

Detección de partículas a nivel de educación básica usando hardware y software libre

P. Patiño Gallego, J. Padóan, y R. Benavides
*Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 N° 76 A-354,
Vía el Volador, Medellín Colombia.*

A. Tapia
*Universidad de Medellín,
Carrera 87 N° 30-65, Medellín, Colombia.*

D. Martínez Caicedo
South Dakota School of Mines and Technology, 501 E St Joseph St, Rapid City, SD 57701, Estados Unidos.

Received 19 May 2020; accepted 27 July 2020

En el presente artículo se demuestra la factibilidad de enseñar los principios básicos de la física experimental de altas energías en instituciones de educación media, usando equipos de bajo costo. Se enfatiza en el uso de hardware y software libre para el estudio de diferentes tipos de radiación. Se construye una caja oscura para analizar la respuesta de un foto-multiplicador de silicio a un pulso de luz.

Descriptores: Foto-sensor; contador Geiger; radiación.

This article demonstrates the feasibility of teaching in secondary education institutions, the basic principles of high-energy experimental physics using low-cost equipment. The use of free hardware and software is emphasized for the study of different types of radiation. A dark box is constructed to study the response of a silicon photo-multiplier to a pulse of light.

Keywords: Photosensor; Geiger counter; radiation.

PACS: 06.20.-f; 01.40.-d; 23.40.-s; 29.40.-n

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.18.56>

1. Introducción

Muchos descubrimientos científicos en física experimental de altas energías se realizan dentro de laboratorios de partículas que poseen una gran infraestructura técnica o también en experimentos desarrollados en diferentes localizaciones en el mundo. Ejemplos de esto son los aceleradores de partículas [1] y el Observatorio Pierre Auger [2]. El método básico de detección de partículas elementales puede enseñarse en distintas facultades de ciencias o instituciones educativas de enseñanza básica a un bajo costo económico para el desarrollo de prototipo de detectores de partículas, con un área activa menor a un metro cuadrado. Estos detectores pueden usar como material activo el plástico centellador y como sistema de detección de luz, los foto-multiplicadores de silicio [3], los tubos foto-multiplicadores [4], entre otros. El desarrollo de estos prototipos tiene el potencial de incrementar la experiencia de los grupos de investigación para contribuir en un futuro cercano en diversos descubrimiento científicos en física de altas energías.

La radiactividad es un proceso que se presenta en núcleos de átomos inestables [5]. Dicho de otra manera, un átomo inestable produce radiactividad para volverse estable. Esta radiación puede ser de tres clases: α , las cuales son poco penetrantes; β son que más penetrantes que las partículas α ; y las γ , que es el tipo más penetrante de radiación. La radiactividad se aprovecha en varias disciplinas como la medicina [6], con aplicaciones en la toma de imágenes diagnósticas, radioterapia y medicina nuclear [6]; en la industria [7], la radiación es utilizada en la esterilización de materiales [8], para hallar

medidas de espesores y densidades [9], etc. Es evidente que la radiación se emplea con mucha frecuencia y que resulta sumamente peligroso exponerse a ella [10,11], por eso es importante tener un dispositivo que ayude a medir la radiación, como es el caso del contador de partículas radiactivas.

En 1908, el físico Hans Geiger fue pionero en crear un dispositivo [12], capaz de detectar diferentes tipos de partículas radiactivas como las partículas α , β y γ [13]. Actualmente este contador se utiliza para determinar la radiactividad presente en distintos lugares, como en reactores nucleares, ambientes contaminados con radiación, hospitales, entre otros, con el propósito de tener sitios seguros de trabajo para las personas. En este artículo se presenta la medida de la actividad de una fuente radiactiva, se usa el estroncio 90 (^{90}Sr) sin obstáculo y luego se usa un material que obstaculice la interacción entre la fuente y el detector, para determinar la atenuación de la radiación a través del material. Se estudia la atenuación en función de la distancia de la fuente al sensor de radiación y del grosor del material seleccionado; en este caso, se utilizaron diferentes cantidades de hojas de papel. La adquisición de datos fue realizada con el contador Geiger de marca SparkFun [14] y se controla con la interfaz de Arduino [15]. Se implementó un código de programación en Arduino para realizar un conteo del número de partículas por minuto emitidas por la fuente. Los resultados preliminares se comparan con los obtenidos usando el contador Geiger de la marca Phywe [16].

La detección y el análisis de partículas de alta energía como las producidas en los aceleradores de partículas o las que provienen del cosmos, conocidas como rayos cósmi-

cos [17,18], son campos de investigación muy activos en la física experimental de altas energías. Una de las partículas elementales más estudiadas son los llamados muones [19,20], los cuales producen luz cuando interactúan con material centellador (esto será estudiado en un próximo trabajo), que mediante el uso de dispositivos de detección, llamadas foto-sensores, obtienen una señal analógica o eléctrica que puede digitalizarse mediante alguna tarjeta. En este trabajo se utilizará una caja oscura para la detección de este tipo de partículas usando un dispositivo foto-sensor de Silicio (SiPM, del inglés Silicon Photomultiplier) [3,21], luego se observa la señal en un osciloscopio, de tal manera que los estudiantes adquieran este conocimiento para luego aplicarlo en la detección de partículas como en los grandes experimentos, ya sea que provengan de fuentes naturales ó artificiales.

Este artículo presenta una propuesta pedagógica de diferentes experimentos para la detección de partículas, pruebas para la caja oscura y manejo de foto-sensores. Se utiliza software y hardware libre [22], lo cual es cada vez más común en los procesos de enseñanza-aprendizaje. El artículo está estructurado de la siguiente manera: En la Sec. 2 se muestra la detección de partículas que provienen de la fuente radiactiva ^{90}Sr [23] usando dos diferentes marcas de contador Geiger, uno de ellos controlado por Arduino [15], con los cuales se comprueba la atenuación del flujo de partículas en función de la distancia y a través de la materia [24]. En la Sec. 3 se explica la construcción de una caja oscura [25] con el objetivo de aislar al foto-sensor de cualquier interferencia electromagnética [26]. En la Sec. 4 se explica a detalle la respuesta del SiPM a una fuente de luz LED con longitud de onda en el rango visible. Finalmente, en la Sec. 5 se presentan las conclusiones del artículo.

2. Contador Geiger

Como ya se mencionó, el primer detector de partículas α fue elaborado por el físico Hans Geiger en 1908 en colaboración con Rutherford y lo llamaron “Contador Geiger”; este trabajo condujo a la teoría nuclear del átomo [12]. En 1928, en la Universidad de Kiel, Alemania, Geiger y su estudiante Walther Müller mejoraron el dispositivo en cuanto a sensibilidad, rendimiento y durabilidad del contador. Con esta modificación, el contador podía detectar partículas α , β y un mayor número de radiaciones ionizantes. A este dispositivo se le nombró “Contador Geiger Müller” el cual es la versión actual de dicho contador [12].

Este contador consiste en un tubo que se encuentra lleno de gases, los cuales pueden ser Helio, Neón, Argón y en algunos casos una mezcla de un vapor orgánico o un gas halógeno. El contador está compuesto por un alambre de tungsteno que pasa por el centro del tubo. Cuando la radiación ionizante atraviesa el tubo, las moléculas del gas se ionizan, produciendo una corriente por el alambre, la cual puede medirse. El hilo de tungsteno va conectado a un amplificador, el cual puede conectarse a un contador electromagnético, que proporciona el número total de pulsos, o tam-

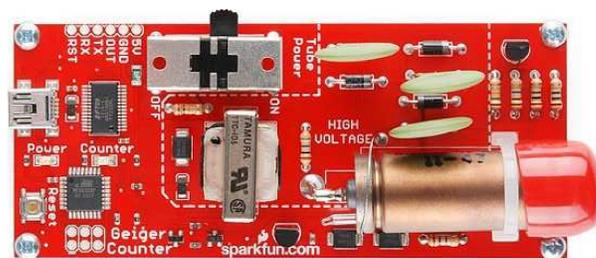


FIGURA 1. Contador Geiger, marca SparkFun, modelo LDN 712.

bién a un integrador que registra la tasa de conteo, expresada generalmente en cuentas por minuto.

Para este proyecto, se utiliza un contador Geiger de la marca SparkFun, presentado en la Fig. 1, el cual consta de un tubo Geiger modelo LDN 712 [27]. El interior del tubo contiene gas de Neón (Ne), capaz de detectar partículas tanto α , β y γ . El contador está construido con material de mica y trabaja con un voltaje aproximado de 500 V, el cual se alcanza gracias al circuito integrado de alto voltaje que se encuentra en la tarjeta del contador. Un LED de color verde indica el conteo de partículas, debido a que la señal del tubo se envía a un integrado que registra el conteo de partículas radiactivas que atraviesan el tubo, encendiendo el LED.

Como interfaz se utiliza un micro-controlador de Arduino, modelo DUE, que aparece en la Fig. 2, con el cual se realiza el experimento de la atenuación de partículas en función de la distancia y para la atenuación de partículas con función del grosor se utiliza un Arduino modelo UNO [15], para mostrar que con ambos modelos se obtiene la curva característica de atenuación.

Para verificar el funcionamiento del contador Geiger SparkFun, este se conecta a través del puerto USB de un computador, para encenderlo se mueve el switch a ON y se comprueba que el LED de conteo parpadea en presencia de radiactividad. Luego se procede a conectar el Sparkfun con el Arduino y a realizar el código de programación en la interfaz de Arduino para hacer un conteo de partículas por minuto, lo cual es visualizado en la pantalla del computador.

La tarjeta del contador Geiger SparkFun posee unos pines en los cuales se encuentra: El pin de salida (OUT), que es el

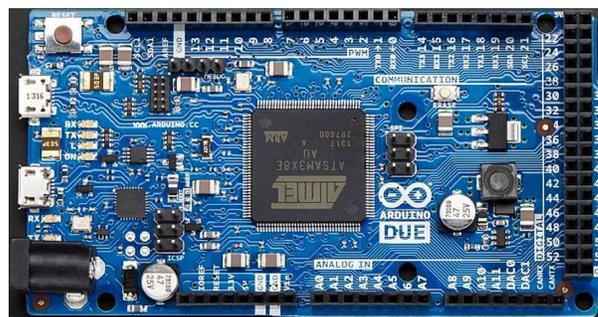


FIGURA 2. Microcontrolador Arduino DUE, utilizado para conectar el contador Geiger.

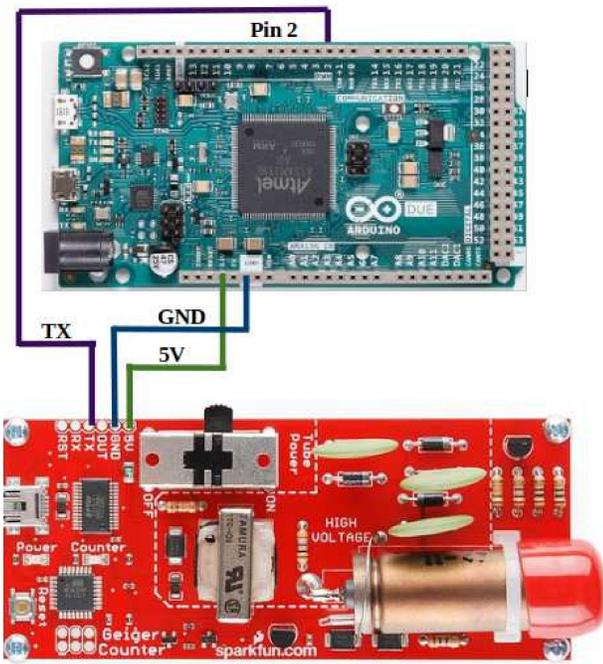


FIGURA 3. Conexiones entre el contador Geiger SparkFun y Arduino DUE.

pin de señal del contador; este se conecta al Arduino DUE, que recibirá la señal del contador y procesará el conteo de partículas por minuto. Las conexiones se realizan como se muestra en la Fig. 3.

La visualización del conteo de partículas se realiza por medio de la interfaz al computador, la cual se activa desde el software Arduino (en la barra superior, se da clic en la pestaña de Herramientas y se selecciona Monitor Serie).

También se utilizó un contador Geiger marca Phywe mostrado en la Fig. 4, que consta de una pantalla LED de 4 dígitos, con 5 tiempos de medición y de un adaptador para la conexión del tubo. El tubo está montado en un cilindro de metal que detecta radiación α , β y γ . Para las mediciones, el tubo se coloca frente a la muestra radiactiva, se selecciona el tiempo que se desea para la medición y se inicia el contador. Después del tiempo programado, emite un sonido para indicar que ha terminado de contar y muestra las cuentas en la pantalla.



FIGURA 4. Contador marca Phywe, tubo y su forma de utilizar con la fuente [16].



FIGURA 5. Fuente radiactiva ^{90}Sr .

La fuente radiactiva de ^{90}Sr emite radiación β^- [28] al realizar la transición del ^{90}Sr hacia el Itrio 90 (^{90}Y) [23]. En la Fig. 5 se puede observar una imagen de la fuente radiactiva de ^{90}Sr usada en este estudio. La fuente se encuentra encapsulada en un contenedor de protección radiactiva, puesto que es una fuente de emisión preferencial. Por ser radiaciones ionizantes, al interactuar con el organismo pueden provocar diferentes alteraciones debido a la ionización provocada en los elementos constitutivos de sus células y tejidos. Los efectos pueden variar dependiendo de factores como: tipo de radiación, cantidad de exposición, tasa de exposición y zona del cuerpo irradiada. Por esta razón es importante tomar medidas de radioprotección para evitar en todo momento una interacción directa con el extremo activo, es decir, no direccionando el flujo hacia el cuerpo humano. Además se debe cumplir con la normatividad impuesta por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia [29].

2.1. Atenuación de partículas β en función de la distancia de detección

Para la toma de datos se realizan mediciones colocando la fuente radiactiva a diferentes distancias en el rango de 0 a 8 cm del contador Geiger SparkFun. Las distancias fueron tomadas con pasos de 0.5 cm y en cada una se realiza la lectura de datos por minuto cierta cantidad de veces con el objetivo de calcular el valor medio y el respectivo error estadístico de cada medición. Este procedimiento se repitió para el contador Geiger-Müller de marca Phywe [16], esta vez con pasos de 1 cm, y al final se compararon los resultados obtenidos entre ambos contadores. Los errores sistemáticos no son tomados en cuenta para este análisis. Los resultados se muestran en la Fig. 6.

Con el contador Geiger de marca Phywe no fue posible tomar medidas entre 0 y 1.5 cm, debido a que el dispositivo únicamente toma lecturas hasta valores de 4 dígitos como

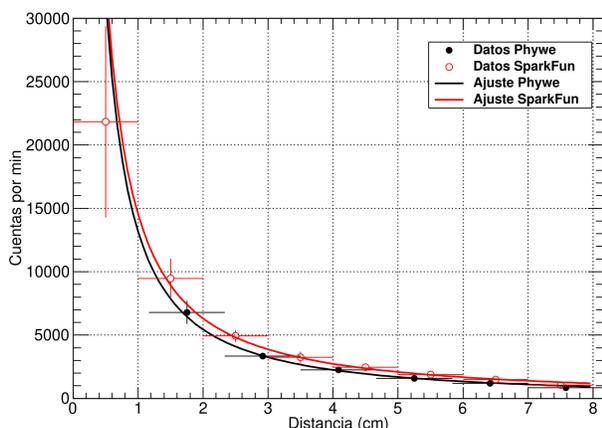


FIGURA 6. Gráficas de las cuentas por minuto en función de las distancias medidas desde la fuente de ^{90}Sr al contador SparkFun y Phywe.

máximo y la fuente de ^{90}Sr a esas distancias emite cuentas mayores que el valor máximo.

Las barras de error en el eje Y son las desviaciones estándar del bin y en el eje X son el ancho de cada bin. De las gráficas se puede apreciar que a mayor distancia, menor es el número de cuentas por minuto. Para tener un mayor entendimiento del comportamiento matemático de los datos, cada una de las gráficas se ajusta a una función de la forma $f(x) = ax^{-b}$, donde a es el factor de normalización y b es el parámetro de ajuste. Para el caso del contador SparkFun, el mejor ajuste que describe los datos corresponde a un valor de $b = 1.204 \pm 0.054$ con $\chi^2/\text{ndf} = 1.1$. Para el contador Phywe, el mejor ajuste que describe los datos corresponde a un valor de $b = 1.273 \pm 0.025$ con $\chi^2/\text{ndf} = 2.6$. Los errores reportados son únicamente estadísticos.

2.2. Atenuación de partículas β en función del grosor de un material absorbente

Se realiza un segundo experimento para estudiar la atenuación de partículas en función del grosor de un material. Este consiste en colocar hojas de papel tamaño estándar A4 con grosor de ~ 0.1 mm como obstáculo al paso de la radiación. A modo de aclaración, estos dos experimentos se realizaron con una diferencia en tiempo de un año y desafortunadamente no con los mismos instrumentos de medición, a causa de problemas logísticos de los laboratorios; sin embargo, esto no influye con el objetivo de mostrar la atenuación de partículas a través un material. Lo anterior se realiza de la siguiente forma:

Se coloca el contador Geiger SparkFun a 6 cm de la fuente radiactiva y el material absorbente se ubica la mitad, sostenido por un soporte de laboratorio, es decir, a 3 cm tanto de la fuente como del contador. Posteriormente, se colocarán hojas de papel alternadas a cada lado de la primera hoja para tener una variación del grosor del material absorbente.

Con los datos se obtiene la Fig. 7, la cual muestra la atenuación de la radiación a medida que atraviesa un determinado número de hojas de papel (se inicia con 30 hojas, pues el

grosor de un número interior no permite

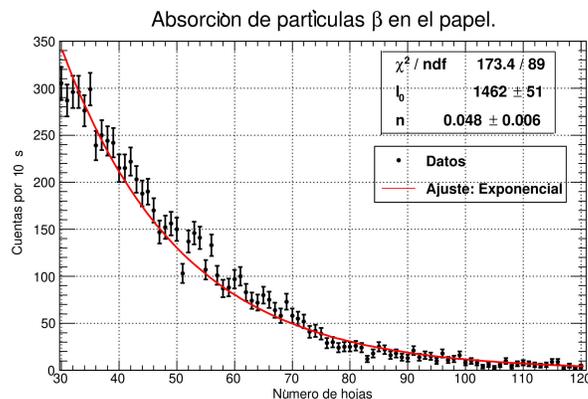


FIGURA 7. Funcional de la absorción de partículas β a través del papel. Donde $I(0)$ se da en cuentas por unidad de tiempo y n en número de hojas $^{-1}$.

diferenciar las lecturas y por ende realizar un proceso estadístico adecuado). Teóricamente, el comportamiento de atenuación de la radiación con el grosor del material absorbente es descrito con la ecuación [24],

$$I = I_0 e^{-nt}, \quad (1)$$

donde I es el flujo de partículas detectadas con material, medido en cuentas por unidad de tiempo. I_0 es el flujo de partículas detectadas sin material. Medido en cuentas por unidad de tiempo. t es el grosor del material absorbente, medido en número de hojas. Con la equivalencia 1 hoja = $4.98 \text{ g}/623.7 \text{ cm}^2$; n es el coeficiente de absorción del material, en unidades inversas a las de t .

Si se considera el anterior modelo, en la Fig. 7 se realiza un ajuste de los datos con una función exponencial, la cual arroja que $\chi^2/\text{ndf} = 1.95$.

3. Caja Oscura

Se construyó una caja oscura con el objetivo de crear un ambiente donde no se permita el paso de la luz hacia el interior de la caja. De esta forma se garantiza que la única señal que llega al foto-sensor SiPM MICROFC-60035-SMT-TR1 [30] sea de la fuente lumínica que estará con él dentro de la caja oscura. Su diseño se hizo en forma de LEGO, con canaletas, como se puede observar en la Fig. 8, para que permita armarse y desarmarse fácilmente, lo cual favorece su transportación en caso de que se requiera hacer medidas en campo abierto o en lugares fuera del laboratorio [25].

Una vez hecho el diseño, la caja oscura es construida usando madera tipo MDF (del inglés Medium Density Fibreboard) [31], con dimensiones de $130 \times 15 \times 15$ cm (ver Fig. 9). Las dimensiones de la caja se determinaron con el objetivo de realizar un trabajo futuro donde se introducirá una barra de plástico centellador de 1 m de longitud en la caja oscura y esta barra se conectará al SiPM como sistema de lectura electrónico. Después de construida, la caja fue pintada en su interior de color negro para evitar la reflexión de la luz (ver

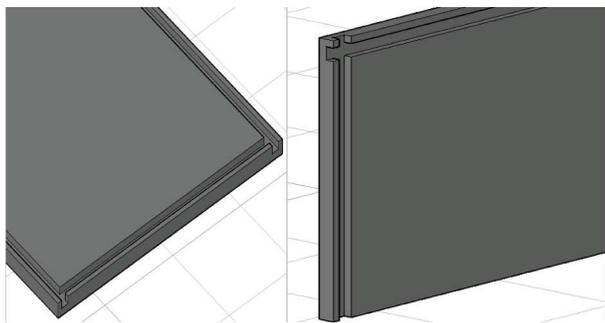


FIGURA 8. Diseño de la caja oscura.

FIGURA 9. Caja oscura construida con material MDF; con dimensiones $130 \times 15 \times 15$ cm.

Fig. 9 izquierda). A continuación se realizan pruebas de aislamiento de luz externa usando una foto-celda [32] y un sensor de luz TSL2561 [26]; para recolectar la información dada por el sensor y poder leerla en la computadora se usa la interfaz de Arduino [15]. De esta manera, al no recibir señal en el sensor, se puede verificar la eficiencia de la caja oscura. En la Fig. 10 se muestra la conexión del sensor de luz TSL2561 a Arduino.

El código de programación utilizado para la lectura de la información del sensor está disponible desde el administrador de la biblioteca Arduino, para esto se debe instalar la librería Adafruit TSL2561 [33].

Después de comprobar que la caja oscura es un buen aislante de luz externa, se introduce en ella un LED de color

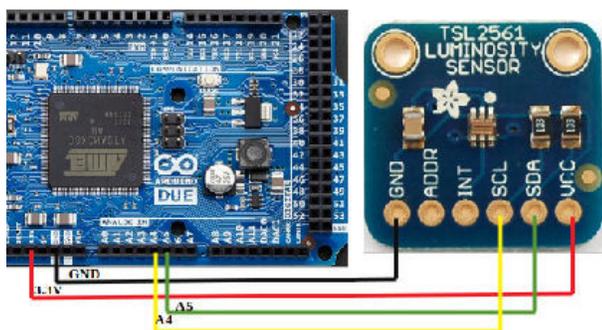


FIGURA 10. Conexiones entre el sensor TSL2561 y la interfaz Arduino DUE.

azul al cual le corresponde una longitud de onda de 385 nm, para la cual se tiene mayor eficiencia de detección al usar el SiPM MICROFC-60035-SMT-TR1 [3]. El LED tiene libre movimiento para poder determinar la atenuación que sufre la señal recibida por el SiPM a medida que la distancia de separación entre los dos dispositivos aumenta.

4. Foto-multiplicador de Silicio (SiPM)

El foto-multiplicador de Silicio es un foto-sensor de estado sólido, compuesto por una distribución de foto diodos de avalancha (APD) operando en modo Geiger, con una ganancia de 10^6 y con tiempo de respuesta de aproximadamente de 30 ps por cada 10 foto-electrones, además, posee bajo ruido y alta eficiencia en la detección de fotones [3]. Cuando los APD trabajan en polarización inversa, es decir, cuando están polarizados a voltajes menores del de ruptura, guardan la proporcionalidad entre la señal producida y la energía depositada en el detector. Sin embargo, cuando el voltaje de alimentación es superior al voltaje de ruptura se pierde dicha proporcionalidad y se dice que está operando en modo Geiger. Cada pixel genera un pulso de salida por cada fotón detectado y la suma de las señales producidas en todas los pixeles conectados en paralelo es la señal del SiPM, la cual es una señal de amplitud proporcional al número de fotones detectados [34]. Para la operación del SiPM, primero se fabrica una placa de circuito sencillo para manipular con mayor facilidad los pines del SiPM [21] (ver Fig. 11). El SiPM usado en este trabajo tiene un voltaje de operación de corriente continua entre 25.2 y 29.7 V. La fuente de voltaje usada fue MHC-305D-II [35]; una vez suministrado el voltaje al SiPM, y mediante el uso del LED se genera un pulso de luz que es detectado por el SiPM, el cual está conectado a un osciloscopio por su pin de salida, para visualizar la señal.

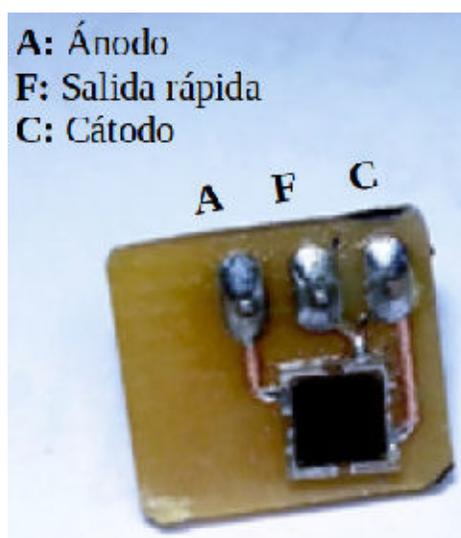


FIGURA 11. Placa de circuito sencillo donde se conecta el SiPM. A, F y C son los pines del ánodo, salida rápida y cátodo, respectivamente.

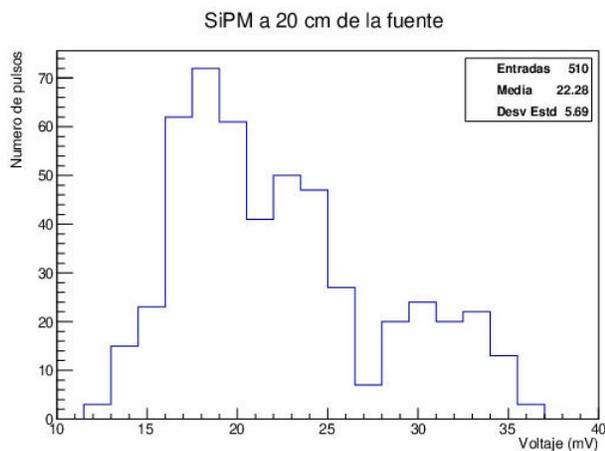


FIGURA 12. Distribución de voltaje para 510 pulsos de lectura del SiPM a una distancia de 20 cm con respecto al LED.

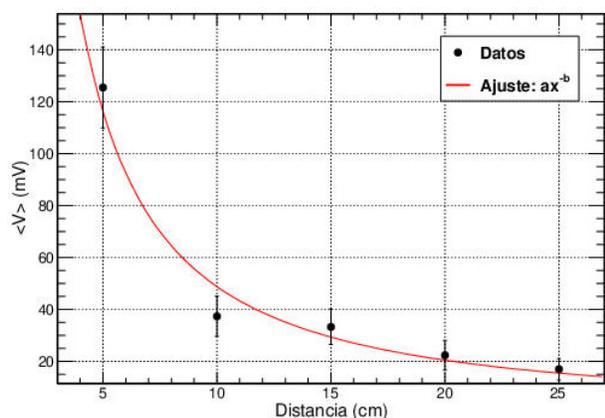


FIGURA 13. Valores medios de los voltajes de los pulsos medidos con el SiPM en función de la distancia entre el LED y el SiPM. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de la respectiva distribución de voltaje para cada distancia.

Para controlar que el LED se encienda y apague con determinada frecuencia, se escribe un breve código de programación en Arduino, de esta manera se aseguran las mismas condiciones de frecuencia al realizar las mediciones. El pulso LED generado tiene un ancho de 312 nanosegundos y una frecuencia de repetición de 10,000 kHz.

Con el SiPM se tomaron medidas de 510 pulsos por cada distancia (5, 10, 15, 20, 25 cm) con un voltaje de alimentación de 25.3 V. Como un ejemplo de la toma de medidas de estos 510 pulsos en función de la distancia, en la Fig. 12 se muestra la distribución de la amplitud de la señal de salida del SiPM en milivoltios para los 510 pulsos a una distancia de 20 cm medida desde el SiPM al LED.

De cada histograma de voltaje de los pulsos detectados en el SiPM se extrae el valor medio y su desviación estándar

para cada distancia, y con estos valores se obtiene la Fig. 13. Los valores medios brindan una idea de la intensidad de luz, que en promedio llega al SiPM para cada una de las distancias, es decir, que a medida que la fuente de luz se aleja del SiPM, se espera una menor intensidad de luz. Para tener un mayor entendimiento del modelo teórico que describa los datos obtenidos, se realiza un ajuste con una función de la forma $f(x) = ax^{-b}$, donde a es el factor de normalización y b es el parámetro de ajuste. El mejor ajuste que describe los datos corresponde a un valor de $b = 1.255 \pm 0.153$ con $\chi^2/ndf = 1.03$.

5. Conclusiones

Se muestra de una manera sencilla, pedagógica y de bajo costo, la manera de estudiar el comportamiento de fuentes radiactivas, haciendo uso de software y hardware libre. Se evidencia que el flujo de partículas radiactivas decrece con la distancia siguiendo una función de comportamiento potencial. Dicha experiencia también se realizó con un equipo más sofisticado de la marca Phywe con el propósito de comparar los resultados. El valor de χ^2/ndf , para el contador Spark-Fun y Phywe, es de 2 y 1.3, respectivamente. Además, se demostró cómo el flujo de partículas β^- es absorbido por una barrera (hojas de papel) y responde a una atenuación de la forma exponencial, cuyo resultado está acorde con lo esperado teóricamente. Para mejorar la lectura de la señal de los fotosensores, se construyó una caja oscura y se demostró cómo construirla de tal manera que la luz quede completamente bloqueada. Se comprueba el correcto funcionamiento del SiPM, con la ayuda de una fuente de luz LED de color azul en el rango en el que se encuentra la mayor eficiencia del foto-sensor y se verifica también que la intensidad de la señal recibida disminuye con la distancia, en forma de una función potencial. Los resultados obtenidos demuestran el funcionamiento básico de algunos de los foto-detectores usados en los experimentos de altas energías, lo cual permite que los estudiantes de educación básica se capaciten en este tipo de tecnologías.

Agradecimientos

Se agradece al proceso de formación joven investigador del ITM por el soporte brindado y al centro de laboratorios integrados de investigación, parque i-ITM. También se agradece al Prof. Luis Nuñez de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por la barra centelladora facilitada para futuras investigaciones relacionadas con este trabajo.

1. R. L. Murray, y K. E. Holbert, *Particle accelerators, in Nuclear Energy* (Elsevier, 2020) pp. 143.
2. P. A. Collaboration, The pierre auger cosmic ray observatory, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **798** (2015) 172. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.058>
3. P. Buzhan *et al.*, *The Advanced Study Of Silicon Photomultiplier, in Advanced Technology and Particle Physics* (Word Scientific, 2002). <https://doi.org/10.1142/9789812776464.0101>
4. Hamamatsu, *Photomultiplier tubes, basic and applications* (2020).
5. R. L. Murray, y K. E. Holbert, *Radioactivity, in Nuclear Energy* (Elsevier, 2020) pp. 33.
6. S. Braccini, *Particle accelerators and detectors for medical diagnostics and therapy* (2016), arXiv:1601.06820 [physics.med-ph].
7. G. A. Johansen, *Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements* (Wiley Series in Measurement Science and Technology) (Wiley, 2004).
8. M. Haji-Saeid, M. H. O. Sampa y A. G. Chmielewski, Radiation treatment for sterilization of packaging materials, *Radiation Phys. Chemis.* **76** (2007) 1535. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.02.068>
9. E. Nazemi, M. Aminipour, A. Olfateh, S. Golgoun y M. Davarpanah, Proposing an intelligent approach for measuring the thickness of metal sheets independent of alloy type, *Applied Radiation and Isotopes* **149** (2019) 65. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.03.023>
10. E. C. Lin, *Radiation risk from medical imaging, Mayo Clinic Proceedings* **85** (2010) 1142. <https://doi.org/10.4065/mcp.2010.0260>
11. H. Goldschmidt, *Chronic radiation effects and radiation protection, in Modern Dermatologic Radiation Therapy* (Springer New York, 1991) pp. 37.
12. M. A. Shampo, R. A. Kyle y D. P. Steensma, Hans geigergerman physicist and the geiger counter, *Mayo Clinic Proceedings* **86** (2011) e54. <https://doi.org/10.4065/mcp.2011.0638>
13. D. Jha, *Radioactivity and Radioactive Decay* (Discovery Publishing Pvt.Ltd, 2020).
14. Sparkfun.com, Sparkfun geiger counter (2020).
15. Arduino.cc, Arduino home (2020).
16. leermiddelen.be, Teslameter, digital 220/230v-phywe- 13610-93 (2020).
17. R. Schlickeiser, *Cosmic Ray Astrophysics* (Astronomy and Astrophysics Library) (Springer, 2013).
18. P. Carlson y A. De Angelis, Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays, *Eur. Phys. J. H.* **35** (2011) 309. <https://doi.org/10.1140/epjh/e2011-10033-6>
19. P. Galison, The discovery of the muon and the failed revolution against quantum electrodynamics, *Centaurus* **50** (2008) 105. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0498.2008.00103.x>
20. A. Vesga-Ramírez *et al.*, *Muon tomography sites for colombian volcanoes* (2017), arXiv:1705.09884 [physics.geo-ph].
21. C. Piemonte y A. Gola, Overview on the main parameters and technology of modern silicon photomultipliers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **926** (2019) 2. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.119>
22. J. M. Pearce, *Introduction to open-source hardware for science, in Open-Source Lab* (Elsevier, 2014) pp. 1.
23. M. M. Bé *et al.*, *Monographie bipm-5 table of radionuclides* (2006).
24. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (Wiley, 2010) pp. 45.
25. M. Platino *et al.*, AMIGA at the auger observatory: the scintillator module testing system, *Journal of Instrumentation* **6** (06), P06006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/06/P06006>
26. Alldatasheet.com, Tsl2561 datasheet (pdf) - texas advanced optoelectronic solutions (2020).
27. Sparkfun.com, 712 end window-alpha-beta-gamma detector (2020).
28. G. Turkington, K. A. Gamage, y J. Graham, Beta detection of strontium-90 and the potential for direct in situ beta detection for nuclear decommissioning applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **911** (2018) 55. DOI: 10.1016/j.nima.2018.09.101
29. *Ministerio de Minas y Energía*, Resolución No. 18 1434 (2002).
30. M. Electronics, *Psilicon photomultipliers* (sipm), lownoise, blue-sensitive (2020).
31. C. I. de Campos y F. A. R. Lahr, Caracterización Del MDF Producido a Partir De Eucalipto y Adhesivo Poliuretano Naturalo, Maderas. Ciencia y tecnología **6**, 10.4067/s0718-221x2004000100006 (2004). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2004000100006>
32. Electronicoscaldas.com, Gl55 series photoresistor (2020).
33. GitHub, Tsl2561-arduino-library (2020).
34. A. Etxebeste, *Caracterización y modelización de detectores basados en la tecnología Cristal Continuo/SiPM para escáneres de tomografía por emisión de positrones.*, Master's thesis, Instituto de Física Corpuscular, IFIC (2011).
35. E. Instrumentacion and F. MCH-305DII, Fuentes: Fuente de alimentación mch-305dii (2020).