

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

JEFERSON DANIEL ROSERO BENAVIDES

Proyecto de Trabajo de Grado

Dr. Alex Marcelo Tapia Casanova
Profesor tiempo completo. Universidad de Medellin

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PASTO, NARIÑO
2022

Índice

1. Introducción	4
2. Área de estudio.....	5
3. Contexto	5
4. Antecedentes	6
5. Objetivos	7
5.1. Objetivo General	7
5.2. Objetivos específicos	7
6. Metodología	8
7. Recursos	9
7.1 Recursos Personales	9
7.2 Recursos Materiales	9
8. Cronograma	10
9. Referencias	11

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

Resumen

El paso de radiación a través de la materia donde ocurren distintos procesos producto de dicha interacción, nos proporciona un panorama importante a la hora de estudiar los procesos físicos que se desarrollan dentro de la materia. La interacción de muones atmosféricos, los cuales son producto de las lluvias atmosféricas extendidas, con un prototipo de detector construido con barras plásticas que será simulado usando la herramienta computacional GEANT4, con esto se pretende tener una propuesta del diseño final del detector de muones. Este proyecto tiene como objetivo estudiar los procesos ópticos que se desarrollan dentro de una barra plástica de centelleo durante el paso de muones atmosféricos. Las simulaciones realizadas y el respectivo análisis de datos, podrían servir como una guía importante para el diseño de un sistema tomográfico basado en muones atmosféricos generados por rayos cósmicos en el área de muongrafía.

1. Introducción

Los rayos cósmicos se los define a menudo como partículas que llegan a la Tierra desde el espacio exterior y la detección de estas partículas requiere múltiples técnicas. Los rayos cósmicos se detectan tanto por medio de telescopios de fluorescencia atmosférica y también por métodos terrestres, es aquí donde entran los detectores de centellador plástico que se han utilizado en los campos de física de altas energías y aplicaciones nucleares durante varias décadas, debido a su rápido tiempo de respuesta, facilidad de fabricación, versatilidad y costos moderados.

El espectro no térmico de los rayos cósmicos indica que su aceleración es el resultado de procesos estocásticos en presencia de campos magnéticos, como propuso por primera vez Fermi[1]. La aceleración difusiva de partículas cargadas en las ondas de choque de las explosiones de supernova puede dar origen a la mayoría de los rayos cósmicos pero las energías más altas de los rayos cósmicos son tan extremas que no se comprende si un mecanismo similar puede acelerar estas partículas incluso en las fuentes más extremas, que pueden o no ser lo suficientemente grandes y tener campos magnéticos suficientemente grandes.

Hace más de cuarenta años, en 1963, John Linsley publicó un artículo sobre la detección de un rayo cósmico de energía 10^{20} eV. El artículo no pasó desapercibido, ni suscitó muchos comentarios. Los pocos físicos que fueron los interesados en los rayos cósmicos de alta energía se convencieron de que el espectro de energía de los rayos cósmicos puede continuar para siempre. El hecho de que los rayos cósmicos puedan tener energías superiores a 10^6 GeV (10^{15} eV) fue establecido a finales de los años treinta por Pierre Auger y sus colaboradores. Mientras tanto, se detectaron lluvias de energía cada vez más alta alcanzando una lluvia de 10^{20} eV entonces parece una cuestión de tiempo y exposición. Ya en los años cincuenta se discutía sobre el origen de tales rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECR, por sus siglas en ingles) y Cocconi llegó a la conclusión de que deben ser de origen extragaláctico ya que los rayos cósmicos galácticos no son lo suficientemente fuertes como para contener este tipo de partículas. Lo exclusivo de este evento se hizo evidente tres años después, tras el descubrimiento de la radiación cósmica del fondo de microondas (CMBR, por sus siglas en ingles).

Casi simultáneamente, Greisen en EE. UU. y Zatsepin y Kuzmin en la URSS publicaron artículos que discutían la propagación de partículas de ultra alta energía en el espacio extragaláctico. Calcularon la distancia de pérdida de energía de los nucleones interactuando en el CMBR y llegó a la conclusión de que es más corta que las distancias entre poderosas galaxias. El espectro de rayos cósmicos debería tener un final alrededor de la energía de 5×10^{19} eV. Este efecto es ahora conocido como el corte GZK. Las estadísticas experimentales de tal evento crecieron con los años, aunque no muy rápido. El flujo de UHECR de energía por encima de 10^{20} eV se estima en 0,5 a 1 evento por kilómetro cuadrado por siglo por estereorradián. Incluso grandes detectores de área, decenas de Km^2 solo detectarían algunos eventos durante diez años de trabajo. El tema se convirtió en uno de interés común durante la última década del siglo pasado cuando surgieron ideas para la construcción de detectores para este tipo de estudios. Cabe resaltar que aun nos quedan varias preguntas sin resolver acerca de estos rayos cósmicos de alta energía, como es el caso de, ¿saber cuales son sus fuentes específicas?, ¿como las partículas pueden alcanzar energías tan altas?, ¿la propagación en el espacio durante su recorrido a la Tierra?, y muchas otras cuestiones que aun requieren de mas análisis por parte del marco experimental.

Ahora bien, cuando las partículas extragalacticas llegan a la superficie terrestre, dicha interacción produce lo que conocemos como lluvias atmosféricas extendidas (EAS, por sus siglas en ingles), las cuales son cascadas de partículas ionizadas y radiación electromagnética que se produce en la atmósfera cuando un rayo cósmico primario (es decir, uno de origen extraterrestre) ingresa a la atmósfera. Cuando una partícula, que puede ser un protón, un núcleo, un electrón, un fotón o (raramente) un positrón, golpea el núcleo de un átomo en el aire, produce muchos hadrones energéticos. Los hadrones inestables se descomponen en el aire rápidamente en otras partículas y radiación electromagnética, que son parte de los componentes de la lluvia.

Y es aquí donde encontramos la denominada lluvia de radiación secundaria, que incluye muones, protones, antiprotones, partículas alfa, piones, electrones, positrones y neutrones. Nuestro interés de investigación se va a centrar en los muones generados en la atmosfera; vale la pena recordar que el muon es una partícula similar al electrón pero con una contribución de masa mucho mas grande. La detección de de dichas partículas puede ser registrada a partir de un detector construido utilizando material centellador plástico, pues se beneficia de las propiedades de este material para emitir fotones cuando los átomos son excitados debido al paso de la radiación ionizante, se han adoptado detectores de este tipo en muchos detectores de partículas recientes como en los experimentos MINOS [3] y OPERA

[2] por nombrar algunos ejemplos.

2. Área de Estudio

Este proyecto de trabajo de grado hace parte de la línea de investigación de física de altas energías y más exactamente en la parte experimental de la misma.

3. Contexto

Este trabajo de investigación en primera medida requiere de un conocimiento previo de física mecánica, física moderna, mecánica cuántica, relatividad especial, astrofísica y física de partículas, conocimientos los cuales hasta la fecha son parte del plantel de asignaturas de la carrera de física en la universidad de Nariño. Algo mas externo a esos tópicos vienen dados en la parte de la programación, ya que también se requiere conocer el lenguaje C++ o C así como el uso y manejo de la herramienta computacional de simulación GEANT4 y del software ROOT para el análisis de datos; dos herramientas creadas por el laboratorio de investigación CERN.

4. Antecedentes

En la actualidad los detectores de centellador plástico han tomado renombre con el paso de los años, esto debido a su técnica que proporciona excelentes resoluciones energéticas y espaciales. Trabajos realizados por los experimentos como el OPERA[2] o el MINOS[3] que usan este tipo de detectores en su investigación con el fin de poder estudiar partículas provenientes de las lluvias atmosféricas.

Las investigaciones más relevantes en cuanto al uso de detectores de centellador plástico utilizadas netamente a la tomografía de muones abren paso a seguir realizando estudios como: capturar imágenes de alta resolución en la corteza no homogénea con radiografía muonica de rayos cósmicos: la estructura de densidad debajo de la superficie del cráter volcánico del monte Asama, Japón [4]. O inclusive como un equipo de expertos del Instituto de Investigación sobre los fundamentos del Universo de la comisión de Energía atómica francesa (CEA) descubren una nueva cavidad dentro de la Gran Pirámide de Guiza [5]. Hasta hace unos años los muones carecían de la importancia que deberían, no fue sino hasta en el año 2017 cuando con ayuda de estos se logro descubrir esta cámara oculta y tiempo después la muongrafía de rayos cósmicos se puso en auge y causo interés en gran medida por el hecho de poder conocer el interior de un objeto a través de un flujo de muones atmosféricos.

También otros proyectos como el MU-RAY[6], ToMuVol[7] y DIAPHANE[8], hicieron uso de esta técnica, donde su principal función es la obtención de imágenes internas en las cavidades de volcanes activos.

A nivel local por parte del grupo experimental de altas energías de la universidad de Nariño se desea utilizar la técnica de detectores de centelleo [9] en la zona del volcán Galeras específicamente en el cono volcánico o en una zona previamente estudiada, con el único fin de proporcionar un estudio detallado de las partículas que atraviesan a este y poder conocer los cambios de densidad de su estructura interna.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Simular la propagación de fotones y sus efectos ópticos generados por el paso de muones atmosféricos a través de un prototipo de detector formado por barras centelladoras.

5.2 Objetivos específico

- Estudiar la teoría correspondiente a los muones atmosféricos y su interacción con el material centellador.
- Instalación y aprendizaje del uso de GEANT4, herramienta computacional utilizada en simular la interacción radiación-materia.
- Implementar en GEANT4 una barra plástica centelladora con sus respectivas características.
- Implementar la propagación de fotones, con sus respectivos procesos ópticos, dentro de la barra plástica centelladora.
- Analizar los datos, usando ROOT, generados por la interacción de muones atmosférico con la barra plástica centelladora.

6. Metodología

Damos a conocer ahora la metodología correspondiente que llevaremos a cabo con el fin de poder desarrollar los objetivos planteados anteriormente y de esta manera poder dar un correcto desarrollo de nuestra propuesta “Simulación de los fenómenos ópticos de propagación de las partículas dentro un prototipo de detector de muones atmosféricos”.

1. Compilación de información, revisión bibliográfica y estudio de fundamentos teóricos correspondientes a la interacción de los muones atmosféricos con un material centellador.

2. Estudio del lenguaje de programación C++ el cual corresponde al lenguaje usado por la herramienta computacional GEANT4 para la implementación de la simulación de un detector y por el software ROOT el cual es usado para el respectivo análisis de datos.

3. Se instalará GEANT4 y se aprenderá su funcionamiento compilando los ejemplos básicos que trae esta herramienta computacional .

4. Se construirá la aplicación en GEANT4 para la simulación del detector usando el lenguaje de programación C++ aprendido anteriormente. Esto implica construir la geometría del detector, especificar los materiales, definir los tipos de partículas subatómicas que interactuarán, etc.

5. Análisis de los datos obtenidos en la simulación haciendo uso del software ROOT.

7. Recursos

Los recursos utilizados para el desarrollo del actual proyecto y su respectiva financiación se pueden ver a continuación.

7.1 Recursos Personales

DESCRIPCIÓN	COSTO EN 4 MESES (COP)	FUENTE DE FINANCIACIÓN
2 horas semanales por parte del asesor del proyecto	1.200.000	Universidad de Nariño
26 horas semanales de trabajo del estudiante	5.200.000	Estudiante

7.2 Recursos Materiales

DETALLES	USO	TOTAL	FUENTE DE FINANCIACIÓN
Computador	3.200.000	6 meses	Estudiante
Elementos de oficina	150.000	6 meses	Estudiante

8. Cronograma

Para la ejecución del siguiente trabajo de grado, el cuál esta pensado en desarrollarse durante los cuatro meses establecidos para el décimo semestre del programa de física de la universidad de Nariño; a continuación se presenta el cronograma de actividades que se llevaran a cabo durante el trabajo de grado.

ACTIVIDADES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4
Revisión de bibliografía, obtención de información e investigación correspondiente a los tópicos de física de partículas, altas energías, paso de radiación a través de materia y muografía.	X			
Estudio del lenguaje de programación C++ en conjunto con el manejo y uso de las herramientas GEANT4 y ROOT.		X	X	
Desarrollo de código y diseño de simulación en GEANT4 de un detector de muones junto con sus respectivos fenómenos ópticos.			X	
Análisis de datos obtenidos de la simulación con el uso de la herramienta ROOT y correspondiente comparación con modelos semejantes				X
Elaboración del trabajo escrito del trabajo de grado que se va a presentar	X	X	X	X

9. Referencias

- [1] Todor Stanev, 2010, High Energy Cosmic Rays, edition 2, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] OPERA Collaboration, Experiment Proposal, CERN/SPSC 2000-028,SPSC/P318,LNGS P25/2000, 2000.
- [3] MINOS Collaboration, Technical Design Report, NuMI-L-337, Fermilab, 1998.
- [4] HIROYUKI KM TANAKA, TOSHIYUKI NAKANO, SATORU TAKAHASHI, JYUNYA YOSHIDA, MINORU TAKEO, JUN OIKAWA, TAKAO OHMINATO, YOSUKE AOKI, ETSURO KOYAMA, HIROSHI TSUJI, KIMIO NIWA. Imágenes de alta resolución en la corteza no homogénea con radiografía muónica de rayos cósmicos: la estructura de densidad debajo del piso del cráter volcánico del monte. Asama, Japón Geophys.Res.Lett. 36 (2009) 1944.
- [5] NICHOLAS ST. FLEUR. Un nuevo misterio de la gran pirámide de Guiza: su vacío interno. The new york times 2017.
- [6] MU-RAY project Collaboration, The MU-RAY project: detector technology and first data from Mt., 2014.
- [7] TOMUVOL Collaboration, Density imaging of volcanos with atmospheric muons, 2012.
- [8] Jacques Marteau(Lyon, IPN), Jean de Bremond d’Ars(Rennes U.), Dominique Gibert(Rennes U. and IPGP, Paris), Kevin Jourde(Lyon, IPN), Jean-Christophe Ianigro(Lyon, IPN), Bruno Carlus(Lyon, IPN), DIAPHANE: Muon tomography applied to volcanoes, civil engineering, archaeology, 2016.
- [9] HIROYUKI KM TANAKA, TOSHIYUKI NAKANO, SATORU TAKAHASHI, JYUNYA YOSHIDA, MINORU TAKEO, JUN OIKAWA, TAKAO OHMINATO, YOSUKE AOKI, ETSURO KOYAMA, HIROSHI TSUJI, KIMIO NIWA. Imágenes de alta resolución en la corteza no homogénea con radiografía muónica de rayos cósmicos: la estructura de densidad debajo del piso del cráter volcánico del monte. Asama, Japón Geophys. Res.Lett. 36 (2009) 1944.
- [10] M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa et al., Review of particle physics, Physical Review D 98 (Aug., 2018) 30001.
- [11] K. Nagamine, Introductory Muon Science. Cambridge University Press, July, 2007.
- [12] N. Lesparre, D. Gibert, J. Marteau et al., Density muon radiography of la soufrière of guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data, Geophysical Journal International 190 (Aug., 2012) 1008–1019.
- [13] E. P. George, Cosmic rays measure overburden of tunnel, Commonwealth Engineer 455 (1955) .
- [14] L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. El Bedwei et al., Search for hidden chambers in the pyramids, Science 167 (Feb., 1970) 832–839.
- [15] K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio et al., Discovery of a big void in khufu’s pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature 552 (Dec., 2017) 386, [1711.01576].
- [16] K. Nagamine, M. Iwasaki, K. Shimomura et al., Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction, Nuclear Instruments

and Methods in Physics Research A 356 (Feb., 1995) 585–595.

[17] H. K. M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi et al., High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of mt. asama, japan, *Earth and Planetary Science Letters* 263 (Nov., 2007) 104–113.

[18] H. K. M. Tanaka, T. Uchida, M. Tanaka et al., Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at Asama volcano, Japan, *Geophysics Research Letters* 36 (Sept., 2009) L17302.

[19] H. K. M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi et al., Radiographic imaging below a volcanic crater floor with cosmic-ray muons, *American Journal of Science* 308 (2008) 843–850.

[20] H. K. M. Tanaka, T. Kusagaya and H. Shinohara, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano, *Nature Communications* 5 (Mar., 2014) 3381.

[21] E. Le Menedeu, RPC application in muography and specific developments, *Journal of Instrumentation* 11 (June, 2016) C06009, [1605.09218].

[22] G. Saracino, L. Amato, F. Ambrosino et al., Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), *Scientific reports* 7 (2017) 1181.

[23] S. Kedar, H. K. M. Tanaka, C. J. Naudet et al., Muon radiography for exploration of Mars geology, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 2 (June, 2013) 157–164.

[24] S. Procureur, Muon imaging: Principles, technologies and applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 878 (Jan., 2018) 169–179.

[25] K. N. Borozdin, G. E. Hogan, C. Morris et al., Surveillance: Radiographic imaging with cosmic-ray muons, *Nature* 422 (Mar., 2003) 277.

[26] P. K. F. Grieder, *Cosmic Rays at Earth*. Elsevier, 2001.

[27] B. Wiebel-Sooth, P. L. Biermann and H. Meyer, Cosmic rays vii. individual element spectra: prediction and data, *Astronomy and Astrophysics* 330 (Feb., 1998) 389–398, [astro-ph/9709253].

[28] H. Asorey, *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación*. PhD thesis, Instituto Balseiro, 2012.

[29] B. Rossi, *Cosmic rays*, vol. 34. McGraw-Hill, 1964, 10.1119/1.1972998.

[30] R. J. R. Judge and W. F. Nash, Measurements on the muon flux at various zenith angles, *Il Nuovo Cimento* 35 (Feb., 1965) 999–1024.

[31] C. L. Morris, J. Bacon, K. Borozdin, J. Fabritius et al., Horizontal cosmic ray muon radiography for imaging nuclear threats, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 330 (July, 2014) 42–46.

[32] D. E. Groom, N. V. Mokhov and S. I. Striganov, Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV–100 TeV, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 78 (July, 2001) 183–356.

[33] N. Lesparre, D. Gibert, J. Marteau et al., Geophysical muon imaging: feasibility and limits, *Geophysical Journal International* 183 (Dec., 2010) 1348–1361.

-
- [34] A. Lobo-Guerrero, La falla de bogotá en cundinamarca, in X Congreso Colombiano de Geología, 2005.
- [35] A. Lobo-Guerrero, Geología e hidrogeología de santafé de bogotá y su sabana, Ponencia presentada en la VII Jornada Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia (1992) 1–20.
- [36] E. Rivera Guerrero, Radiografía de Monserrate mediante muones: Monografía, Master's thesis, Universidad de Los Andes, Bogotá, 2016.
- [37] Environmental Systems Research Institute (Esri), ArcGIS for desktop, 2018.
- [38] National Aeronautics and Space Administration (NASA), EarthData Search.
- [39] D. Heck and T. Pierog, Extensive air shower simulation with corsika: A user's guide, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik (2016) .
- [40] R. Brun and F. Rademakers, Root—an object oriented data analysis framework, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 389 (Feb., 1997) 81–86.
- [41] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Magnetic Field Calculators (Geomag).
- [42] O. C. Allkofer, G. Bella, W. D. Dau et al., Cosmic ray muon spectra at sea-level up to 10 TeV, Nuclear Physics B 259 (Sept., 1985) 1–18.
- [43] R. Nishiyama, A. Taketa, S. Miyamoto et al., Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons, Geophysical Journal International 206 (Aug., 2016) 1039–1050.
- [44] S. Tsuji, K. Toshikazu, K. Okei et al., Measurements of muons at sea level, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 24 (1998) 1805–1822.
- [45] S. Cecchini and M. Spurio, Atmospheric muons: experimental aspects, Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 1 (Nov., 2012) 185–196.
- [46] R. Nishiyama, S. Miyamoto and N. Naganawa, Experimental study of source of background noise in muon radiography using emulsion film detectors, Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 3 (Apr., 2014) 29–39.
- [47] V. Kudryavtsev, Muon simulation codes music and musun for underground physics, Computer Physics Communications 180 (Mar., 2009) 339–346, [0810.4635].
- [48] V. Niess, A. Barnoud, C. Cârloganu and E. Le Ménédeu, Backward monte-carlo applied to muon transport, Computer Physics Communications 229 (Aug., 2018) 54–67, [1705.05636].
- [49] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler and J. P. Biersack, Srim - the stopping and range of ions in matter (2010), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 (June, 2010) 1818–1823.
- [50] GEANT4 collaboration, S. Agostinelli et al., GEANT4: A Simulation toolkit, Nucl. Instrum. Meth. A506 (2003) 250–303.
- [51] J. Mompert, C. Domingo, C. Baixeras et al., Calculation of range and energy loss of fast ions with $z \geq 30$ using a corrected bethe-bloch formula, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 107 (Feb., 1996) 56–61.