

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

Noemí Lizbeth Moreno López¹, Julián Félix¹

¹División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, León, México
E-mail: morenoln2016@licifug.ugto.mx, felix@fisica.ugto.mx

Resumen — La radiación Cherenkov se produce en materiales transparentes cuando una partícula con carga eléctrica se mueve a través de éstos a una velocidad mayor que la velocidad de propagación de la luz en el medio. La radiación Cherenkov no ha sido observada en materiales opacos en ningún laboratorio del mundo. En este artículo describimos la planeación, el diseño, la construcción, y la caracterización de un sistema experimental para observar la radiación tipo Cherenkov producida por incidencia de rayos cósmicos en un bloque de Aluminio comercial de 10 cm x 10 cm x 10 cm. Presentamos detalles técnicos de la planeación, el diseño, la construcción, y la caracterización de este detector, y algunos resultados físicos muy preliminares.

Palabras Clave – Aluminio, Fotón, Radiación Cherenkov, Rayos Cósmicos

Abstract — Cherenkov radiation is produced in transparent materials when a particle with electric charge moves through them with a velocity greater than the velocity of light in the medium. Cherenkov radiation has not been observed in opaque materials in any laboratory in the world. In this article, we describe the planning, design, construction and the characterization of an experimental system to observe Cherenkov-type radiation produced by the incidence of cosmic rays in a 10cm x 10cm x 10cm commercial aluminum block. We present technical details of planning, design, construction and the characterization of this detector, and some preliminary physical results.

Keywords — Aluminum, Cherenkov Radiation, Cosmic Rays, Photon

I. INTRODUCCIÓN

La forma de medir las *propiedades de una partícula* ha sido a través del desarrollo de técnicas de detección. Es necesaria una fuente de partículas para su detección, las fuentes pueden ser de origen nuclear, radioactivo, óptico o cósmico [1, 2]. En este artículo reportamos la planeación, el diseño, la construcción y la caracterización de un detector de rayos cósmicos a base de plásticos centelladores completamente original y la planeación, el diseño, la construcción del sistema experimental y la presentación de evidencias preliminares de fotones producidos en Aluminio.

A. Rayos cósmicos

Las partículas y núcleos atómicos provenientes del espacio exterior se denominan rayos cósmicos. Estas partículas de alta energía que llegan del espacio exterior son principalmente **protones (89%)**, núcleos de hidrógeno (elemento más común en el universo), **núcleos de He (10%)** y **núcleos pesados (1%)**, núcleos con períodos de vida de 10^6 años o inclusive más [3, 4].

El origen astrofísico de los rayos cósmicos sigue siendo un tema de investigación, pero actualmente se clasifican como **primarios** y **secundarios**. La **radiación cósmica primaria** corresponde a aquellas partículas aceleradas en las fuentes astrofísicas, la **radiación cósmica secundaria** corresponde a aquellas partículas producidas por la interacción de las primarias con el gas interestelar y la atmósfera terrestre [5, 6]. Algunos ejemplos de los rayos cósmicos primarios son electrones, protones, He, C, O, Fe y otros núcleos sintetizados en las estrellas. Por otra parte, algunos ejemplos de rayos cósmicos secundarios son núcleos de Li, Be, Bo [4], y no son creados en las estrellas.

Componentes de rayos cósmicos en la Tierra

Cuando los rayos cósmicos inciden sobre la atmósfera terrestre (usualmente de alta energía), a menudo producen una cascada de partículas subatómicas secundarias denominada "chubasco de partículas" [7]. Ésta consiste en un número de partículas dependiente a la energía del rayo cósmico inicial.

A nivel del mar, las partículas más numerosas son los *muones, electrones, positrones, fotones y protones* [4, 8].

En 1936 Víctor Hess gana el Premio Nobel en Física por descubrir la radiación cósmica [9].

B. Detección de partículas

Un **detector de partículas** es un instrumento para medir una o más propiedades de una partícula [10].

Las partículas pueden ser detectadas a través de su interacción con la materia. Estas interacciones se diferencian respecto a partículas eléctricamente cargadas que atraviesan el material, e. g., *ionización, excitación, radiación Cherenkov*, y partículas eléctricamente neutras, estas partículas neutras deben producir partículas con carga eléctrica en la interacción [11, 12, 13].

A continuación, se mencionan las dos técnicas de detección empleadas en este trabajo.

Centelleo

Una partícula que pasa a través de algunas sustancias deja un rastro de energía, el cual se manifiesta en moléculas excitadas. Estas sustancias en las que algunas liberan una pequeña fracción de esta energía ($\approx 3\%$) como fotones ópticos se conocen como centelladores [14, 15].

La fluorescencia tiene lugar con la excitación inicial debido a la absorción de un fotón y la desexcitación es debida a la emisión de un fotón con otra longitud de onda [15].

Radiación Cherenkov

Esta radiación, se produce en materiales transparentes cuando una partícula con carga eléctrica se mueve a través del medio con índice de refracción n y a velocidad mayor a la velocidad de propagación de la luz en el medio. La luz producida está polarizada, es coherente y tiene una dirección de propagación bien definida dependiente de la velocidad de la partícula incidente y el índice de refracción del medio [16, 17, 18]. De la geometría del evento se obtiene la siguiente relación:

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n},$$

de esta relación se obtiene que $\beta n > 1$, por tanto $v > \frac{c}{n}$, donde v es la velocidad de la partícula incidente.

En las dos técnicas mostradas anteriormente detectamos fotones. Se requiere un sistema de conversión de estos fotones a electrones para la producción de una señal eléctrica [19].

II. METODOLOGÍA

El objetivo principal en este trabajo es el estudio de la producción de fotones en Aluminio. Para esto se planificaron una serie de objetivos particulares, enunciados a continuación:

- Construcción y caracterización de dos detectores de veto que operan por centelleo o efecto Cherenkov, cuya función es la validación de señales eléctricas haciendo uso del Método de Coincidencias¹.
- Pruebas con *LED, fotodiodo y polarizadores* en un sistema de aislamiento óptico para asegurar:
 - Correcto funcionamiento de los elementos del sistema de foto detección.
 - Observación de los efectos producidos por los polarizadores en las características de las señales eléctricas del fotodiodo (efectos en amplitud).
- Pruebas con *diferentes materiales de prueba, fotodiodo y polarizadores* en un Sistema de aislamiento óptico²[20], para observar:
 - Efectos producidos por los polarizadores en las características de las señales eléctricas del fotodiodo (efectos en amplitud).
 - Comparación de los resultados obtenidos con el *LED* y con los *diferentes materiales de prueba*.

A. Diseño

El sistema consiste en dos detectores de veto, un material de prueba, dos tarjetas electrónicas unidas al material de prueba, dos más, cada una unida a un detector de veto y una tarjeta electrónica en donde se alimentan los foto-detectores y se leen y digitalizan las señales eléctricas producidas por los foto-detectores de los detectores de veto y los unidos al bloque de aluminio de 10cm x 10cm x 10cm [21]. En la Figura II.A.1 se observa la configuración principal, la cual consta de dos detectores de veto, un cubo de aluminio de 100 mm x 100 mm x 100 mm, también se observan las posiciones de las tarjetas electrónicas:

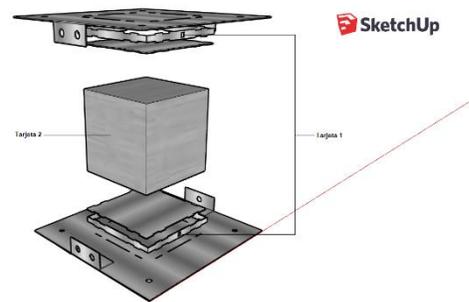


Figura II.A.1 Configuración principal; dos detectores de veto por centelleo, un bloque de aluminio y la posición de las tarjetas electrónicas.

¹ Walther Bothe. Premio Nobel 1954.

² Las señales eléctricas producidas por el fotodiodo son fotones producidos en el material de prueba.

Detectores de veto

Un arreglo de dos detectores por centelleo arriba y abajo del material de prueba son detectores de veto. Se tiene un sistema de validación por coincidencias cuando se asegura la ocurrencia de un evento en una ventana de tiempo establecida.

Cada detector de veto tiene una base de $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$, cuatro piezas laterales que se unen a la base de $8.4\text{ mm} \times 104\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ y una tapa de $104\text{ mm} \times 104\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$, una de las piezas laterales cuenta con un orificio de $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ en la que se acopla el MPPC Hamamatsu³ [22]. A continuación, se presenta el diagrama de cada detector de veto, Figura II.A.2.

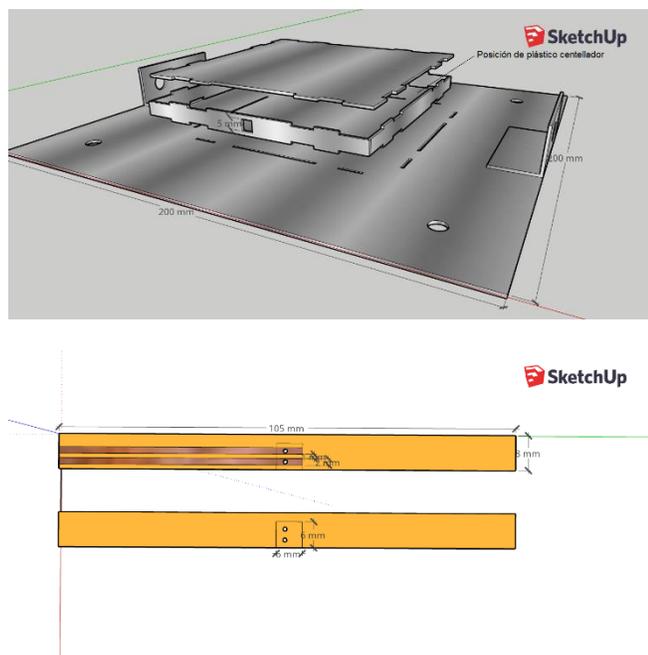


Figura II.A.2. Diseño de detector de veto, diseño de las tarjetas donde se ensambla el fotodiodo.

B. Construcción

Detectores de veto

Se cortaron con láser, lijaron, limpiaron y pulieron los elementos y se perforó la base que compone a cada detector de veto, el elemento centellador para cada uno es el material plástico FAST TIMING PLASTIC SCINTILLATOR EJ-232Q de ELJEN TECHNOLOGY⁴ [23]. En la Figura II.B.1 se puede observar la construcción de los detectores de veto:



Figura II.B.1. Muestra de la estructura de los detectores de veto antes de colocar el plástico centellador. El material de los elementos es aluminio debido a que es altamente reflectivo.



Figura II.B.2. Ensamblado de los detectores de veto con el plástico centellador dentro. Se cubrió con cinta de aluminio para evitar entradas de luz.

Tarjetas de detectores de veto

Se cortó una placa fenólica con las dimensiones mostradas en la Figura II.A.2, se retiró el cobre, excepto del espacio que ocupan las dos líneas paralelas, se hicieron perforaciones de 1mm de diámetro en cada línea por las cuales se pasó un alambre de cobre. Por un lado, se soldó el fotodiodo a cada alambre correspondiente y a la placa, por el otro se soldó el alambre a la línea de cobre correspondiente. En la orilla, a cada línea de cobre se unió una de las terminales de un conector moxley y después se cubrió toda la tarjeta con cinta aislante para evitar contacto eléctrico, como se puede observar en la figura siguiente:

³ Fotodiodo MPPC S12572-100P Hamamatsu.

⁴ Plástico centellador, véase referencia [23].



Figura II.B.3. Tarjeta 1. Tarjeta que tiene a un fotodiodo, la cual se une a un detector de veto. Se cubrió con cinta de aislar negra para evitar contacto eléctrico, además se pueden observar las conexiones eléctricas (alambre rojo, negro).

Estas tarjetas se unieron al elemento del detector de veto en donde se encuentra la perforación de $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, una vez colocada la tarjeta, se cubrió con cinta de aluminio para evitar entradas de luz.

Se construyeron, además, cuatro conectores de 70 cm de longitud que unen al fotodiodo⁵ con la tarjeta electrónica que lo alimenta. Por un lado, una conexión tipo molex, y del lado opuesto una conexión que correspondiera con la conexión de la tarjeta que alimenta a los fotodiodos, i. e., una conexión tipo mini-DIN. En la figura siguiente, se muestran los extremos de un conector:



Figura II.B.4. Muestra del conector molex y mini-DIN respectivamente. Estos son los extremos de los conectores de 70cm.

C. Sistema experimental

Los elementos del sistema experimental se mencionaron previamente, a continuación, se muestra el esquema general:

⁵ Fotodiodos de las tarjetas tipo 1, 2 dado que ambas tienen conexión tipo molex.

⁶ Las características del sistema de aislamiento óptico se pueden observar en la referencia [20], en la sección de diseño, construcción.

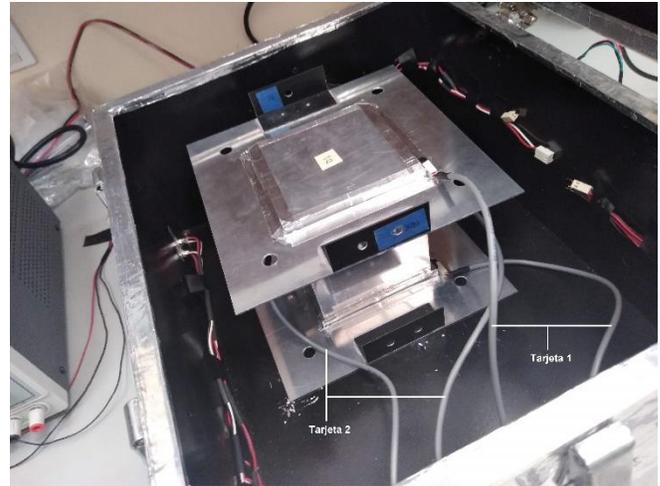


Figura II.C.1. Los detectores de veto y el material de prueba se introducen en un Sistema de aislamiento óptico, se muestran además los conectores que corresponden a cada tipo de tarjeta por un extremo, por el otro, todos se conectan a la tarjeta electrónica con la que se alimenta a los fotodiodos y se tiene la lectura de la salida analógica y digital.



Figura II.C.2. Muestra del Sistema de aislamiento óptico⁶, al cual se le ensambla la tarjeta electrónica que alimenta a los fotodiodos y con las cuales se tiene la lectura analógica y digital de las señales eléctricas producidas por los fotodiodos con ayuda de una base de metal⁷. Se observa en el osciloscopio la salida analógica y digital de una señal eléctrica de uno de los canales de la tarjeta, que corresponde a uno de los fotodiodos conectados o al material de prueba o a los detectores de veto.

⁷ Las características de la tarjeta electrónica se pueden observar en la referencia [21], en el Apéndice C: Tarjetas electrónicas, C.I. Tarjetas de Lectura con Discriminador.

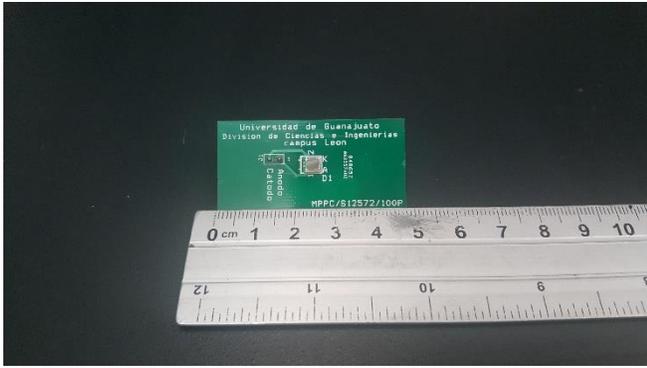


Figura II.C.3. Tarjeta 2. Tarjeta que tiene ensamblado un fotodiodo, éstas se unen a los materiales de prueba.

D. Pruebas

Análisis de amplitudes de señales eléctricas de fotodiodo

Se comenzó analizando las amplitudes de las señales eléctricas producidas en el fotodiodo al poner una fuente luminosa (LED) delante del fotodiodo y un número diferente de polarizadores entre la fuente luminosa y el fotodiodo dentro del sistema de aislamiento óptico en cuatro casos diferentes:

1. LED frente a fotodiodo,
2. LED frente a fotodiodo con un polarizador,
3. LED frente a fotodiodo con dos polarizadores en su máxima transferencia de luz,
4. LED frente a fotodiodo con dos polarizadores en su mínima transferencia de luz.

Se observó que la amplitud de las señales eléctricas disminuía al incrementar el número de polarizadores, siendo la señal de menor amplitud aquella en la que los polarizadores tenían mínima transferencia de luz. A continuación, se observa la forma en la que se realizaron estas pruebas:

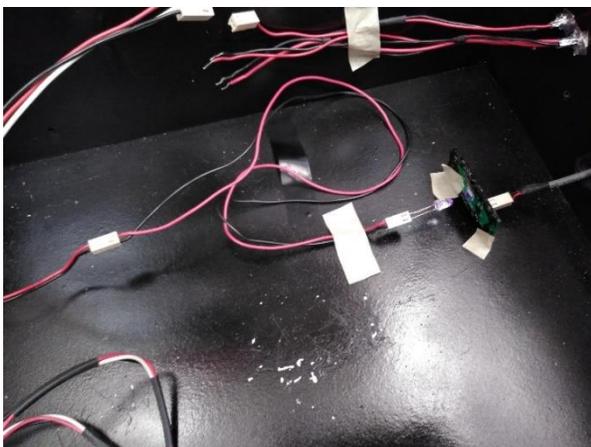


Figura II.D.1. Tarjeta 2 con fotodiodo delante de una Fuente luminosa (LED) sin polarizadores entre el fotodiodo y la fuente luminosa.

Después, se realizó una prueba similar con cuatro materiales diferentes: *plástico centellador verdoso*, *plástico centellador transparente*, *aire* y *aluminio*. Las pruebas consistían en analizar las amplitudes de las señales eléctricas producidas en el fotodiodo de la manera siguiente:

1. Se une un fotodiodo (Tarjeta 2) al material de prueba, se fija el fotodiodo con cinta de aluminio de forma que las únicas señales producidas se deban a un fenómeno producido en el material, todo dentro del sistema de aislamiento óptico. En el caso de aire, sólo se introduce el fotodiodo en el sistema de aislamiento óptico.
2. Se une un fotodiodo (Tarjeta 2) a un polarizador y ambos al material de prueba. En el caso de aire, solo se fija el polarizador al fotodiodo y se introduce al sistema de aislamiento óptico.
3. Se une un fotodiodo (Tarjeta 2) a dos polarizadores en su máxima transferencia y ambos al material de prueba, todo dentro del sistema de aislamiento óptico. En el caso de aire, solo se fijan los dos polarizadores al fotodiodo y se introducen al sistema de aislamiento óptico.
4. Se repite el paso anterior, pero con los polarizadores en su mínima transferencia.

En la Figura II.D.2 se muestra un diagrama de cómo se colocan los elementos de prueba en cada punto del párrafo anterior:

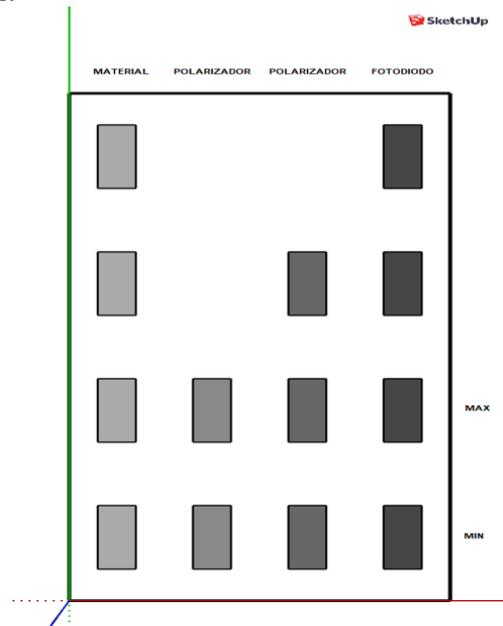


Figura II.D.2. Las columnas representan los elementos de prueba, todos los elementos están en contacto, MATERIAL: LED, *plástico centellador verdoso*, *plástico centellador transparente*, *aire*, *aluminio*. MAX, MIN representan las posiciones de los polarizadores en conjunto en máxima y mínima transferencia respectivamente.

Funcionamiento de los detectores, análisis de coincidencias

Se realizaron pruebas para comprobar el funcionamiento de los detectores de veto y de las demás tarjetas electrónicas. Se obtuvieron señales de todos los elementos mostrados en la Figura II.C.1. El siguiente paso sería analizar las cuentas obtenidas en la tarjeta electrónica de cuatro canales ensamblada en el sistema de aislamiento óptico (véase referencia [21]).

Cada canal cuenta con un nivel de trigger que sirve para discriminar las señales que no son producidas por ruido electrónico, generalmente la selección de este nivel es tres veces la amplitud de ruido electrónico, para tener mayor probabilidad de que la señal detectada es por un fenómeno producido en el material de detección.

Método de coincidencias

El material de interés es el aluminio, para comprobar que los fotones capturados por los fotodiodos unidos al aluminio son producidos por la incidencia de rayos cósmicos en el material, se requiere que haya señal en las dos tarjetas unidas al aluminio (Tarjetas 2) y en ambos detectores de veto (Tarjetas 1) colocados arriba y abajo del cubo de aluminio en una ventana de tiempo específica para considerar el evento simultáneo.

Se requiere de un *Sistema de Adquisición de Datos* para hacer dicho análisis de coincidencias, en este caso se tiene CompactRIO 9025 de National Instruments para la eventual realización de estas pruebas.

III. RESULTADOS

Se tienen resultados preliminares relacionados a la amplitud de las señales eléctricas del fotodiodo.

A. Amplitudes de señales eléctricas de fotodiodo

En el LED se observó que las amplitudes de las señales eléctricas en el fotodiodo tenían el siguiente orden de mayor a menor amplitud:

1. Sin polarizador.
2. Un polarizador.
3. Dos polarizadores con máxima transferencia.
4. Dos polarizadores con mínima transferencia.

Este era el parámetro de comparación con los demás materiales.

Para igualar las condiciones de los sistemas, todas las pruebas se realizaron con una alimentación para el fotodiodo de 95V, un nivel de trigger en el osciloscopio de 86 mV para dos fotodiodos de tipo Tarjeta 2, el motivo de repetir las pruebas con dos fotodiodos era apoyar el resultado presentado en cada material.

En total, para cada fotodiodo se hicieron pruebas para cada material de los cuatro mencionados anteriormente: plástico centellador verdoso, plástico centellador transparente, aire y aluminio, y para cada material se repitió la prueba respecto al número de polarizadores que se utilizaban (véase Figura II.D.2). Una prueba para un número de polarizadores, un material y un fotodiodo consistía en registrar 100 amplitudes de señales producidas en el fotodiodo, y de estas determinar su promedio.

En la figura siguiente se muestra un diagrama de cómo se realizó el registro de amplitudes de señales eléctricas del fotodiodo:

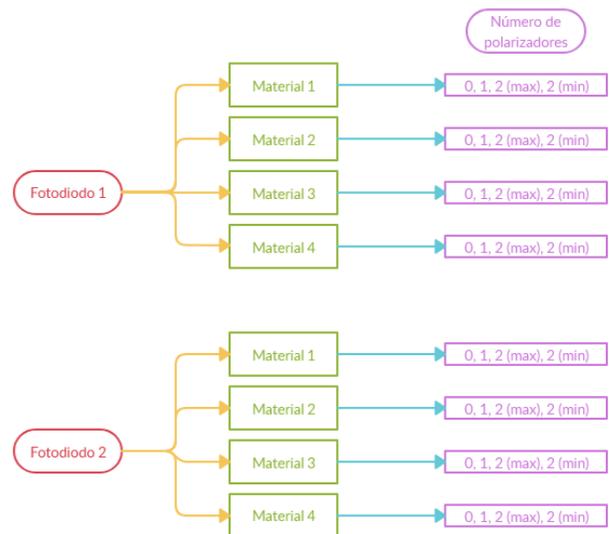


Figura III.A.1. Para cada fotodiodo se realizaron pruebas con cuatro materiales: Material 1, 2, 3, 4 – plástico centellador verdoso, plástico centellador transparente, aire, aluminio. Por cada material se realizaron cuatro pruebas respecto al número de polarizadores que se colocaron entre el fotodiodo y el material; 0, 1, 2 (max), 2 (min) – sin polarizador, un polarizador, dos polarizadores con máxima transferencia, dos polarizadores con mínima transferencia.

Los resultados obtenidos se muestran mediante el siguiente gráfico:

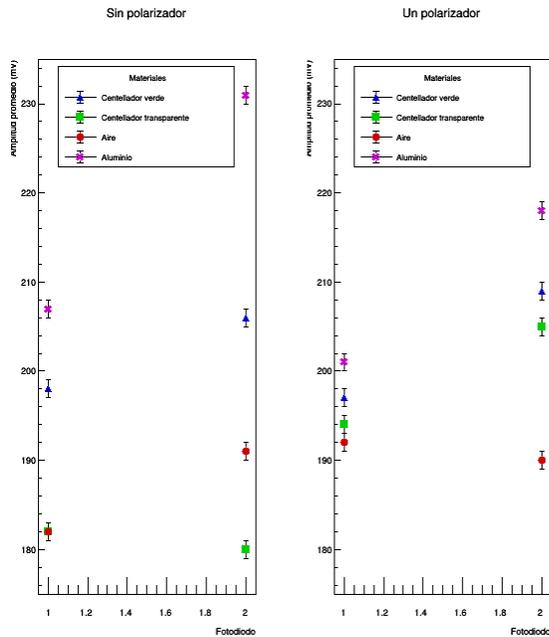


Figura III.A.2. Promedio de las amplitudes registradas cuando no se tiene polarizador y cuando se tiene uno.

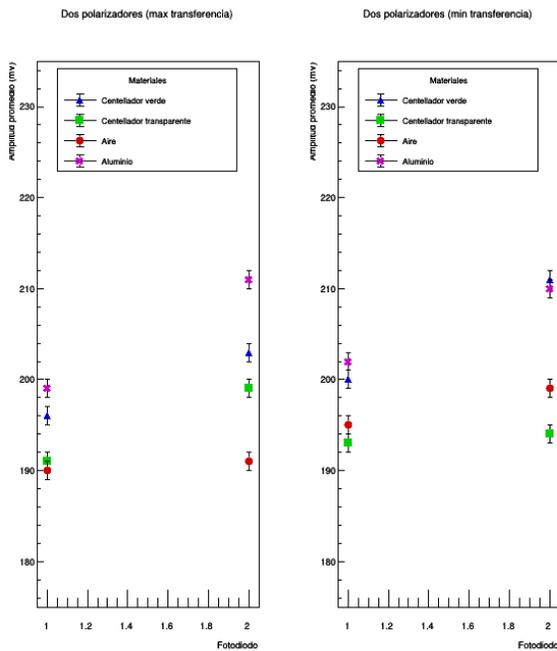


Figura III.A.2. Promedio de las amplitudes registradas cuando se tienen dos polarizadores en su máxima transferencia y dos polarizadores en su mínima transferencia.

Al observar las gráficas anteriores, es posible notar que materiales tales como los plásticos centelladores y el aire no tienen un patrón respecto al cambio de la amplitud de las señales eléctricas como función del número de polarizadores, para ninguno de los fotodiodos. Sin embargo, el aluminio muestra resultados similares a los de un LED, i. e., la amplitud de las señales eléctricas decrece al aumentar el número de polarizadores (y su posición, de máxima a mínima transferencia).

IV. DISCUSIÓN

Podemos preguntar:

¿Es el aluminio una fuente de fotones?

Examinamos la evidencia colectada:

Recordando el concepto de radiación Cherenkov, se tiene la producción de fotones cuando una partícula eléctricamente cargada atraviesa un medio dieléctrico con índice de refracción n con velocidad mayor a la velocidad de la luz en el medio. Lo que se tiene en este caso no es medio dieléctrico, sino un metal, por lo que no se tienen las condiciones tradicionales para producir radiación Cherenkov, sin embargo, las características de los resultados obtenidos relacionan la producción de fotones en el metal por la incidencia de un rayo cósmico. Tenemos evidencias de la producción de fotones en el bloque de Aluminio.

V. CONCLUSIONES

Hay evidencia de que fotones se producen en el bloque de Aluminio por incidencia de rayos cósmicos.

Es necesario continuar con las pruebas referentes al análisis de coincidencias para así asegurar que los fotones producidos en el aluminio son debido a la incidencia de rayos cósmicos. Es el siguiente paso a mostrar en el análisis.

En la Figura III.A.2 y Figura III.A.2 se observa que para uno de los fotodiodos, específicamente el Fotodiodo 1, se tiene una amplitud mayor en el caso de dos polarizadores con mínima transferencia que con dos polarizadores con máxima transferencia, la diferencia es de 3 mV, sin embargo, en el Fotodiodo 2 se cumple que la amplitud es menor cuando se tienen dos polarizadores en su mínima transferencia que en su máxima transferencia. Observe que, hasta esta parte, se tiene un resultado equivalente para los dos Fotodiodos en el caso del aluminio, a comparación de los demás materiales.

Una forma de seguir apoyando los resultados obtenidos respecto a que el aluminio tiene los mismos resultados que un

LED sería hacer más pruebas con éstos o mayor número de fotodiodos.

APÉNDICE

E. MPPC Hamamatsu

Multi Pixel Photon Counter es un fotodiodo; un tipo de dispositivo llamado SiPM (silicon photomultipliers). Es un tipo de dispositivo de conteo de fotones, opera al absorber un fotón y producir una corriente eléctrica proporcional a la energía incidente del fotón. Véase la referencia [22], donde se encuentra la hoja de datos del dispositivo.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Partículas Elementales de la Universidad de Guanajuato, lugar donde se realizó todo el proceso referente al proyecto.

A Omar Alejandro Lezama Gallegos, condiscípulo, quien estuvo trabajando paralelamente en una parte del proceso y con quien se tuvo la oportunidad de compartir información valiosa.

REFERENCIAS

- [1] Floratos, Emmanuel. *Introduction to Particle Physics*. PHYSICS DEPT UNIVERSITY OF ATHENS. CERN 9 NOVEMBER 2015. https://indico.cern.ch/event/447008/contributions/1953687/attachment/s/1184942/1717323/ParticlePhysicsFOR_TEACHERS.pdf
- [2] Arthur H. Rosenfeld, George 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 2017 by J.J. Beatty (Ohio State Univ.), J. Matthews (Louisiana State Univ.), and S.P. Wakely (Univ. of Chicago). <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf>
- [5] University of Houston Clear Lake. *Practical Applications of Cosmic Ray Science: Spacecraft, Aircraft, Ground Based Computation and Control Systems and Human Health and Safety*. Spring 2015. Steve Koontz - NASA, Johnson Space Center, Houston, Texas. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150003480.pdf>
- [6] William F. Hanlon. *Cosmic Ray Spectra of Various Experiments*. The University of Utah. <http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>
- [7] Alessandro De Angelis. *Spontaneous Ionization to Subatomic Physics: Victor Hess to Peter Higgs*. INFN Univ. Udine, INAF and LIP/IST LisboaSpacepart. CERN, November 2012. <https://indico.cern.ch/event/197799/contributions/371924/attachments/291924/408037/12SpacepartDeangelis.pdf>
- [8] Nick Murphy. *Cosmic Rays and Particle Acceleration*. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. *Astronomy* 253: Plasma Astrophysics. April 14–16, 2014. https://www.cfa.harvard.edu/~namurphy/Lectures/Ay253_08_ParticleAccel.pdf
- [9] Victor 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/>
- [10] Erika Garutti. *The Physics of Particle Detectors*. Lecture Notes. SS 2012. https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1_Introduction_HEPdetectors.pdf
- [11] Claus Grupen, Boris Shwartz. *Particle Detectors*. Second Edition. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. https://ajbell.web.cern.ch/documents/eBooks/Particle_Detectors_Groupen.pdf
- [12] Prof. Dr. Johanna Stachel. *Detectors in Nuclear and Particle Physics*. Department of Physics and Astronomy. University of Heidelberg. June 26, 2018. <https://www.physi.uni-heidelberg.de/~fschney/detektoren/detector-2018-7.pdf>
- [13] Particle Data Group. *27. Passage of particles through matter*. Revised January 2012 by H. Bichsel (University of Washington), D.E. Groom(LBNL), and S.R. Klein (LBNL). <http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [14] William Frass. *C4: Particle Physics Major Option Particle Detectors*. Oxford Physics. Michaelmas 2009. <https://www2.physics.ox.ac.uk/sites/default/files/Detectors.pdf>
- [15] Particle Data Group. *28. Particle Detectors*. Revised 2006. <http://pdg.lbl.gov/2006/reviews/pardetrpp.pdf>
- [16] Pavel A. Cherenkov. *Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics*. Nobel Lecture, December 12, 1958. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/cerenkov-lecture.pdf>
- [17] Igor E. Tamm. *General characteristics of radiations emitted by systems moving with super-light velocities with some applications to plasma physics*. Nobel Lecture, December 11, 1958. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/tamm-lecture.pdf>
- [18] J. V. Jelley. *Cherenkov radiation and its applications*. United Kingdom Atomic Energy Authority. PERGAMON PRESS. 1958. https://www2.physics.ox.ac.uk/sites/default/files/2013-08-20/external_pergamon_jelley_pdf_18410.pdf
- [19] S. M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of semiconductor device*. Third Edition. Wiley-Interscience.
- [20] Andrea Paloma Cimental Chávez. *Planeación, diseño, construcción, caracterización y pruebas de un detector de rayos cósmicos en base a un gas de electrones de cuatro canales*. Universidad de Guanajuato.
- [21] Raúl Alejandro 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.
- [22] Hamamatsu. *MPPC: Multi Pixel Photon Counter*. Datasheet. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-010_etc_kapd1045e.pdf
- [23] Eljen Technology. *Fast timing plastic scintillator Ej-232Q*. Datasheet. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-232-ej-232q>