

Simulación de los fenómenos ópticos de propagación de las partículas dentro de un prototipo de detector de muones atmosféricos

Jeferson Daniel Rosero Benavides
Dir: Alex Tapia, Ph.D.

Universidad de Nariño

21 de noviembre de 2022



Contenido

- 1 Introducción
- 2 Muones
- 3 Física Óptica
- 4 Simulación
- 5 Resultados y conclusiones

Introducción

Motivación

Centramos nuestra atención en la tomografía muonica, el cual es una práctica que se basa en la observación de la absorción de muones dentro de la materia, como sabemos la interacción de rayos cósmicos de alta energía con la atmósfera generan lluvias atmosféricas extendidas (EAS) de partículas, entre ellas los muones. Una aplicación reciente es la utilización de estos muones atmosféricos para el estudio de la estructura interna de objetos terrestres. En este trabajo se pretende presentar una propuesta de diseño para un detector de muones atmosféricos y estudiar los distintos procesos ópticos que se generan dentro del mismo.

Rayos cósmicos

¿Que son los rayos cósmicos?

son partículas subatómicas que impactan la atmósfera de la Tierra. Algunos rayos cósmicos tienen energías ultrarelativistas las cuales están por encima de los $10^{20} eV$.

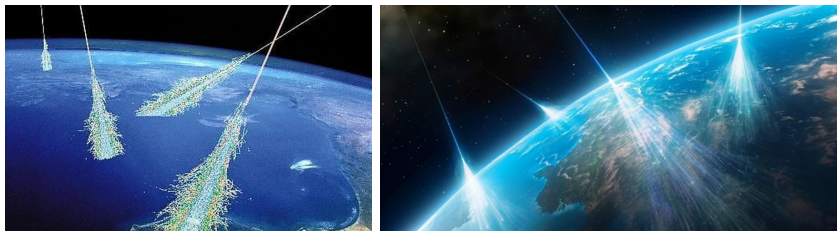


Figura: (1)

Rayos cósmicos

Antecedentes

- El descubrimiento de los rayos cósmicos se remonta a 1907 el padre Theodore Wulf del Instituto de física de Ignatus, con la invención de un nuevo electroscopio. Una misteriosa radiación del laboratorio
- En 1912 con el físico nuclear Viktor Hess, quien en una serie de vuelos en globo se propuso a estudiar la ionización de la atmósfera terrestre producto de una radiación desconocida.
- Luego en 1963, John Linsley publicó un artículo sobre la detección de un rayo cósmico de energía $10^{20} eV$.
- Cocconi en 1967 concluye que dichos rayos son de origen extra-galáctico.

Rayos cósmicos

Composición

Las partículas de rayos cósmicos son en su mayoría hidrógeno (87%) y algo de helio (12%) con cantidades decrecientes de carbono, oxígeno, etc. y de elementos más pesados. todos son completamente ionizado. Los electrones representan aproximadamente el 1% de los rayos cósmicos.

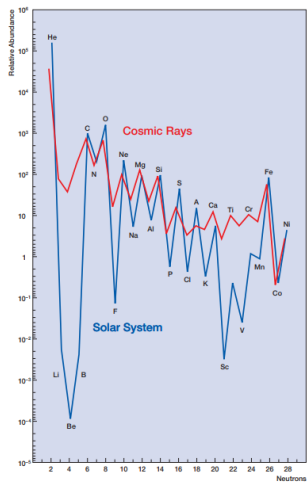


Figura: (2)

Rayos cósmicos

Espectro de energía

El espectro de varios elementos de los rayos cósmicos lo podemos ver en la figura 3. Las proporciones de las componentes mayores (con excepción del hierro) son relativamente constantes con la energía. Estas son bien descritas por una inversa serie de potencias de la energía, con un flujo diferencial dado por:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-(\gamma+1)} \quad (1)$$

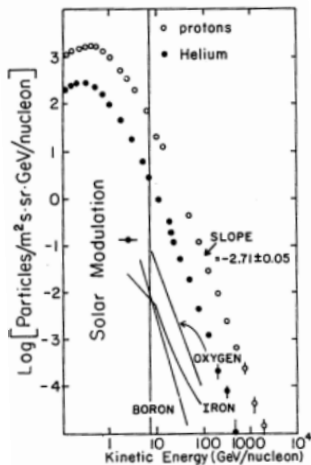


Figura: (3)

Rayos cósmicos

Lluvias atmosféricas extendidas (EAS)

Cuando las partículas de alta energía interactúan con la materia (atmósfera), se crean nuevas partículas, que en general también poseen altas energías. Las cascadas secundarias se clasifican como cascada electromagnética y como cascada hadrónica y esta a su vez posee tres componentes fundamentales, una componente electromagnética, una componente muónica y una componente hadrónica.

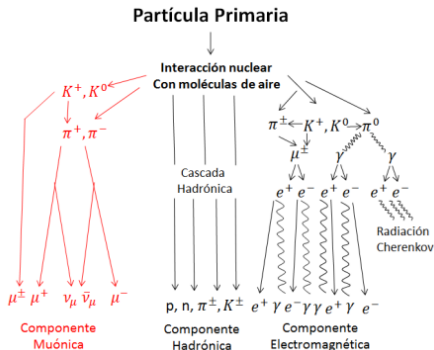


Figura: (4)

Muones

Muones (μ^-)

¿Qué son?

Partículas elementales de la familia de los leptones, que al igual que el electrón, tiene una carga negativa y espín 1/2, pero cuenta con una masa de $105,7 \text{ MeV}/c^2$, aproximadamente 200 veces más masivo.

El espectro de energía de los muones al nivel del mar para dos ángulos se muestra en la figura 5.

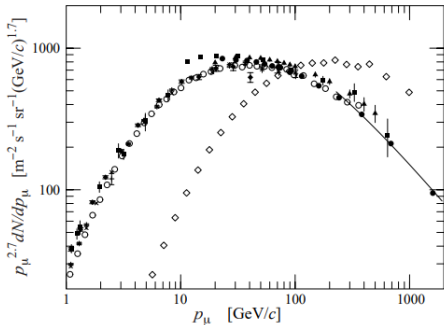


Figura: (5)

Muones (μ^-)

La interacción muón-materia, fórmula de Bethe-Bloch

$$\left\langle \frac{-dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} + \frac{1}{8} \frac{Q_{max}^2}{(\gamma M c^2)^2} \right] + \Delta \left| \frac{dE}{dx} \right| \quad (2)$$

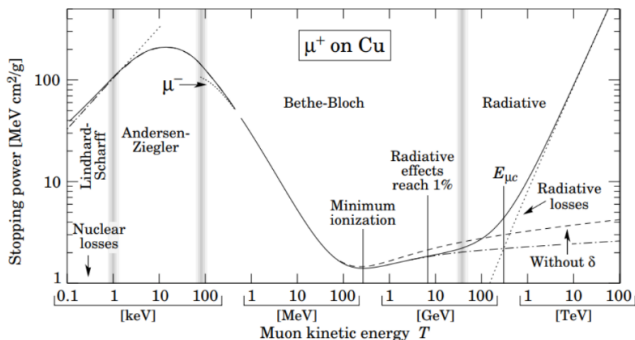


Figura: (6) Gráfico de valores de potencia de frenado en función de la energía, para un muón penetrando en cobre.

Muones (μ^-)

Muongrafía

Se basa en aprovechar partículas de alta energía para la obtención de imágenes que son producidas por rayos cósmicos en lluvias de partículas en la atmósfera terrestre.

Energía mínima E_{min} necesaria para que un muón logre atravesar una cierta cantidad de roca estándar.

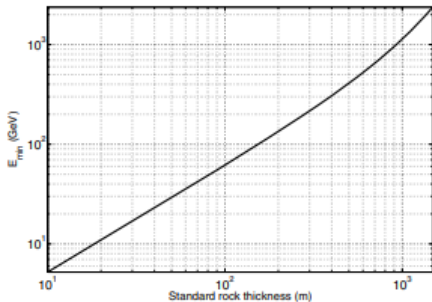


Figura: (7)

Muones (μ^-)

Métodos de detección

Detectores de Centelleo: Aprovecha la propiedad de absorber energía (a través de interacciones de Coulomb) y vuelven a emitir esa energía en forma de radiación electromagnética (luz de centelleo) cuando por él pasa radiación ionizante. El uso de centelladores es el método de detección más convencional.

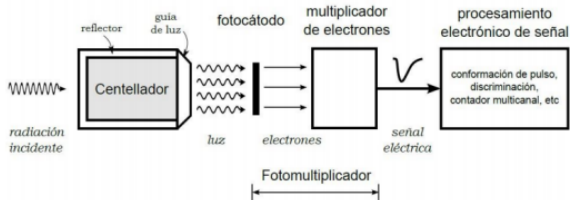
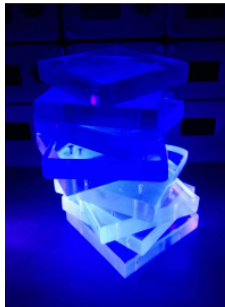


Figura: (8)

Muones (μ^-)

Métodos de detección

Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM): Es un fotodetector de estado sólido que utiliza múltiples píxeles de fotodiodo de avalancha (APD) que operan en modo Geiger.

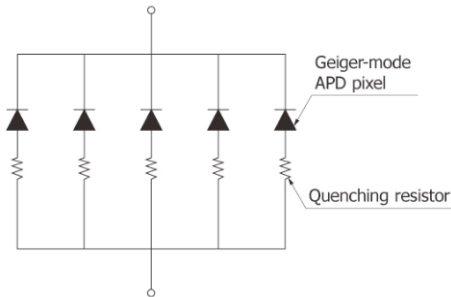


Figura: (9)

Física Óptica

Centelleo

Los materiales de centelleo poseen la propiedad que se conoce como luminiscencia, cuando estos materiales son expuestos a cierta forma de energía, estos absorben y reemiten energía en forma de luz visible.

Proceso de centelleo en talio y yoduro de sodio activado. La evolución temporal del proceso de reemisión es descrito por un simple decaimiento exponencial:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (3)$$

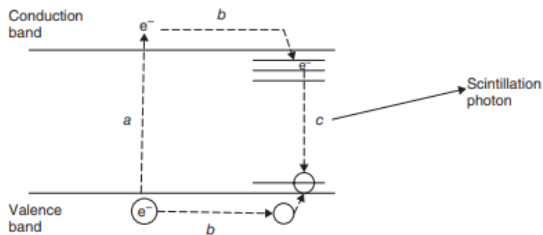


Figura: (10)

Radiación Cherenkov

La radiación Cherenkov surge cuando una partícula cargada en un medio material se mueve más rápido que la velocidad de la luz en ese mismo medio.

$$\beta c = v = c/n \quad (4)$$

En cuyo caso, una onda de choque electromagnética es creada y vemos que el frente de onda formado es cónico en su forma y es emitido a un ángulo:

$$\cos\theta = 1/\beta n \quad (5)$$

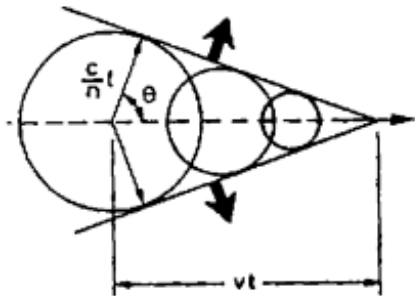


Figura: (11)

Coeficiente de absorción

En la medida de adsorción, aquí se pone atención a la intensidad de luz $I(z)$ luego de recorrer cierta distancia z de material en comparación con la intensidad incidente I_0 de este modo se define el coeficiente de absorción.

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha_{abs}(w)z} \quad (6)$$

Existe una dependencia de la frecuencia del coeficiente de absorción que en general es bastante diferente para los diversos procesos físicos que ocurren en las propiedades ópticas de los sólidos.

$$\alpha_{abs}(w) = 2 \frac{w \tilde{k}(w)}{c} \quad (7)$$

Simulación

GEANT4

Es una herramienta orientada a objetos basada en el lenguaje de programación C++, software proporcionado por CERN para la próxima generación de experimentos HEP que hace uso de las denominadas *classes*. Las categorías de clase y sus relaciones se presentan mediante el siguiente diagrama:

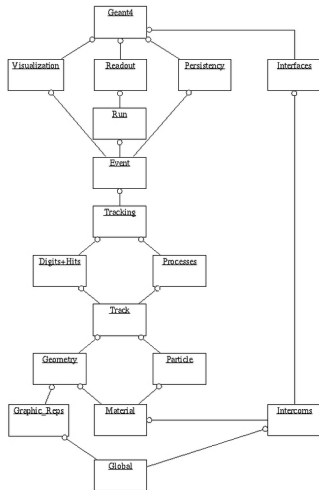


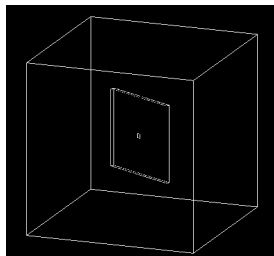
Figura: (12)

GEANT4

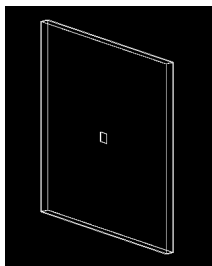
Clases definidas por el usuario

- G4VUserDetectorConstruction → Construcción de materiales y geometrías (superficies ópticas)
- G4VUserPhysicsList → Definición de partículas
- G4VUserPrimaryGeneratorAction → Generación de eventos
- G4UserSteppingAction → Almacena la información de procesos
- G4AnalysisManager → Extrae la información de procesos (ROOT)

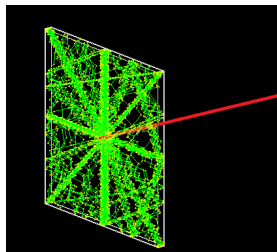
Simulación (Visualización)



(a) Detector y SiPM dentro del volumen madre



(b) Detector y SiPM unidos ópticamente



(c) Detector con un evento simulado

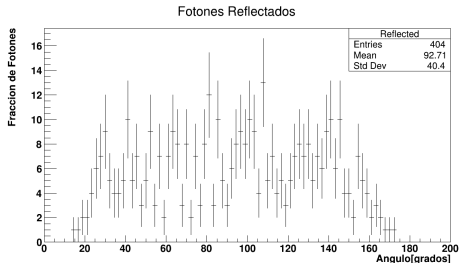
Figura: (13) Vista en GEANT4 del detector de centellador plástico de dimensiones $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}$ unido ópticamente a un fotomultiplicador (SiPM) de dimensiones $6 \times 6 \text{ mm}^2$ dentro de un volumen madre que contiene aire

Resultados y conclusiones

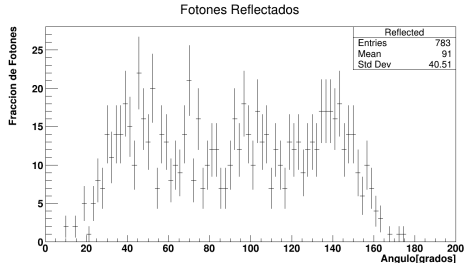
Procesos de Contorno

Se simularon un total de 10000 eventos (muones) de energía 1GeV disparados directamente sobre la superficie del detector.

Reflexión de fotones ópticos



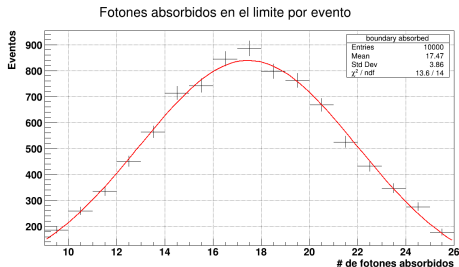
(a) Gráfica de la fracción de fotones ópticos transmitidos en función del ángulo de reflexión “sin” superficie óptica de recubrimiento en el detector



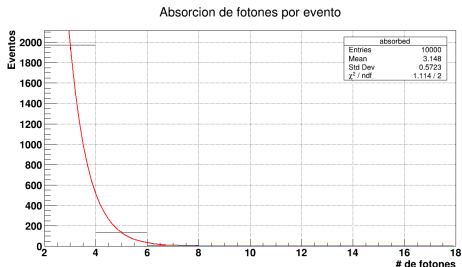
(b) Gráfica de la fracción de fotones ópticos transmitidos en función del ángulo de reflexión “con” superficie óptica de recubrimiento en el detector

Figura: (14)

Absorción de fotones



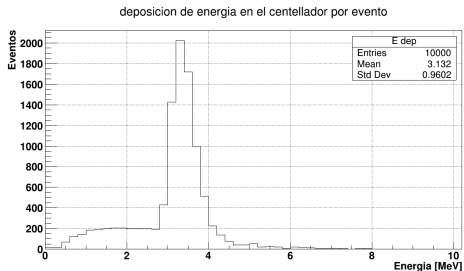
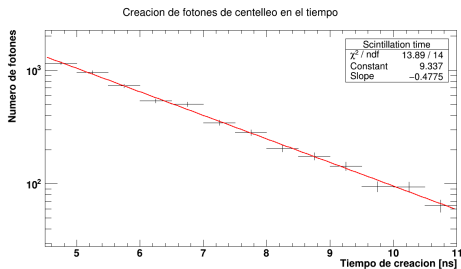
(a) Absorción de fotones ópticos en los límites del material centellador. La línea roja se ajusta a una distribución gaussiana de la forma $Ae^{-0,5\left(\frac{x-Mean}{\sigma}\right)^2}$



(b) Absorción de fotones ópticos dentro del material centellador. La línea roja se ajusta muy bien a una función exponencial negativa de la forma $e^{10}e^{-x} = L_0e^{-x}$ con L_0 siendo la intensidad inicial de los fotones.

Figura: (15)

Centelleo



- (a) Distribución del tiempo de emisión de fotones ópticos de centelleo generado por muones de 1GeV. La línea roja se ajusto a una función exponencial de la forma $C_{fast} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fast}}\right)$
- (b) Energía depositada en el centellador por muones de energía de 1GeV por evento.

Figura: (16)

Espectro de energía de los fotones en el centellador y Cherenkov

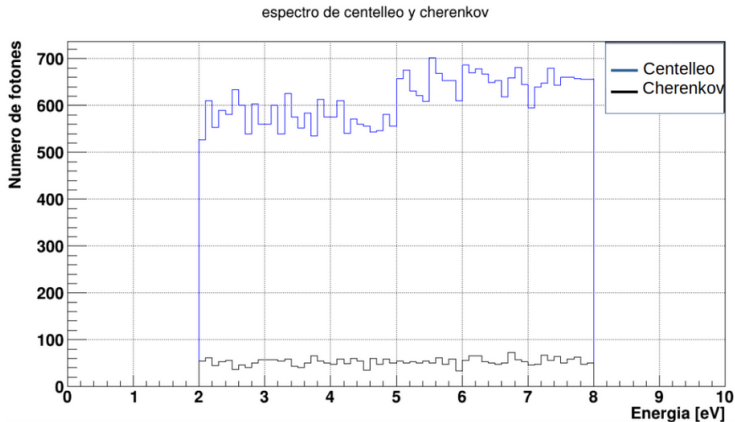
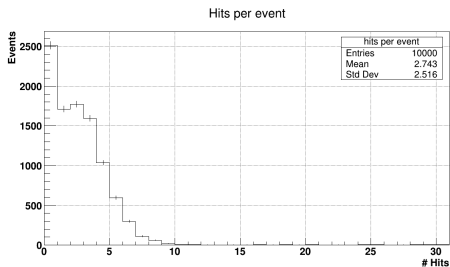
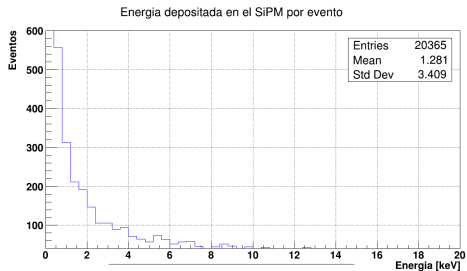


Figura: (18) Gráfica del espectro de energía de fotones de centelleo (línea azul) y el espectro de energía de fotones Cherenkov (línea negra)

Respuesta del fotomultiplicador



(a) Número de impactos por evento generados por los fotones ópticos arribando al fotocátodo del SiPM con $QE = 20\%$



(b) Energía depositada en el SiPM por los fotones ópticos que alcanzan a impactar en el fotocátodo.

Figura: (19)

Conclusiones finales

- Implementación de GEANT4 y ROOT para la simulación y el análisis de los resultados cuantitativos.
- Uso de un recubrimiento óptico para el aumento de las reflexiones dentro del material centellador.
- Cuantificar procesos ópticos ocurridos en el paso de radiación (muones) ionizante dentro de un material centellador.
 - Centelleo (90 % de luz emitida)
 - Cherenkov (10 % de luz emitida)
 - Fotones absorbidos en el material
- Dependiendo del tamaño real que se elija para el detector, este puede requerir el uso de materiales de centelleo más gruesos o SiPM más eficientes.
- El aporte del trabajo en el ámbito de la tomografía muónica.

Referencias

- Nolwenn, L., Dominique G. y Jacques M. (2012), Density Muon Radiography of La Soufrière of Guadeloupe Volcano: Comparison with Geological, Electrical Resistivity and Gravity data. *Geophysics. J. Int.*, 185, pp 1-14.
- Abraham et. al., J. (2004), (Pierre Auger Collaboration), Properties and performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory, *Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A.*, 523, pp 50-95.
- Moreno, J. C. (2012). Estudio de rayos cósmicos ultra energéticos en el Observatorio Pierre Auger: Nuevo modelo de profundidad atmosférica y su influencia en observables, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la Plata, 224 p.
- F. Beauducel et. al. (2008), Muon radiography of volcanoes and the challenge at Mt. Vesuvius, *Cosmic radiation and Geoparticle Physics*, 10, pp 1-19.
- Bene et. al., S. P. (2013), Air shower simulation for background estimation in muon tomography of volcanoes, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, pp 11-15.

¡Gracias!