

Detección y estudio de fotones producidos en aluminio por incidencia de rayos cósmicos

N. L. Moreno López y J. Félix

División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, León, México.

Received 06 September 2021; accepted 09 August 2022

El entendimiento de la interacción entre partículas y la materia es importante para el avance de nuevas técnicas de detección y medición de propiedades de las partículas. El resultado de los procesos de interacción partícula incidente y material de detección es la producción de fotones, de iones, o de ambos. A la fecha no se ha reportado la producción de fotones en placas metálicas por incidencia de rayos cósmicos. Planeamos, diseñamos, construimos, caracterizamos y operamos un sistema experimental, basado en placas de Aluminio de 10×10 cm de varios espesores y el fotodiodo Hamamatsu S12572-100P, con el que mostramos evidencias de la producción de fotones en Aluminio por incidencia de rayos cósmicos. Detectamos señales entre el violeta e infrarrojo, con un mínimo de cuentas oscuras, con aproximadamente la misma intensidad, la misma proporción, entre los diferentes colores, y mostramos que tienen características que asociamos a los fotones: absorción, reflexión, refracción, dispersión, y polarización, por lo que concluimos que deben de ser producidas por fotones las señales detectadas. Los fotones se producen en el interior del material por incidencia de rayos cósmicos. Observamos que a mayor espesor de Aluminio atravesado mayor número de fotones producidos, en concordancia con el resultado conocido que a mayor espesor de aluminio atravesado por la partícula mayor energía depositada. Algunas aplicaciones de este fenómeno son detección de partículas elementales, identificación de materiales, estudio de rayos cósmicos, estudio de radiación ionizante, etc. Presentamos los detalles técnicos del sistema experimental, los resultados físicos obtenidos, y esbozamos posibles explicaciones de este fenómeno.

Descriptor: Aluminio; fotón; interacción partícula incidente y materia; rayos cósmicos; técnicas de detección de partículas elementales.

Understanding the interaction between particles and matter is important for the advancement of new detection and particles properties measurement techniques. The result of interaction processes between incident particle and detection material is the production of photons, ions or both. The photon production in metal plaques due to cosmic rays incidence has not been reported to date. We planned, designed, built, characterized and operated an experimental system based on 10×10 cm Aluminium plates of various thicknesses and the photodiode Hamamatsu S12572-100P with which we show evidences of photon production in Aluminium due to cosmic rays incidence. We detected signals between violet and infrared with a minimum of dark counts, with approximately the same intensity, the same proportion between the different colors, and we show that they have characteristics that we associate with photons: absorption, reflection, refraction, dispersion and polarization, then we concluded that the detected signals must be produced by photons. The photons are produced inside the material by the incidence of cosmic rays. We observed that the greater the thickness of Aluminium traversed the greater the number of photons produced, in concordance with the very well known result that the greater the thickness of Aluminium traversed by the particle the greater the deposited energy. Some applications of this phenomenon are elementary particles detection, identification of materials, study of cosmic rays, study of ionizing radiation, etc. We present technical details of the experimental system, the physical results obtained, and outline possible explanations of this phenomenon.

Keywords: Aluminium; cosmic rays; elementary particles detection; interaction incident particle and matter; photon.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.69.020802>

1. Introducción

La forma de medir las propiedades físicas de una partícula ha sido a través de las **técnicas de detección** de las partículas. Para este efecto, son necesarias una **fuentes de partículas** y una forma de detección de las partículas; las fuentes pueden ser de origen nuclear, radioactivo, óptico o *cósmico* [1, 2] y las formas de detección son variadas, en todos los casos un pequeño rastro de energía de la partícula debe generarse (un ion o un fotón) en un medio material, y luego amplificarse hasta niveles medibles por métodos convencionales.

1.1. Rayos cósmicos

La radiación en forma de partículas muy energéticas provenientes del espacio exterior a la Tierra le conocemos como

radiación cósmica.

La radiación cósmica está formada de partículas elementales, núcleos atómicos y nucleones. Estas partículas de alta energía que llegan del espacio exterior son principalmente *protones* (89 %), *núcleos de He* (10 %) y *núcleos pesados* (1 %) [3, 4]. Clasificamos los rayos cósmicos como *primarios* y *secundarios*. Los primarios son partículas aceleradas en las fuentes astrofísicas (e.g. e^- , p^+ , He, C, O, Fe), los secundarios son partículas producidas por la interacción de los primarios con el gas interestelar y la atmósfera terrestre (e.g. núcleos de Li, Be, Bo) [5, 6]. A nivel del mar, las partículas más numerosas son μ , e^- , e^+ , γ y p^+ [4, 7].

En 1936 se otorga el Premio Nobel en Física a Víctor Hess por descubrir la radiación cósmica [8].

Actualmente hay una enorme actividad para estudiar la radiación cósmica por muchos medios dentro y fuera de la

Tierra.

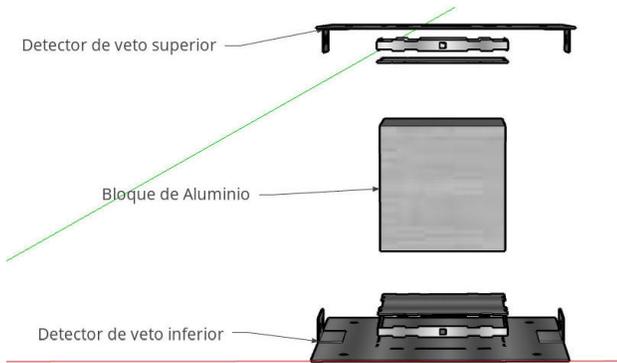


FIGURE 1. Diseño parcial del sistema experimental.

1.2. Detección de partículas elementales

Un **detector de partículas** es un instrumento para medir propiedades de una partícula [9]. Detectamos partículas elementales a través de su interacción con el medio de detección. En la interacción, la partícula deja un pequeño rastro de energía que se manifiesta en forma de *ionización*, *excitación atómica* o *molecular*, *radiación Cerenkov*, *radiación Bremsstrahlung*, *radiación de transición*, y otras, o en forma de partículas como *positrones*, *neutrones*, *fotones* y otras [9–12]. El resultado de la interacción partícula incidente y medio de detección es la *emisión de fotones*, la *producción de iones* o ambas. El pequeño rastro de energía se amplifica hasta un nivel donde es posible usar instrumentos convencionales para medir.

2. Planeación y diseño del sistema experimental

El objetivo principal es la detección y estudio de fotones producidos en Aluminio por incidencia de rayos cósmicos.

Planeamos y diseñamos el sistema experimental que se muestra en la Fig. 1.

Diseñamos y construimos dos detectores de veto que operan por centelleo (plástico centellador Fast Timing Plastic Scintillator EJ-232Q de Eljen Technology [13]), caracterizamos los foto-detectores MPPC (Multi-Pixel Photon Counter [14], S12572-100P de Hamamatsu) unidos a los detectores de veto y al bloque de Aluminio, comprobamos el funcionamiento correcto de elementos del sistema de foto-detección y análisis de cuentas oscuras, colectamos evidencias con las que demostramos la producción de fotones en el Aluminio, caracterizamos esos fotones y estudiamos su origen.

3. Sistema experimental

Diseñamos, construimos, ensamblamos y operamos un sistema experimental que consiste en dos detectores de veto (Veto), dos foto-detectores (T2) unidos al material de prueba

(Material), una tarjeta electrónica de cuatro canales de detección (TEP) con la que alimentamos los foto-detectores y

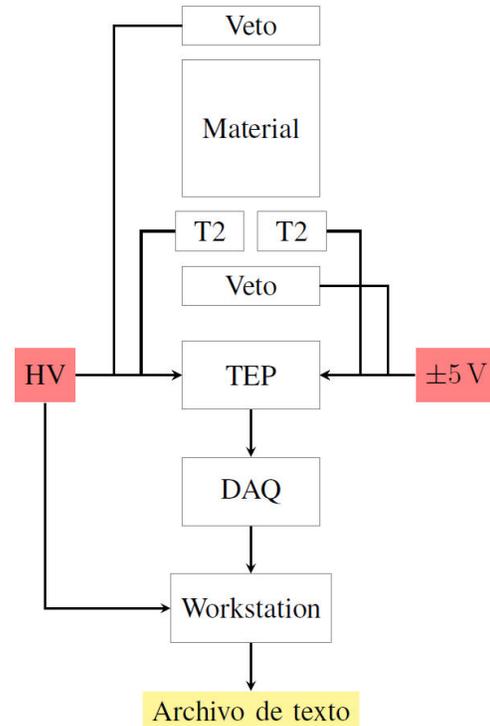


FIGURE 2. Diagrama a bloques del sistema experimental.

leemos y digitalizamos las señales producidas por los fotodiodos (fotodiodos de los detectores de veto y los dos T2) y un sistema de aislamiento óptico y electromagnético en el que se introducen los elementos anteriores. Mostramos el esquema general del sistema experimental en la Fig. 2.

En la Fig. 2, HV [15] y ± 5 V (voltaje de corriente directa) [16] son la alimentación de los foto-detectores y la alimentación de la TEP [13] respectivamente, DAQ el sistema de adquisición de datos [17] y la Workstation, el control de nuestro sistema experimental. En la Fig. 1 representamos un *sistema de validación por coincidencias* que consiste en dos detectores de veto colocados arriba y abajo del material de prueba a base de Aluminio; con éste aseguramos la ocurrencia de un evento en una ventana de tiempo establecida, porque si hay señal en el detector de veto superior e inferior producidas por el paso de una partícula, necesariamente esta partícula tuvo que pasar por el material de prueba.

En la Fig. 3 mostramos algunos elementos del sistema experimental: (a) sistema de veto para validación por coincidencias; (b) tarjeta electrónica para montar y alimentar el fotodiodo de los detectores de veto; (c) tarjeta electrónica para montar y leer los fotodiodos unidos al material de prueba.

4. Pruebas y resultados

Para verificar los indicios de la producción de fotones en el Aluminio, constatamos que con nuestro sistema experimental captamos luz en el visible e infrarrojo; probamos algunas

propiedades de la luz producida por LEDs; y medimos el nivel de ruido de nuestro sistema experimental.

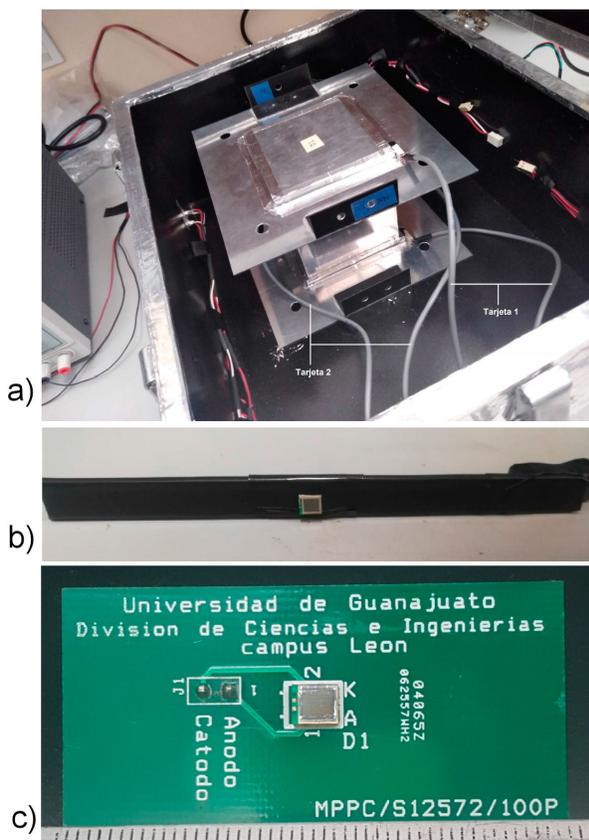


FIGURE 3. a) Sistema de validación por coincidencias dentro de un sistema de aislamiento óptico y electromagnético. b) Tarjeta 1: sistema de foto-detección de los detectores de veto. c) Tarjeta 2: sistema de foto-detección unido al bloque de Aluminio. Algunos elementos del sistema experimental.

Probamos que las señales producidas en el Aluminio tienen características que asociamos a los fotones, y las caracterizamos.

Para indagar el origen de esta radiación, medimos las señales producidas en el fotodiodo a diferentes espesores de Aluminio. Validamos la incidencia de rayos cósmicos usando la condición de veto.

4.1. Caracterización

Determinamos el voltaje óptimo de operación de los elementos de foto-detección Tarjeta 1 y Tarjeta 2 analizando el número de cuentas obtenidas en un periodo de prueba de 10 min para el rango de voltajes [65 Vcd, 90 Vcd]. Concluimos que debemos operar los fotodiodos a 70 Vcd, en acuerdo exacto con la información proporcionada por el fabricante Hamamatsu.

Los elementos de foto-detección (los fotodiodos en la Tarjeta 1 y en la Tarjeta 2) los operamos a 70 Vcd.

4.2. Pruebas preliminares

Analizamos la amplitud de las señales producidas por el fotodiodo como función de los polarizadores (P) posicionados

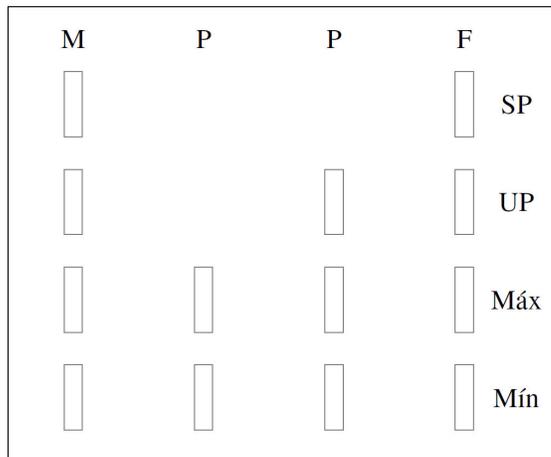


FIGURE 4. Gráfica de la disposición experimental de los materiales, M -material de prueba-, P -polarizador- y F -fotodiodo-. Donde SP -sin polarizador-, UP -un polarizador-, Máx -dos polarizadores con máxima transferencia de luz-, Mín -dos polarizadores con mínima transferencia de luz- es el número de polarizadores entre el material de prueba y el fotodiodo.

entre un material de prueba (M) y un fotodiodo (F). Los materiales de prueba son un LED azul, aire, un plástico centellador transparente, un plástico centellador verdoso y un bloque de Aluminio.

Realizamos las pruebas con dos fotodiodos diferentes. Los polarizadores cubrieron totalmente a los fotodiodos en las pruebas. Comparamos los resultados obtenidos con el LED y los resultados obtenidos con los demás materiales. Mostramos la configuración experimental en la Fig. 4.

A excepción de las observaciones en las que el LED fue el material de prueba, en todas las observaciones, para cada fotodiodo, para cada material de prueba y en cada una de las configuraciones de los polarizadores (véase Fig. 4), registramos 100 amplitudes de voltaje (señales) producidas en cada fotodiodo con el osciloscopio Tektronix TDS2022C [18], determinamos el promedio de las 100 amplitudes y comparamos.

Las amplitudes de las señales eléctricas producidas por el fotodiodo como función de los polarizadores posicionados entre el LED azul y el fotodiodo tuvieron el siguiente orden decreciente:

- LED frente a fotodiodo.
- LED frente a fotodiodo con un polarizador.
- LED frente a fotodiodo con dos polarizadores con máxima transferencia de luz.
- LED frente a fotodiodo con dos polarizadores con mínima transferencia de luz.

Mostramos las amplitudes promedio de las señales eléctricas producidas en el fotodiodo como función de los po-

larizadores posicionados entre los demás materiales de prueba y el fotodiodo en la Fig. 5; se exceptuó el LED. El eje

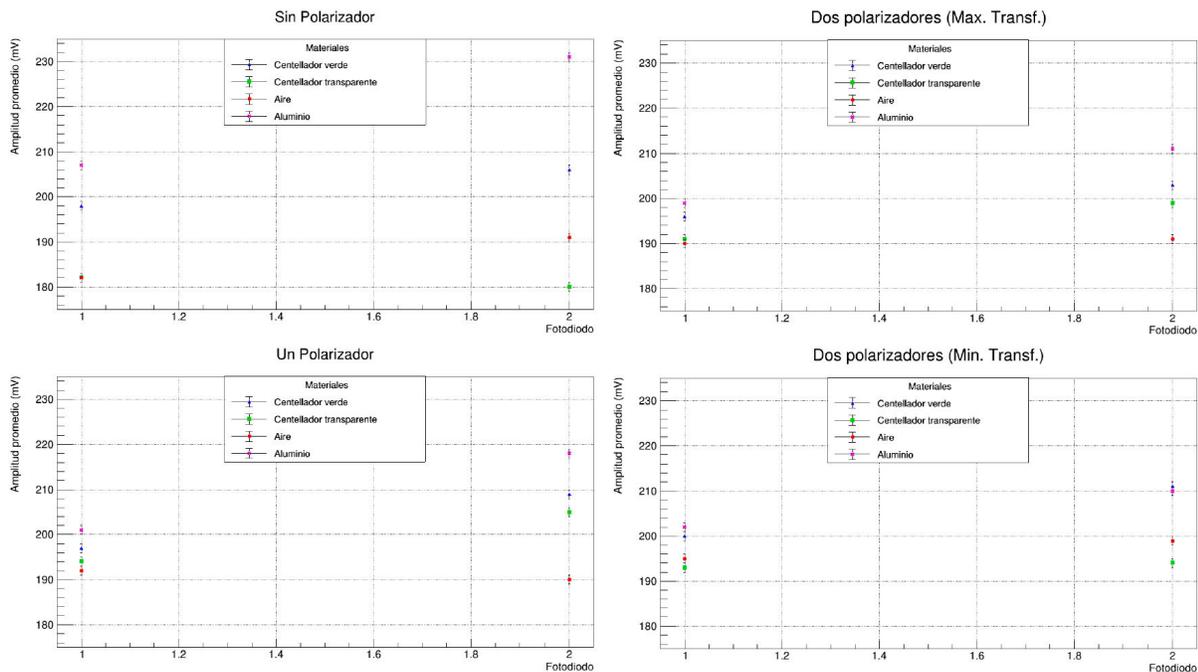


FIGURE 5. Amplitudes promedio producidas en cada fotodiodo (Fotodiodo 1, Fotodiodo 2) unido a un material de prueba para cada configuración experimental. Los resultados son estadísticamente consistentes.

horizontal representa el foto-detector con el que se midieron las amplitudes de las señales producidas por los materiales de prueba. Los foto-detectores con los que medimos amplitudes los denominamos Fotodiodo 1 y Fotodiodo 2. Los resultados son estadísticamente consistentes.

En casi todos los casos, las amplitudes de las señales obtenidas interponiendo el bloque de Aluminio resultaron mayores.

Los resultados obtenidos son el *primer indicio de la producción de fotones en el Aluminio*, posiblemente por incidencia de rayos cósmicos. Existe similitud entre las señales producidas con el Aluminio y con un LED: las amplitudes de las señales producidas por el fotodiodo decrecen a medida que se aumenta y cambia la orientación de los polarizadores colocados entre el LED o Aluminio y el fotodiodo, con ningún otro material observamos una característica similar.

4.3. Funcionamiento del sistema experimental

En esta sección mostramos los resultados observacionales de una serie de pruebas realizadas en el sistema experimental. Con estas pruebas aseguramos que el sistema experimental funciona adecuadamente.

4.3.1. Funcionamiento del sistema de foto-detección

Probamos el funcionamiento de los fotodiodos de nuestros sistemas de foto-detección (Tarjeta 1, Tarjeta 2) y su capa-

cidad de detección en diferentes regiones del visible y el infrarrojo colocando como material en nuestro sistema experimental (véase Fig. 2) un LED (azul, verde, rojo e infrarrojo) entre dos foto-detectores tipo Tarjeta 2. Seleccionamos el voltaje mínimo de operación de cada LED, en el que los foto-detectores no se saturaron, y con frecuencia de 1 kHz.

Los fotodiodos detectan longitudes de onda en la región del visible y del infrarrojo como se especifica en su hoja técnica [19], y a la frecuencia de generación de los fotones. Mostramos los resultados obtenidos en la Fig. 6.

4.3.2. Análisis de cuentas oscuras

Introducimos los fotodiodos del sistema de foto-detección tipo Tarjeta 2 en el sistema de aislamiento óptico y electromagnético para determinar la cantidad de cuentas oscuras producidas por los fotodiodos operándolos con el voltaje de operación óptimo. Censando dos direcciones diferentes (horizontal, vertical) obtuvimos los resultados que mostramos en la Tabla I, en una toma de datos de 10 min por cada prueba.

Detectamos cuentas oscuras sólo en una observación (cuando posicionamos uno de los fotodiodos verticalmente),

TABLA I. Total de cuentas oscuras obtenidas en el análisis. Básicamente cero cuentas oscuras en 10 minutos de muestreo en las dos pruebas y en las dos posiciones que censamos.

Prueba	Canal 1	Canal 2
Primera prueba		
Posición vertical	0	189.0 ± 13.7
Posición horizontal	0	0
Segunda prueba		
Posición vertical	0	0
Posición horizontal	0	0

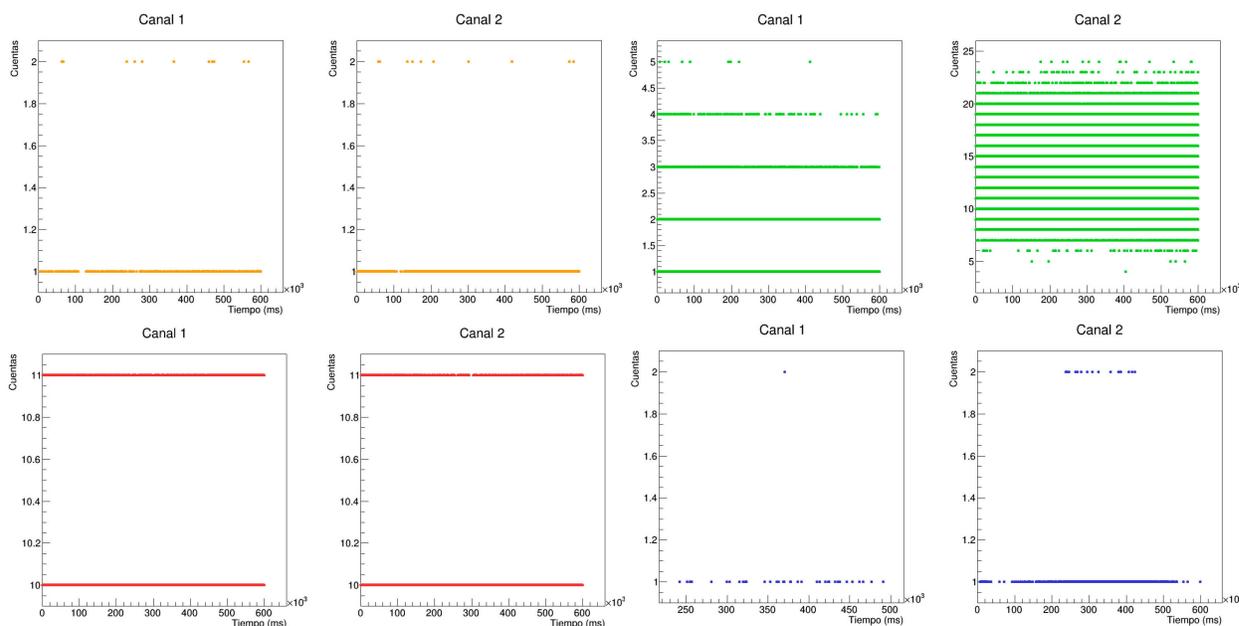


FIGURE 6. Detección de fotones producidos por el LED infrarrojo, el LED rojo, el LED verde y el LED azul respectivamente. La frecuencia de detección es la misma que la frecuencia de generación. Sistemáticamente con el canal 2 siempre se obtuvieron mayor número de cuentas.

en las demás observaciones no obtuvimos cuentas oscuras. De acuerdo a resultados posteriores en los que usamos un bloque de Aluminio como fuente luminosa (en lugar de aire), el número de fotones detectados se encuentra en órdenes de $10^5 - 10^6$ detecciones, en pruebas de la misma duración. Luego, las 189 cuentas resultan despreciables contra las miles de señales que se obtienen con pruebas subsecuentes. Concluimos que dentro del sistema de aislamiento óptico y electromagnético y sin material de detección (aire como material de detección) no se producen fotones que puedan ser detectados por los foto-detectores, ni como cuentas oscuras producidas por fluctuaciones cuánticas, térmicas, o de inducción electromagnética. Para los propósitos experimentales este resultado es excelente, porque no tenemos que corregir los resultados por cuentas oscuras.

4.4. Producción de fotones en el Aluminio

Mostramos una serie de evidencias con las que probamos que las señales detectadas por los fotodiodos son producidas por fotones generados en el Aluminio con fenómenos que asociamos a los fotones: *absorción, reflexión, polarización, refracción y dispersión*. Analizamos las características de los

fotones: la *composición de los fotones detectados por color anteponiendo filtros* y la *polarización usando polarizadores comerciales*.

4.4.1. Estudio de absorción

Observamos la absorción de la luz que se produce en el Aluminio. Colocamos en nuestra configuración experimental el bloque de Aluminio como material de prueba. Separamos los fotodiodos del bloque de Aluminio 0.0 ± 0.5 mm, 4.0 ± 0.5 mm, 8.0 ± 0.5 mm y 12 ± 0.5 mm con piezas de acrílico empalmadas. Mostramos en la Fig. 7 la disposición del bloque de Aluminio y los diodos foto-detectores para las pruebas de absorción realizadas.

Los resultados obtenidos en estas pruebas para el Canal 1 y el Canal 2 (canales en la tarjeta electrónica principal que corresponden a los sistemas de foto-detección tipo tarjeta 2) los resumimos en la Fig. 8. El eje horizontal representa la separación entre los foto-detectores y el Aluminio en milímetros, el eje vertical el número de cuentas medido para cada separación. Los errores en el eje vertical no son perceptibles

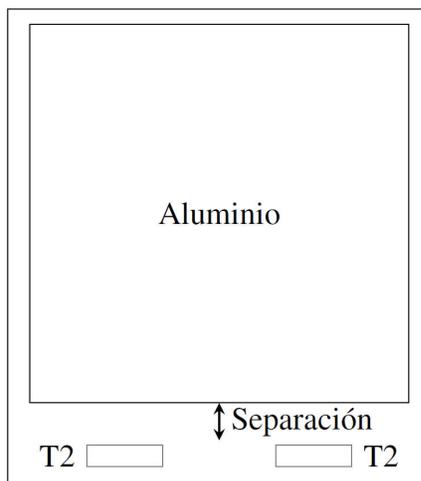


FIGURE 7. Diagrama de la disposición del bloque de Aluminio y los diodos fotodetectores para las pruebas del estudio de absorción.

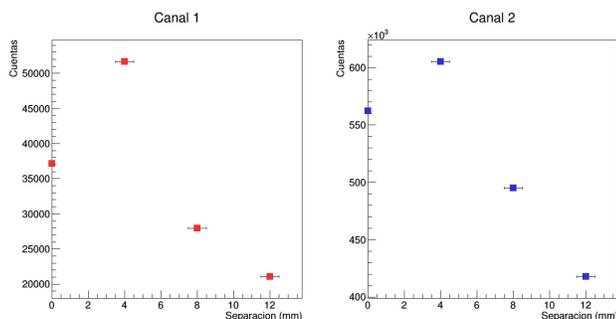


FIGURE 8. Cuentas obtenidas como función de la separación entre el bloque de Aluminio y los foto-detectores. En promedio, a mayor separación menor número de cuentas. El origen y la implicación del salto en la gráfica entre el primer punto y el segundo punto de datos todavía los seguimos investigando.

al ojo humano puesto que se encuentran dos o tres órdenes debajo del número de cuentas medido. Los errores en el eje vertical, son errores estadísticos.

Hay un incremento en el número de cuentas de 0 mm de separación (cuando el diodo foto-multiplicador está en contacto con el bloque de Aluminio) a 4.0 ± 0.5 mm de separación; por la separación, hay mayor probabilidad de coleccionar más fotones provenientes de distintos lugares de la fuente, en consistencia con que se producen fotones en el bloque de Aluminio que se dispersan en el aire.

A partir de una separación de 4.0 ± 0.5 mm el número de cuentas decrece a medida que incrementamos la separación entre el bloque de Aluminio y los foto-detectores en los dos canales de detección. Con los resultados obtenidos concluimos que los fotones producidos en el Aluminio se absorben en el aire y se dispersan.

Comparamos esta prueba con el análisis de cuentas oscuras (donde el material de prueba es el aire) donde no obtuvimos cuentas debido a que no había una fuente de fotones. En estas pruebas seguimos obteniendo cuentas aunque el bloque de Aluminio está separado unos cuantos milímetros de

los foto-detectores como si hubiera una fuente luminosa en la vecindad de los fotodiodos. La única posible fuente es el bloque de Aluminio.

4.4.2. Estudio de reflexión

Las pruebas con el Aluminio son similares a las pruebas del estudio de reflexión con el LED. Colocamos capas de papel reflejante (papel de Aluminio electrostático) entre el fotodiodo y el bloque de Aluminio con la superficie reflejante hacia el bloque de Aluminio y la superficie opaca hacia el fotodiodo. Realizamos tres pruebas (Caso 1, Caso 2 y Caso 3) con diferentes capas y posiciones del papel reflejante. Describimos cada caso en la Fig. 9.

Los resultados obtenidos en el Canal 1 y el Canal 2 los resumimos en la Fig. 10. El eje horizontal representa cada caso, de acuerdo a la Fig. 9, el eje vertical el número de cuentas medido para cada caso. Los errores en el eje vertical no son perceptibles al ojo humano puesto que se encuentran dos o

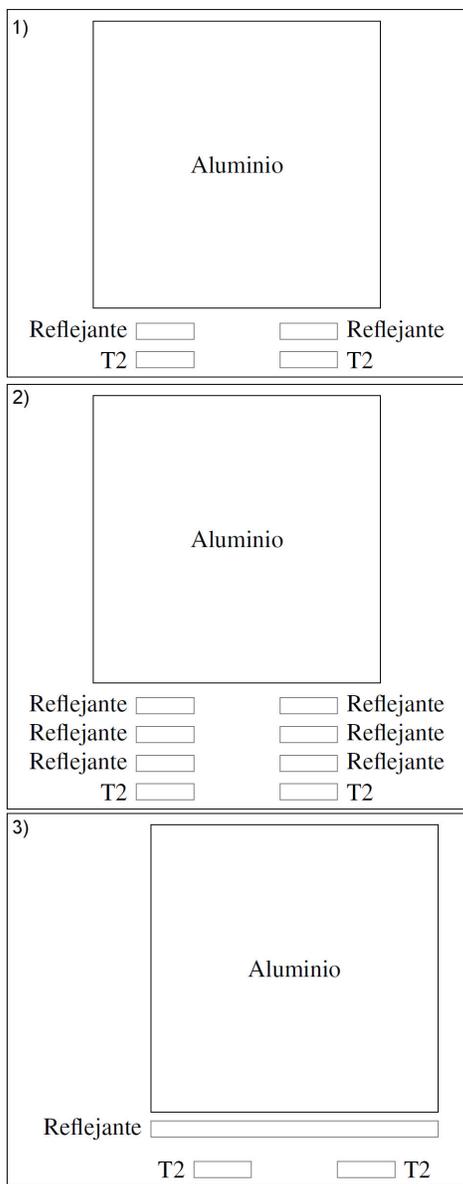


FIGURE 9. Caso 1: una capa de reflejante entre Aluminio y fotodiodo. Caso 2: tres capas de reflejante entre Aluminio y fotodiodo. Caso 3: una capa de reflejante a ≈ 2 mm de una cara del bloque de Aluminio y a ≈ 5 mm de las tarjetas 2. Disposición del bloque de Aluminio y los diodos foto-multiplicadores para los estudios de reflexión.

tres órdenes debajo del número de cuentas medido. Los errores en el eje vertical, son errores estadísticos.

El Caso 0, en que el bloque de Aluminio está unido a los foto-detectores sin material reflejante de por medio. En el Caso 1 y el Caso 2 el bloque de Aluminio, el material reflejante y los fotodiodos están unidos. En el Caso 3 puede manifestarse también el fenómeno de absorción de los fotones producidos por el Aluminio en el aire.

El número de cuentas decrementa cuando colocamos material reflejante entre el Aluminio y los fotodiodos, *i.e.*, una porción de los fotones producidos por el Aluminio se refleja en el material reflejante otra porción se refracta, transmite

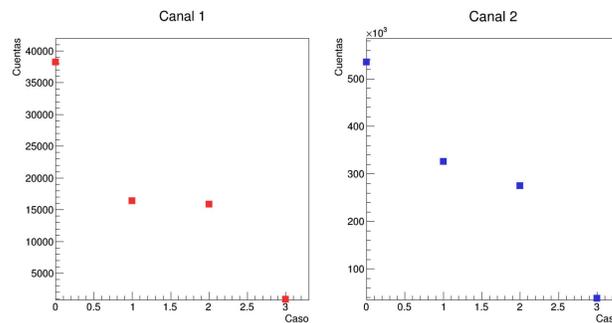


FIGURE 10. Resultados de la prueba de reflexión de fotones producidos por el bloque de Aluminio.

o absorbe. Los resultados obtenidos con LEDs y Aluminio son equivalentes. Concluimos que los resultados son consistentes con que los fotones, que producen las señales en los foto-detectores, se reflejan.

4.4.3. Estudio de dispersión

Observamos el fenómeno de absorción, dispersión y refracción de la luz producida en el Aluminio. Separamos los fotodiodos y el bloque de Aluminio con dos materiales diferentes entre ellos:

- Aire: como en las pruebas de absorción, separamos los fotodiodos del bloque de Aluminio de los fotodiodos 6.0 ± 0.5 mm, 12.0 ± 0.5 mm y 18.0 ± 0.5 mm con placas de acrílico.
- Lente: separamos los fotodiodos del bloque de Aluminio con una lente convexa de vidrio de 15.40 ± 0.05 mm de gruesa y 10 cm de diámetro. Los fotones producidos en el bloque de Aluminio atraviesan la lente y son capturados por los fotodiodos.

Posteriormente comparamos los resultados obtenidos al separar los fotodiodos del bloque de Aluminio con aire y con una lente comercial de vidrio. El diagrama de estas pruebas es equivalente al de la Fig. 7. Mostramos lo resultados obtenidos en la Tabla II.

En ninguno de los casos con aire los fotodiodos detectaron fotones producidos por el Aluminio a distancias iguales

TABLA II. Cuentas obtenidas en las pruebas del estudio de dispersión y refracción.

Prueba	Separación (mm)	Canal 1	Canal 2
Aire			
	6.0 ± 0.5	0	0
	12.0 ± 1.0	0	0
	18.0 ± 1.5	0	0
Lente			
	15.40 ± 0.05	238.0 ± 15.4	22692.0 ± 150.6

o mayores a 6.0 ± 0.5 mm. Posiblemente los fotones se dispersaron y absorbieron en el aire antes de llegar a los fotodiodos. Este fenómeno lo observamos previamente con la luz producida por los LEDs.

Al cambiar el medio en el que se trasladan los fotones desde el Aluminio hasta los fotodiodos -en lugar de aire colocamos una lente convexa- el resultado cambia, en este caso los fotodiodos sí capturan fotones. La luz producida por el Aluminio se dispersa y refracta en menor grado al atravesar una lente que al atravesar aire. Los resultados son consistentes con que las señales observadas son producidas por fotones que se refractan, reflejan, dispersan, etc.

4.4.4. Estudio de filtración

Estudiamos la composición de los fotones producidos en el Aluminio filtrándolos con material filtro de colores distintos. Estamos sujetos a analizar únicamente el rango de detección del fotodiodo especificado en su hoja técnica. No descartamos la posibilidad de que los fotones se produzcan en otra región del espectro electromagnético, pero no tenemos forma de saberlo con nuestro sistema experimental.

Para este estudio, utilizamos en nuestra configuración experimental el bloque de Aluminio como material de prueba. Colocamos capas de filtro de un color (azul, verde, amarillo o rojo) entre el bloque de Aluminio y los fotodiodos. Los filtros están en el rango de detección de los fotodiodos utilizados en nuestro sistema experimental. Mostramos dos casos diferentes de acuerdo al número de filtros colocados entre el bloque de Aluminio y el fotodiodo en las Fig. 11.

Determinamos la composición de los fotones detectados haciendo uso de la eficiencia del foto-detector, éste tiene una eficiencia dependiente de la longitud de onda, de acuerdo a su hoja técnica. Para determinar el número de fotones de cada color producidos por el Aluminio dividimos el número de fotones detectados de cada color por la eficiencia de detección [19]. Mostramos una aproximación de la eficiencia en la Tabla III, considerando las longitudes de onda de la referencia [20] y la eficiencia es el valor promedio de la curva presentada por el fabricante del foto-detector [19].

Mostramos la corrección por eficiencia o el número de fotones producidos por el Aluminio en el Caso 1 y el Caso 2 en la Tabla IV. El número de fotones de cada color producidos por el Aluminio se encuentra en el mismo orden de magnitud. En conclusión, los fotones son producidos en el Aluminio por

TABLA III. Eficiencia de detección del foto-detector del sistema experimental.

Color	Longitud de onda	Eficiencia
Azul	470 nm	0.27
Verde	550 nm	0.23
Amarillo	600 nm	0.18
Rojo	665 nm	0.14

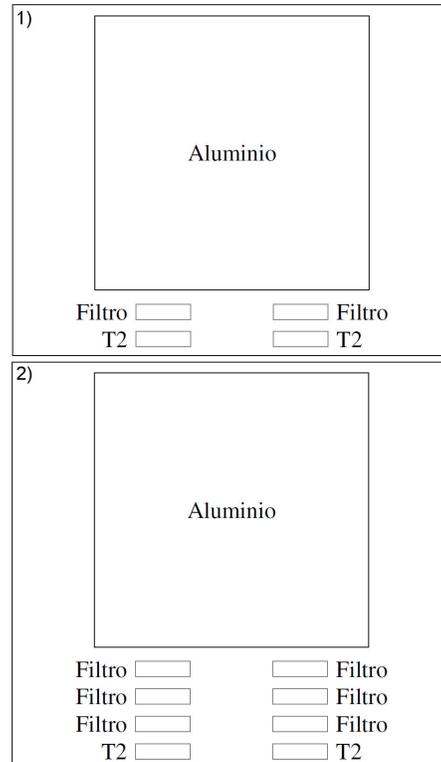


FIGURE 11. Caso 1: una capa de filtro entre el bloque de Aluminio y el fotodiodo. Caso 2: tres capas de filtro del mismo color entre el bloque de Aluminio y el fotodiodo. Pruebas de estudio de filtración.

TABLA IV. La composición de los fotones producidos en el Aluminio, por incidencia de rayos cósmicos, corregida por la eficiencia del foto-detector. A mayor número de capas de filtro, menor número de fotones detectados.

Caso	Color	Canal 1	Canal 2
Caso 1			
	Azul	561500 ± 749	4359396 ± 2088
	Verde	640665 ± 800	4927204 ± 2220
	Amarillo	828628 ± 913	6333611 ± 2517
	Rojo	838421 ± 916	8094693 ± 2845
Caso 2			
	Azul	233259 ± 483	2360956 ± 1537
	Verde	188483 ± 434	2357630 ± 1536
	Amarillo	204928 ± 453	3012528 ± 1736
	Rojo	233221 ± 483	3050657 ± 1747

incidencia de rayos cósmicos en todo el rango óptico casi con igual probabilidad.

4.4.5. Estudio de polarización

Para estudiar la polarización de los fotones producidos en el Aluminio utilizando el bloque de Aluminio como material de prueba en la configuración experimental. Posicionamos un

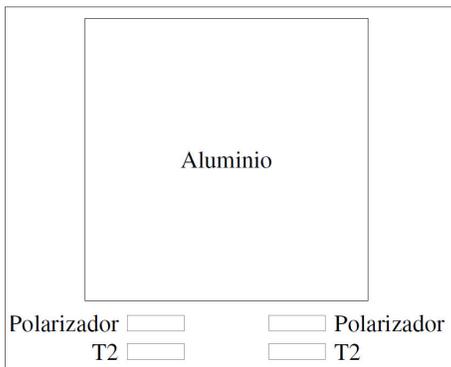


FIGURE 12. Disposición de los componentes experimentales para la prueba de polarización.

polarizador de forma circular y de diámetro 4.80 ± 0.05 cm entre el bloque de Aluminio y los fotodiodos. Mostramos el diagrama de estas pruebas en la Fig. 12.

Colocamos una marca de referencia aleatoria en el polarizador y una marca de referencia en una cara del bloque de Aluminio. En la primera prueba hicimos coincidir la marca del polarizador y la marca del bloque de Aluminio. En las pruebas rotamos el polarizador en pasos de $\theta = 45^\circ$ en el rango $\theta, \theta \in [0^\circ, 315^\circ]$. El fotodiodo y el bloque de Aluminio conservan su posición inicial en todas las pruebas.

Si la luz producida por el Aluminio no tiene un vector de polarización particular, esperaríamos que para cualquier orientación del polarizador deberíamos obtener una cantidad

de fotones detectados similar. En una gráfica del número de cuentas obtenidas durante el periodo de prueba (10 min) como función de la orientación del polarizador observaríamos una tendencia a una línea horizontal.

Los resultados obtenidos en el Canal 1 y el Canal 2 los resumimos en la Fig. 13. El eje horizontal representa el ángulo en grados que rotamos el polarizador con respecto a un eje normal a la superficie del polarizador, y manteniendo en una posición estática el bloque de Aluminio y los foto-detectores durante las pruebas; el eje vertical, el número de cuentas medido para cada ángulo rotado del polarizador. Los errores en el eje vertical no son perceptibles al ojo humano puesto que se encuentran dos o tres órdenes debajo del número de cuentas medido. Los errores en el eje vertical, son errores estadísticos.

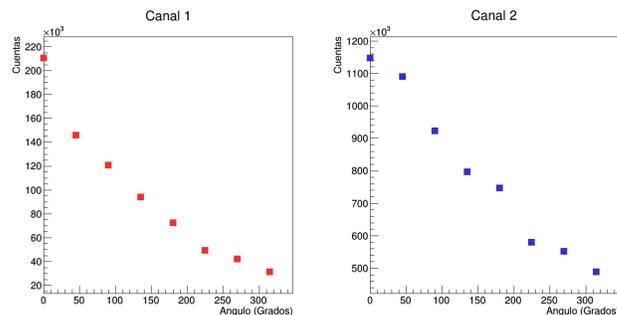


FIGURE 13. Resultados obtenidos para las pruebas de polarización de la luz emitida por el bloque de Aluminio.

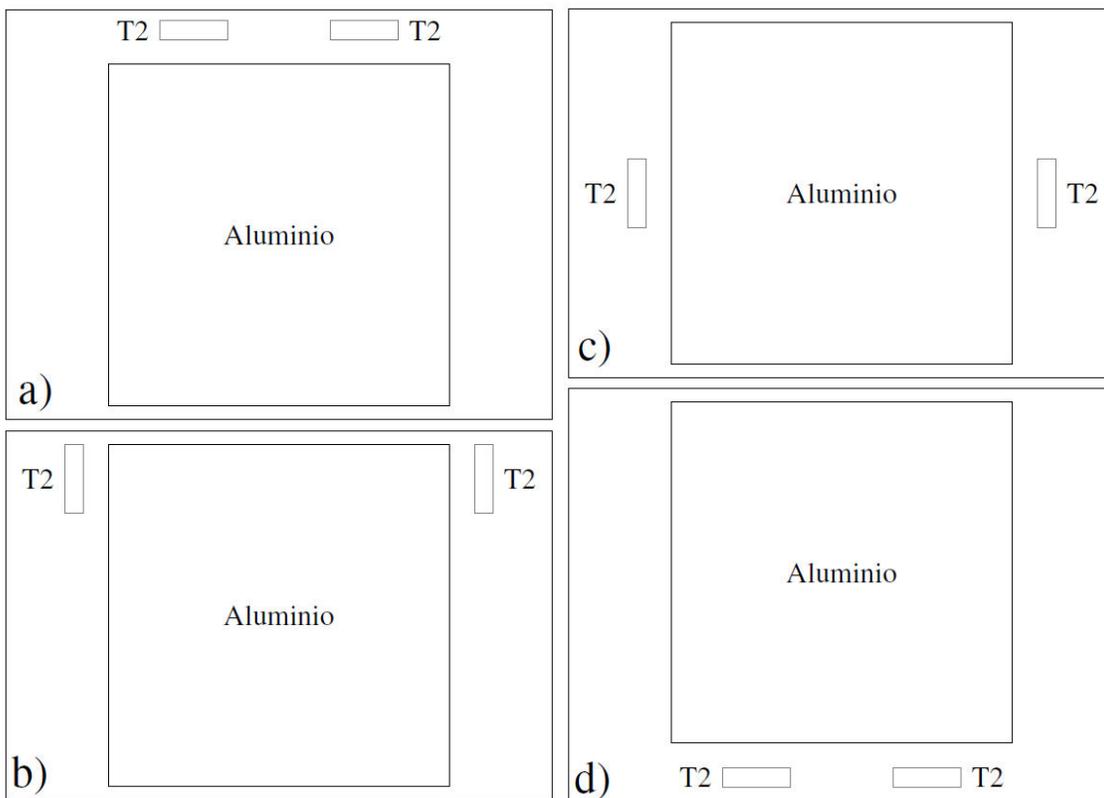


FIGURE 14. a) Primera posición: 0.0 cm. b) Segunda posición: 1.10 ± 0.05 cm. c) Tercera posición: 5.00 ± 0.05 cm. d) Cuarta posición: 10.00 ± 0.05 cm. Diagramas de las pruebas que componen el Caso 1. Diferentes posiciones de los fotodiodos.

Los resultados muestran que hay una mayor cantidad de fotones detectados por los fotodiodos en ciertas orientaciones del polarizador, mientras que en otras orientaciones el número de fotones detectados se reduce drásticamente. Podemos concluir que la luz producida por el Aluminio está polarizada.

4.5. Origen de fotones detectados

Indagamos el origen y las causas de la producción de fotones en Aluminio. Analizamos el número de cuentas de las señales producidas en los fotodiodos con diferentes espesores de Aluminio. Validamos la incidencia de rayos cósmicos usando la condición de veto: la señal en el bloque de Aluminio (que produce las señales en los fotodiodos) la tomamos como válida si es simultánea con las señales provenientes de los dos detectores de veto en una ventana de tiempo de 1 ms.

4.5.1. Producción de fotones como función del espesor del Aluminio

La pérdida de energía por unidad de distancia recorrida por una partícula (dE/dx) al atravesar un material es función de variables como el número atómico (Z), la masa, etc [12]. La energía depositada es proporcional a la distancia recorrida y esta energía está relacionada con el número de fotones producidos. Nosotros analizamos el número de fotones detectados como función del espesor del Aluminio. Observamos si la cantidad de fotones producidos en el Aluminio aumenta cuando incrementamos el espesor del material. Realizamos dos tipos de pruebas identificadas como casos.

- Caso 1: el material de prueba es el bloque de Aluminio. Colocamos los fotodiodos a diferentes profundidades del bloque de Aluminio (o espesores recorridos por la partícula incidente) como mostramos en la Fig. 14.

Mostramos los resultados del Caso 1, las cuentas obtenidas en el Canal 1 y el Canal 2 en la Fig. 15. El eje horizontal representa la profundidad en el bloque de Aluminio a la que posicionamos los foto-detectores. El eje vertical el número de cuentas medido para cada

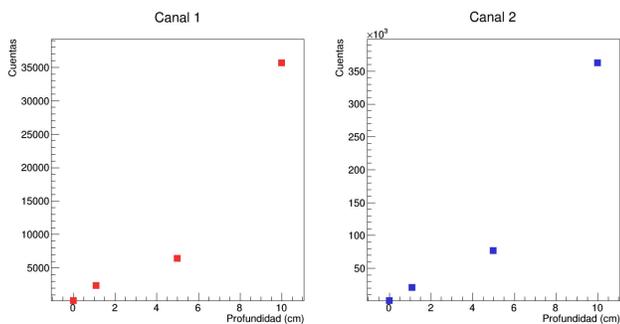


FIGURE 15. Resultados del Caso 1. A mayor profundidad recorrida, mayor número de cuentas.

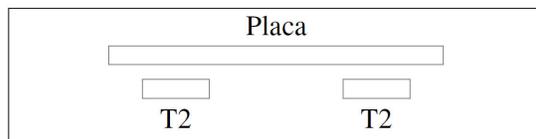


FIGURE 16. Diagrama de disposición del bloque de Aluminio y el diodo fotomultiplicador para las pruebas del Caso 2.

profundidad. Los errores en el eje vertical no son perceptibles al ojo humano puesto que se encuentran dos o tres órdenes debajo del número de cuentas medido. Los errores en el eje vertical, son errores estadísticos.

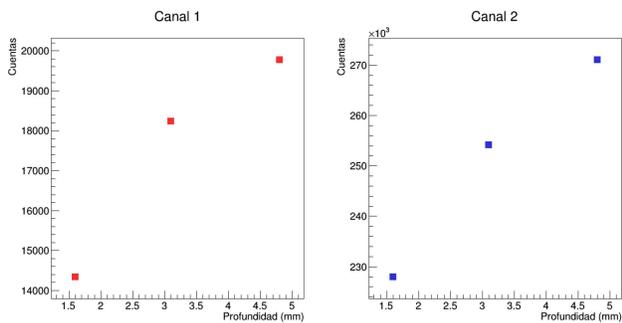
A mayor distancia recorrida hay una mayor cantidad de cuentas o mayor número de fotones producidos en el metal detectados por los foto-detectores.

- Caso 2: los materiales de prueba son placas de Aluminio de $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ de área y de los siguientes espesores: Placa 1 de 1.60 ± 0.05 mm, Placa 2 de 3.10 ± 0.05 mm y Placa 3 de 4.80 ± 0.05 mm. El diagrama se muestra en la Fig. 16.

Los resultados obtenidos en el Canal 1 y el Canal 2 los resumimos en la Fig. 17. El eje horizontal representa el espesor de las placas de Aluminio, o profundidad de Aluminio a la que posicionamos los foto-detectores. El eje vertical el número de cuentas medido para cada profundidad. Los errores en el eje vertical no son perceptibles al ojo humano puesto que se encuentran dos o tres órdenes debajo del número de cuentas medido. Los errores en el eje vertical, son errores estadísticos.

Los resultados en los dos foto-detectores muestran la misma funcionalidad en la gráfica del número de cuentas como función del espesor (profundidad) de las placas de Aluminio.

En los dos casos estudiados (Caso 1, Caso 2) observamos que a mayor distancia recorrida de las partículas incidentes, mayor cantidad de fotones detectados por los foto-detectores. El depósito de energía está relacionado con la producción de un fenómeno en el seno del material Aluminio. El resultado del fenómeno son fotones. A mayor distancia recorrida por la



y en por lo menos un fotodiodo unido al bloque de Aluminio. Si una partícula atravesó ambos detectores de veto, debió de atravesar el bloque de Aluminio. Analizamos dos casos, como sigue:

FIGURE 17. Resultados del Caso 2, cuentas registradas por cada fotodiodo como función del espesor de la lámina de Aluminio.

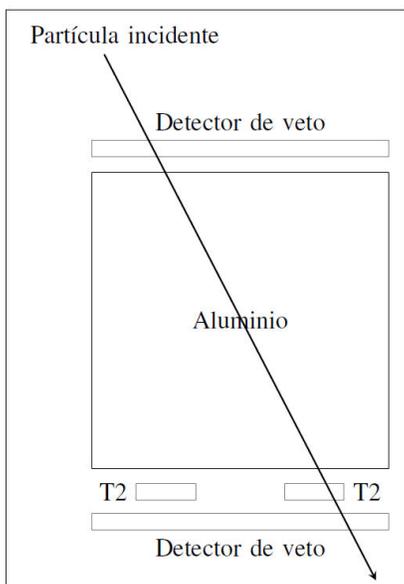


FIGURE 18. Diagrama del sistema de validación por coincidencias.

- Caso 1: seleccionamos el evento en el que se produce señal en los detectores de veto y en un fotodiodo unido al bloque de Aluminio.

partícula, mayor energía depositada por la partícula, y por lo tanto mayor cantidad de fotones producidos y detectados.

Los resultados son congruentes con que los eventos (triggers o cuentas) son producidos por fotones creados en el Aluminio por rayos cósmicos que dejan rastros de energía en el seno del bloque de Aluminio.

4.5.2. Rayos cósmicos

Las señales observadas en el sistema experimental tienen su origen principalmente en los rayos cósmicos, en el ruido electrónico, en las fluctuaciones térmicas, etc. Los rayos cósmicos cuentan con energía suficiente como para penetrar y producir señales simultáneas en un gran número de detectores [4]; las señales producidas por fluctuaciones térmicas y por fluctuaciones cuánticas no se propagan entre los detectores, la aplicación de la condición de veto es suficiente para eliminar a casi todas estas señales.

En la Fig. 18 mostramos un diagrama de la disposición de los diferentes detectores para validar una coincidencia de eventos producidos por incidencia de rayos cósmicos. Requerimos una señal eléctrica simultánea en dos detectores de veto

- Caso 2: seleccionamos el evento en el que se produce señal en los detectores de veto y en los dos fotodiodos unidos al bloque de Aluminio.

TABLA V. Coincidencias en el Caso 1 y el Caso 2 y cuentas obtenidas en cada canal.

Caso 1	
Coincidencias	430393 ± 656
No coincidencias	169607 ± 412
Coincidencias Canal 1	171155 ± 414
Coincidencias Canal 2	422996 ± 651
Caso 2	
Coincidencias	163758 ± 405
No coincidencias	436242 ± 661
Cuentas	
Canal 1	294687 ± 543
Canal 2	$1.64266 \times 10^6 \pm 1282$
Canal 3	946701 ± 973
Canal 4	$1.2436 \times 10^6 \pm 1115$

Cada fotón detectado en un detector de veto se produce por la incidencia de una partícula a través de él [11], las partículas que inciden en el detector de veto son rayos cósmicos. Si una partícula pasa a través de los dos detectores de veto, por la configuración, debe de pasar a través del bloque de Aluminio. Si se produce un evento simultáneo en los detectores de veto y en los foto-detectores unidos al bloque de Aluminio, entonces la producción de un fotón en el Aluminio se debe al paso de la partícula a través de él, en este caso un rayo cósmico.

En la Tabla V mostramos el número total de cuentas obtenidas en cada canal y el total de coincidencias por milisegundo y no coincidencias por milisegundo obtenidas en cada uno de los casos.

En ambos casos la toma de datos tiene una duración de 10 min = 600,000 ms y 600,000 datos colectados, por lo que Coincidencias + No Coincidencias = 600,000. Para el Caso 1, en el 28.5 % de las ventanas de tiempo hubo coincidencias entre los detectores de veto y el Canal 1, en el 70.5 % de las ventanas de tiempo hubo coincidencias entre los detectores de veto y el Canal 2. Hubo coincidencias descritas en el Caso 1 en el 71.7 % de las ventanas de tiempo. En el Caso 2 hubo coincidencias en el 27.3 % de las ventanas de tiempo. Los resultados anteriores no se alteran estadísticamente al tomar en cuenta las condiciones de veto para la selección de los eventos.

Las señales observadas son producidas por rayos cósmicos. Las señales observadas en los fotodiodos son fotones producidos en el Aluminio por incidencia de los rayos cósmicos.

5. Discusión y conclusiones

Las señales observadas en los fotodiodos son producidas por fotones generados, en diferentes formas -centelleo, Cerenkov,

y otras-, en el interior del bloque de Aluminio, por incidencia de rayos cósmicos. Los argumentos son los siguientes:

Verificamos que los voltajes de operación sugeridos por el fabricante Hamamatsu para los fotodiodos foto-detectores MPPC S12572-100P fueran correctos (70 Vcd). Operamos simultáneamente dos fotodiodos a este voltaje dentro de una caja hecha de madera de 1.27 cm de espesor, pintada de negro por dentro, blindada electromagnéticamente del exterior con una lámina delgada de Aluminio y con cerradura hermética. Dentro de esta caja los dos fotodiodos Hamamatsu usados registraron prácticamente cero cuentas oscuras; es decir, sin que los fotodiodos tocan algún material denso, simplemente al aire, las cuentas oscuras registradas fueron cero en los dos fotodiodos en un caso y cero cuentas en un fotodiodo y 189 cuentas en el otro fotodiodo, en otro caso; cada caso fue una toma de datos de 10 minutos cada uno, registrando cada milisegundo para una toma total de 600,000 registros.

Demostramos que los fotodiodos detectan fotones tal como se especifica en la hoja técnica de los fotodiodos proporcionada por Hamamatsu. Dentro de la misma caja de blindaje, les incidimos fotones, luz de muy baja intensidad, producida por LED infrarrojo, rojo, amarillo, verde, azul, y ultravioleta oscilantes a 1 kHz. La intensidad es tan baja que directamente con los ojos no se detectó luz. En todos los casos registramos fotones a la frecuencia que los generamos. Con los LED sin voltaje aplicado las señales en los fotodiodos no se generaron, el número de pulsos detectados en 10 minutos, en los dos fotodiodos fue cero. Este resultado coincide con la medición de cero cuentas oscuras, y demostramos que los fotodiodos MPPC de Hamamatsu funcionan bien para detectar fotones en todo el espectro visible incluyendo el ultravioleta cercano y el infrarrojo cercano.

Demostramos que los fotones producidos por luz LED se reflejan en láminas de Aluminio; se absorben, atenúan o dispersan por capas de aire; se filtran por colores en filtros comerciales; se refractan por lentes de vidrio; y se polarizan con polarizadores comerciales. Las señales detectadas por los detectores MPPC Hamamatsu tienen todas las propiedades físicas que tienen los fotones.

Dentro de la misma caja blindada, con los dos fotodiodos en contacto mecánico con un bloque de Aluminio comercial de 10 cm × 10 cm × 10 cm, por debajo, detectamos señales, como las señales producidas por la luz LED por cientos de miles en 10 min en ambos foto detectores. Si separamos el bloque de Aluminio de los fotodiodos más de 2 cm ya no observamos señales, en 10 min de toma de datos, pero sí observamos señales en los veto-detectores que colocamos y operamos simultáneamente arriba y abajo del bloque de Aluminio, y dentro de la caja blindada. Las señales se vuelven a detectar en cuanto ponemos en contacto mecánico fotodiodos y bloque de Aluminio.

Aplicamos la técnica de coincidencias para asegurar y validar que cada señal en los fotodiodos está relacionada con el paso de partículas cósmicas a través de los veto-detectores y del bloque de Aluminio. O al menos que haya señal en los dos fotodiodos y los dos veto-detectores, uno arriba y otro abajo

del bloque de Aluminio, simultáneamente en una ventana de 1 ms.

Imponiendo la condición anterior de coincidencias de señales para seleccionar los eventos o señales generadas por el bloque de Aluminio, mostramos que lo que genera las señales en los dos MPPC fotodiodos Hamamatsu se refleja en láminas de Aluminio; se absorbe, atenúa o dispersa por capas de aire; se filtra por colores en filtros comerciales; se refracta por lentes de vidrio; y se polariza con polarizadores comerciales.

Por lo anterior, lo que se genera en el bloque de Aluminio y que produce las señales en los fotodiodos fotomultiplicadores Hamamatsu tiene todas las propiedades de los fotones, luego concluimos que en el bloque de Aluminio se producen fotones por incidencia de rayos cósmicos.

Estas señales observadas mediante los dos diodos fotodetectores Hamamatsu dependen en intensidad del espesor de Aluminio atravesado por los rayos cósmicos. Hicimos dos estudios: uno donde usamos el bloque de aluminio y los fotodiodos Hamamatsu los colocamos a diferentes distancias de la parte superior del bloque de Aluminio; desde cero que corresponde a la parte superior del bloque de Aluminio, luego en las caras laterales en diferentes posiciones hasta llegar a la parte inferior que corresponde a 10 cm de espesor de Aluminio. Otro, donde pusimos los fotodiodos Hamamatsu debajo de láminas de Aluminio de diferentes espesores, de 10 cm \times 10 cm de área, y en contacto mecánico y óptico. En los dos casos los resultados son consistentes.

El número de cuentas registradas con cada uno de los dos fotodiodos es directamente proporcional al espesor del Aluminio. Este resultado está en acuerdo con la predicción clásica y cuántica que la energía perdida por una partícula eléctricamente cargada al atravesar un metal es directamente proporcional a la distancia recorrida en el metal por la partícula incidente. Y es consistente con la suposición siguiente: partículas eléctricamente cargadas, rayos cósmicos, inciden sobre el bloque y las láminas de Aluminio, las traspasan y dejan un rastro de energía en su trayectoria.

Los fotones producidos por la incidencia de rayos cósmicos en metales, y detectados en los MPPC fotodiodos Hamamatsu, deben de generarse de alguna forma. Por excitación-desexcitación, o ionización, de átomos del metal; sólo hay dos líneas de emisión-absorción del Aluminio en la región visible reportadas (624.3 nm y 466.3 nm que corresponden con el amarillo y el azul, respectivamente) y nueve líneas en el ultravioleta, y los fotones observados están en todo el rango visible, aunque se observa una ligera preponderancia en estos dos colores mencionados, incluyendo el rojo; es necesario investigar la producción de fotones en el ultravioleta y en todo el rango visible de forma más controlada usando fil-

tros de banda estrecha; de producirse el ion debería de ser posible detectarlo de forma simultánea con los fotones producidos; producción de iones y producción de fotones deben de ser fenómenos generados simultáneamente. Por radiación de transición en la cara de entrada y en la cara de salida del bloque de Al. Por radiación tipo Cerenkov; aunque radiación tipo Cerenkov en metales no ha sido descrita en la literatura. Por radiación de frenado o Bremsstrahlung. Por otras formas no conocidas hasta ahora. Todas estas formas de producción de fotones en medios metálicos están en proceso de estudio.

Hay reportes de detección de radiación tipo Bremsstrahlung o radiación de transición, producidos en materiales diferentes a los metales. En ambos casos, los fotones producidos en estos fenómenos están en la región de Rayos X. Los fotones reportados en este trabajo están en la región visible.

Las características observadas de la radiación producida en el Aluminio, o de las señales en los fotodiodos unidos al Aluminio son similares a las características de la radiación Cerenkov, porque algunas características coinciden en ambas, por ejemplo, ambas se encuentran en la región del visible, ambas están polarizadas, y en ambas la cantidad de fotones detectados es función del espesor del material.

Se producen fotones polarizados en el rango visible, con igual proporción en todos los colores, en el Aluminio por incidencia de rayos cósmicos.

En todas las formas anteriormente enumeradas se presupone que los fotones son producidos en el seno del metal, o al menos en la interfase aire-metal, y que salen al medio ambiente, al aire, donde son detectados. Las detecciones de fotones reportadas en este trabajo son hechas afuera del bloque de metal, en el aire. Este fenómeno no está reportado en la literatura; clásicamente se considera que los fotones son absorbidos por el metal cuando son producidos en el seno del metal, sin posibilidad de salir, pero nosotros observamos fotones fuera del bloque de metal. El metal y los rayos cósmicos tienen un papel activo en la producción de los fotones observados.

Investigaciones más a fondo y extensas son necesarias para esclarecer los fenómenos anteriores. Las estamos desarrollando.

La detección de fotones, y de iones, producidos en metales es una forma de detectar rayos cósmicos y radiación en general. Resta elaborar sobre esta técnica de detección de radiación. La estamos elaborando.

La aplicaciones potenciales de esta radiación es en la detección de partículas elementales, identificación de materiales, detección de radiación en general, estudio de rayos cósmicos, etc. Queda pendiente una investigación más exhaustiva y profunda de estos fenómenos ópticos observados y de las potenciales aplicaciones.

1. E. Floratos, Introduction to Particle Physics. Physics Dept University of Athens. CERN. November 2015. pp. 3-39. <https://indico.cern.ch/event/447008/contributions/1953687/attachments/1184942/1717323/ParticlePhysicsFORTEACHERS.pdf>.
2. A. H. Rosenfeld, y G. A. Snow, 8h. Elementary Particles and Interactions. University of California, Berkeley. University of Maryland. <https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/aip/aip-handbook-section8h.pdf>.
3. CERN. Cosmic rays: particles from outer space. <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>.
4. Particle Data Group. 30. Cosmic rays. Revised October 2019. <https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-cosmic-rays.pdf>.
5. S. Koontz, Practical Applications of Cosmic Ray Science: Spacecraft, Aircraft, Ground Based Computation and Control Systems and Human Health and Safety. Spring 2015. NASA Space Center, Houston, Texas. pp. 3-27. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150003480.pdf>.
6. W. F. Hanlon. Cosmic Ray Spectra of Various Experiments. The University of Utah. <https://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
7. N. Murphy, Cosmic Rays and Particle Acceleration. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Astronomy 253: Plasma Astrophysics. April 14-16, 2014. pp. 3-27. URL: <https://www.cfa.harvard.edu/~namurphy/Lectures/Ay25308ParticleAccel.pdf>.
8. V. F. Hess, Unsolved Problems in Physics: Tasks for the Immediate Future in Cosmic Ray Studies. Nobel Lecture, December 12, 1936. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1936/hess/lecture/>.
9. Erika Garutti. The Physics of Particle Detectors. Lecture Notes. SS 2012. pp. 3-40. URL: <https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1IntroductionHEPdetectors.pdf>.
10. Boris Shwartz Claus Grupen. Particle Detectors. Second Edition. (Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology). URL: <https://ajbell.web.cern.ch/documents/eBooks/ParticleDetectorsGrupen.pdf>.
11. Particle Data Group. 28. Particle Detectors. Revised 2006. <https://pdg.lbl.gov/2006/reviews/pardetrpp.pdf>.
12. Particle Data Group. 27. Passage of particles through matter. Revised January 2012. URL: <https://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-revpassage-particles-matter.pdf>.
13. R. A. Gutiérrez Sánchez Diseño, construcción, caracterización y operación de un detector de rayos cósmicos de 32 canales para la detección de partículas con carga positiva. Universidad de Guanajuato. División de Ciencias e Ingenierías.
14. Eljen Technology, FAST TIMING PLASTIC SCINTILLATOR EJ-232, EJ-232Q. Datasheet. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-232-ej-232q>.
15. B. K. Precision DC Power Supply. XLN Series. Datasheet, Manual. URL: <https://bkpmedia.s3.amazonaws.com/downloads/manuals/enus/XLNmanual.pdf>.
16. Tenma 72-8335A. Datasheet. <https://www.farnell.com/datasheets/1813161.pdf>.
17. National Instruments. USER MANUAL AND SPECIFICATIONS NI cRIO-9025. <https://www.ni.com/pdf/manuals/375490d.pdf>.
18. Tektronix, Digital Storage Oscilloscopes TDS2000C Series Datasheet, <https://www.mouser.com/datasheet/2/403/TDS2000C-Digital-Storage-Oscilloscope-Datasheet-4-844791.pdf>.
19. Hamamatsu. MPPC (Multi-Pixel Photon Counter), S12572-010, -015C/P. Datasheet. URL: <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-010etckapdl045e.pdf>.
20. Space Science Laboratory UC Berkeley. Rainbows of Light: The Visible Light Spectrum. Five Stars Pathway Afterschool Science Curriculum. MC 7450 Berkeley, CA 94706. pp. 5. <https://multiverse.ssl.berkeley.edu/Portals/0/Documents/FiveStarsCurriculumDocs/FiveStarsLessonVisibleLightfinal.pdf>.