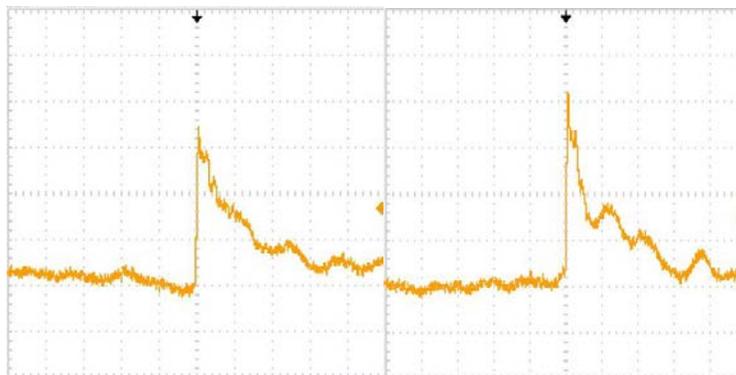


Figura 8 Señales en osciloscopio. Escala horizontal 500 ns; vertical 50 mV; 1900 V.

Se continuó realizando pruebas, ahora se alimentó el campo eléctrico con un voltaje de 1950 V, se observaron señales en el osciloscopio con un tiempo de

descarga de 1 μ s y 200 a 220 mV, el trigger del osciloscopio se colocó en 70 mV, al igual que en las anteriores señales, ver figura 9.

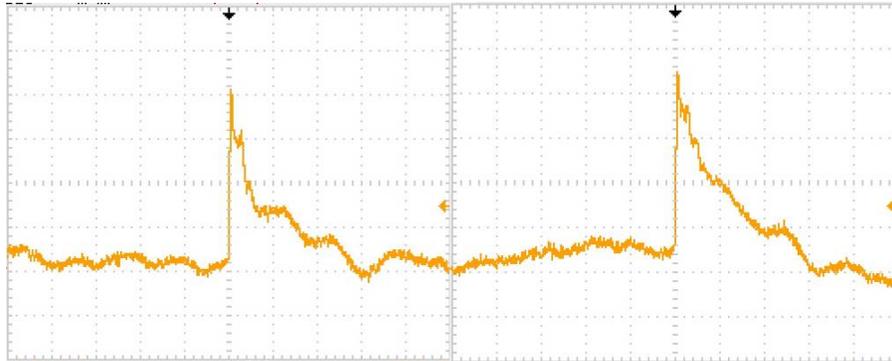


Figura 9 Señales en osciloscopio. Escala horizontal 500 ns; vertical 50 mV; 1950 V.

Se realizó una toma de datos manual, conectando los dos canales de ionización a un osciloscopio, se fijó el voltaje de alimentación del campo eléctrico hasta tener 10 señales en cada canal, se registraba la amplitud de esas 10 señales y luego se incrementaba el voltaje en 50 V. Con estos datos será posible relacionar la amplitud de las señales con el voltaje de alimentación del campo eléctrico.

3. Resultados

Con las primeras observaciones de los pulsos de ionización, se vio una variación en la amplitud del pulso, pero el tiempo de descarga se mantuvo sin variación.

Los pulsos tienen pequeñas deformidades después de alcanzar el pico de amplitud. En el canal existe ruido que se puede originar de diferentes fuentes, algunas de ellas son: el uso de cables y pines, las instalaciones eléctricas en el laboratorio, etc. Se observó ruido con amplitud hasta de 50 mV.

Al observar las señales con la forma de exponencial que decae y que suceden eventos de forma aleatoria, es posible que se esté observando el paso de rayos cósmicos que ionizan el material.

Con los datos tomados de la amplitud respecto al voltaje del campo eléctrico, se medía el promedio de la amplitud de los 10 pulsos, de esta forma se mide la

amplitud promedio de los pulsos a un determinado voltaje que genera el campo eléctrico en el que está inmerso la barra de Cobre.

La toma de datos se inició a un voltaje de entrada de 1222 V y se incrementó el voltaje hasta 3000 V debido a que la fuente utilizada tiene un límite superior de voltaje de 3000 V.

Se graficaron los dos canales de ionización y se agregaron a la misma gráfica tres canales de señales que corresponden a un detector de partículas que utiliza placas paralelas con un campo eléctrico, pero con gas como material de detección, ver figura 10. En figura 10 se compara con señales de un detector de placas paralelas que utiliza tres gases diferentes (Xe, Ar, α) como haces, y con gas i-butylen como gas de detección

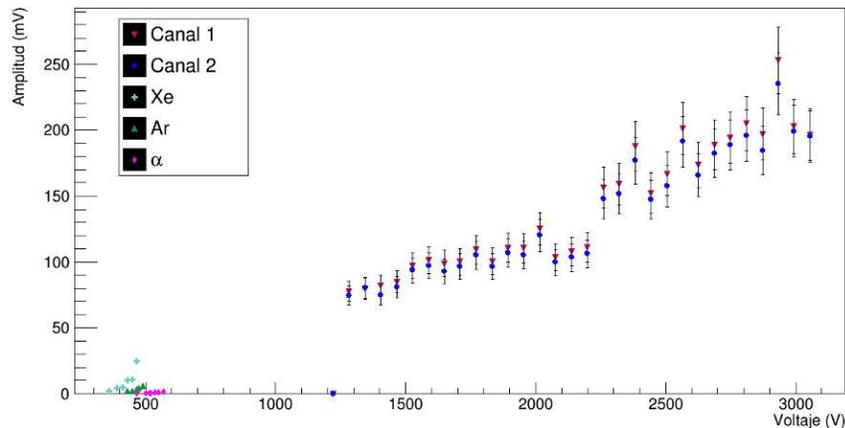


Figura 10 Gráfica de amplitud de las señales contra voltaje [Stelzer, 2014].

4. Discusión

Se observó que al incrementar el voltaje de alimentación del campo eléctrico la amplitud de las señales aumentaba, esta forma de operar es muy similar a lo sucedido en otros detectores de partículas, lo que hace suponer que el funcionamiento del detector es correcto.

Al comparar la amplitud de las señales del canal 1 y 2, se observa que ambos canales son estadísticamente equivalentes, esto hace suponer que las señales que llegan a ambos circuitos corresponden a la misma partícula que ioniza el material.

Realizando la comparación con los datos de otros detectores que funcionan con placas paralelas y con gases como medio de detección, se puede observar que con este sistema se obtienen pulsos de mayor amplitud, esto facilita el procesar la señal con un sistema de adquisición de datos y poder diferenciar entre el ruido de los canales y las señales.

Para poder observar pulsos en el detector, se utiliza mayor voltaje de alimentación comparado con el otro sistema de detección que utiliza gases, pero usando corrientes bajas, máximo 0.333 mA. El tener corrientes bajas hace posible el uso de fuentes de baja potencia para alimentar el sistema de detección.

5. Conclusiones

- Se tiene un detector de rayos cósmicos a base de una barra de Cobre de 10 x 3.8 x 1.2 cm.
- Funcionan satisfactoriamente los dos canales de detección por ionización.
- Se midió la capacitancia de la barra de Cobre generada por la configuración del sistema. El valor de la capacitancia es de 3.12 nF.
- Se logró activar los canales de ionización y tener señal en ambos. Se terminó el diseño de las tarjetas electrónicas de todo el sistema.
- Se observó que, al incrementar el voltaje de alimentación del campo eléctrico, la amplitud de las señales incrementaba.
- Se realizarán pruebas para identificar el voltaje óptimo de operación y medir la amplitud de las señales en ese voltaje. Con esto se podrá asignar un valor de trigger para convertir la señal analógica en digital y poder contar el número de pulsos.
- Se observó un mejor funcionamiento del detector, comparándolo con un sistema de detección de placas paralelas.
- Se innovó en la construcción de un detector de rayos cósmicos utilizando la técnica de detección por ionización en un sólido que es conductor eléctrico, al buscar en la literatura, no se encontraron trabajos similares.
- Se planea realizar pruebas para identificar cual es el material de detección más conveniente de utilizar.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Advanced Energy Industries, Inc. Ultravolt M Series Miniature, Micro-Sized High Voltage Biasing Supplies, 2016.
- [2] Analog Devices. CMP401/CMP402. USA, 2002 – 2016.
- [3] CERN Courier, A discovery of cosmic proportions, Julio 18 2012, <http://cerncourier.cm/cws/article/cern/50215> Mayo 2017.
- [4] Cosmic rays, J.J. Beatty, J. Matthews, S.P. Wakely, junio 2016: <http://pdg.lbl.gov/2016/mobile/reviews/pdf/rpp2016-rev-cosmic-rays-m.pdf>.
- [5] Hamamatsu Photonics K. K., MPPC (multi-pixel photon counter). Japan, 2015.
- [6] Hamamatsu Photonics K.K. and Opto-semiconductor Handbook Editorial Committee. Optosemiconductor Handbook: Hamamatsu photonics K.K. and Solid State Division, 2014.
- [7] Laboratorio de Partículas Elementales de la Universidad de Guanajuato, Mayo 2017: <http://laboratoriodeparticulaselementales.blogspot.mx/>.
- [8] OrCAD Cadence PCB Solutions, Noviembre 2016: <http://www.orcad.com>.
- [9] Particle Data Group, Atomic and nuclear properties of copper (Cu), 2016: http://pdg.lbl.gov/2017/AtomicNuclearProperties/HTML/copper_Cu.html.
- [10] Rosas-Torres F J., *J. Phys.: Conf. Ser.* **792** 012036, 2017.
- [11] SketchUp Pro, Noviembre 2016: <http://www.sketchup.com/es>.
- [12] Stelzer, H. Nucl. Inst. and Meth. 133, 409 (1976). Cited by F. Sauli. Gaseous Radiation Detectors, Cambridge monographs, UK (2014).
- [13] Tektronix. Digital Storage Oscilloscopes, TDS1000C-EDU Series Datasheet. United State of America, 2013.
- [14] Tenma, Premier Farnell. DC Power Supply. United Kingdom, 2017.