VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estudio de la eficiencia de detección de radiación ionizante de un módulo de detección basado en aire, Ar95%$CH_4$5%, y He

Study of the ionizing radiation detection efficiency of a detector module based on air, (Ar95%$CH_4$5%), and He

César Álvarez Arredondo[1], Luis Alberto Torres Luna[2], Julián Félix[3]
División de ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato
c.alvarezarredondo@ugto.mx[1], la.torresluna@ugto.mx[2], felix@ugto.mx[3]

Resumen

La detección de radiación ionizante para investigación básica, industrial, servicios, medicina y otras, se realiza con distintos dispositivos, como los tubos Geiger-Müller a base de gases; estos tubos son prácticos, relativamente simples, y fáciles de construir y usar. Para estudios de la eficiencia de detección con aire, Ar95%$CH_4$5%, y He, caracterizamos ocho tubos Geiger-Müller; cada uno construido a base de un tubo de Aluminio de 2.54 cm x 2.54 cm x 11 cm, con 0.1 cm de espesor de pared. Medimos la eficiencia de detección de cada tipo de gas en la detección de la radiación cósmica, relativa a un sistema de veto compuesto por dos plásticos centelladores, bloques de 1 dm^3 acoplado a un tubo fotomultiplicador cada uno, a 0 kPa y 3 kPa de presión diferencial interior del tubo tipo Geiger-Müller. La eficiencia de detección medida es ~5%, y estadísticamente independiente del tipo de gas y de la presión diferencial del gas. El flujo de rayos cósmicos medido es (1.06±0.04) partículas $sr^{-1}cm^{-2}min^{-1}$, que concuerda estadísticamente muy bien con el valor universalmente aceptado.

Palabras clave: Rayos cósmicos; radiación; detección; flujo.

Introducción

Los detectores tipo Geiger-Müller fueron los primeros dispositivos eléctrico-electrónicos desarrollados para la detección de radiación ionizante, e instrumentados para la colección automática de datos. Se basan principalmente en la recolección de iones producidos en un gas por el paso de las partículas ionizantes. Los tubos Geiger-Müller, fueron introducidos por Geiger y Müller en 1928, son ampliamente reconocidos por su bajo costo de elaboración, su facilidad de uso (Knoll, 2010), y su bajo mantenimiento.

Los detectores tipo Geiger-Müller -básicamente una cámara (tubo) llena de gas con un electrodo (fibra metálica) puesto a un alto potencial ya sea positivo o negativo- operan de esta forma: cuando una partícula ionizante, eléctricamente cargada, pasa por el gas y lo ioniza, los electrones libres son acelerados hacia la fibra metálica, si ésta está a un potencial eléctrico positivo, que se sostiene en los extremos del tubo, y normalmente coaxial at tubo; los electrones ganarán energía y producirán más iones al momento de chocar contra los átomos y moléculas del gas, generando así una avalancha de electrones en la fibra metálica. La carga eléctrica de la avalancha se almacena en un circuito RC, cuando el proceso termina que generalmente dura unos pocos ns, el capacitor se descarga a través una resistencia eléctrica conectada en serie con el capacitor, generando un pulso eléctrico indicio del paso de una partícula ionizante.

Un tipo de radiación usado, o detectado, en estos dispositivos son los rayos cósmicos, que son de mucho interés actualmente en ciencia básica, en ingeniería, en medicina y campos diversos de la tecnología. Es la fuente de radiación que usamos en el presente trabajo.

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía que impactan la atmósfera terrestre provenientes del espacio exterior. Son clasificados en rayos cósmicos primarios y secundarios, de acuerdo con su proveniencia: los primarios son aquellos que, provenientes del espacio exterior a la tierra, impactan e interactúan con las capas altas de la atmósfera terrestre, están compuestos de protones, neutrones, gammas, y núcleos atómicos pesados; los secundarios, los producidos durante las interacciones de los primarios con

las moléculas de la atmósfera terrestre. Éstos últimos conforman los air showers o cascadas de partículas, creadas a través de los decaimientos e interacciones sucesivas de los rayos cósmicos secundarios con la atmósfera terrestre (Takahashi, 2026), comprenden muones, neutrinos, electrones, positrones, fotones, mesones (kaones y piones), bariones (protones, neutrones, y otros) (Gaisser, 2016). La mayor parte de partículas con carga eléctrica detectadas al nivel del mar son los muones con un flujo promedio de 1 muon por cm^2, por minuto, por estereorradián, con una energía media de 4 GeV (Autran et al., 2018) (Sierawski et al., 2010). Estos muones son producidos por los decaimientos de piones y kaones (Takahashi, 2026). El flujo aumenta con la altura, de forma exponencial, desde el nivel medio del mar (0 m) hasta aproximadamente 15 km, a parir de ahí desciende exponencialmente.

Diseñamos, construimos, y caracterizamos 8 tubos de Geiger-Müller; los operamos llenos con aire, con Ar95%$CH_4$5%, y con He a 0 kPa y a 3 kPa de presión diferencial. Medimos la eficiencia de cada tipo de gas para detectar radiación cósmica como función de la presión diferencial. Medimos el flujo de rayos cósmicos en el punto con coordenadas globales (21.012° N, -101.369° O, 1815 m s.n.m.m).

Planeación, Diseño y Construcción

Los tubos de Geiger-Müller a diseñar y construir deben ser pequeños, hechos con materiales convencionales, fáciles de construir, compactos; con 4 de ellos se debe cubrir un área de 10 cm x 10 cm. El gas de operación debe ser controlado en tipo de gas, en flujo, y en presión diferencial.

El diseño del tubo Geiger-Müller lo mostramos en la Figura 1. Constituye una celda básica de detección de radiación ionizante. Con cuatro celdas de este tipo, puestas juntas y paralelas, formamos un plano de detección. Con dos planos de detección, puestos a 90 grados uno con respecto al otro, formamos un módulo de detección. El módulo de detección consta de 8 celdas básicas de detección. Tiene una entrada y una salida única de gas, un medidor de presión (HABOTEST HT636), 8 conectores de alto voltaje y 8 conectores de señales eléctricas independientes.

La base del detector Geiger-Müller, celda básica de detección, es un tubo de aluminio comercial de 2.54 cm x 2.54 cm x 11 cm, de 0.1 cm de espesor de pared; es aislante por fuera -logrado mediante anodización- y es conductor eléctrico por dentro -obtenido por pulido del metal-, Figura 1, pieza gris claro. Tiene dos cabezales puestos en los extremos del tubo de aluminio, piezas grises en negro, para ser impresas en 3D en *polylactic acid* (PLA), de 0.5 cm de espesor y 2.54 cm x 5.08 cm, penetran cada uno 0.5 cm dentro del tubo de aluminio; sirven como soporte a la fibra metálica -electrodo positivo o negativo-, y como soporte a la tarjeta electrónica de alimentación del alto voltaje (HV) y a la de lectura de la señal. La fibra metálica está coaxial al tubo de aluminio, hecha de cobre cubierto con estaño, de 0.2 mm de diámetro, y tensada a 200 g. Sobre las tarjetas electrónicas, piezas amarillo claro en la Figura 1, se sueldan las bases para los conectores de alto voltaje (BNC de 5000 V), por un extremo, y por el otro extremo se colocan las bases de los conectores para leer las señales eléctricas (tipo SMB), piezas cafés en la Figura 1. No están ilustrados los conectores de alto voltaje ni los de señal. La conexión entre el interior del tubo de aluminio y tierra (la base de los conectores de voltaje) se logra mediante cuatro laminitas de cobre puestas en el costado de la base de los conectores. En cada extremo de los tubos, atravesando los cabezales y las tarjetas electrónicas, lleva sendos tubos de PVC de 0.2 cm de diámetro interior y de 0.3 cm de diámetro exterior con conector de espiga en los extremos. Los salientes de los cabezales sirven para ensamblar los planos en un módulo.

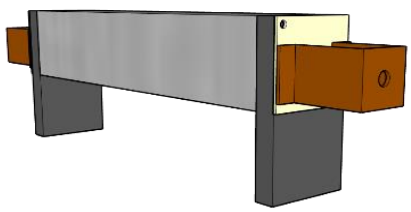


Figura 1. Diseño de un tubo Geiger-Müller en perspectiva. Figura propia.

En la Figura 2 ilustramos el diagrama del circuito eléctrico y electrónico de una celda básica. El interior del tubo de Aluminio se conecta a tierra común con los conectores y las fuentes de alto voltaje.

Construimos ocho tubos detectores de radiación ionizante tipo Geiger-Müller, con las características especificadas en el diseño antes descrito. En la Figura 3 mostramos una de las celdas básicas de detección ya completamente construida y funcional. Los cabezales, las tarjetas electrónicas y los tubos de PVC se fijaron con resina acrílica (Gorilla super glue gel), que también funcionó como sellador entre el cabezal y el tubo de Aluminio. Las laminitas para hacer tierra interior al tubo de aluminio, la fibra metálica, y los componentes electrónicos se soldaron con soldadura eléctrica a base de estaño. Los cabezales se imprimieron en 3D, en plástico PLA.

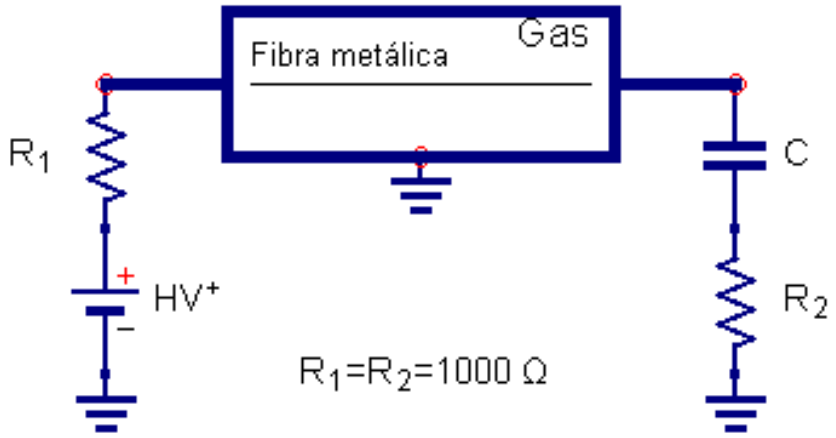


Figura 2. Circuito eléctrico de los tubos Geiger-Müller. Figura propia.



Figura 3. Tubo Geiger-Müller ensamblado, totalmente construido. Figura propia.

Caracterización

Los 8 detectores Geiger-Müller construidos, muy similares entre ellos, fueron probados y corregidos cuando se encontraron deficiencias. Revisamos y probamos los contactos eléctricos, las conexiones eléctricas, las uniones de los tubos de gas, el sello de los cabezales, la continuidad de las conexiones a tierra, la continuidad de las fibras metálicas, y los valores de las resistencias eléctricas. Probamos el sellado de los cabezales con los tubos de PVC y el sellado de éstos con las mangueras de conexión para inyectar los gases. Todos quedaron herméticamente sellados, y a prueba de fugas de gas.

Para identificar las celdas básicas las etiquetamos como X1, X2, X3, X4 y Y1, Y2, Y3, Y4. Arregladas en un módulo de detección de radiación ionizante quedan como un sistema de coordenadas rectangular, de tal forma que este arreglo no solo sirve para detectar radiación ionizante sino para posicionar el punto por donde pasó la partícula ionizante.

Las pruebas preliminares de detección de radiación, con rayos cósmicos, de cada una de las 8 celdas básicas de detección las realizamos con aire, a una atmósfera de presión -0 kPa de presión diferencial, es decir, a una atmósfera de presión-. Aplicamos altos voltajes a la celda básica de detección, desde 0 volt hasta 2500 volt y medimos las amplitudes de los pulsos detectados. Un ejemplo de esta caracterización se muestra en la Figura 4, el número de cuentas como función de la amplitud de las señales, a diferentes voltajes. Los máximos en la distribución, del número de cuentas como función de la amplitud de detección, no son aleatorios; en cada distribución se presentan algunos máximos relacionados con las energías de ionización de los gases. A mayor alto voltaje, mayor es la amplitud de la señal detectada. Un rango de voltaje aceptable para la operación de las celdas básicas de detección es entre 2000 Vdc a 2600 Vdc. En este rango no se observan descargas eléctricas continuas o repetitivas.

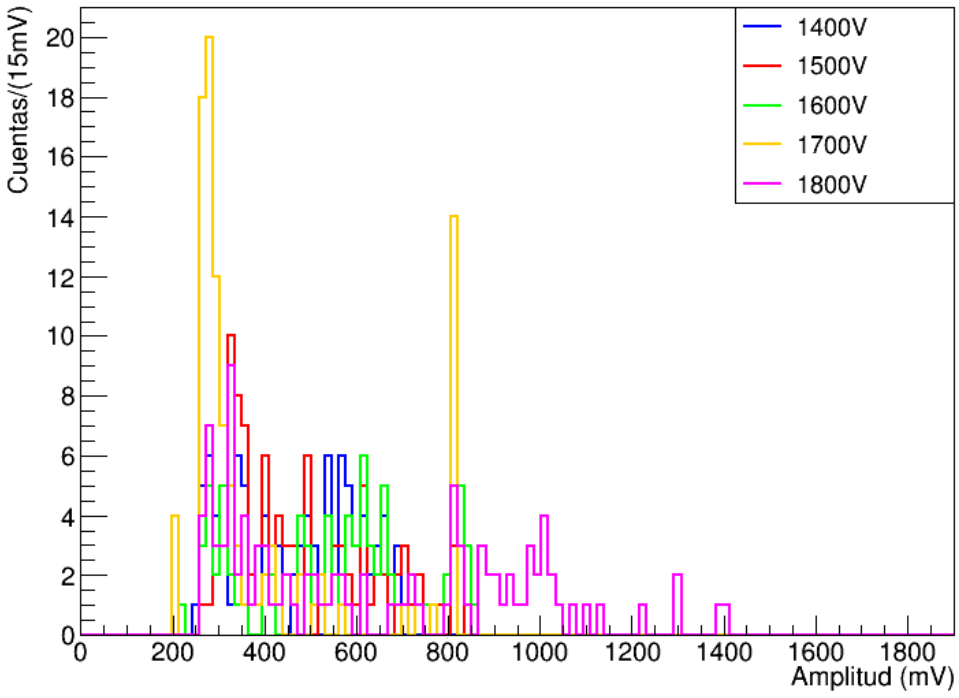


Figura 4. Distribución del número de cuentas como función de las amplitudes de las señales detectadas en la cámara Y1, con aire y a presión atmosférica, a distintos voltajes. Las otras cámaras tienen funcionalidades similares. Figura propia.

En la Tabla 1 se resumen las propiedades importantes de estos gases relacionadas con este trabajo. La energía media de creación de pares ion-electrón es útil para estimar el número de pares ion-electrón creados por una partícula con carga eléctrica al pasar a través del detector (Leo, 1994), a partir de la energía depositada por la partícula ionizante en el gas. El potencial de ionización de un átomo se define como la energía requerida para desligar un electrón del átomo (Bernholdt & Bartlett, 1999).

***Tabla 1**. Propiedades de ionización de los gases utilizados. Información tomada de (Herzberg, 1958) (Leo, 1994). Tabla propia.*

Gas	Potencial de ionización (eV)	Energía media para la creación del par ion-electrón (eV)
Aire (N_2, O_2)	(15.5, 12.2)	(35, 31)
CH_4	13.1	28.0
Ar	15.8	26.0
He	24.6	41.0

La eficiencia de detección de radiación ionizante, de los tubos Geiger-Müller, la medimos relativa a dos celdas de detección de radiación ionizante cósmica a base de plásticos centelladores. El sistema experimental configurado está compuesto de dos bloques cúbicos (10 cm x 10 cm x 10 cm) de acrílico centellador tipo Eljien technology (Eljien, 2026), con un tubo fotomultiplicador (EMI 9954B) cada uno en contacto mecánico en una de las caras del cubo centellador, Figura 5. Estudiamos las señales producidas por radiación cósmica en los bloques de plástico centellador. Para seleccionar los rayos cósmicos incidentes en los tubos Geiger-Müller se impuso la condición de coincidencia entre señal del canal 0 (CH0) y del canal 1 (CH1) en una ventana de tiempo de 3 micro segundo; de esta forma, mucho del ruido electrónico y señales espurias quedan reducidos, la señal seleccionada tiene un ~66% de probabilidad de ser producida por rayos cósmicos y no por otra causa. En la Figura 6 se ilustra un ejemplo de las señales detectadas por este sistema capturada con un osciloscopio Tektronix TDS 2022C. La configuración lógica del sistema experimental, para crear y seleccionar señales coincidentes, se muestra en la Figura 7.

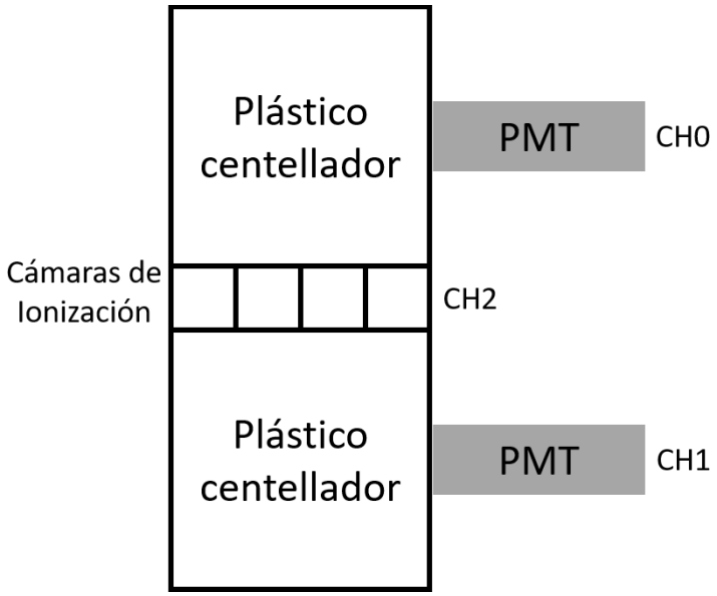


Figura 5. Configuración del sistema experimental para medir la eficiencia de detección de las celdas básicas de detección de la radiación cósmica. Figura propia.

Si la partícula cósmica, de radiación ionizante, pasa por el detector superior (CH0) y por el detector inferior (CH1), en una ventana determinada de tiempo, necesariamente debió de pasar por el detector de en medio (CH2) que son las cámaras de detección tipo Geiger-Müller bajo estudio. De esta forma se valida lógicamente el paso de la partícula incidente, y la detección de la radiación ionizante cósmica en las celdas básicas de detección tipo Geiger-Müller. La Eficiencia de detección de los tubos Geiger-Müller, relativa a la detección de la radiación por los bloques de acrílico, la definimos como el cociente del número de detecciones realizadas por los tubos de Geiger-Müller al número de detecciones realizadas con el detector superior (CH0). Usamos un plano de detección de 4 celdas tipo Geiger-Müller en la medición de la eficiencia, con una celda básica instrumentada. Las señales fueron capturadas por un sistema CAEN (DT5724) de adquisición automática y continua de datos. Capturamos datos en periodos de 60 minutos.

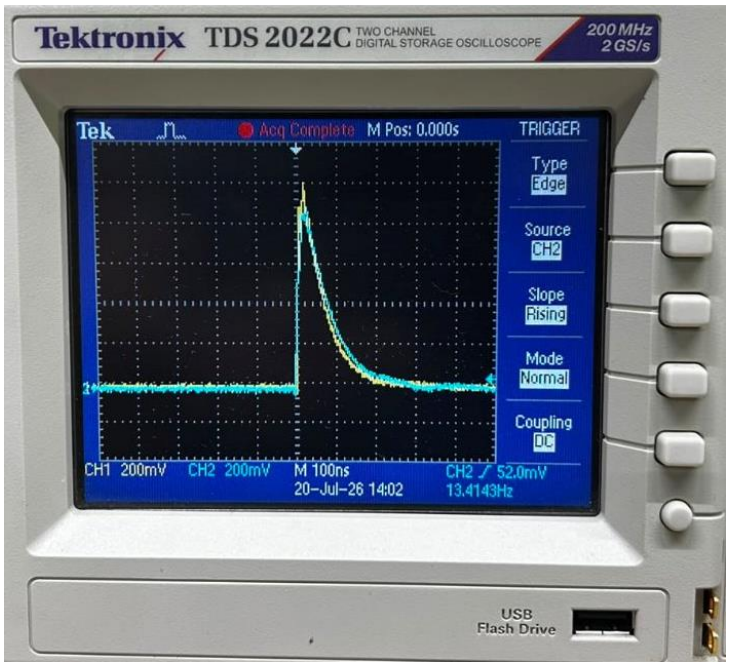


Figura 6. Señales coincidentes entre el canal 0 (línea amarilla) y el canal 1 (línea azul) del arreglo experimental. Figura propia.

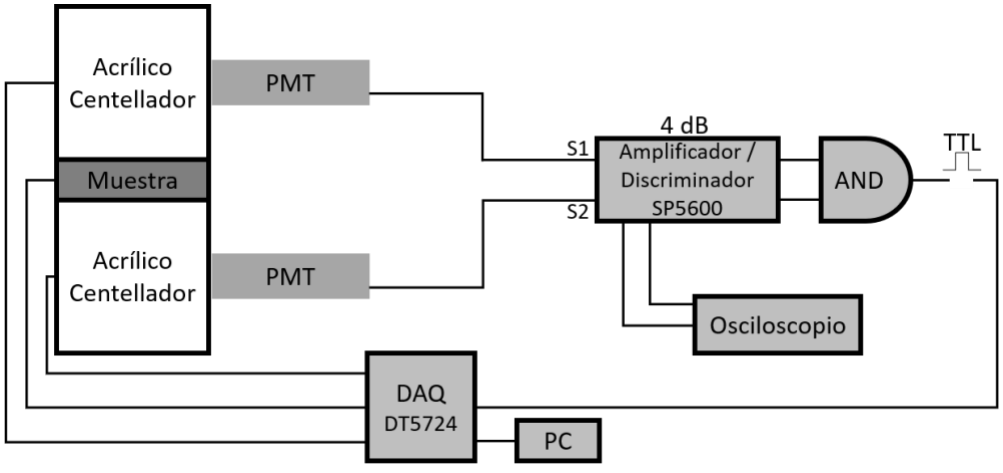


Figura 7. Esquema lógico, de conexión, en el arreglo experimental. Figura propia.

En la Figura 8 mostramos un ejemplo de la distribución de la diferencia de tiempos de las señales coincidentes entre el detector superior CH0 y el detector inferior CH1. Las señales de interés son las que están alrededor de 0. La resolución temporal del DT5724 es de 10 ns. Son las que usamos para medir la eficiencia de detección de las celdas de detección tipo Geiger-Müller con diferentes gases (Aire, Ar95%$CH_4$5%, He) y a diferentes presiones diferenciales (0 kPa, 3 kPa).

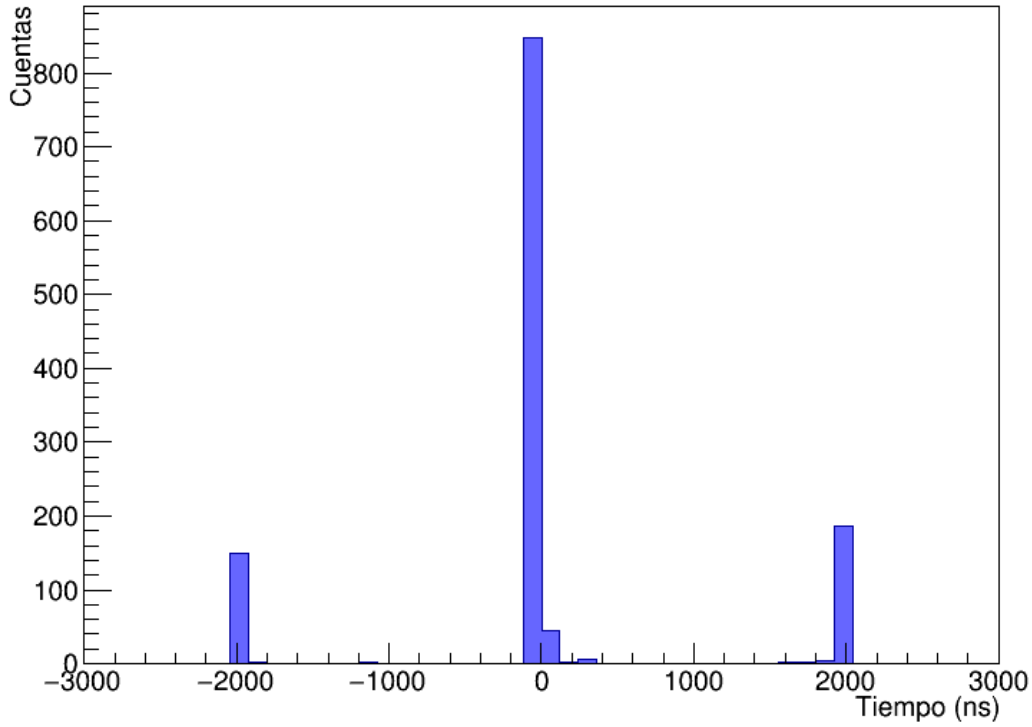
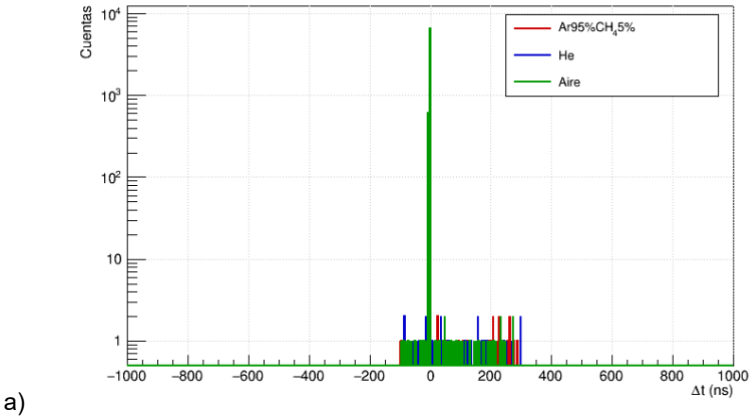


Figura 8. Ejemplo del número de cuentas como función de la diferencia de tiempos entre canal CH0 y canal CH1, señales coincidentes en el tiempo. Figura propia.

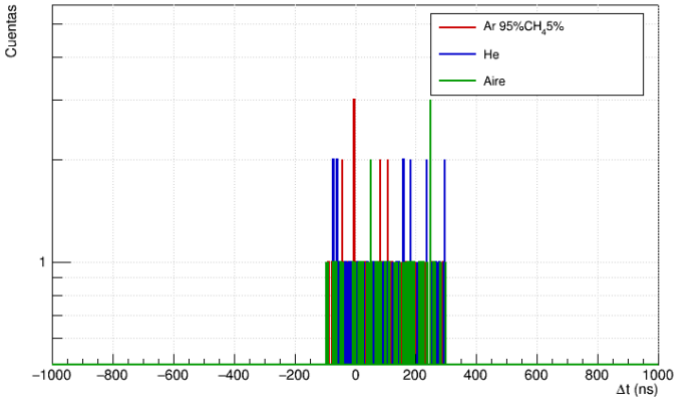
Resultados

En la Figura 9 ilustramos ejemplos de las cuentas recolectadas, en cada 10 ns, como función de la diferencia de tiempo entre el canal superior (CH0) y canal medio (CH2), que corresponde con las cámaras de detección de radiación tipo Geiger-Müller. Solamente usamos una celda de detección, y consideramos que como para cubrir el área correspondiente al área del bloque de acrílico centellador se requieren 4, y con igual eficiencia, el número de detecciones obtenidas con una celda lo multiplicamos por 4. Ecuación 1.

$$1)\quad eficiencia\ de\ detección, \epsilon = 4\frac{número\ de\ eventos\ en\ CH2}{número\ de\ eventos\ en\ CH0}.$$



a)



b)

Figura 9. Distribución de cuentas en el canal CH1 (a)) y canal CH2 (b)) cono función de la diferencia de tiempos, para diferentes gases. Figura Propia.

En la Tabla 2 resumimos estas medidas, y los resultados obtenidos.

***Tabla 2**. Número de cuentas por canal en las cámaras de ionización, con diferentes gases a diferentes presiones diferenciales. Los voltajes de operación del CH0 (y CH1) y el CH2 son de 1,300 V y 2,500 V, respectivamente.*

0 kPa	Cociente cuentas/gas	Aire	He80%Aire20%	Ar95%$CH_4$5%
	CH2/CH0	108/8446	96/8540	108/8376
Eficiencia de detección %		5.10	4.50	5.16
3 kPa	CH2/CH0	99/8703	98/8526	80/8536
Eficiencia de detección %		4.60	4.60	3.75

En la Figura 10 mostramos la eficiencia de detección de las cámaras de ionización en función del tipo de gas y de la presión diferencial.

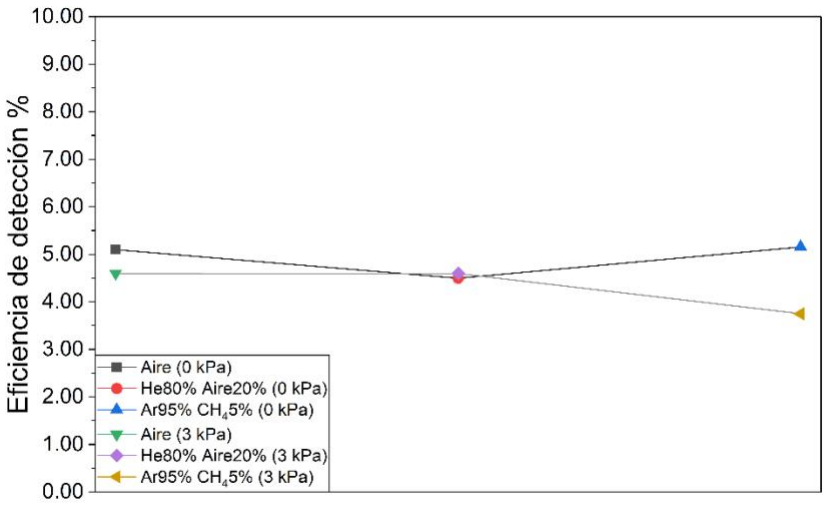


Figura 10. Eficiencia de detección de las cámaras de Geiger-Müller como función del tipo de gas y de la presión diferencial. Figura Propia.

La medición del fujo de rayos cósmicos, principalmente muones, la realizamos usando los resultados para el número de partículas detectadas en el detector superior, canal 0 (CH0) en coincidencia con el detector inferior, canal 1 (CH1), Tabla 2.

El flujo de rayos cósmicos está dado por la ecuación 2, por definición de flujo; con N el número de partículas detectadas, A es el área efectiva vertical del detector, t el período de detección y Ω el ángulo sólido subtendido por el detector. El error sistemático en el flujo medido está dado por la ecuación 3; donde J y Ω son el flujo y ángulo sólido medidos, respectivamente; l es la medida de la mitad de la arista de un bloque centellador y D es la mitad de la altura del arreglo de detección de la Figura 5 y las cantidades δl y δD son sus errores de medición asociados, respectivamente. Con estas medidas, se mide el ángulo θ entre el eje vertical y la trayectoria recta más inclinada de las partículas incidentes, de tal forma que la partícula pase por los tres detectores, ecuación 4. El ángulo sólido está dado por la ecuación 5; y el error, por la ecuación 6.

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

$$3)\quad \delta J = \frac{J}{\Omega}\frac{4\pi l D\ \sin\theta}{(l^2 + D^2)}\sqrt{\left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2},$$

$$4)\quad \theta = tan^{-1}\left(\frac{l}{D}\right),$$

$$5)\quad \Omega = 4\pi(1 - cos\,\theta),$$

$$6)\quad \delta\Omega = 4\pi\ sin\,\theta\delta\theta.$$

Las medidas geométricas empleadas, según la geometría del sistema experimental, Figura 5, son como sigue: $l = 5$ cm, $\delta l = 0.1$ cm; $D = 11.27$ cm y $\delta D = 0.2$ cm; $A = 100$ cm^2; $t = 60$ minutos.

Los resultados de las mediciones del flujo de partículas cósmicas, a través del detector, las compilamos en la Tabla 3. Estas mediciones no dependen del tipo de gas o de la cámara de Geiger-Müller, porque se usan solamente los detectores a base de plástico centellador.

Tabla 3. Flujo de rayos cósmicos en los detectores a bases de acrílicos centelladores. Se consideró $A = 100$ cm^2, $t = 60$ min y $\Omega = 1.33$ sr.

Eventos (CH1)	Flujo (partículas ($sr^{-1}cm^{-2}min^{-1}$)) ± error sistemático
8392	1.05±0.04
8396	1.05±0.04
8446	1.06±0.04
8703	1.09±0.05
8390	1.05±0.04
8446	1.06±0.04
8540	1.07±0.05
8526	1.07±0.05
8474	1.06±0.05
8396	1.05±0.04
8376	1.05±0.04
8340	1.05±0.04
8536	1.07±0.05

En la Figura 11 mostramos el flujo de rayos cósmicos medido. Estadísticamente son equivalentes.

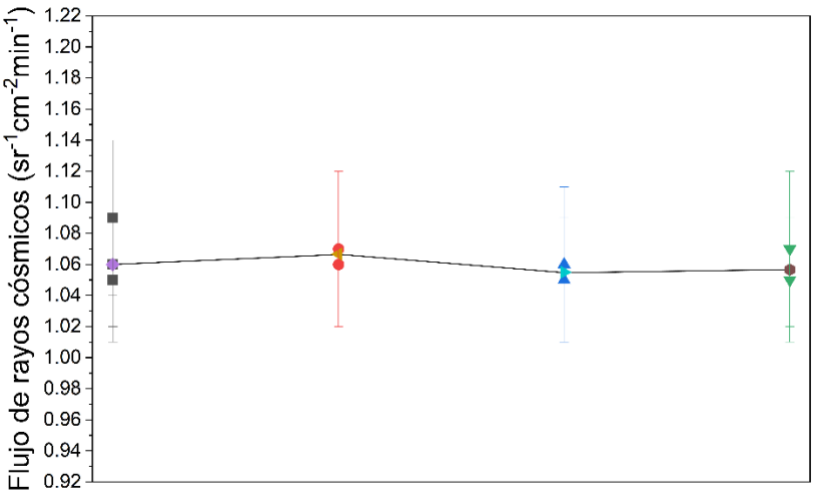


Figura 11. Diferentes medidas del Flujo de rayo cósmicos. Figura Propia.

Discusión

Planeamos, diseñamos, construimos, y caracterizamos 8 cámaras mono alámbricas tipo Geiger-Müller. Conformamos dos planos de detección, con 4 cámaras de detección de radiación ionizante cada uno, y un módulo de detección conformado por los dos planos de detección perpendiculares entre sí. El sistema modular de detección tiene una única entrada, y una única salida, de gas. Cada celda de detección tiene un conector de alto voltaje y un conector de bajo voltaje, o señal. Cada cámara mono alámbrica la caracterizamos por separado. Mecánicamente entre cámara y cámara hay una tolerancia de 0.1 cm de separación. Todo el módulo fue montado en un chasis impreso en 3D. La conexión para inyectar el gas es a base de manguera látex de 1 mm de diámetro interior, 3 mm de diámetro exterior. El módulo es mecánicamente estable.

Las cámaras las operamos con aire, con Ar95%$CH_4$5%, y con He (mezcla de 80% He y 20% aire), a altos voltajes entre 0 y 2500 Vdc, y 0 kPa y 3 kPa de presión diferencial. Con condiciones más estrictas en los parámetros de construcción de las cámaras de Gieger-Müller podemos lograr mejores sistemas de detección. La toma de datos la realizamos de forma continua en intervalos de 1 hora.

Imponer la condición de coincidencias de señales detectadas entre el canal superior -CH0- y el canal inferior -CH1-, en una ventana de tiempo de 3 microsegundos, garantiza que una gran parte del ruido -constituido por señales espurias provenientes de fluctuaciones térmicas, variaciones en los voltajes de alimentación, fluctuaciones cuánticas, etc.- es eliminado; cerca del 95% de las señales detectadas no tienen relación con el paso de una partícula a través de ambos detectores. Las señales obtenidas de esta forma -en la distribución número de cuentas por intervalo de diferencia temporal- tienen un máximo de distribución alrededor de 0, estás son las señales de interés, y son las que se emplean en este trabajo. El sistema de adquisición de datos tiene una resolución temporal de 10 ns, muy por debajo de la ventana temporal impuesta para definir la coincidencia temporal entre señales, pero muy por arriba del tiempo que una partícula, moviéndose a la velocidad de la luz, emplea en recorrer 10 cm (esto es 0.33 ns), que es la distancia máxima entre el detector CH0 y el detector CH1; este tiempo de vuelo es sólo una referencia, dado que existen tiempos de tránsito de las señales en cada uno de los tubos fotomultiplicadores con los que se detectan la señales en los acrílicos centelladores que también fluctúan, y no las hemos tomado en consideración.

Con dos detectores en coincidencia, las señales colectadas solo tienen una probabilidad del 66% de ser correctas. Aunado a esto, puede haber falsos que se detectan como positivos en las señales colectadas; es decir, los tomamos como señal correcta, cumplen con todas las condiciones lógicas impuestas, pero sólo por azar, son falsos positivos. Estimamos el número de estos eventos mediante la ecuación 7, donde n es número de señales colectadas, τ el tiempo de resolución temporal del sistema experimental, x es el número de canales en coincidencia usados (Auger, 1939).

$$7) \quad N_F = \frac{n^x \tau^{x-1}}{60^{x-2}}.$$

Con $n = 8500$ partículas detectadas en promedio, $\tau = 3$ micro segundo, $x = 2$, estimamos que $N_F \sim 4$ partículas en 60 minutos de toma de datos. Un número muy bajo en comparación con las 8500 partículas, en promedio en 60 minutos, detectadas; aproximadamente 5 falsos positivos en cada 10 000 partículas detectadas.

Con esas muestras de datos medimos la eficiencia relativa de detección de las cámaras Geiger-Müller y el flujo de rayos cósmicos. En las Figuras 8,9 mostramos ejemplos de distribuciones de cuentas por bin de diferencia de tiempo entre CH0 y CH1 (10 ns, en la Figura 9).

La eficiencia relativa de detección de las cámaras tipo Geiger-Müller, mostrada en la Figura 10, es pequeña en comparación con la eficiencia de detección de los detectores a base de plásticos centelladores. Esta eficiencia de detección está referida a la eficiencia de detección de los detectores a base de plásticos centelladores. En promedio se obtiene un 5% de eficiencia. De acuerdo con la estadística limitada que tenemos, y a los intervalos de presión estudiados, concluimos que la eficiencia de detección de las cámaras de Geiger-Müller a base de gas es independiente del tipo de gas y de la presión estudiada. La eficiencia de detección también podría depender de otras variables como la temperatura, la humedad, los contaminantes presentes en la cámara y en los gases.

Para medir la eficiencia relativa de detección de radiación ionizante de las cámaras tipo Geiger-Müller es menester tener un flujo de partículas conocido de rayos cósmicos. Medimos y caracterizamos este flujo con los canales CH0 y CH1. Ver Figura 11 y Tabla 3. El resultado típico obtenido es 1.07±0.05 (partículas/cm^2 min sr), que concuerda bastante bien con el valor del flujo de rayos cósmicos aceptado universalmente a nivel del mar, aunque León Guanajuato -concretamente el laboratorio de partículas elementales de la División de Ciencias e Ingenierías del Campus León- está a 1800 metros sobre el nivel medio del mar. A esta altura el flujo de rayos cósmicos debe de ser de 1.47 (partículas/cm^2 min sr), según estimaciones realizadas empleando un modelo donde el incremento con la altura es exponencial hasta los 15 km de altura; después de esa altura el flujo de rayos cósmicos cae exponencialmente con la altura. El modelo es muy simple, no se toman en cuenta las energías de los rayos cósmicos, ni otras variables como el tipo de partícula y el tipo de interacción de las partículas. Con condiciones más estrictas podemos tener flujos de partículas cósmicas con menos contaminantes.

Podemos concluir que estamos empleando un flujo confiable de partículas cósmicas, y que los resultados que exponemos para las eficiencias de detección de las cámaras de Geiger-Müller son válidos a primera aproximación.

Conclusiones

Planeamos, diseñamos, construimos, caracterizamos y operamos 8 cámaras monoalámbricas para la detección de radiación ionizante. Configuramos dos planos de detección a base de 4 cámaras de detección cada uno, y un módulo de detección de radiación ionizante a base de dos planos de detección puestos a 90° un con respecto al otro.

Medimos las eficiencias de detección de las cámaras tipo Geiger-Müller como función del tipo de gas -Aire, Ar95%$CH_4$5%, y He- a 0 kPa y 3 kPa de presión diferencial, y obtuvimos alrededor de 5% de eficiencia de detección. Esta eficiencia de detección de radiación ionizante es independiente del rango de presión estudiado y del tipo de gas empleado.

Medimos el flujo de rayos cósmicos empleando dos detectores a base de plástico centellador, y obtuvimos un valor consistente con el valor universalmente aceptado para el flujo de rayos cósmicos ((1.06±0.04) partículas/(cm^2 min sr)). Con este resultado confirmamos que estamos usando un flujo de radiación cósmicos confiable para hacer los estudios de eficiencia de detección de radiación ionizante por parte de las cámaras de Geiger-Müller construidas, caracterizadas y operadas.

Podemos cubrir un amplio espectro de aplicaciones de estos resultados, que van desde el desarrollo tecnológico en detectores de radiación ionizante, estudio de la radiación ionizante en diferentes situaciones físicas -radiación natural proveniente de materiales radiactivos, radiación cósmica, etc.-, medicina, industria de muchos tipos -de envasado, de exploración, vulcanología, etc.-, en ciencia básica -como astronomía de rayos cósmicos, astronomía multi ventana, aplicaciones meteorológicas, estudios geológicos, etc.-.

Bibliografía

Autran, J. et al. (2018). Characterization of atmospheric muons at sea level using a cosmic ray telescope. *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment*, *903*, 77-84. https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.038

Bernholdt, D. E., & Bartlett, R. J. (1999). A Critical Assessment of Multireference-Fock Space CCSD and Perturbative Third-Order Triples Approximations for Photoelectron Spectra and Quasidegenerate Potential Energy Surfaces. En *ADVANCES IN QUANTUM CHEMISTRY* (Vol. 34, pp. 271-293). Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0065-3276(08)60533-X

Eljien Technology. (2026). https://eljentechnology.com/

Gaisser, T., Engel, R., & Resconi, E. (2016). *Cosmic Rays and Particle Physics* (2.ª ed.). Cambridge University Press.

Herzberg, G. (1958). Ionization potentials and Lamb shifts of the ground states of 4He and 3He. (1958). *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A. Mathematical And Physical Sciences*, *248*(1254), 309-332. https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0246

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4.ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Leo, W. R. (1994). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to approach* (2.ª ed.). Springer Science & Business Media.

Sierawski, B. et al. (2010). Muon-Induced Single Event Upsets in Deep-Submicron Technology. *IEEE Transactions On Nuclear Science*, *57*(6), 3273-3278. https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2080689

Takahashi, F. et al. (2026). Review of Particle Physics. *International Journal Of Modern Physics A*, *41*. https://pdg.lbl.gov/

Auger, P. et al. (1939). Extensive Cosmic-Ray Showers. *Reviews Of Modern Physics*, *11*, 288-291.