



*Centelladores plásticos orgánicos para detección de muones: una revisión*

*Muon detection using plastic organic scintillators: a review*

*Cintiladores de plástico orgânico para detecção de múon: uma revisão*

Caterine Yesenia Carrasco-Montesdeoca <sup>I</sup>  
[ccarrasco@yachaytech.edu.ec](mailto:ccarrasco@yachaytech.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-5704-5563>

María Fernanda Heredia-Moyano <sup>II</sup>  
[mariaf.heredia@esPOCH.edu.ec](mailto:mariaf.heredia@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-0145-2098>

**Correspondencia:** [ccarrasco@yachaytech.edu.ec](mailto:ccarrasco@yachaytech.edu.ec)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Revisión

\***Recibido:** 01 de octubre de 2021 \***Aceptado:** 20 Noviembre de 2021 \* **Publicado:** 30 de Diciembre de 2021

- I. Máster en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Biofísica, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay, Ecuador.
- II. Máster en Física, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

## Resumen

Los muones tienen la misma carga negativa que los electrones pero 200 veces más en proporción a la masa de los electrones, se forman cuando las partículas de alta energía llamadas rayos cósmicos chocan contra los átomos de la atmósfera de la Tierra viajando a una velocidad cercana a la de la luz, éste tipo de partículas pueden atravesar cientos de metros de material sólido antes de ser absorbidas, su omnipresencia y poder de penetración hace que sean perfectos para obtener imágenes de objetos grandes y densos sin dañarlos, por lo que la necesidad de detectores de muones es obvia ya que las cascadas atmosféricas consisten principalmente en muones cuando alcanzan la superficie de la tierra, proporcionando en muchos modelos teóricos una firma característica para la nueva física. De esta manera, el presente trabajo tiene la finalidad de describir brevemente a través de la metodología de revisión bibliográfica a los centelladores plásticos orgánicos, como detectores de muones, debido a que presentan características de bajos costos y mayor eficiencia en la obtención de resultados. En esta investigación también se estudia el funcionamiento físico de este tipo de detectores y las condiciones que deben tener para actuar como detectores ideales de detección.

**Palabras Clave:** Astrofísica; física; centelladores plásticos; ciencia de materiales; muones

## Abstract

Muons have the same negative charge as electrons but 200 times more in proportion to the mass of the electrons, these are formed when high-energy particles called cosmic rays collide with atoms in Earth's atmosphere traveling at close to the speed of light, this type of particle can pass through hundreds of meters of solid material before being absorbed. Its omnipresence and penetrating power make them perfect to get large and dense images of objects without damaging them. Therefore, the need for muon detectors is obvious since air showers atmospheric consists mainly of muons when these reach the earth's surface, providing in many theoretical models a characteristic signature for the new physics. In this way, the present research work has the purpose of briefly describe through the literature review methodology the organic plastic scintillators as muon detectors, due to their present low-costs characteristic and greater efficiency for obtaining results. In this research it is also studied the physical operation of this type of detectors and the conditions they should have to act as ideal detectors for detection

**Key words:** Astrophysics; physics; plastic scintillators; science materials; muons

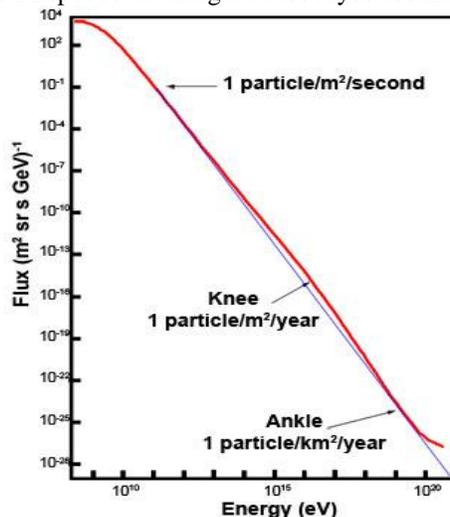
## Resumo

Os múons têm a mesma carga negativa que os elétrons, más 200 vezes mais em proporção à massa dos elétrons, eles são formados quando partículas de alta energia chamadas de raios cósmicos colidem com átomos na atmosfera da Terra viajando a uma velocidade próxima à da luz, deste tipo de partículas podem passar por centenas de metros de material sólido antes de serem absorvidas, sua onipresença e poder de penetração os tornam perfeitos para a obtenção de imagens de objetos grandes e densos sem danificá-los, razão pela qual a necessidade de detectores de múons é óbvia, uma vez que as cascadas atmosféricas consistem principalmente de múons quando atingem a superfície da terra, fornecendo em muitos modelos teóricos uma assinatura característica para a nova física. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo descrever resumidamente os cintiladores plásticos orgânicos, como detectores de múons, por meio da metodologia de revisão de literatura, devido ao fato de apresentarem características de baixo custo e maior eficiência na obtenção de resultados. Esta pesquisa também estuda o funcionamento físico desse tipo de detectores e as condições que eles devem ter para atuar como detectores ideais para detecção.

**Palavras-chave:** Astrofísica; físico; cintiladores de plástico; Ciência de materiais; múons

## Introducción

La detección de la radiación resulta ser de gran importancia dentro de diferentes campos de aplicación como: la medicina, la física de altas energías, la seguridad industrial y ambiental entre otras. Los rayos cósmicos son básicamente partículas de alta energía que viajan hacia nosotros desde la galaxia. Aproximadamente los rayos cósmicos detectables comienzan con energías de aproximadamente 1 GeV [1,2]. El espectro de energía de los rayos cósmicos puede ser explicado por la ley de potencias con un empinamiento detectable un poco por debajo de  $10^{15}$  eV llamado rodilla y un aplanamiento por encima de  $10^{18}$  eV llamado tobillo [3,4], como se muestra en la figura 1.

**Fig. 1** Espectro de energía de los rayos cósmicos[5]

Posiblemente la forma de ley de potencia inversa del tipo  $\alpha E^{-\gamma}$ , es el resultado de procesos de aceleración de rayos cósmicos que involucran la aceleración progresiva en campos magnéticos por interacciones de las partículas con ondas de choque remanentes, por ejemplo, en una explosión de supernovas. Los rayos cósmicos de alta energía interactúan con la atmósfera, para luego dar origen a un efecto de multiplicación y propagación hasta alcanzar el suelo, las partículas secundarias se desvían de su trayectoria, originando una forma de cascada de rayos cósmicos también llamada como cascadas atmosféricas extensas (EAS) [6].

El muon es una partícula que interactúa débilmente, generalmente continúa su camino hacia el nivel del mar, los piones neutros se descomponen inmediatamente en pares de rayos gamma que dan inicio a la ducha electromagnética y producen electrones y positrones mediante el proceso de *bremsstrahlung* y además producen rayos gamma [7,8]. En el mar, hay principalmente tres componentes: primero, el componente muónico que es una partícula altamente penetrante y se produce en la atmósfera, segundo, el componente electromagnético en el que se producen electrones, positrones y rayos gamma y tercero es un componente hadrónico [9], éstas partículas están directamente asociadas con la partícula primaria de rayos cósmicos.

Muchos muones son producidos por partículas primarias de muy baja energía cuyos componentes electromagnéticos mueren en la atmósfera. El resultado es por el gran flujo a nivel del suelo

existente [4], su flujo en el nivel del mar es de aproximadamente una partícula por cm cuadrado por minuto.

Para detectar las partículas primarias antes de que tenga lugar la interacción, se han utilizado los experimentos de satélite y globo conocido como el método de detección directa. A nivel del suelo, estas partículas se detectan utilizando grandes conjuntos de detectores que detectan muchas partículas secundarias al mismo tiempo [4]. Se utilizan principalmente dos métodos, la detección de la fluorescencia del aire, en la que las partículas cargadas en la cascada provocan la excitación (ionización) de las moléculas de aire que emiten luz de una longitud de onda característica. La intensidad de la fluorescencia proporciona información sobre la energía primaria, éste método se utiliza para localizar la energía de la cascada y el tipo de partícula primaria. El otro método es la detección de muones, electrones y fotones utilizando detectores de centelleo. A partir de esta partícula secundaria se recopilan los datos que son utilizados para reconstruir los parámetros primarios. Estos se denominan métodos de detección indirecta porque en estos métodos las partículas primarias no se han detectado directamente sino mediante la reconstrucción [10]. El telescopio de muones es la base de muchos estudios avanzados [4].

Utilizar centelladores plásticos y fotomultiplicadores de silicio (SiPM) como método para la detección de muones resulta ser rentable y barato, además presentan propiedades como elevada versatilidad, eficiencia y entrega de mejores resultados a la hora de toma de datos, debido a que se puede medir el número de muones que atraviesan al centellador plástico, por medio del destello de luz que se produce y es medida la intensidad de los fotones ópticos por fotomultiplicadores, para dar como respuesta impulsos eléctricos, [11].

En este artículo de revisión bibliográfica se describen brevemente a los muones y se puntualiza a los centelladores plásticos orgánicos, además se describe el mecanismo de detección y se mencionan los costos y beneficios que ofrecen este tipo de centelladores en comparación de centelladores plásticos inorgánicos.

## **Muones**

Los muones son el resultado de la interacción de los rayos cósmicos primarios con los componentes de la atmosfera, son partículas elementales que no se descomponen en otras partículas, continuamente pierden energía causada entre la ionización, perdiendo toda la energía restante en su paso a través de la materia, constan de un espín semi-entero, como es el fermión, al

igual que el electrón, presentan gran capacidad de atravesar la materia, siendo capaces de atravesar rocas a unos cuantos metros antes de detenerse, su masa es 200 veces mayor que la del electrón aproximadamente  $0,106 \text{ GeV}$  [1,11].

Las imágenes de transmisión de muones han ayudado a descubrir cámaras ocultas en las pirámides de Egipto y determinar las profundidades de los túneles subterráneos que necesitan direccionamiento, pero pueden ser demasiado sensibles para mediciones invasivas. Las cámaras de magma también se mapean utilizando imágenes de transmisión de muones. El mapeo de las cámaras de magma ayuda a predecir erupciones volcánicas, como el proyecto Mu-Ray del Instituto Nacional Italiano de Física Nuclear que se dedican a mapear las cámaras dentro del Monte Vesubio con la esperanza de predecir su próxima erupción [12].

### **Centelladores Plásticos**

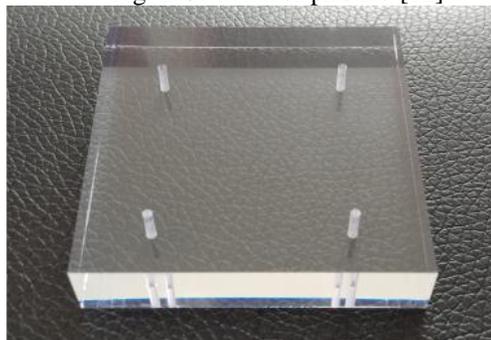
Los centelladores plásticos son un tipo de polímero especial que emiten un pequeño destello de luz dentro de un cierto rango de longitud de onda, figura 4. Éste fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando un gran número de moléculas y átomos, los cuales, al volver a su estado fundamental, se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible. El rango de destello también se conoce como rango de pico. La capacidad del centellador plástico para reflejar luz tanto como sea posible es muy importante, debido a que la luz emitida se encauza hacia el fotodetector, una vez allí el fotocátodo del fotomultiplicador absorbe los fotones y emite fotoelectrones, que serán magnificados en el orden de  $10^6$ , produciendo una corriente eléctrica del fotomultiplicador que es procesada electrónicamente en una etapa analógica y después en una etapa digital.

Una de las características de los centelladores plásticos es la necesidad de que los lados paralelos a la radiación incidente sean lisos para garantizar una alta reflexión de la luz con mayor precisión detectable para el fotomultiplicador (PMT) [12].

Los materiales plásticos de centelleo se utilizan actualmente para la detección pasiva de materiales nucleares, principalmente en los monitores de portal de radiación [13], además los centelladores de plástico presentan menores costos de fabricación a comparación de los centelladores plásticos disponibles comercialmente en la actualidad. Los centelladores plásticos resultan ser una excelente alternativa para detectar muones, debido a que la longitud de atenuación en el centellador de plástico es más larga que en los cristales, esto se debe a que los

centelladores plásticos se pueden producir en cualquier forma y tamaño, una mayor longitud de atenuación permite diseñar y fabricar largas tiras de centelleo en las que la luz se transferirá eficazmente incluso a grandes distancias [14].

Fig. 2 Centellador plástico [12]



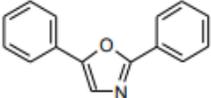
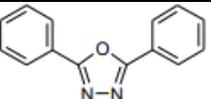
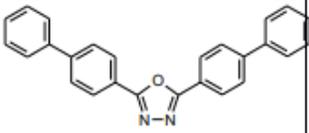
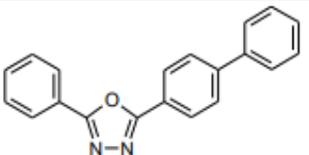
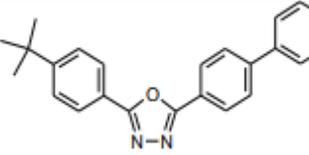
### Centelladores orgánicos

Los centelladores orgánicos pueden fabricarse en tamaños relativamente grandes y son más baratos de fabricar que los centelladores inorgánicos [15]. Tienen un tiempo de respuesta mucho más rápido que la mayoría de los centelladores inorgánicos dando excelente sincronización al ser transparentes a su propia luz de centelleo, se pueden utilizar en tamaños muy grandes [16]. La principal diferencia entre los centelladores orgánicos e inorgánicos está dada por las diferentes mediciones para las que son utilizados, las partículas generalmente no se detienen en un centellador orgánico debido a la densidad relativamente baja que varía de 1,03 a 1,20  $g\ cm^{-3}$ , porque tienen un número atómico  $Z$  promedio de 4. Por lo tanto, sólo se puede medir una pequeña fracción de la energía cinética total, en contraste con los centelladores inorgánicos que generalmente están diseñados para absorber las partículas entrantes por completo porque presentan número atómico  $Z$  grande y densidades mayores [14].

Los centelladores orgánicos poseen un material centellante, llamado en forma coloquial flúor se encuentra disuelto en un solvente base, que es el responsable de la fluorescencia. Los compuestos centellantes son hidrocarburos aromáticos, contienen átomos de carbono ligados entre sí en forma de anillo. Algunos de los compuestos químicos que se pueden utilizar como flúores primarios en centelladores plásticos son, p-terfenilo (PTP), 2- (4-terc-butilfenil) -5- (4-bifenilo) -1,3,4-

oxadiazol (B-PBD) [11-14], monómero de estireno 2,5 difeniloxazol (PPO)[17] y 1,4-bis (5-feniloxazol-2-il) benceno (POPOP) [17], 2,5-difenil-1,3,4-oxadiazol (PPD) [14], 2,5-bis (4-bifenil) -1,3,4-oxadiazol (BBP) [14], 2-fenil-5 (4-bifenil) -1,3,4-oxadiazol (PBD) [14], estos tipos de materiales son ricos en carbono y en hidrógeno pero presentan precios elevados, la Tabla 1, presenta las sustancias que pueden ser utilizadas como flúores primarios en centelladores plásticos.

**Tabla 1.** Sustancias que se pueden utilizar como flúores primarios en centelladores plásticos.  $\lambda_{abs}$  denota longitud de onda al máximo de absorción,  $\lambda_{em}$  - longitud de onda al máximo de emisión,  $\Phi_f$ - eficiencia cuántica de fluorescencia,  $\tau$  - tiempo de desintegración.

Nombre, estructura química	Abreviatura	$\lambda_{abs}$ (nm)	$\lambda_{em}$ (nm)	$\Phi_f$	$\tau$	R
 p-terfenilo	PTP	228 mb 756 c	335 mb 339 c	0,85 mb	1,2 mb 1,05 e 1,16 me 0,99 c	8,6 mb 6 k
 2,5 difeniloxazol	PPO	308 mb 303 e	365 mb 361 e 375 d	0,8 mb	1,6 mb 1,3 b 1,35 c 1,4 e	414 mb 335 k
 2,5-difenil-1,3,4-oxadiazol	PPD	283 mb	355 mb	0,9 mb	1,5 mb 1,2 e	70 mb
 2,5-bis (4-bifenil) -1,3,4-oxadiazol	BBD	314 d 315 mb	373 d 380 mb	0,85 mb	1,4 mb	2,5 mb 1 k
 2-fenil-5 (4-bifenil) -1,3,4-oxadiazol	PBD	305mb 302e	360- 356mb 362e	0,8mb	1,2 mb	21mb 18k
 2- (4-terc-butilfenil) -5- (4-bifenilo) -1,3,4-oxadiazol	BPBD	308mb	365mb 368c	0.85mb	1,2 mb	119mb 77k

En cuanto a las propiedades mecánicas, los centelladores orgánicos plásticos son maleables y resultan ser más nobles para poder ser maquinados a diferencia de los cristales inorgánicos, los detectores inorgánicos son frágiles y pesados lo que dificulta su manipulación y maquinización, obligando a mantenerlos aislados de la humedad ambiental por la antonomasia que presentan, a diferencia de los plásticos pueden ser colocados en moldes, ser extruidos, laminados, torneados y cortados sin dificultad, tornándolos más rentables. Otro parámetro es la radiación ionizante, para los detectores inorgánicos puede ocurrir dislocaciones y sitios intersticiales en la red cristalina, creando tensiones y provocando migración de impurezas, una dosis de 1 kGy genera pérdida de desempeño, mientras que, en los plásticos, la radiación destruye las cadenas poliméricas creando entrecruzamiento y fotorreticulado mejorando las propiedades del material, requieren de una dosis 10 Gy para empezar a perder desempeño [26].

### **Mecanismo de Detección usando Centelladores Plásticos**

#### **Mecanismos de interacción de los muones con la materia**

Las características de interacción mostradas por los muones de alta energía durante su paso a través de la materia son principalmente de naturaleza electromagnética. Así, las colisiones con electrones, la emisión radiactiva, los procesos de tridente que producen pares electrón-positrón y pares de muones e interacciones con núcleos son los diferentes procesos por los cuales los muones de energía  $10^7 \leq E \leq 10^9$  MeV pierden energía [18].

Los muones negativos que en el centellador se detienen, pueden enlazarse a núcleos de carbono C y de hidrógeno H del centelleo de la misma forma como lo hacen los electrones. El muon no es un electrón y el principio de exclusión de Pauli no impide que ocupe un orbital atómico ya lleno de 8 electrones. Los muones negativos ligados pueden interactuar con los protones antes de que decaigan espontáneamente [19], como indica (1), se muestra en la figura 2.



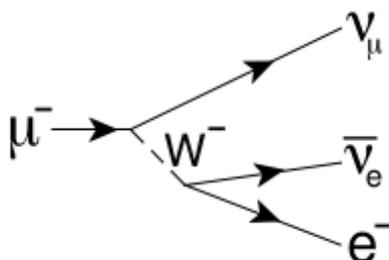
$\mu^-$ : muones negativos

$p$ : protón

$e^-$ : electrón

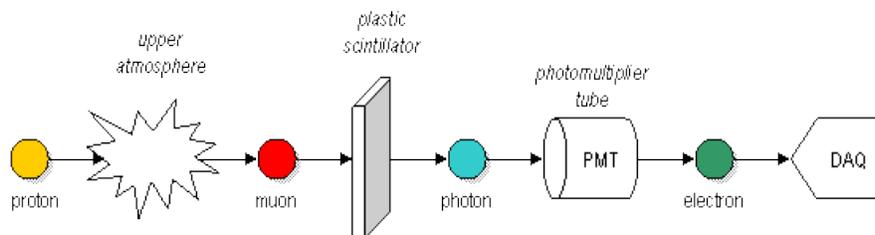
$\nu_e$ : antineutrino del electrón

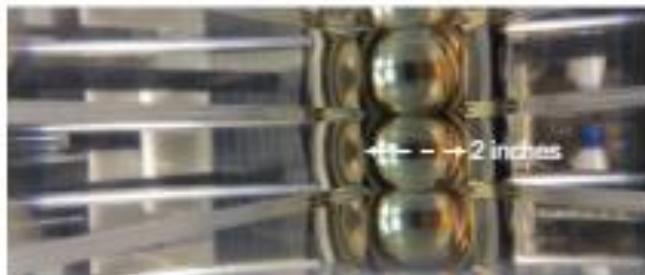
$\bar{\nu}_\mu$ : antineutrino del muon

**Fig. 3** El muon decae a menudo en un neutrino de muon, antineutrino de electrones y un electrón [20].

### Mecanismo físico de paneles de muones

En el mecanismo físico del montaje de centelladores conocido como paneles de muones, figura 5, las partículas interactúan con el plástico centellador, entran, se frenan y decaen dentro del material. La desaceleración de la partícula da lugar a que el centellador excitado emita luz detectada por el PMT, cuando se menciona PMT se habla de los dos tipos de detectores. El primero al entrar al PMT las partículas tienen una energía total de 160 MeV. Después el PMT transforma de fotones a electrones, finalmente los electrones son multiplicados en los dinodos que contiene el PMT en su estructura interna, originando una señal eléctrica producida proporcional a la energía depositada por la partícula [11,21]. La figura 3, muestra el diagrama del mecanismo de detección de los muones por los paneles de centelladores plásticos.

**Fig. 4** Mecanismo de detección de muones. La partícula ionizante atraviesa el centellador, originando la emisión del espectro en el UV, el camino libre medio de la luz en el plástico es de unos pocos milímetros. El tubo fotomultiplicador (fotodetector) absorbe los fotones UV y reemite en una longitud de onda más larga [22]**Fig. 5** Procedimiento de montaje de los centelladores plásticos (a) La guía de luz con el PMT se fija con cemento óptico BC-600. (b) Un panel se envuelve con un reflector (papel aluminio) (c) Se envuelve el panel con papel de aluminio. (d) Los paneles de muones se envuelven [23].



A



B



C



D

Una aproximación del número de muones incidentes en el área diferencial  $dA$  durante el tiempo  $dt$  dentro del ángulo sólido  $d\omega$  desde la dirección normal a  $dA$ , se puede conocer con (2), e integrando esta función sobre el ángulo sólido apropiado, se puede estimar el flujo total de todas las direcciones.

$$dN = I(\phi) d\omega dA dt \quad (2)$$

Otra manera de aproximar el flujo de muones es mediante (3)

$$\Phi_u = \frac{N_u}{t_d \times A_d \times \epsilon_u} \quad (3)$$

$\Phi_u$  es el número de muones originado entre el número total de muones observados durante el tiempo de adquisición de datos por el área efectiva del lado superior por la eficiencia de selección de muones [23,24].

Cabe decir que la intensidad del muon puede variar con la altitud, así como también con el ángulo de la vertical, además con la latitud y la hora de la noche (la posición de magnetosfera terrestre y la posición relativa del sol).

### Condiciones de un buen Centellador

Para que el detector sea sensible a los muones, los centelladores de plástico deben alcanzar una longitud de onda de 400 nm a 430 nm. Este rango significa que el centellador emitirá un resplandor azul violeta. La carcasa hermética de papel de aluminio y cinta aislante garantiza que el PMT (fotomultiplicador) pueda captar la luz que emana del centellador con un ruido de fondo mínimo [12, 25].

Por último, para que los centelladores sean eficientes deben presentar características de emisión compatibles con el fotodetector y la lectura electrónica, una métrica de rendimiento clave de cualquier centellador es su rendimiento de luz, que se define como:

$$\text{Rendimiento de luz} = \frac{\# \text{ de fotones de centelleo}}{\text{Energía de la partícula (MeV)}} \quad (4)$$

### Conclusiones

Los centelladores plásticos orgánicos permiten obtener respuestas de un elevado número de partículas en un tiempo corto porque la longitud de atenuación en el centellador de plástico es más larga que en los cristales, además poseen alta flexibilidad para poder ser construidos en cualquier forma y tamaño, una mayor longitud de atenuación permite diseñar y fabricar largas tiras de centelleo en las que la luz se transferirá eficazmente inclusive a distancias grandes, los centelladores plásticos resultan ser una excelente alternativa para detectar muones, construirlos con lleva precios más baratos a comparación de otros tipos de centelladores incluso los centelladores comerciales, por lo tanto, el uso de éste tipo de detectores resulta ser favorable y

eficiente en investigaciones en astrofísica resultando ser más favorable por el elevado rendimiento de luz, la transmitancia y la obtención de datos en un menor tiempo.

## Referencias

1. Clay, R.W, Kurban, Z & Wils, N. (n.d). Cosmic ray related undergraduate experiments. Notes, 1-18.
2. Sharan, M.K, Singaraju, R.N, Sinha, T, Ghosh, T & Jha, V.N. (2021). Measurement of cosmic-ray muon flux in the underground laboratory at UCIL, India, using plastic scintillators and SiPM. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 994, 165083, doi: 10.1016/j.nima.2021.165083.
3. Thoudam SRachen JVan Vliet AAchterberg ABuitink SFalcke HHörandel J. (2016). Cosmic-ray energy spectrum and composition up to the ankle – the case for a second Galactic component. *Astron. Astrophys.* 595. 1–24, doi: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628894>
4. Bhatnagar, S. (2021). Muon telescope: An experimental observation of leptonbased on coincidence technique. *J. Phys. Conf. Ser.* 1084. 012150, doi: 10.1088/1742-6596/1804/1/012150.
5. S. A. O. at S. University. (n.d). Cosmic Ray Energies. Recuperado de: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Cosmic+Ray+Energies>.
6. Haungs, A. (2015). Cosmic Rays from the Knee to the Ankle. *Phys. Procedia*, 61. 425 – 434, doi: 10.1016/j.phpro.2014.12.094.
7. Alves Batista, R., Biteau, J., Bustamante, M., Dolag, K., Engel, R., Fang, K., ... Unger, M. (2019, June 4). Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00023>
8. Lechner, A. (2018). Particle interactions with matter. In CERN Yellow Reports: School Proceedings (Vol. 5, pp. 47–68). CERN. <https://doi.org/10.23730/CYRSP-2018-005.47>
9. *Cosmic Rays at Earth*. (2001). *Cosmic Rays at Earth*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-50710-5.x5000-3>
10. Engel, R. (2012). Indirect detection of cosmic rays. In *Handbook of Particle Detection and Imaging* (pp. 594–632). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3->

642-13271-1\_24

11. Díaz Valdiviezo, K. A., & Carrasco Montesdeoca, C. Y. (2017). *Estudios preliminares para la construcción de un prototipo de detector de radiación basados en centelladores plásticos* (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6914/1/86T00041.PDF>
12. Powell Chesley, H. (2018). *Building a pocket-sized muon detector and starting a cosmic ray research group* (Tesis de bachiller). Brigham Young University. Idaho
13. Hajagos, T. J, Liu, C, Cherepy, Nerine J., & Pei, Q. (2019). High-Z Sensitized Plastic Scintillators: A Review. United States. <https://doi.org/10.1002/adma.201706956>
14. Wiczorek, A. (2017). *Development of novel plastic scintillators based on polyvinyltoluene for the hybrid J-PET/MR tomograph* (Tesis de doctorado). Jagiellonian University.
15. Zaitseva, N. P., Glenn, A. M., Mabe, A. N., Carman, M. L., Hurlbut, C. R., Inman, J. W., and Payne, S. A. (2018). Recent developments in plastic scintillators with pulse shape discrimination. United States: 889. 97-104, doi:10.1016/j.nima.2018.01.093.
16. Aliaga, D & Boyes, W. (2010). Nuclear Instrumentation Technology. *Instrumentation Reference Book*, Elsevier Inc., 521–547.
17. Kang, H.; Min, S.; Seo, B.; Roh, C.; Hong, S.; Cheong, J.H. (2021). Preliminary Studies of Perovskite-Loaded Plastic Scintillator Prototypes for Radioactive Strontium Detection. *Chemosensors*. 9, 53. doi: 10.3390/chemosensors9030053.
18. Chatterjee, L & Bandyopadhyay, B.K. (1976). Interaction characteristics of muons with matter for the energy range  $10^7 \leq E \leq 10^9$  MeV," *Acta Phys. Austriaca*, 45, 345–357, 1976, [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7326084>.
19. Carrigan, M & Partner, L. (2017). *Measurement of the Muon Lifetime*. Boston.
20. BenZvi, S. (2020). The mean lifetime of the muon. Recuperado de: <https://physics.nyu.edu/NYSCPT/summer02/sb1.pdf>.
21. Coan, T.E & Ye, J. (2003). Muon Physics, *física de preimpresión*. 051110.0. 1–10. Recuperado de: <https://web.njit.edu/~sirenko/Phys450/MU.pdf>.
22. D. de F. del L. de Electrónica. (n.d). Departamento de Física del Laboratorio de Electrónica," *Conceptos básicos de Muon*. Recuperado de: <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/~veiga/experiments.html>.

23. Prihtiadi, H, Adhikari, G Adhikari, P... Yong, S. (2017). Muon detector for the COSINE-100 experiment COSINE-100 Collaboration. 13(02), 02007-02007
24. Al-dulaimi, A, Al-hamadany, A, Al-Gherairy, M, Al-timimi, R & Al-Zuhairi, A. (2018). Study of the Scintillation Detector Efficiency and Muon Flux,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 13, 7037–7041.
25. Masias, J, Delgado, F, Coll, L, Pérez, A, Bazoa, J & Gago, A.M. (2019). Using a portable muon detector for radioactive source measurements and identification. *Nucl. Instr. Meth. Phys.* 1–23. Recuperado de: <https://arxiv.org/pdf/1903.04562.pdf>.
26. Departamento de Física. (n.d). Centelladores. Recuperado de: <http://materias.df.uba.ar/labo5a2013v/files/2013/02/Centelladores.pdf>