

SIMULACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV EN AGUA DE LA COLABORACIÓN LAGO

Rolando Calderón Ardila

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias
Escuela de Física
Bucaramanga
2015

SIMULACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV EN AGUA DE LA COLABORACIÓN LAGO

Rolando Calderón Ardila

Trabajo de grado para optar al título de Físico

Director: Dr. Luis Alberto Núñez ^{1,2}

Co-Director: Dr. Hernán Gonzalo Asorey ^{1,2,3}

¹GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN RELATIVIDAD Y GRAVITACIÓN - UIS

²GRUPO HALLEY DE ASTRONOMÍA Y CIENCIAS AEROESPACIALES

³LABORATORIO DETECCIÓN DE PARTÍCULAS Y RADIACIÓN, INSTITUTO BALSEIRO Y CENTRO
ATÓMICO BARILOCHE, BARILOCHE, ARGENTINA

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias
Escuela de Física
Bucaramanga
2015

A mis profes,
porque de ellos aprendí,
lo que quiero hacer y ser,
y lo que no quiero hacer ni ser
el resto de mi vida.
Gracias

AGRADECIMIENTOS

Es mi deseo agradecer primero, antes que a cualquier otro a mis queridos padres, Urbano y María Inés quienes a lo largo de mi vida siempre me han apoyado, sin importar las circunstancias ni las dificultades, sin importar lo bueno ni lo malo, sin importar el resultado. A estas dos personas debo mi vida y el deseo mas profundo de vivir, siempre les estaré agradecido por su ejemplo y confianza, los amo. A mi amada Alejandra y mi hermoso hijo Alan, por darme dirección y fuerza, por su amor y confianza, por acompañarme en este camino tan bello que es la vida. A mis tutores; Luis A. Nuñez por mostrarme con su ejemplo y pasión el significado y la belleza de esta profesión, por enseñarme que los limites los pone uno mismo y siempre hay que pasarlos; A Hernán Asorey por su confianza y orientación, por compartir no solo sus conocimientos, sino ademas, sus experiencias y su ser, he sido afortunado grandes son... A mis compañeros y amigos Christian y Mauricio por creer en mi y compartir los sueños, esperanzas y logros que sus esfuerzos han forjado, por estar ahí siempre, a todos los miembros y ex-miembros del grupo Halley por permitirme hacer parte esta familia.

Finalmente a las personas que de una u otra manera me ayudaron a alcanzar esta meta.

Gracias.

Índice general

Índice de figuras	12
1 Introducción	18
2 Rayos Cósmicos	20
2.1 Espectro de los Rayos Cósmicos	21
2.2 Destellos de Rayos Gamma	22
2.2.1 (Destellos Gamma)	22
2.2.2 Clasificación para la Astronomía Gamma	23
2.3 Lluvias Atmosféricas Extendidas	24
3 Latin American Giant Observatory (LAGO)	27
3.1 Técnica de la partícula única	29
4 El detector Cherenkov en Agua (WCD)	31
4.1 Radiación de Cherenkov	31
4.1.1 Efecto Cherenkov	31

4.2	Aplicación del fenómeno de radiación Cherenkov	37
4.2.1	Detectores Cherenkov en agua (WCD)	39
4.3	Procesos Físicos dentro del Tanque	40
4.3.1	Efecto fotoeléctrico	40
4.3.2	Efecto Compton	41
4.3.3	Creación de pares	42
4.3.4	Interacción de los electrones	42
5	Los códigos GEANT4	44
5.1	Introducción	44
5.1.1	El método de Monte Carlo	46
5.1.2	Descripción fundamental	46
5.1.3	Aplicación al transporte de radiación	47
5.2	El núcleo y clases de GEANT4	47
6	Resultado : Simulación del Detector en GEANT4	50
6.1	Las principales clases de implementación	50
6.1.1	Definición de la geometría	51
6.1.2	Lista de Física	52
6.2	Simulación del Detector WCD	53
6.2.1	Geometría	53
6.2.2	Simulación de la geometria	53

6.2.3	Definiendo Materiales	55
6.2.4	Construcción de volúmenes	56
6.2.5	Inyección de Partículas	56
7	Resultados y Discusión	59
7.1	Pulsos para diferentes partículas	59
7.1.1	Caracterización de los pulsos	59
7.2	Tiempo Característico de atenuación	60
7.2.1	Longitud de atenuación	60
8	Conclusiones	65
8.1	Conclusiones	65
8.2	Exposición del trabajo a la comunidad	66
8.3	Perspectivas	66
	Bibliografía	68

Índice de figuras

2.1	Representación artística de rayos cósmicos llegando e inter-actuando en la alta atmósfera generando Lluvias Atmosféricas Extendidas	20
2.2	Espectro de energía de los rayos cósmicos generado con datos obtenidos por diferentes observatorios, imagen tomada de [1].	22
2.3	Dibujo artístico que representa del desarrollo de una cascada atmosférica extendida la cual posee típicamente una componente muónica, hadrónica y electromagnética, a la derecha una representación de una cascada individual llegando a detectores de superficie.	25
2.4	A la izquierda se observa el desarrollo de una lluvia atmosférica extendida de tipo electromagnética; A la derecha tenemos el desarrollo de una lluvia atmosférica extendida de tipo hadrónica.	26
3.1	Este gráfico es una representación espacial que referencia las instalaciones de en las cuales operan, y entraran en operación detectores en agua Cherenkov de la colaboración LAGO.	28
3.2	Líneas de la misma sensibilidad para algunos experimentos de diferente tamaño y altura que usan la técnica de la partícula única; Sierra Negra se muestra como una linea discontinua, y Chacaltaya como una linea sólida. Es importante destacar que unas decenas de m^2 de WCD a gran altura son tan eficientes para esta técnica como experimentos que se están ejecutando actualmente a nivel del suelo, en cruz un candidato para la instalación de un arreglo de detectores LAGO, en el páramo de Berlin, Santander-Colombia imagen tomada de [2].	30

4.1	Fotografía del <i>WCD</i> Guane3 instalado en la ciudad de Bucaramanga-Colombia, en operación a la fecha, sus datos serán usados para hacer comparaciones de los pulsos característicos con simulaciones computacionales.	32
4.2	La respuesta del medio al paso de una partícula cargada	33
4.3	Construcción del frente de ondas y emisión del cono de luz	34
4.4	Banda de radiación Cherenkov, la radiación es emitida solamente en este rango de frecuencias	35
4.5	Algunos medios y rangos de velocidades	38
4.6	Super-Kamiokande, o Super-K, es un observatorio de neutrinos localizado en Japón.	39
4.7	Telescopio Magic en la isla de Palma	39
4.8	Esquema de un detector usado por el proyecto LAGO instalados a lo largo de Sur y Centro América	40
4.9	Esquema del efecto fotoeléctrico	41
4.10	Esquema del efecto compton, λ_i refiere a la longitud de onda incidente, λ_f refiere de igual forma a la longitud de onda final acompañada por un electrón.	41
5.1	Geant4 (<i>Geometry ANd Tracking</i> por sus siglas en ingles, aqui tenemos un ejemplo de visualización de una lluvia atmosférica tipo hadrónica. . .	45
5.2	Estructura de categorías de las clases de GEANT4. Las lineas terminadas flecha representan una relación de uso en el sentido de que las clases en la categoría junto a la flecha usan clases de la categoría situada al otro lado de la línea. [3]	49
6.1	Esquema simplificado de las medidas del detector Guane3 instalado en Bucaramanga a 956 msnm visto desde arriba y con una vista lateral . .	53

6.2	Construcción del detector en GEANT4, parte del código debe ser modificado para cumplir con las medidas y propiedades.	54
6.3	La imagen fue obtenida a partir de la inyección de un μ^+ vertical con una Energía $E = 5GeV$, el interior del tanque esta definido como un recubrimiento reflectivo y refractivo a partir del modelado que en GEANT4 es llamado <i>Unified – model</i> ; las lineas verdes son representaciones del seguimiento de fotones propagándose dentro del agua, las líneas azules representan partículas cargadas (+)	57
6.4	Un ejemplo, al realizar la simulación para 200 μ^+ y promediar se obtiene la cantidad de fotones Cherenkov que llegan al PMT en funcion del tiempo para una partícula atravesando el tanque, esta distribución permite realizar un fit a los datos con una función exponencial, el τ representa la atenuación del pulso en el tanque, se obtuvo en este caso un $\tau = (55,1 \pm 1,79)ns$	58
7.1	Espectros de energía de los secundarios observados al nivel del detector para una hora de flujo equivalente de primarios, donde se muestra las principales componentes de la lluvia.	60
7.2	A la izquierda dos pulsos generados por electrones e^- , a la derecha positrones e^+ , los dos casos con una energía de incidencia dentro del detector de 10 <i>MeV</i> y 100 <i>MeV</i> , los ajustes exponenciales permiten determinar los tiempos de atenuación, estos son usados para calcular la longitud de atenuación de cada partícula al paso por el detector.	61
7.3	A la izquierda dos pulsos generados por muones μ^- , ala derecha μ^+ , los dos casos con una energía de incidencia dentro del detector de 1000 <i>MeV</i> y 10000 <i>MeV</i> respectivamente, los ajustes exponenciales permiten determinar los tiempos de atenuación, estos son usados para calcular la longitud de atenuación de cada partícula al paso por el detector, se enuncian en la tabla .7.1	62

- 7.4 En este caso podemos observar dos pulsos a la izquierda correspondientes a fotones Gamma con energías de 10 y 100 MeV , a la derecha tenemos un registro del paso de 200 protones con energías de 1 GeV y 5 GeV promediados, al realizar las simulaciones se observo que no pasan la mayoría de los protones con estas energías, solo algunos avanzan en el tanque gracias a que sufren procesos físicos de frenado e interacción, sus partículas hijas con carga son las que alcanzan a generar cherenkov en el agua. . 62
- 7.5 Histograma de carga para los pulsos medidos por GUANE3 durante una hora, en este caso particular los datos fueron tomados el 2015-04-10, un histograma de carga es el área bajo la curva registrada por el PMT para eventos con un pico máximo de voltaje que superaron el umbral establecido. Un histograma de carga típico muestra la carga depositada por partícula en unidades de ADC. Este histograma sirvió para poder ubicar el VEM (Vertical Equivalent muon, por sus siglas en ingles). Esto fue de vital importancia ya que el VEM de muones con energías de 1 GeV esta caracterizado. 63
- 7.6 Pulso promedio para muones verticales registrados por el detector GUANE3, instalado en Bucaramanga a 956 m s.n.m, se obtuvo buscando el valor de carga en el VEM en la Figura .7.5, luego todos los pulsos con esa carga y finalmente se obtuvieron los (τ) y se promediaron para todos los encontrados, se realiza un ajuste exponencial para conocer su tiempo característico de atenuación (τ) el cual sirvió para comparar con las simulaciones obtenidas, el tiempo característico obtenido es $\tau = (59, 50 \pm 1, 92)ns$ 64

Resumen

TÍTULO: SIMULACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV EN AGUA DE LA COLABORACIÓN LAGO¹

AUTOR: Calderón Ardila, Rolando².

PALABRAS CLAVES: Detector Cherenkov, GEANT4,, Radiación Cherenkov, Rayos cósmicos.

DESCRIPCIÓN:

Para la caracterización de las señales detectadas por detectores Cherenkov en agua WCD (*Water Cherenkov Detector*, por sus siglas en ingles) debido al paso de partículas secundarias originadas en cascadas atmosféricas extendidas en el marco del proyecto LAGO (*Latin American Giant Observatory*), por sus siglas en ingles), es necesario desarrollar simulaciones detalladas y adicional mente validar códigos desarrollados por el proyecto para al estudio de la respuesta de los detectores WCD, partículas secundarias que se originan durante la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. En este contexto, el proyecto LAGO tiene como objetivo estudiar la componente de alta energía de explosiones de rayos gamma (GRBs) y los fenómenos meteorológicos espaciales mediante la búsqueda de la modulación solar de los rayos cósmicos galácticos. Esto motivó al desarrollo del presente trabajo en el cual se desarrollaron simulaciones computacionales a partir de los códigos denominados GEANT4 (*Geometry ANd Tracking*, por sus siglas en inglés), herramienta desarrollada para simular la interacción de radiación con la materia y sirvió como herramienta para validar la respuesta experimental de los WCD de la colaboración; simultáneamente se realizó un paralelo con los datos obtenidos por LAGO, observando resultados importantes que avalan su aplicación. se obtuvieron los tiempos característicos de atenuación (τ), estos resultan útiles para calcular la longitud de atenuación λ .

¹Trabajo de grado.

²Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis Alberto Núñez (Director), Hernán Gonzalo Asorey (Co-Director).

Abstract

TITLE: SIMULATION OF THE WATER CHERENKOV DETECTORS COLABORATION LAGO ³

AUTHOR: Calderón Ardila, Rolando ⁴.

KEY WORDS: Cherenkov detector, GEANT4, Cherenkov radiation, Cosmic rays.

DESCRIPTION:

For the characterization of the signals detected by water Cherenkov detectors WCD (Water Cherenkov Detector, for its acronym in English) due to the passage of secondary particles originated from extensive air cascade under the LAGO Project (Latin American Giant Observatory, for its acronym in English). is necessary to develop detailed simulations and further validate codes developed by the Project for studying the response of the detectors WCD, these secondary particles are originated during the cosmic ray interaction with the atmosphere. In this context, the LAGO project aims to study the high-energy component of Gamma ray bursts (GRBs) and space weather events by finding solar modulation of galactic cosmic rays.

This motivated the development of this work in which computer simulations were developed from known codes GEANT4 (Geometry ANd Tracking, for its acronym in English) this tool was developed to simulate the passage of radiation through matter and served as a tool to validate the experimental response of the WCD of the collaboration, a parallel was held simultaneously with the developed data by LAGO obtaining significant results that support its application and, the τ corresponding to the characteristic times of attenuation were obtained, which are useful for calculating the length of λ attenuation.

³Degree work.

⁴Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis Alberto Núñez (Director), Hernán Gonzalo Asorey(Co-Director).

Capítulo 1

Introducción

Los rayos cósmicos, los cuales fueron descubiertos en 1912 por el austriaco Víctor Hess y llamados así por Millikan en 1925 [4], han motivado diversos estudios sobre su naturaleza. Su espectro se presenta como una ley de potencias que se extiende desde energías de 10^9 eV hasta energías mas allá de 10^{20} eV. La Observación y estudio de estos interesantes fenómenos es posible gracias a sus partículas secundarias que son producidas por la interacción de una partícula primaria con núcleos de la alta atmósfera, un evento como este es conocido como chubasco atmosférico [5] En la fenomenología destacan los GRBs (*Gamma Ray Bursts*) que han representado una de las principales motivaciones al estudio de estas partículas tan energéticas.

Los GRB, son los eventos más energéticos y brillantes en el universo. Fueron registrados inicialmente gracias a los satélites ‘VELA’ en 1967 que estaban trabajando en la búsqueda de posibles actividades nucleares no autorizadas. Estas emisiones de fotones gamma son las más energéticas observadas a la fecha y su duración es muy corta, del orden de segundos y hasta unos minutos.

En los años 90, el satélite *Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)* con su detector BATSE (*Burst And Transient Source Experiment*, por sus siglas en inglés) aportó valiosa información sobre estos destellos. BATSE mostró que estaban distribuidos de una manera isotropa y que en promedio se observaba un destello por día. Además, mostró que duraban entre 0.01 y 100 segundos y que presentaban dos diferentes poblaciones,

GRBs cortos y GRBs largos diferenciados por su duración en el tiempo.

BeppoSAX permitió la detección de la contraparte de los GRBs cortos al revisar en otras longitudes de onda tales como X, óptico y radio. Las observaciones en el rango óptico, permitieron determinar la distancia a la que los GRBs fueron generados. La baja luminosidad se explica porque los GRBs llegan de distancias lejanas. Una mejor observación de las contrapartes ópticas y posibles fuentes de rayos gamma fue aportado por SWIFT y Fermi. Estos resultados muestran que los GRBs son generados por la colisión de dos estrellas de neutrones o una estrella de neutrones con un agujero negro, y los GRBs largos son asociados con el colapso de estrellas masivas y las explosiones tipo hypernovas.

LAGO pretende aportar en el estudio de los GRBs no solo por su capacidad de detección a nivel del suelo, sino además por su bajo costo. De esta manera los detectores de LAGO pueden estar instalados en más lugares y abarcar mayor área de detección. LAGO está trabajando a partir de la colaboración ¹ de más de 9 países en los cuales se han instalado los detectores a lo largo de Sur América y Centro América y cuenta con un grupo de colaboradores internacionales. La estrategia de LAGO es poder sincronizar los detectores de manera que su estructura sea similar en todas las instalaciones, los protocolos de calibración y funcionamiento también deben ser similares con el propósito de adquirir datos en simultaneo mediante un repositorio que permita una rápida revisión y análisis de los datos.

¹<http://www.lagoproject.org//>

Capítulo 2

Rayos Cósmicos

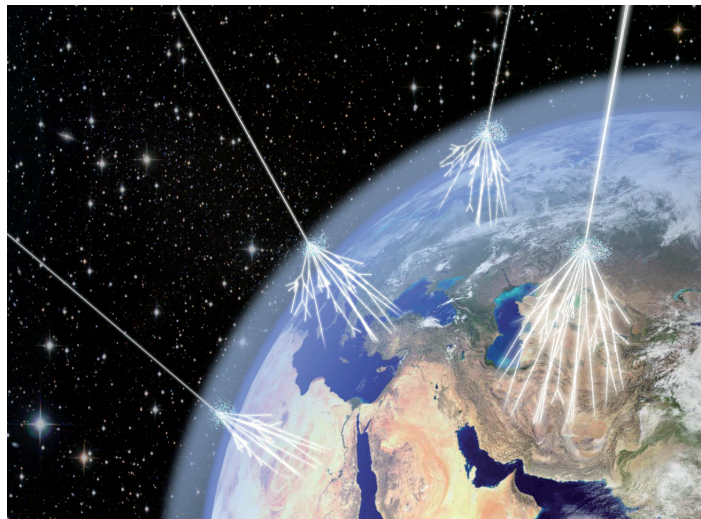


Figura 2.1: Representación artística de rayos cósmicos llegando e inter-actuando en la alta atmósfera generando Lluvias Atmosféricas Extendidas

Definimos como rayos cósmicos a las partículas, siendo en su mayoría núcleos atómicos, que tienen su origen mas allá del sistema solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano. En su mayoría esta radiación esta formada por núcleos atómicos con numero atómico que va desde $Z = 1$ (hidrógeno) hasta $Z = 26$ (hierro). Se encuentran presentes además trazas de elementos más pesados, electrones y neutrinos de alta energía.

Espectro de los Rayos Cósmicos

El estudio de los rayos cósmicos (RC) se ha prolongado desde hace casi un siglo hasta el día de hoy, se han observado en un amplio rango de energías que abarca desde $E < 10^9 \text{eV}$ hasta valores de energías superiores a los $E > 10^{20} \text{eV}$, y dependiendo de la energía que posean se utilizan diferentes métodos experimentales. La figura 3.1 muestra el flujo de los RC por unidad de área, por unidad de ángulo sólido, por segundo, por eV que se encuentra en función de la energía; El flujo observado disminuye rápidamente con el aumento de la energía para los RC .

Se ha encontrado que en el rango de las energías mas bajas, $E \leq 10^{10} \text{eV}$, el espectro esta completamente dominado por el viento solar, y los campos magnéticos en la heliósfera y en la magnetósfera. Más aún, ademas las variaciones locales del campo magnético heliosférico son capaces de introducir modulaciones en el flujo hasta energías de varios cientos de GeV [6]. Se ha podido observar una anticorrelación entre el flujo observado y el ciclo de actividad solar de 11 años de duración. El flujo de RC puede describirse mediante una simple ley de potencias de la forma

$$\left(\frac{dN}{dE_p} \right) \propto E_p^\alpha, \quad (2.1)$$

donde α es el indice espectral, y es aproximadamente igual a -3 y E_p refiere a la energía del primario. Esta ley se observa en casi todo el rango del espectro energético. Se observan algunas pequeñas variaciones en la pendiente de algunas zonas, como por ejemplo, el caso cuando se tiene la energía de $E \sim 10^{15,5} \text{eV}$ donde se tiene un variación del indice espectral de $E^{-2,7}$ a E^{-3} a esto se le conoce en la literatura como la rodilla. El espectro energético tiene otra variación en la energía $E \sim 10^{17,7} \text{eV}$ con un $E^{-3,3}$, a esta región se le asigna el nombre de la segunda rodilla, después de la segunda rodilla, de nuevo el espectro vuelve a regularizarse, para la energía de $10^{18,5} \text{eV}$ se tiene otra variación en el espectro energético y se conoce como el tobillo [6].

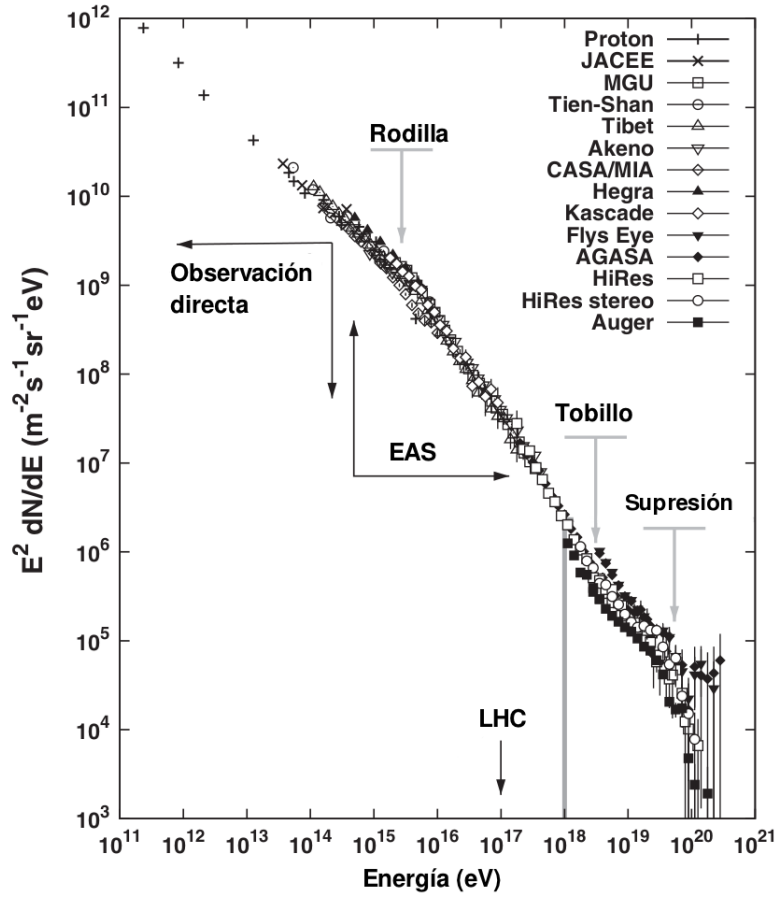


Figura 2.2: Espectro de energía de los rayos cósmicos generado con datos obtenidos por diferentes observatorios, imagen tomada de [1].

SECCIÓN 2.2

Destellos de Rayos Gamma

2.2.1 (Destellos Gamma)

Los destellos de rayos gamma ó *gamma ray burst (GRBs)* por sus siglas en ingles, son emisiones extra solares repentinas y muy intensas de rayos gamma que duran unos pocos segundos, como mencione en la introducción se clasifican en de corta y de larga duración, y esto depende de la fuente o mecanismo de producción, durante los últimos

años se han realizado algunos descubrimientos como por ejemplo, la observación de la lenta desaparición de rayos X , señales en el rango óptico y la identificación de galaxias a distancias cosmológicas que generaron presuntamente los *GRBs*.

En el caso del proyecto LAGO ¹, la detección de *GRBs* es uno de sus intereses científicos, los experimentos basados en detectores de superficie pueden estudiar los eventos de *GRBs* a energías arriba de 10 GeV [7], a través de las mediciones de las partículas secundarias generadas por la interacción de los rayos gamma primarios con la atmósfera produciendo $e^\pm$, γ y fotones Cherenkov al llegar a niveles del suelo. Las varias observaciones que se han obtenido a energías de cientos de GeV son establecidas gracias a la luz Cherenkov que permite la observación indirecta de fuentes de rayos gamma y mediante telescopios presentan una cierta limitación a la hora de detectar eventos como los *GRBs* por su pequeño campo de visión.

Los detectores basados en arreglos a nivel del suelo, llamados también de superficie, como por ejemplo LAGO pueden detectar las partículas secundarias que alcanzan el nivel del suelo, su mayor campo de visión representa una ventaja para sumarse al estudio de los *GRBs*.

2.2.2 Clasificación para la Astronomía Gamma

Se han establecido rangos específicos en términos de la energía para los rayos gamma [8], a continuación los enumeramos

- Para $\gamma < 30$ MeV se le conocen como rayos gamma de baja energía (γ_{LE}).
- Para energías de $30 \text{ MeV} < \gamma < 30 \text{ GeV}$ se conocen como rayos gamma de alta energía (γ_{HE}).
- Para energías de $30 \text{ GeV} < \gamma < 30 \text{ TeV}$ se conocen como rayos gamma de muy alta energía (γ_{VHE}).
- Para energías de $30 \text{ TeV} < \gamma < 30 \text{ PeV}$ se conocen como rayos gamma de ultra alta energía (γ_{UHE}).
- Para $\gamma > 30 \text{ PeV}$ se conocen como rayos gamma de extrema energía (γ_{EHE}).

¹Latin American Giant Observatory

Un (γ_{VHE}) que arriba a la tierra, e interacciona en la alta atmósfera, produce una lluvia atmosférica predominantemente del tipo electromagnética, la primera interacción es típicamente la creación de un par electrón-positrón. Estas partículas se encuentran bajo la acción del proceso físico de Bremsstrahlung.

SECCIÓN 2.3

Lluvias Atmosféricas Extendidas

Como mencionamos anteriormente los *RC* interactúan con la atmósfera. Cuando esto sucede, se genera un fenómeno que se denomina lluvias atmosféricas extendidas o *extensive air shower* (*EAS* por sus siglas en inglés), que son el resultado de la interacción de los *RC* con los átomos que se encuentran en la alta atmósfera. Luego de la interacción se producen millones de partículas secundarias que generalmente suelen llegar al nivel del mar y cubren grandes extensiones de la superficie terrestre. La partícula generadora de la *EAS* es denominada primario y todas las partículas producidas después de la primera interacción son llamados secundarios. Las *EAS* pueden tener componente hadrónica y electromagnética, en este caso los detectores de superficie son usados para detectar los secundarios de estas lluvias.

Lluvia Electromagnética

En las lluvias iniciadas por un gamma, llamadas lluvias electromagnéticas, la *EAS* comienza con la producción de un par electrón-positrón debido a la interacción del gamma con el campo eléctrico de un núcleo atmosférico, por esto la siguiente generación de fotones se emiten a través del proceso Bremsstrahlung; esto puede suceder en repetidas ocasiones. Debido a la dispersión múltiple de los $e^\pm$, estas partículas se alejan de la dirección del fotón incidente, recibe el nombre de eje de la cascada [6], este proceso se repite hasta que la energía de los secundarios llega a un valor crítico que es cercano a 85 MeV.

La Figura 2.4 se tiene un esquema del desarrollo de un *EAS* de tipo electromagnética. Cuando los procesos de ionización y el efecto Compton ² empiezan a dominar sobre el proceso Bremsstrahlung y la producción de pares, en este momento la cascada ha

²Un fotón incidente interactúa con un electrón libre, después hay dispersión entre un electrón y un fotón de menor frecuencia.

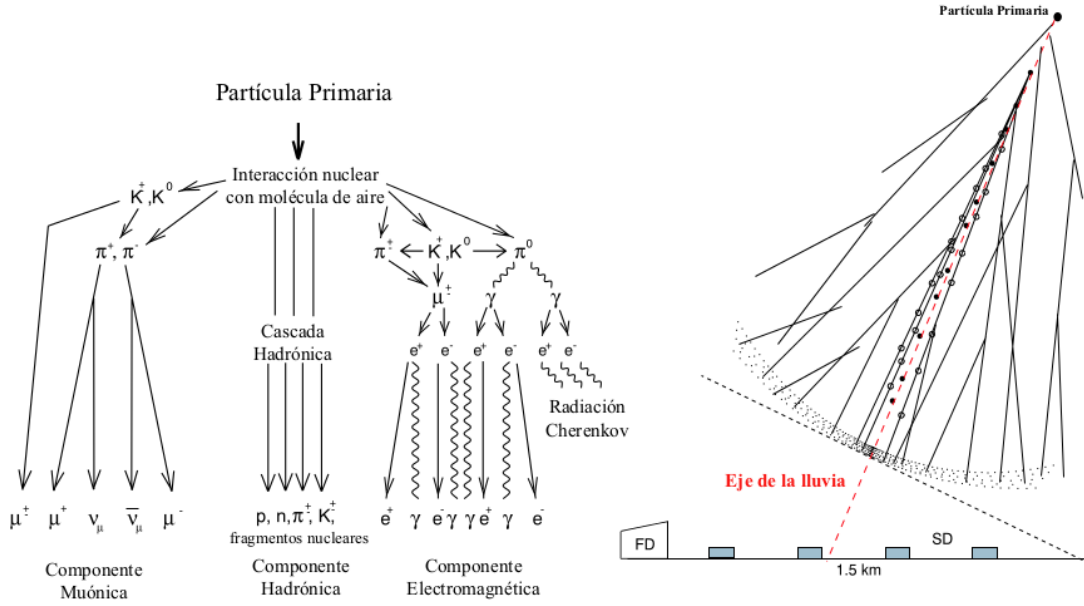


Figura 2.3: Dibujo artístico que representa del desarrollo de una cascada atmosférica extendida la cual posee típicamente una componente muónica, hadrónica y electromagnética, a la derecha una representación de una cascada individual llegando a detectores de superficie.

alcanzado su máximo desarrollo. Si un gamma con una energía E_0 recorre una longitud de radiación χ_0 de aire [6], y luego en la primera interacción sucede la producción electrón-positrón, luego si en cada interacción la energía disponible se divide en partes iguales entre las partículas que participan, es decir, el electrón tiene fracción de la energía $\frac{E}{2}$ al igual que el positrón, y luego en la siguiente interacción, estas partículas perderán energía con el proceso Bremsstrahlung. Se observa que después de n pasos sucesivos, hay un total de $N = 2^n$ partículas. Para poder calcular la energía de cada una de las partículas de la generación n -ésima se obtiene con la siguiente expresión [9].

$$E_n = \frac{E_0}{2^n}, \quad (2.2)$$

Donde E_0 es la energía del primario, E_n es la energía de las partículas y 2^n es el total de partículas correspondiente a la n -ésima generación de partículas.

Lluvia Hadrónica

Los RC que principalmente son (p , núcleos pesados, α), producen una lluvia de tipo hadrónica, al experimentar una interacción hadrónica con un núcleo de la atmósfera. La cascada se inicia cuando un RC interactúa con un núcleo atmosférico o una molécula,

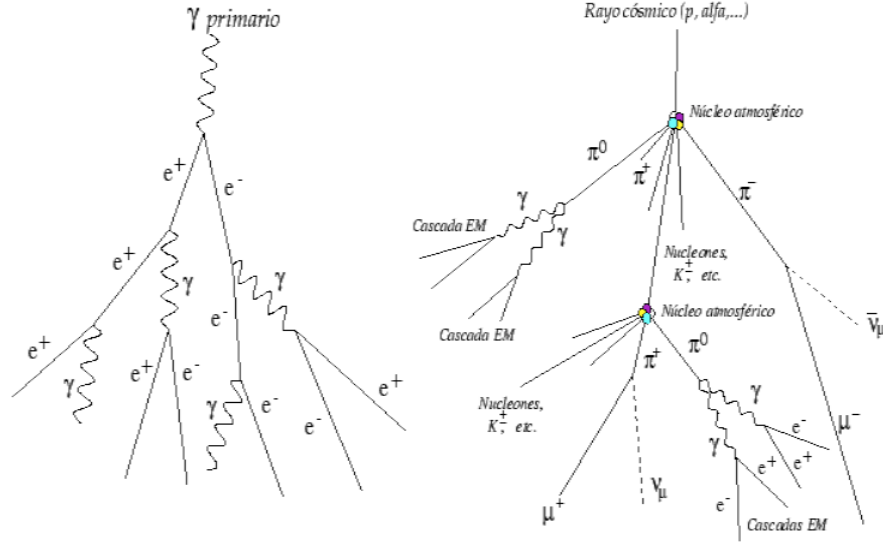


Figura 2.4: A la izquierda se observa el desarrollo de una lluvia atmosférica extendida de tipo electromagnética; A la derecha tenemos el desarrollo de una lluvia atmosférica extendida de tipo hadrónica.

después de esta primera interacción las partículas que se pueden producir son piones neutros (π^0), piones cargados $\pi^\pm$, kaones $K^\pm$, nucleones (n, p), los posibles fragmentos del núcleo original forman lo que se llama el núcleo hadrónico de la lluvia; cuando la energía de los nucleones es del orden de $E = 1\text{GeV}$, ya no hay producción de piones. Luego los (π^0) se desintegran en dos, dando lugar a cascadas electro- magnéticas, los $\pi^\pm$ que no interaccionan con otros núcleos atmosféricos, se desintegran en muones, gracias a esto se tiene la componente muónica [9].

Componente Muónica

Esta componente de las lluvias es producida por el decaimiento de mesones cargados, los cuales se derivan de las primeras interacciones hadrónicas. Inicialmente el número de muones aumenta a medida que la lluvia se desarrolla hasta llegar a un máximo para luego atenuarse muy lentamente. Esto sucede, debido a que los muones casi no interactúan con el medio y la pérdida de energía solo se da por ionización.

Capítulo 3

Latin American Giant Observatory (LAGO)

"Solo las personas que están lo suficientemente locas como para pensar que pueden cambiar el mundo..... son quienes lo cambian "

Steve Jobs

El Proyecto LAGO (*Latin American Giant Observatory* por sus siglas en ingles, consiste en una colaboración internacional de 9 países latinoamericanos, LAGO tiene como objetivos principales el estudio del fondo de radiación generado por *RC*, la meteorología espacial y la componente de alta energía de los destellos de rayos gamma mayores a (10GeV), usando la técnica de la partícula única [2] en detectores ó arreglos de detectores Cherenkov en agua [10]. Se han seleccionado sitios de gran altura (Chacaltaya, Bolivia, 5200 m.s.n.m. Pico Espejo, Venezuela, 4765 m.s.n.m., Sierra Negra, México, 4550 m s.n.m,) y la construcción en sitios de menor altitud como en Argentina, Perú, Colombia, Guatemala, Ecuador y Brasil. Los *WCD* a gran altitud ofrecen una única posibilidad de detectar el bajo flujo de los GRB en el rango de energías de 1 GeV a 1 TeV [11].

La absorción en la atmósfera es tal que por ejemplo a 1400 m s.n.m.(el Observatorio Pierre Auger de rayos cosmicos)[12] , la cantidad de partículas es 100 veces menor que a 5200 m de altura (Observatorio de rayos cósmicos en Chacaltaya), mientras que el ruido es algo como 8 veces menor. Un detector de agua Cherenkov tipo Auger en el cerro de Chacaltaya es por lo tanto, equivalente a 1250 detectores a la altura de Auger.

Con $20m^2$ de detectores a 5200m de altura, se tendrá un umbral de detección menor al de los 1600 detectores de Auger.

Entre otras cosas LAGO permitirá el estudio de rayos $\gamma > 10$ GeV que, hasta hoy, son fenómenos de muy difícil detección por otros instrumentos espaciales, con el objetivo de:

- Estudiar correlaciones entre la actividad solar y la modulación del fondo de rayos cósmicos.
- Correlacionar fluctuaciones del conteo registrado con la ocurrencia de un *GRB* detectado en satélite.
- Dar información para establecer un rango máximo de la escala de distancia en la que ocurrió el evento de GRB.
- Permitir el seguimiento de fuentes conocidas y el descubrimiento de nuevas clases de fuentes de GRB, puntuales y difusas.
- La sensibilidad a bajas energías y continua operación permitirán medir la pronta emisión de ráfagas de rayos γ .

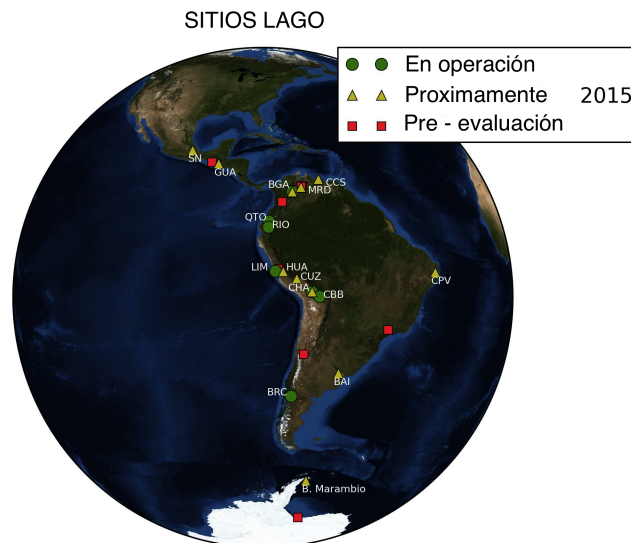


Figura 3.1: Este gráfico es una representación espacial que referencia las instalaciones de en las cuales operan, y entraran en operación detectores en agua Cherenkov de la colaboración LAGO.

Técnica de la partícula única

Como mencionamos anteriormente la atmósfera terrestre está siendo bombardeada por RC todo el tiempo, de manera que una partícula que ingresa, sea un γ , una partícula cargada o un núcleo atómico produce un chubasco o lluvia atmosférica extendida. Si queremos estudiar estas lluvias, existen estrategias que permiten su detección. La técnica de detección más usada en los detectores de superficie consiste en la detección directa del arribo de los secundarios que no son independientes entre sí, para poder observar la cascada completa y con esta información hacer la reconstrucción de la energía y dirección del primario.

La técnica de la partícula aislada (*Single Particle Technique*, *SPT* por sus siglas en inglés), consiste en contabilizar todos los fotones que registran los *PMTs* del experimento, no importa si pertenecen a un *EAS* o si es una partícula de una *EAS* de menor tamaño. La idea principal en esta técnica de detección, es conocer el conteo de partículas en un determinado periodo de tiempo, con esto se pueden estudiar las variaciones en otro instante temporal. Existen algunos fenómenos que deben ser considerados al momento de realizar este tipo de experimentos, ya que pueden inducir variaciones en el flujo de los secundarios, éstos son por ejemplo, variaciones en la presión atmosférica, tormentas eléctricas, actividad solar y variaciones en el campo magnético terrestre.

Los *WCD* y la *SPT* pueden ser usados para para buscar fotones de alta energía, teniendo en cuenta el hecho que entre mayor sea la altura para la ubicación del detector, se tendrá mayor sensibilidad, esto se puede apreciar en la figura 3.2 que se muestra la sensibilidad de detección y compara algunos sitios de LAGO con otros experimentos. Actualmente, para poner en marcha este tipo de experimentos, es fundamental que se realicen simulaciones para poder optimizar recursos que en algunos casos son de gran utilidad, por este motivo consideramos importante la simulación de un detector LAGO con el propósito de conocer su respuesta.

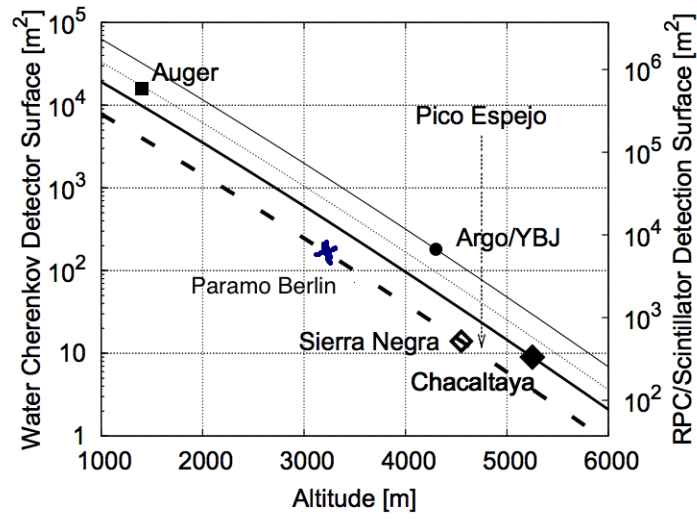


Figura 3.2: Líneas de la misma sensibilidad para algunos experimentos de diferente tamaño y altura que usan la técnica de la partícula única; Sierra Negra se muestra como una línea discontinua, y Chacaltaya como una línea sólida. Es importante destacar que unas decenas de m^2 de *WCD* a gran altura son tan eficientes para esta técnica como experimentos que se están ejecutando actualmente a nivel del suelo, en cruz un candidato para la instalación de un arreglo de detectores LAGO, en el páramo de Berlin, Santander-Colombia imagen tomada de [2].

Capítulo 4

El detector Cherenkov en Agua (WCD)

SECCIÓN 4.1

Radiación de Cherenkov

4.1.1 Efecto Cherenkov

Introducción

En 1904 Arnold Sommerfeld especula sobre la radiación de partículas cargadas viajando más rápido que la luz, solo un año mas tarde el famoso Albert Einstein muestra teóricamente que nada puede viajar más rápido que la luz desterrando al olvido el trabajo de Sommerfeld.

Luego alrededor de 1910 la física experimental mas famosa, Marie Curie observa una extraña luminiscencia azul en botellas con una solución concentrada de radio, evidentemente, con el inmenso mundo que se habría ante sus ojos no pudo reparar en algo tan insignificante, mas adelante en 1926 Lucien Mallet escribe un artículo titulado “Lu-

miniscencia del agua y otras sustancias orgánicas sometidas a radiación γ ". Realiza un primer análisis espectrográfico encontrándose con un espectro continuo y extendido.

En 1934 Pável Cherenkov determinó que la variación de intensidad era muy pequeña en función del líquido utilizado (muy poca absorción) y que la distribución espectral variaba muy poco y estaba acumulada en el azul y el violeta. Tampoco noto variaciones en la intensidad con la temperatura ni con la adición de agentes amortiguadores de la fluorescencia. Demostró que los rayos β producían el mismo efecto y que los elementos radiantes no eran directamente los rayos γ .

Unos años después Frank y Tamm proponen explicar ese fenómeno basándose en el olvidado trabajo de Sommerfeld sobre radiación de partículas viajando mas rápido que la luz; así Ginzburg desarrolla una interpretación cuántica de la teoría de Tamm y Frank, y finalmente Gettling en 1947 utiliza fotomultiplicadores en una primera aplicación practica basada en el efecto Cherenkov.

Hoy, en 2015 después de muchos años durante los cuales la humanidad aprovecho este fenómeno para estudiar la radiación ionizante, el proyecto LAGO en América Latina y otros observatorios usan *WCD* aprovechando este fenómeno para estudiar los rayos cósmicos.

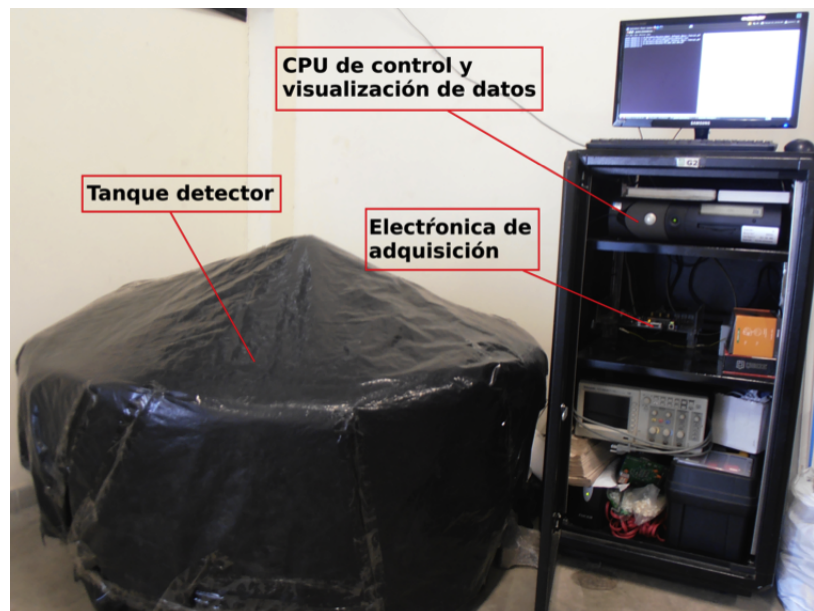


Figura 4.1: Fotografía del *WCD* Guane3 instalado en la ciudad de Bucaramanga-Colombia, en operación a la fecha, sus datos serán usados para hacer comparaciones de los pulsos característicos con simulaciones computacionales.

Fenómeno Cherenkov

Existe una radiación generada a partir de la respuesta de un medio dieléctrico al paso de una partícula cargada. En determinadas condiciones esta singular radiación es observada, fue interpretada y estudiada inicialmente por Pavel Cherenkov y S.I Vavilov, luego de ellos los cálculos teóricos fueron realizados por I.M. Frank y I.E. Tamm (1937).

Esta radiación no se relaciona con la radiación de frenado que es producida por el movimiento de un electrón rápido. Por otro lado el fenómeno Cherenkov se trata esencialmente de la radiación emitida por un medio bajo la influencia del campo de una partícula que se mueve en el a velocidades super lumínicas.

Esta partícula cargada genera a su alrededor una serie de dipolos inducidos y un campo de polarización simétrico. Cuando la velocidad de la partícula se acerca a la de la luz en el medio el potencial se retarda rompiendo dicha simetría, La ruptura de simetría del campo de polarización conlleva a la posibilidad de emisión de radiación.

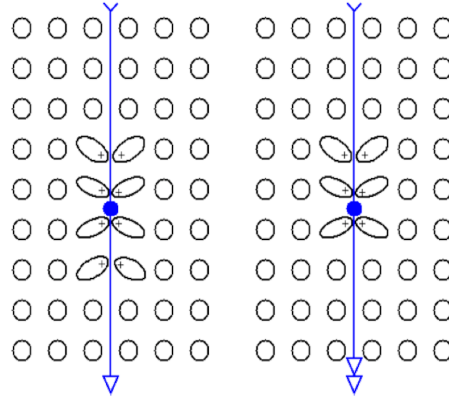


Figura 4.2: La respuesta del medio al paso de una partícula cargada

Concluyendo esta idea una partícula cargada moviéndose a través de un medio denso sufrirá pérdidas de energía debido a su interacción con este, y tenemos que

$$\nu > \frac{c}{\sqrt{\epsilon(\omega)}} \mapsto \beta > \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\omega)}}, \quad (4.1)$$

Es decir, si la velocidad de la partícula es mayor que la velocidad de la luz en el medio a la frecuencia ω . Emitirá radiación, esta radiación emitida es conocida como radiación Cherenkov. En el caso de que el medio sea ligeramente absorbente, existe un resultando

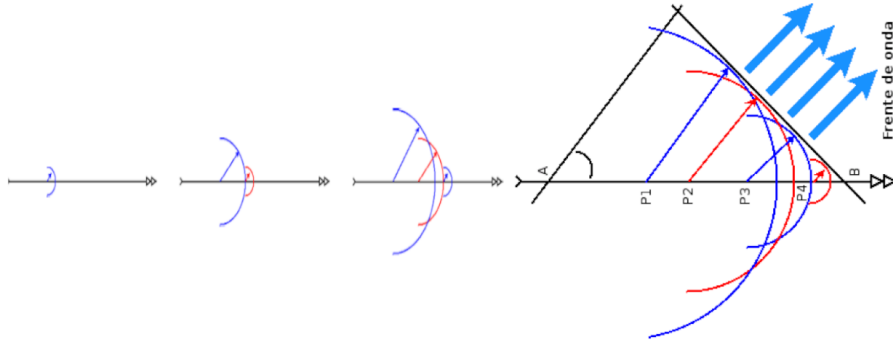


Figura 4.3: Construcción del frente de ondas y emisión del cono de luz

llamado la fórmula de Frank-Tamm [13]:

$$\left(\frac{dE}{dl}\right)_{Cherenkov} = \left(\frac{Ze}{c}\right)^2 \int_{\beta^2 \epsilon(\omega) > 1} \omega \left(1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon(\omega)}\right) d\omega \quad (4.2)$$

Lo que muestra la fuerte dependencia en frecuencia para la emisión de radiación, siendo emitida particularmente en aquellas bandas donde el medio presenta dispersión anómala. Para el agua y en el visible, la emisión Cherenkov se produce en longitudes de onda cortas, donde el índice de refracción $n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)} \simeq \sqrt{\epsilon(\omega)}$.

La dirección de propagación de la radiación Cherenkov esta dada por el vector de Poynting, $\propto E \times B$. El angulo de emisión queda definido por

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta \sqrt{\epsilon(\omega)}} \quad (4.3)$$

determinado exclusivamente por el medio y la velocidad de la partícula como muestra la Figura 4.4

Para aclarar estas ideas hay que pensar que, debido a que la velocidad de fase de la luz en medios dieléctricos de índice de refracción mayores que 1 es menor que c , se da el caso

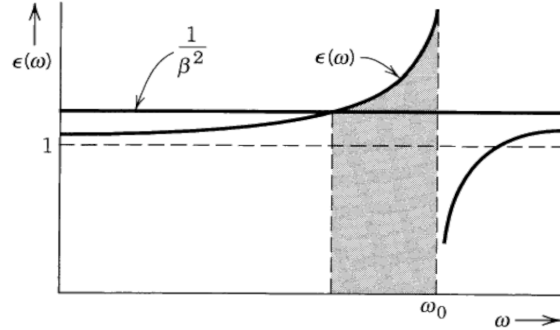


Figura 4.4: Banda de radiación Cherenkov, la radiación es emitida solamente en este rango de frecuencias

de que estas partículas pueden viajar a velocidades mayores que la de la luz en aquellos medios. Cuando este efecto ocurre lo que sucede es que los átomos del medio vecinos a la partícula se polarizan y emiten radiación coherente a un ángulo característico θ determinado por la relación .4.1 ; ver figura .4.4

Es importante aclarar que se debe cumplir que $\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}$, Según esta ecuación existe un umbral de velocidad $\beta = \frac{1}{n}$ bajo el cual no hay emisión de luz Cherenkov. En consecuencia, también hay un umbral de momento $p = m\gamma\beta$ donde m es la masa de la partícula y $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$.

A medida que la velocidad de la partícula aumenta desde β_μ el ángulo de emisión aumenta hasta llegar a un máximo $\theta_{max} = \cos^{-1} \frac{1}{n}$, que corresponde al máximo valor posible de la velocidad de la partícula, $\beta = 1$.

En la figura .4.3 se muestra una sucesión de ondas de campo esféricas para $v > \frac{c}{n}$.Se puede ver que es posible construir un frente de onda coherente cuando $\beta > \frac{1}{n}$ pero no cuando $\beta < \frac{1}{n}$. En la figura podemos ver la construcción de Huygens, en esta se muestran varias posiciones de la partícula y las correspondientes ondas esféricas irradiadas. Para el caso $\beta > \frac{1}{n}$, los planos tangentes a las esferas representan ondas electromagnéticas planas propagándose en el medio a un ángulo θ respecto a la trayectoria de la partícula.

Los fotones Cherenkov son irradiados con probabilidad uniforme a lo largo de elementos de superficies cónicas de ángulo θ relativo a la dirección de movimiento de la partícula cargada como se ve en la figura 4.3 Esta luz Cherenkov es polarizada, teniendo el vector de campo eléctrico en el plano formado por la dirección del fotón y el vector de velocidad de la partícula cargada. La intensidad de la luz Cherenkov por unidad de longitud, por

unidad de intervalo de frecuencia está dada por [13]

$$\frac{dN}{dx d\nu} = \frac{4\pi^2 e^2 Z^2}{hc^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\nu)} \right) \quad (4.4)$$

$$\frac{dN}{dx d\nu} = \frac{4\pi^2 e^2 Z^2}{hc^2} \sin^2 \theta \quad (4.5)$$

$$\frac{dN}{dx d\nu} = \frac{2\pi Z^2}{137c} \sin^2 \theta \quad (4.6)$$

que es el número de fotones emitidos por centímetro de recorrido y por unidad de intervalo de frecuencia ν . Z representa la carga de la partícula emisora en unidades de e , h es la constante de Planck, β es el cociente de la velocidad de la partícula dividida por c , y θ es el ángulo que forma la dirección del fotón emitido con la dirección de viaje de la partícula cargada.

Para $Z = \pm 1$, la ecuación toma la siguiente forma,

$$\frac{dN}{dx d\nu} = \frac{4\pi^2 e^2}{hc^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\nu)} \right) \quad (4.7)$$

Podemos escribir esta ecuación en términos de la longitud de onda de la radiación emitida,

$$\frac{dN}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \frac{1}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \quad (4.8)$$

entonces el número total de fotones emitidos por unidad de longitud de camino es

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \int_{\beta_{n>1}} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (4.9)$$

Si la variación en $n(\lambda)$ es pequeña sobre la región de longitudes de onda λ_1 a λ_2 , la

cantidad de energía emitida por unidad de longitud es

$$\frac{dE}{dx} = 2\pi^2 r_e m c^2 \sin^2 \theta \left(\frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{1}{\lambda_2^2} \right) \quad (4.10)$$

mientras que el número de fotones es

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \sin^2 \theta \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (4.11)$$

Si por ejemplo tomamos el intervalo de 300-570 nm para la longitud de onda que corresponde aproximadamente al rango de respuesta de tubos fotomultiplicadores con fotocátodos de $Sb - Cs$, obtenemos

$$\frac{dN}{dx} = 731 \sin^2 \theta \simeq 320 \text{ fotones/cm} \quad (4.12)$$

Tenemos entonces que para una partícula con una unidad de carga y con $\beta \simeq 1$ atravesando agua, cuyo índice de refracción es $n = 1,33$, el ángulo de Cherenkov se aproxima a $\theta \simeq 41,6^\circ$

La emisión de la luz Cherenkov es casi instantánea. La distribución angular de la intensidad de la luz es aproximadamente una función delta en el ángulo Cherenkov θ . La distribución real es anchada debido a dispersión, pérdida de energía de la partícula, dispersión múltiple y difracción.

SECCIÓN 4.2

Aplicación del fenómeno de radiación Cherenkov

Como hemos mencionado, en función del material utilizado como medio refractor podremos estudiar partículas en un determinado rango de velocidades y por tanto de energías. El rango de energías va desde la velocidad de la luz en el medio hasta la

velocidad de la luz en el vacío, que se caracterizara por un cierto ángulo límite, como ejemplo podemos ver la figura 4.5.

Material	Índice de refracción	Velocidad umbral	Ángulo límite
Aire	1,0003	0,9997c	0,025rad
Agua	1,333	0,75c	0,72rad
Hielo	1,31	0,76c	0,702rad
Aerogel	1,05	0,95c	0,309rad

Figura 4.5: Algunos medios y rangos de velocidades

Actualmente existen muchos y experimentos que usan el fenómeno de radiación Cherenkov, entre estos están por ejemplo los usados en aceleradores de partículas los cuales miden toda la circunferencia del cono para tomar información de la velocidad de la partícula, estos trabajan en conjunto con otros detectores de tipo umbral que cuentan el paso de partículas para poder hacer conteos.

En Astrofísica se aprovecha este fenómeno para detectar lluvias atmosféricas extendidas ya mencionadas en capítulos anteriores, las cuales se generan cuando un rayo cósmico de alta energía interactúa con la atmósfera terrestre generando por ejemplo pares electrón-positrón con una velocidad muy alta. Mediante el estudio de la radiación Cherenkov producida por el paso de estas energéticas partículas se investiga con el propósito de determinar la fuente e intensidad del rayo cósmico que la genere.

También existen telescopios que aprovechan este fenómeno. Existen al menos tres tipos; los basados en agua como el superKamiokande 4.6, este observatorio fue diseñado para estudiar los neutrinos solares y atmosféricos, y para detectar el decaimiento de protones y neutrinos provenientes de supernovas en cualquier parte de nuestra galaxia. Se compone por cerca de 50.000 toneladas de agua pura rodeadas por cerca de 11.000 tubos foto-multiplicadores. La estructura cilíndrica tiene 40 m de alto y 40 m de ancho.

Otro tipo son los telescopios basados en hielo como Ice-Cube el cual usa hielo como medio refractivo para detectar neutrinos, está ubicado en el polo sur, el otro tipo de telescopio es en aire como el telescopio Magic, ver figura 4.7 situado en la isla de Palma en Canarias, este tipo de telescopio utiliza el aire como medio refractivo.

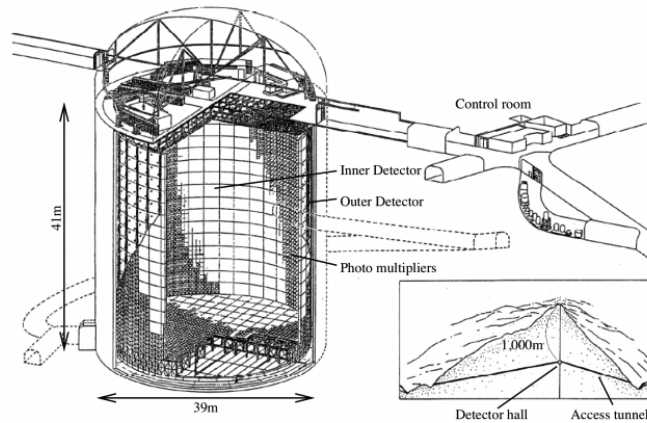


Figura 4.6: Super-Kamiokande, o Super-K, es un observatorio de neutrinos localizado en Japón.



Figura 4.7: Telescopio Magic en la isla de Palma

4.2.1 Detectores Cherenkov en agua (WCD)

Utilizados por el proyecto LAGO, estos detectores están formados principalmente por un recipiente que contiene agua purificada, un material difusivo y reflectivo interno, un foto multiplicador (PMT) y una tarjeta de adquisición. Cuando una partícula cargada pasa por el detector generan radiación Cherenkov debido a que se mueve mas rápido que la luz en el agua. Estos fotones son detectados y amplificados por el foto multiplicador, luego contados por la tarjeta de adquisición. Existe la posibilidad que radiación detectada se originen en los procesos de creación de pares en el interior del detector, un esquema lo podemos ver en la figura 4.8

Los PMT del proyecto LAGO tienen una estructura de dínodos de gran resolución

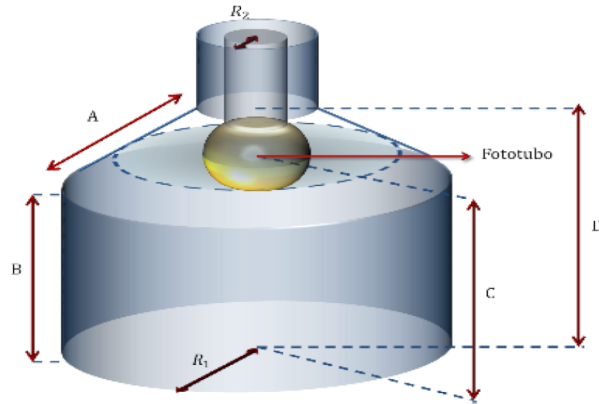


Figura 4.8: Esquema de un detector usado por el proyecto LAGO instalados a lo largo de Sur y Centro América

de energía optimizado para un tiempo de respuesta rápida y con una eficiencia de colección de fotones superior al 25 %. El fotocátodo de los fotomultiplicadores están hechos de vidrio de borosilicato de 4mm de espesor para una transmisión y durabilidad ante el agua, además esta recubierta por Bialkali (Sb-K-Cs) con una alta sensibilidad a la luz Cherenkov y una baja emisión termodinámica. La tarjeta de adquisición controla y polariza el PMT y se encarga de adquirir, digitalizar y enviar a un computador las señales producidas en el detector.

SECCIÓN 4.3

Procesos Físicos dentro del Tanque

Generalmente las partículas y la radiación puede ser detectada únicamente a través de la interacción con la materia, los fotones por ejemplo pueden interaccionar con la materia a través de varios procesos. Mencionamos los relevantes para este trabajo a modo de resumen, pues no se pretende profundizar en ellos, algunos son bien conocidos. Primero mencionamos el efecto fotoeléctrico, de vital importancia en el PMT.

4.3.1 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el proceso por medio del cual se genera una emisión de electrones de una superficie de metal cuando ésta es iluminada por la luz. Los fotones con

frecuencia ν de energía $E = h\nu$ que al colisionar con los electrones que se encuentran ligados en el metal, puede absorber un foton de energía $E = h\nu$ como muestra el dibujo 4.9 La energía del fotón se usa en parte para liberar al electrón del metal y parte para suministrarle energía cinética. Por tanto la energía cinética máxima de los electrones emitidos es:

$$K_{max} = E_{foton} - \phi_0 = h\nu - \phi_0 \quad (4.13)$$

En este caso los electrones arrancados son los menos ligados, esto tiene que ver con la función de trabajo del metal ϕ_0 que es del orden de unos pocos eV.

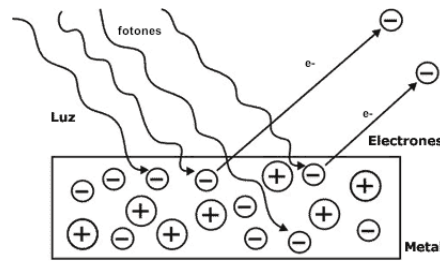


Figura 4.9: Esquema del efecto fotoeléctrico

4.3.2 Efecto Compton

Para que se conserve el momento en la interacción foton- electrón, en el estado final se obtiene un electrón y un nuevo foton entre los cuales se reparten la energía y el momento del foton incidente. Este efecto también se produce con electrones cuasi-libres, o sea aquellos que tienen una energía de ligadura al átomo mucho menor que la energía del foton incidente. Podemos ver un esquema en la figura 4.10

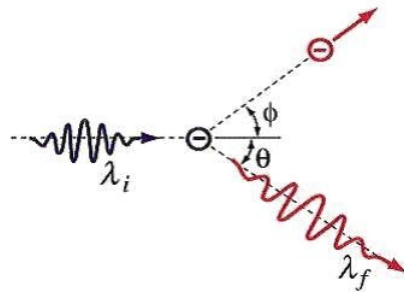


Figura 4.10: Esquema del efecto compton, λ_i refiere a la longitud de onda incidente, λ_f refiere de igual forma a la longitud de onda final acompañada por un electrón.

La relación de dispersión que se obtiene al incidir un fotón de energía $E_\gamma = h\nu$, con un electrón de energía $E_0 = m_e c^2$, esta dado por:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi) \quad (4.14)$$

donde $\frac{h}{m_e c} = 0,0243 \text{ \AA}$, conocido como la longitud de onda Compton. El efecto produce un cambio en el fotón, dispersándose a un ángulo θ y un ángulo ϕ para el electrón.

4.3.3 Creación de pares

Es conocido como el proceso por el cual un fotón de energía suficiente, crea un electrón y un positrón. El proceso por lo general es dado por la interacción de un fotón con el campo de Coulomb del núcleo, y en esta interacción se crea un par electrón positrón siempre y cuando la energía del fotón sea mayor a $2m_e c^2$, Este proceso es característico de los aceleradores de partículas, donde se hacen colisionar partículas como electrones y positrones de muy alta energía. Este proceso es dado por la reacción:

$$\gamma \longrightarrow e^+ + e^- \quad (4.15)$$

4.3.4 Interacción de los electrones

la interacción de la radiación con la materia tiene importantes complicaciones cuando la partícula incidente esta cargada y los fenómenos que se observan también dependen de su masa. El tipo de material con el que interactua y los mecanismos de transporte; mencionaremos tres procesos, de los cuales ya se comento el primero, el efecto cherenkov, los otros dos son la ionización y la radiación de frenado.

Ionización

Si al chocar la partícula con los electrones atómicos, la energía es superior a la energía de enlace (energía de ionización) del electrón colisionado, este electrón abandona el

átomo y por tanto se crea un ión positivo. La ionización total, I_T producida por una partícula cargada en su paso a través de la materia, es igual al número total de pares ión electrón producidos a lo largo de su trayectoria. Entonces, llamando E_0 a la energía cinética inicial de la partícula, se tiene:

$$I_T = \frac{E_0}{W} \quad (4.16)$$

Donde W es la energía media para producir un par de ión electrón. El valor de W depende por una parte de la naturaleza y energía de la partícula incidente y por otra, de la naturaleza del medio.

Bremsstrahlung

Cuando una partícula de masa m y carga ze penetra en el campo eléctrico de un núcleo atómico con carga Ze , experimenta la acción de una fuerza eléctrica y por tanto es acelerada emitiendo una radiación electromagnética, llamada radiación de frenado o, bremsstrahlung: la partícula que interacciona experimenta una aceleración emitiendo una radiación de intensidad, $I \propto (zZm)^2$, añadiendo una constante de proporcionalidad tenemos:

$$I = K \cdot \left(\frac{z^2 Z^2}{m^2} \right) \quad (4.17)$$

Capítulo 5

Los códigos GEANT4

SECCIÓN 5.1

Introducción

GEANT4 ¹ es un toolkit de herramientas computacionales de distribución libre, desarrollado para simular el transporte de partículas a través de la materia, Incorpora un conjunto muy extenso de partículas y materiales, así como de modelos de interacciones tanto hadrónicas como leptónicas, que permiten reproducir fenómenos de colisión a energías comprendidas en un rango que se extiende desde los 250 eV hasta los TeV. Como se describirá a continuación, es un código desarrollado en el lenguaje C++ y diseñado de acuerdo con el paradigma de la *POO* (*Programación Orientada a Objetos*), a sido construido siguiendo la filosofía de proporcionar total flexibilidad al usuario, de manera que este pueda :

- Diseñar una simulación que se ajuste totalmente a los intereses del usuario.

¹<http://geant4.cern.ch/>

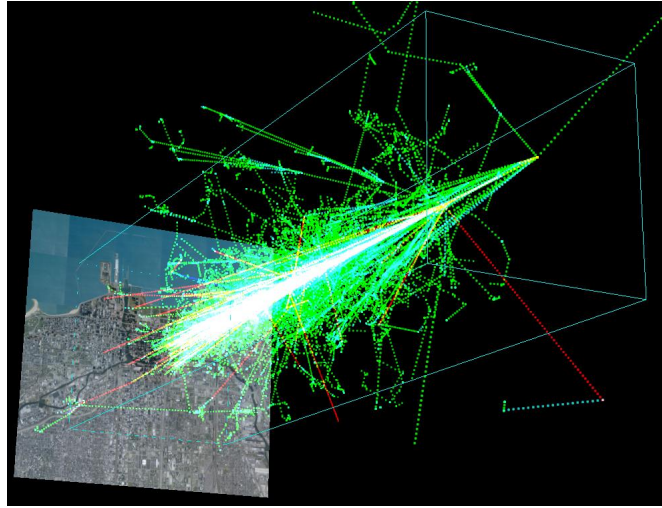


Figura 5.1: Geant4 (*Geometry AND Tracking* por sus siglas en ingles, aqui tenemos un ejemplo de visualización de una lluvia atmosférica tipo hadrónica.

- Obtener todo tipo de información a partir de la simulación.

Estos códigos son usados en áreas como física nuclear, física de partículas, diseño y desarrollo de aceleradores, ingeniería espacial y física médica. Todos los procesos que involucran colisiones o transporte de partículas tienen naturaleza estocástica ². No se puede asegurar el número de interacciones que se van a producir en cada momento, sólo se puede asignar una probabilidad a cada uno de los posibles sucesos, Geant4 trabaja mediante el uso de algoritmos Monte Carlo.

GEANT4 se desarrollo partiendo de estudios independientes realizados en 1993 en el *CERN*, Ginebra, Suiza y en el *KEK* (en ingles, *High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki, Japon*). El objetivo de ambos trabajos fue investigar el uso de las modernas técnicas de computación, basadas en la *POO*, para mejorar el programa ya existente *GEANT3*, que es un código de simulación Monte Carlo desarrollado en *FORTRAN* para reproducir el transporte de partículas a través de la materia en experimentos de física de altas energías.

En 1994 se coordinaron ambas investigaciones y ello derivó en un proyecto conjunto coordinado por el *CERN* bajo la denominación *RD44*. Se trataba de un proyecto pionero porque involucraba rediseñar y re programar un código ya existente, pero usando el lenguaje *C++* en lugar de *FORTRAN*. Finalmente, en diciembre de 1998 se lanzó

² Un proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para caracterizar una sucesión de variables aleatorias (estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo.

la primera versión oficial del nuevo código, que pasó a llamarse *GEANT4*. Desde entonces han sido publicadas al menos dos versiones oficiales por año ³, lo cual ilustra las constantes mejoras y depuraciones que se llevan a cabo continuamente.

5.1.1 El método de Monte Carlo

Definición

El método Monte Carlo se puede definir como una técnica matemática desarrollada para resolver problemas mediante el uso de números aleatorios. Se trata de un método específicamente desarrollado para abordar situaciones de índole probabilista, su aplicación también es válida en problemas de naturaleza determinista.

5.1.2 Descripción fundamental

Monte Carlo presenta una estructura muy sencilla. El procedimiento para su uso, consiste primero en crear un programa que realice una prueba aleatoria que permita asignar un valor determinado para una cierta cantidad de interés. Posteriormente, esta prueba se repite un número N de veces de manera que todas las pruebas sean independientes entre sí; en otras palabras, todas las pruebas deben partir de una semilla diferente. Una vez realizadas, se calcula la magnitud de interés tomando el valor medio de los resultados. En segundo lugar, en virtud del teorema del límite central puede demostrarse que la incertidumbre asociada al valor estimado es $\kappa\sqrt{N}$, donde κ es una constante típica del experimento realizado. Por lo tanto, si queremos disminuir la incertidumbre en un factor 2, debemos multiplicar por 4 el número de repeticiones.

Debemos aclarar que la sencillez de la estructura del método de Monte Carlo no implica que la resolución del problema planteado lo sea. De hecho, para un mismo problema se puede plantear más de una estrategia de resolución. Evidentemente, cada una de éstas tendrá un valor de κ determinado, por lo que una elección correcta de dicha estrategia ayuda a aumentar la exactitud de la estimación realizada para un número determinado de repeticiones.

³<http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/download.shtml/>

5.1.3 Aplicación al transporte de radiación

Para el transporte de radiación el análisis mediante simulación de este tipo de problemas permite calcular observables cuya medida experimental es muy complicada, poco fiable o incluso imposible de medir. Por ejemplo, con una simulación es posible clasificar un determinado tipo de radiación en función de ciertos criterios que nos convengan (proceso y lugar donde esa radiación ha sido originada, materiales y volúmenes con los que ha interactuado).

Otra ventaja de las simulaciones Monte Carlo es que, utilizando los modelos apropiados, podemos analizar a escala microscópica la estructura de una traza generada por el paso de una partícula cargada por un material determinado. Por otra parte, este método también permite estimar la deposición de energía en volúmenes tan pequeños en los que es imposible calcular experimentalmente dicha magnitud, por estos motivos el método Monte Carlo está en los códigos del Geant4.

SECCIÓN 5.2

El núcleo y clases de GEANT4

Todos los posibles elementos que puedan estar involucrados en una simulación se encuentran incluidos en esta herramienta de software. Dentro del código GEANT4 podemos encontrar:

- Objetos que ofrecen una gran flexibilidad y versatilidad para definir tanto la geometría del problema como los materiales involucrados.
- La definición de todas las partículas fundamentales incluidas en la lista del *PDG* (Particle Data Group), ⁴. Además es posible definir cualquier ion de manera genérica.
- Clases con las que podemos elegir los modelos físicos que queremos aplicar en nuestro caso particular, junto con la posibilidad de implementar un nuevo modelo si fuese necesario.

⁴<http://pdg.lbl.gov/>

- Clases que proporcionan la generación de partículas primarias, a partir de las cuales se realiza el transporte a través de la geometría incluyendo la posibilidad de definir campos electromagnéticos.
- Utilidades para definir regiones con parámetros específicos dentro de una simulación determinada.
- Clases que permiten designar los detectores o volúmenes sensibles y definir el tipo de eventos que sean de interés.
- Clases que facilitan la visualización de la geometría.
- Utilidades con las que se puede generar una información de salida acorde al problema que se intenta abordar con la simulación.

En la Figura 5.2 se muestra un esquema representativo de las relaciones existentes entre las diferentes categorías en el nivel superior de GEANT4. Por construcción del diagrama, las clases que están situadas en la parte baja del mismo son usadas por aquellas situadas en la parte superior. Para un vistazo general de todas las categorías, clases y tecnicismos referimos al manual de desarrollo.⁵ GEANT4 funciona en cualquier sistema operativo, existe para Windows, Linux y Mac OSX .

⁵<http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForAppliDev.pdf>

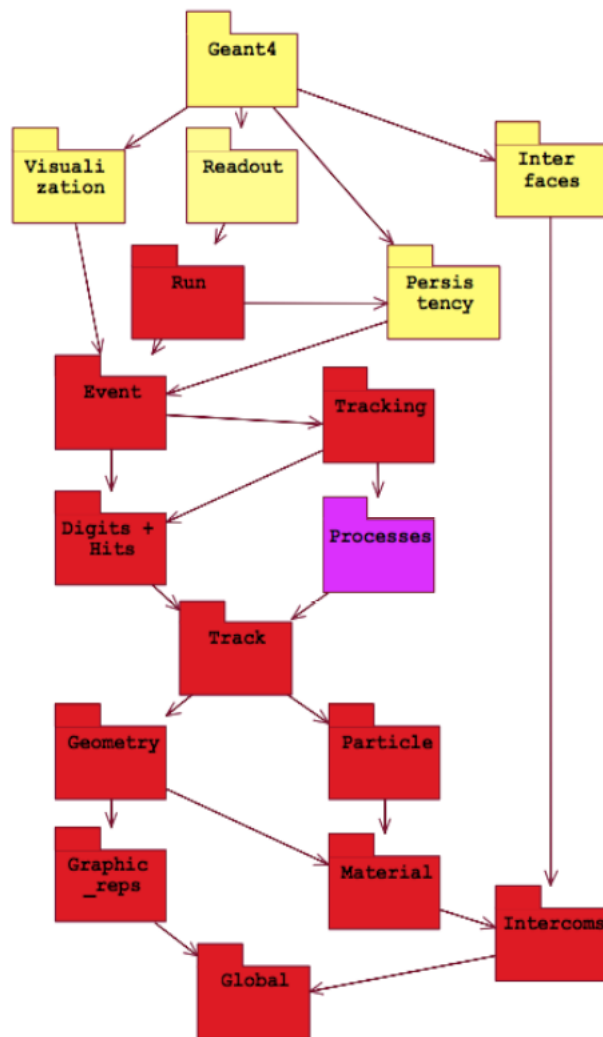


Figura 5.2: Estructura de categorías de las clases de GEANT4. Las líneas terminadas flecha representan una relación de uso en el sentido de que las clases en la categoría junto a la flecha usan clases de la categoría situada al otro lado de la línea. [3]

Capítulo 6

Resultado : Simulación del Detector en GEANT4

La Tecnología es una extensión de la creatividad humana.

Anónimo

En este capítulo presentamos las herramientas de trabajo, los códigos de GEANT4, que han sido revisados y adaptados. Este software desarrollado para física de altas energías nos permitió simular el tanque detector LAGO en Bucaramanga, este modelo simple permite simular el medio de propagación para partículas cargadas que ingresan a nuestro detector Guane3 a 956 msnm, además de la geometría del tanque y el PMT, mencionaremos las clases principales, de carácter obligatorio en GEANT4 para compilar cualquier simulación.

SECCIÓN 6.1

Las principales clases de implementación

GEANT4 requiere que el usuario complete y termine de codificar el programa de acuerdo a sus intereses, incluyendo la implementación del método principal *main()* donde inicia

la aplicación. En general, dependiendo de las necesidades del usuario será necesario definir un mayor o menor número de clases, pero siempre es obligatorio implementar estas tres clases, que deben ser registradas en el método principal:

- **UserDetectorConstruction**

Que es la clase donde se establece la geometría.

- **UserPhysicsList**

Donde definimos la lista procesos físicos involucrados.

- **UserPrimaryGeneratorAction**

Donde configuramos la generación de primarios.

6.1.1 Definición de la geometría

Esta clase debe derivar de la clase virtual denominada *G4VUserDetectorConstruction*. Aquí es donde se define tanto la geometría del problema como los materiales que constituyen cada volumen. Para ello, hay que seguir la jerarquía establecida en GEANT4, realizada para optimizar recursos de CPU y que explicamos a continuación. Existen otras alternativas, plasmadas en la guía del usuario ¹, pero todas ellas siguen en cierto modo el mismo procedimiento.

- El primer paso consiste en definir la forma y dimensiones de cada volumen mediante un sólido, que está representado por un objeto perteneciente a cualquiera de las clases que heredan de la clase abstracta *G4VSolid*, como pueden ser *G4Box* o *G4Tubs*.
- Una vez creado el sólido, en el segundo paso se define el llamado volumen lógico, que combina la información del sólido junto con la del material del que está compuesto el mismo. El volumen lógico está representado en el código por un objeto de la clase *G4LogicalVolume* y siempre debe definirse dentro de otro volumen lógico. Siempre hay que generar el volumen que contiene a todos los demás, que suele llamarse *experimental hall*.

¹User Documentation <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>.

- Finalmente se crea el volumen físico, que está representado por un objeto de la clase *G4VPhysicalVolume*. El volumen físico es una copia del volumen lógico, el cual incluye a los volúmenes lógicos que contenga en su interior, está localizado en una zona del espacio definido por el sistema de referencia del volumen lógico que la contiene.

Es importante resaltar que todas las operaciones lógicas entre volúmenes (intersección, adición y sustracción) se realizan a nivel de volúmenes lógicos, tal y como debería esperarse por la denominación. Es importante tener en cuenta esto, ya que las relaciones entre volúmenes que se consideren repercutirán en las prestaciones de la simulación.

En general, cuanto más jerarquizada se haya definido una determinada geometría, más rápido se realizará la simulación, ya que cuanto menos volúmenes lógicos hayan sido definidos en el mismo nivel jerárquico, más eficiente es el algoritmo de transporte. En nuestro caso tenemos en cuenta un volumen sensible, que también se define a nivel de volumen lógico, cada volumen sensible debe estar representado por un objeto perteneciente a una clase derivada de *G4VSensitiveDetector*.

6.1.2 Lista de Física

GEANT4 no considera partícula o interacción alguna por defecto; ni siquiera el proceso de transporte sin interacción. Toda la información relativa a partículas e interacciones que se consideran en la simulación debe incluirse en una clase que derive de la clase virtual *G4VUserPhysicsList*. En esta clase hay que incluir:

- Las partículas cuyo transporte a través de la materia se va a simular.
- Los tipos de interacción con la materia que se consideran para cada partícula. Cada forma de interacción está gobernada por uno o varios modelos, entre los cuales también se puede elegir.
- Los cortes de producción de electrones, fotones y positrones secundarios en la simulación, para evitar divergencia infrarroja en algunos procesos electromagnéticos. Además, desde la versión 9.3 se puede introducir un corte de producción para protones, que actúa como umbral de producción en colisiones hadrónicas elásticas.

Simulación del Detector WCD

6.2.1 Geometría

Nuestra simulación esta realizada con la geometría del detector *WCD* Guane3 de la colaboración LAGO. Las medidas a usar seran entonces, un tanque cilíndrico de altura $h = 59\text{cm}$ y un radio de $r = 51,5\text{cm}$ con un foto-multiplicador (PMT, por sus siglas en ingles) Hamamatsu de 8" (R5912) con eficiencia cuántica de un 25 por ciento, que esta situado arriba en el eje del cilindro como lo muestra la Figura 7.3.

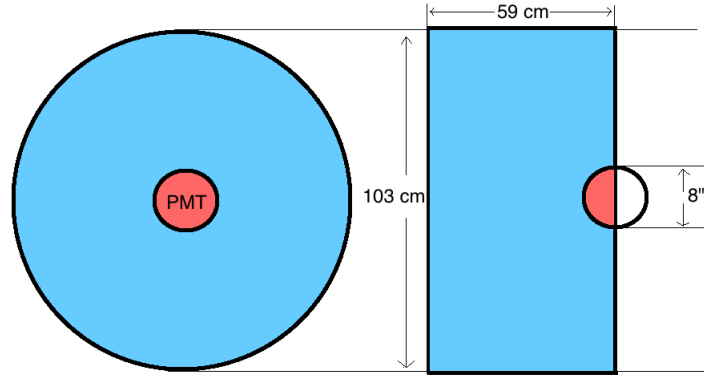


Figura 6.1: Esquema simplificado de las medidas del detector Guane3 instalado en Bucaramanga a 956 msnm visto desde arriba y con una vista lateral

6.2.2 Simulación de la geometria

Para simular el WCD de la colaboración se uso un ejemplo que GEANT4 trae implementado para fotones ópticos. El conjunto de codigos se llaman LXe y vienen por defecto en los ejemplos extendidos de Geant4. En el archivo *LXeDetectorConstruction.hh* se definen los objetos que están relacionados con las variables que se ocupan para las dimensiones de la geometría del detector, los materiales (*G4Material * material*) y los elementos (*G4Element * elemento*) con los cuales van a estar constituidos los objetos del detector.

Después se buscó el archivo donde se asignan valores a las variables relacionadas con

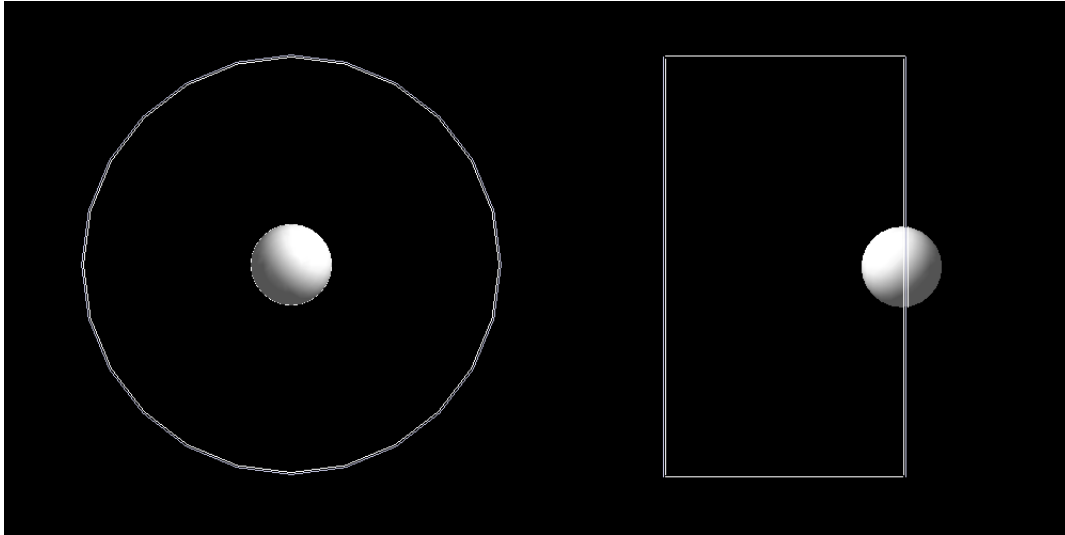


Figura 6.2: Construcción del detector en GEANT4, parte del código debe ser modificado para cumplir con las medidas y propiedades.

las dimensiones del detector y algunos otros elementos de LXe, esto se hace en el archivo *LXeDetectorConstruction.cc* donde se pueden modificar algunos atributos del detector, como es: el número de PMTs, las dimensiones del detector, longitud del PMT, etc Por ejemplo, veamos los valores a cambiar para las dimensiones del detector ya definido:

```
void LXeDetectorConstruction::SetDefaults(){
    //Resets to default values
    d_mtl=1.0*cm;

    scint_x = 103.0*cm;
    scint_y = 103.0*cm;
    scint_z = 59.0*cm;
    nx = 1;
    ny = 1;
    nz = 1;
    outerRadius_pmt = 10.0*cm;
    sphereOn =false;
    refl=1.0;
    nfibers=30;
    WLSslab=false;
    slab_z=2.5*mm;
```

En esta lista se modifican los principales atributos mencionados, como por ejemplo:

- Longitud del PMT (d_{mtl})
- Dimensiones del detector ($scint_j$)
- Número de PMTs (n)
- Si aparece o no la esfera, recubierta del pmt (sphereOn)
- Otros atributos

6.2.3 Definiendo Materiales

En el archivo *LXeDetectorConstruction.cc* podemos definir materiales, así como elementos, Por ejemplo:

```
//Aluminum
Al = new G4Material("Al",z=13.,a=26.98*g/mole,density=2.7*g/cm3);
//Vacuum
Vacuum = new G4Material("Vacuum",z=1.,a=1.01*g/mole,
                        density=universe_mean_density,kStateGas,0.1*kelvin,
                        1.e-19*pascal);
//Air
Air = new G4Material("Air", density= 1.29*mg/cm3, 2);
Air->AddElement(N, 70*perCent);
Air->AddElement(O, 30*perCent);
//Glass
Glass = new G4Material("Glass", density=1.032*g/cm3,2);
Glass->AddElement(C,91.533*perCent);
Glass->AddElement(H,8.467*perCent);
//Polystyrene
Pstyrene = new G4Material("Polystyrene", density= 1.03*g/cm3, 2);
Pstyrene->AddElement(C, 8);
Pstyrene->AddElement(H, 8);
```

6.2.4 Construcción de volúmenes

Para construir los volúmenes, se definen estos objetos es en el archivo *LXeMainVolume.hh*, mientras que en el archivo *LXeMainVolume.cc* se asignan valores a los atributos de nuestros volúmenes, a continuación mostramos las líneas de código que los definen, finalmente luego de la construcción de los volúmenes se procede a la inyección de partículas.

```
scint_cylinder = new G4Tubs("scint_cylinder"  
    ,0.,scint_x/2.,scint_z/2.,0.*deg,360.*deg);  
housing_cylinder = new G4Tubs("housing_cylinder"  
    ,0.,housing_x/2.,housing_z/2.,0.*deg,360.*deg);  
    scint_log = new G4LogicalVolume  
        (scint_cylinder,G4Material::GetMaterial("Water"),  
            "scint_log",0,0,0);  
    housing_log = new G4LogicalVolume(housing_cylinder,  
        G4Material::GetMaterial("fPethylene"),  
            "housing_log",0,0,0);  
scint_phys = new G4PVPlacement  
    (0,G4ThreeVector(),scint_log,"scintillator",  
        housing_log,false,0);
```

La instrucción *G4Tubs* declara un objeto del tipo tubo y sus dimensiones, se encuentra definida en *G4Box.hh*, con *scint-log* se define el material de *scint-cylinder*, con *scint-phys* se posiciona *scint-cylinder* dentro del volumen principal. La instrucción *housing-cylinder* es el volumen principal del detector, donde deben estar contenidos todos los volúmenes que se hayan declarado, con la instrucción *housing-log* se define el material de *housing-cylinder* que en este caso es (fPethylene), que al modificar su reflectividad se comporta como Tyvek o un material liso, en este caso (fPethylene) es la mas cercano a lo que usamos en la realidad.

6.2.5 Inyección de Partículas

Resultado para el detector GUANE3

Luego de la construcción de volúmenes se procede a la inyección de partículas; La inyección se encuentra definida en el archivo *LXePrimaryGeneratorAction.cc* la definición estándar es un gamma con una enegía de 511 keV, posicionado a -20 cm en dirección

Z y con un momento 1 en P_z respecto al eje de referencia (Para el gamma refiere a la Energía), para la simulación modificamos la entrada para simular electrones, protones, gammas y muones en un rango de energías entre 10 MeV y 10.000 MeV, en la figura 6.3 podemos observar un registro gráfico de una corrida del código.

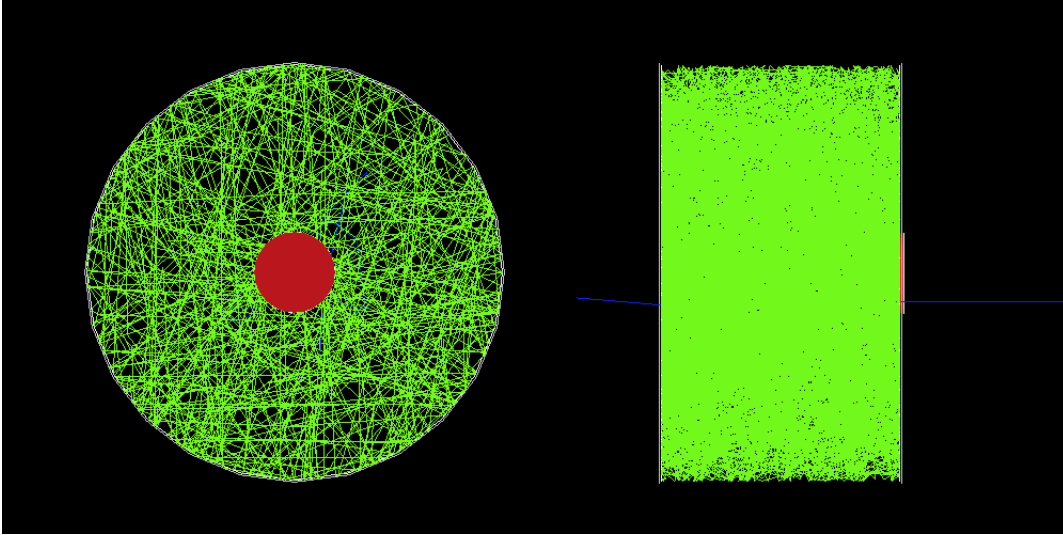


Figura 6.3: La imagen fue obtenida a partir de la inyección de un μ^+ vertical con una Energía $E = 5\text{GeV}$, el interior del tanque esta definido como un recubrimiento reflectivo y refractivo a partir del modelado que en GEANT4 es llamado *Unified - model*; las líneas verdes son representaciones del seguimiento de fotones propagándose dentro del agua, las líneas azules representan partículas cargadas (+).

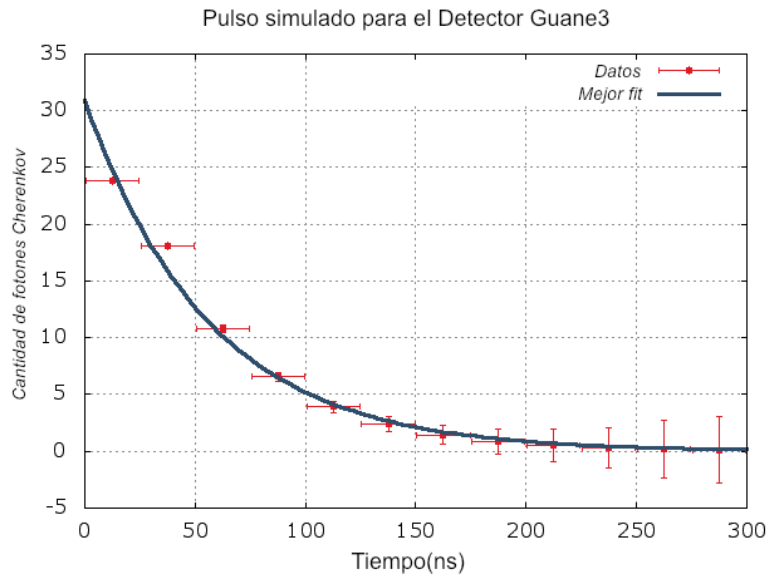


Figura 6.4: Un ejemplo, al realizar la simulación para $200 \mu^+$ y promediar se obtiene la cantidad de fotones Cherenkov que llegan al PMT en función del tiempo para una partícula atravesando el tanque, esta distribución permite realizar un fit a los datos con una función exponencial, el τ representa la atenuación del pulso en el tanque, se obtuvo en este caso un $\tau = (55,1 \pm 1,79)ns$

Capítulo 7

Resultados y Discusión

SECCIÓN 7.1

Pulsos para diferentes partículas

7.1.1 Caracterización de los pulsos

Para estudiar la forma de los pulsos se requirió hacer un análisis a partir de los fotones que llegan al PMT simulado, para esto se realiza un binned temporal, que corresponde a empaquetar la cantidad de fotones que llegan en el tiempo, en ventanas pequeñas de 25 nanosegundos (ns), que se relaciona con la tasa de muestreo del detector real. Luego se realiza un ajuste exponencial a la distribución de fotones logrando obtener su tiempo característico de atenuación (τ). Este está relacionado con el tiempo entre la llegada de los primeros fotones al PMT y el de los últimos, todos estos fotones fueron generados por la misma partícula. Es importante resaltar que los últimos tuvieron que recorrer más distancia debido a sus múltiples reflexiones. Se realizaron múltiples simulaciones, entre ellas destacan y presentamos los pulsos de las realizadas para energías a las cuales llegan mayor cantidad de secundarios. Esto se observó en el espectro de energía de secundarios observados a nivel del detector GUANE3 en Bucaramanga a 956 m s.n.m,

simulado por Suárez-Durán [14], y que se presenta en la Figura 7.1 . gracias a este resultado se decidió presentar los pulsos simulados con las energías descritas en la tabla 7.1 .

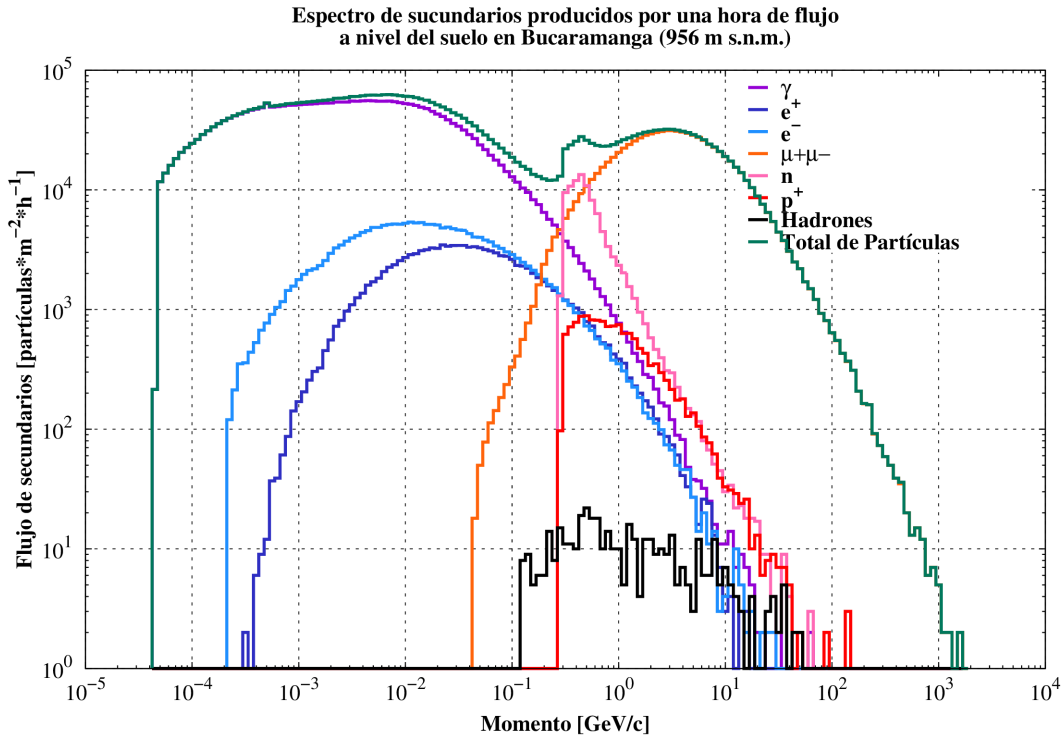


Figura 7.1: Espectros de energía de los secundarios observados al nivel del detector para una hora de flujo equivalente de primarios, donde se muestra las principales componentes de la lluvia.

SECCIÓN 7.2

Tiempo Característico de atenuación

7.2.1 Longitud de atenuación

A partir de los tiempos de atenuación encontrados, se puede encontrar la *longitud de atenuación* λ que nos da una medida cuantitativa de la distancia que viajan los fotones generados por efecto Cherenkov antes de ser absorbidos por el medio o por las paredes del tanque. tabla.7.1

El tiempo de atenuación τ da un parámetro de cuanto tiempo viajan los fotones. La longitud de atenuación, por lo tanto, se define como el producto del tiempo de atenuación por la velocidad de la luz en el agua.

$$\lambda = \frac{\tau c}{\eta} \quad (7.1)$$

Aquí c es la velocidad de la luz en el vacío y η es el índice de refracción en el agua, tomado como $\eta = 1,33$. A partir de los τ calculados se pueden encontrar las respectivas longitudes de atenuación para las partículas inyectadas.

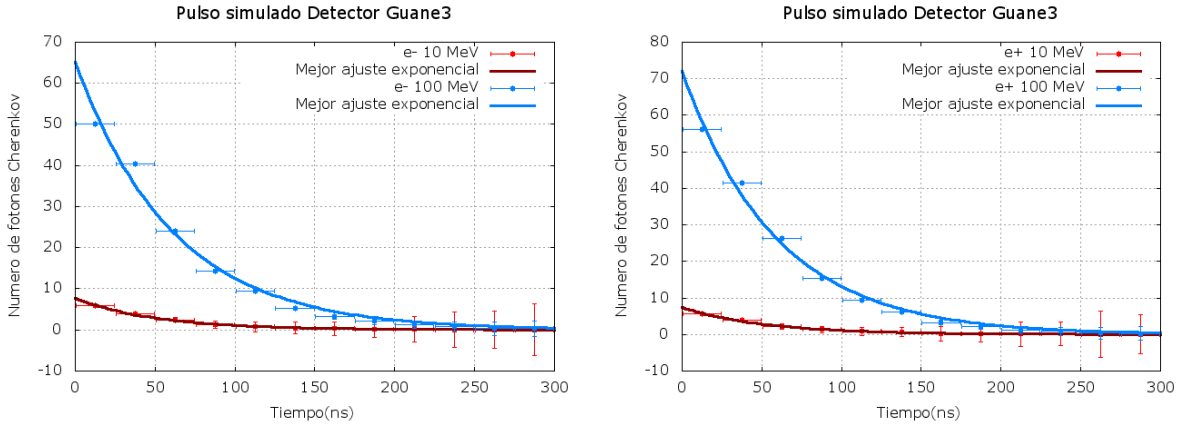


Figura 7.2: A la izquierda dos pulsos generados por electrones e^- , a la derecha positrones e^+ , los dos casos con una energía de incidencia dentro del detector de 10 MeV y 100 MeV, los ajustes exponenciales permiten determinar los tiempos de atenuación, estos son usados para calcular la longitud de atenuación de cada partícula al paso por el detector.

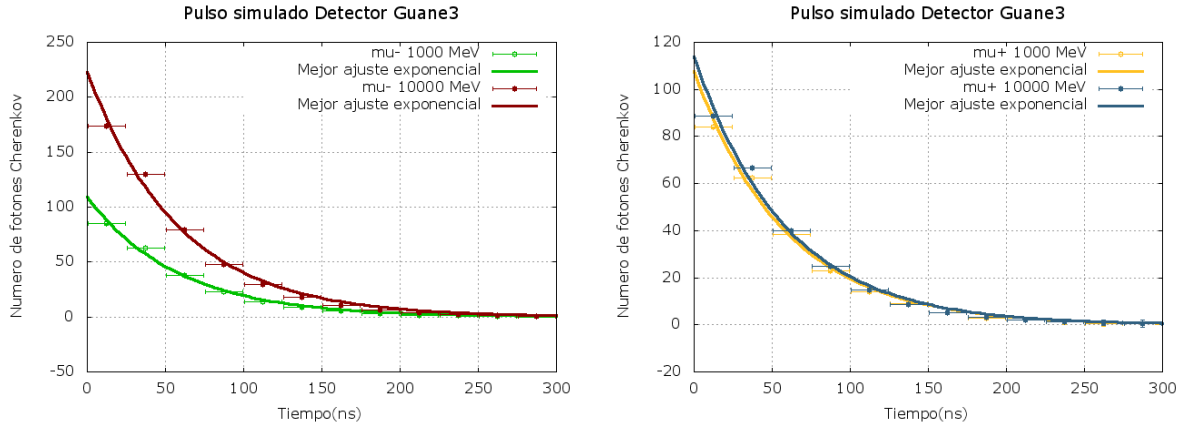


Figura 7.3: A la izquierda dos pulsos generados por muones μ^- , ala derecha μ^+ , los dos casos con una energía de incidencia dentro del detector de 1000 *MeV* y 10000 *MeV* respectivamente, los ajustes exponenciales permiten determinar los tiempos de atenuación, estos son usados para calcular la longitud de atenuación de cada partícula al paso por el detector, se enuncian en la tabla .7.1

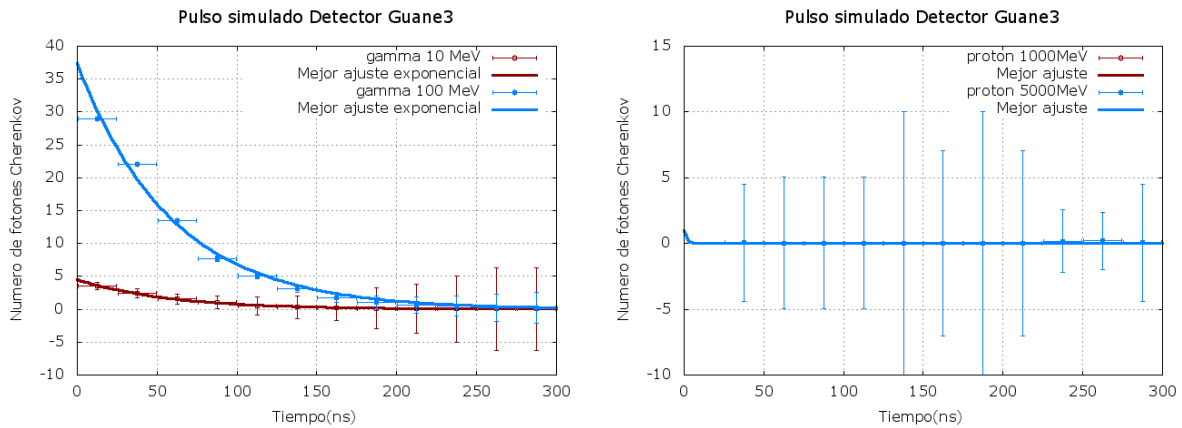


Figura 7.4: En este caso podemos observar dos pulsos a la izquierda correspondientes a fotones Gamma con energías de 10 y 100 *MeV*, a la derecha tenemos un registro del paso de 200 protones con energías de 1 *GeV* y 5 *GeV* promediados, al realizar las simulaciones se observo que no pasan la mayoría de los protones con estas energías, solo algunos avanzan en el tanque gracias a que sufren procesos físicos de frenado e interacción, sus partículas hijas con carga son las que alcanzan a generar cherenkov en el agua.

Partícula	Energía	Tiempo de atenuación (τ)	Long. de atenuación (λ)
γ	10 MeV	$(56,64 \pm 1,49)$ ns	$(12,75 \pm 0,33)$ m
γ	100 MeV	$(58,93 \pm 2,24)$ ns	$(13,29 \pm 0,50)$ m
e^+	10 MeV	$(52,81 \pm 1,14)$ ns	$(11,91 \pm 0,25)$ m
e^+	100 MeV	$(58,80 \pm 1,78)$ ns	$(13,26 \pm 0,40)$ m
e^-	10 MeV	$(52,12 \pm 1,27)$ ns	$(11,75 \pm 0,28)$ m
e^-	100 MeV	$(60,81 \pm 2,74)$ ns	$(13,71 \pm 0,61)$ m
μ^+	1000 MeV	$(58,48 \pm 1,89)$ ns	$(13,19 \pm 0,42)$ m
μ^+	10000 MeV	$(58,18 \pm 1,84)$ ns	$(13,12 \pm 0,41)$ m
μ^-	1000 MeV	$(58,02 \pm 1,87)$ ns	$(13,08 \pm 0,42)$ m
μ^-	10000 MeV	$(58,42 \pm 1,79)$ ns	$(13,17 \pm 0,40)$ m
p	1000 MeV	no penetra	

Cuadro 7.1: En esta tabla, se muestra

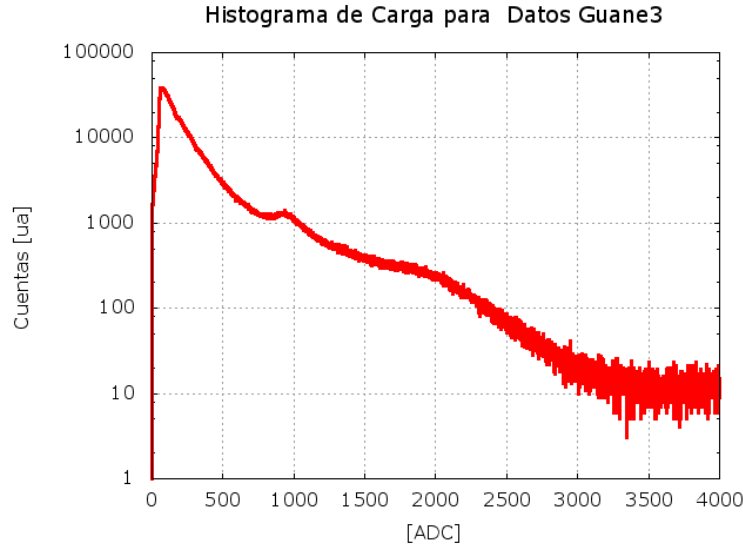


Figura 7.5: Histograma de carga para los pulsos medidos por GUANE3 durante una hora, en este caso particular los datos fueron tomados el 2015-04-10, un histograma de carga es el área bajo la curva registrada por el PMT para eventos con un pico máximo de voltaje que superaron el umbral establecido. Un histograma de carga típico muestra la carga depositada por partícula en unidades de ADC. Este histograma sirvió para poder ubicar el VEM (Vertical Equivalent muon, por sus siglas en ingles). Esto fue de vital importancia ya que el VEM de muones con energías de 1GeV esta caracterizado.

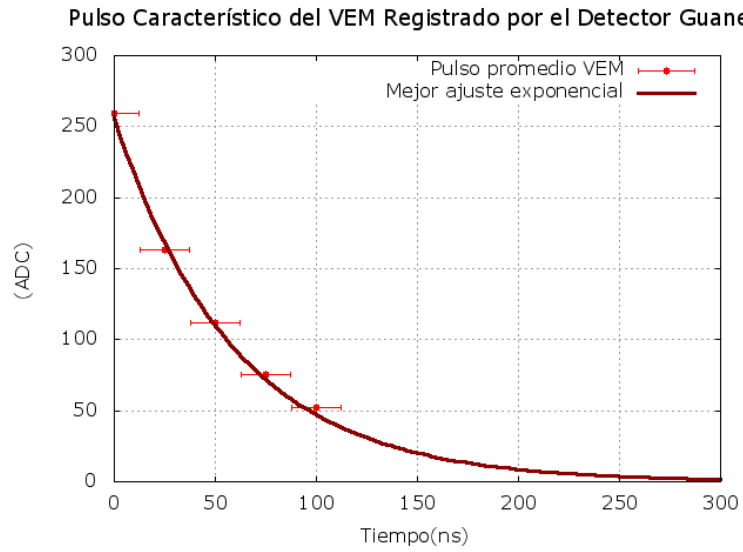


Figura 7.6: Pulso promedio para muones verticales registrados por el detector GUANE3, instalado en Bucaramanga a 956 m s.n.m, se obtuvo buscando el valor de carga en el VEM en la Figura .7.5, luego todos los pulsos con esa carga y finalmente se obtuvieron los (τ) y se promediaron para todos los encontrados, se realiza un ajuste exponencial para conocer su tiempo característico de atenuación (τ) el cual sirvió para comparar con las simulaciones obtenidas, el tiempo característico obtenido es $\tau = (59, 50 \pm 1, 92)ns$.

Capítulo 8

Conclusiones

SECCIÓN 8.1

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una simulación en GEANT4 realizada para los detectores de la colaboración LAGO, en particular GUANE3 instalado y operando en la Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga-Colombia. Se enfatizó en el conocimiento y caracterización de los pulsos que son generados dentro del tanque detector mencionado en los anteriores capítulos. Esto ha sido de vital importancia para investigaciones futuras ya que el trabajo realizado y los códigos usados pueden servir como plataforma de trabajo.

El principal objetivo fue conocer la respuesta del detector, al paso de partículas cargadas por su interior. Al realizar esta labor pudimos obtener los tiempos de atenuación y las longitudes de atenuación, esto permitirá comparar en el tiempo estos datos ya que algunas propiedades del medio cambian, como por ejemplo la calidad del agua y ese parámetro podemos ajustado en las simulaciones, pudiendo así tener datos que nos indiquen que tanto se ve afectada la sensibilidad del detector.

Cuando se simulan $\mu^\pm$ a 1 GeV se puede observar en los pulsos, que en promedio los μ^- depositan menos carga en el detector, esto era esperado ya que en el vacío, la vida media de los μ^- y la de los μ^+ es la misma, pero cuando el medio en el que se encuentran no es el vacío, en este caso agua, se produce un fenómeno denominado captura muonica, esto es interesante y podría estudiarse mejor, pero sale del dominio de este trabajo. Al calcular los τ para los pulsos obtenidos a 1 GeV para $\mu^\pm$ en las simulaciones y comparar con el τ de los datos experimentales a un 1 GeV para $\mu^\pm$ del tanque se observa similitud en los tiempos de atenuación que corresponde a lo esperado y hasta el alcance de este trabajo avala los códigos usados.

SECCIÓN 8.2

Exposición del trabajo a la comunidad

Este trabajo fue presentado y sometido en SILAFEA 2014 Latin American Symposium of High Energy Physics, por sus siglas en ingles, en *Ruta*ⁿ Medellín Colombia, adicionalmente ha sido aceptado para ser publicado en Nuclear Physics B - Proceedings Supplement (2015)1-4 de ELSEVIER. Además una versión en *arXiv* : 1503.07270[astro-ph.IM]

SECCIÓN 8.3

Perspectivas

El trabajo de simular y conocer todos los detalles del detector WCD es un proceso de desarrollo que LAGO asume y continua mejorando, el trabajo presentado representa un avance hacia un completo código, que permita consolidar esta investigación y evolución del proyecto enmarcado en la colaboración entre nuestros países hermanos de latinoamérica, la perspectiva es generar las entradas (input) para lluvias atmosféricas extensas y poder determinar la respuesta del detector a todo el background simultáneamente a nivel del suelo, teniendo así unas condiciones muy cercanas a la realidad, ayudando a discriminar algunas aproximaciones que debido a la complejidad de la física involucrada son necesarias para modelar estos fenómenos. Por estos motivos el trabajo realizado en

esta tesis constituye un hilo fundamental para la consecución de estas investigaciones en la colaboración LAGO.

Bibliografía

- [1] Stanev T. Letessier-Selvon, A. Ultrahigh energy cosmic rays. *Reviews of Modern Physics*, 83 (3):907–942, 2011.
- [2] D. Allard, C. Alvarez, H. Asorey, H. Barros, X. Bertou, M. Castillo, J. M. Chirinos, A. De Castro, S. Flores, J. Gonzalez, M. Gomez Berisso, J. Grajales, C. Guada, W. R. Guevara Day, J. Ishitsuka, J. A. Lopez, O. Martinez, A. Melfo, E. Meza, P. M. Loza, E. Moreno Barbosa, C. Murrugarra, L. A. Nunez, L. J. Otiniano Orma-
chea, G. Perez, Y. Perez, E. Ponce, J. Quispe, C. Quintero, H. Rivera, M. Rosales, A. C. Rovero, O. Saavedra, H. Salazar, J. C. Tello, R. Ticona Peralda, E. Varela, A. Velarde, L. Villasenor, D. Wahl, and M. A. Zamalloa. The Large Aperture GRB Observatory. *ArXiv e-prints*, June 2009.
- [3] Agostinelli S. Geant4 simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.506(3):250–303, 2003.
- [4] R. A. Millikan and G. H. Cameron. High frequency rays of cosmic origin iii. measurements in snow-fed lakes at high altitudes. *Physical Review*, 28(5):851–868, Nov 1926.
- [5] P. Auger, P. Ehrenfest Jr., R. Maze, J. Daudin, C. Robley, and A. Freón. Extensive cosmic-ray showers. *Review of Modern Physics*, 11:288, 1938.
- [6] H. Asorey. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina, Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina, 2012.
- [7] S. Vernetto. Detection of gamma-ray bursts in the 1 GeV-1 TeV energy range by ground-based experiments. *Astroparticle Physics*, 13:75–86, March 2000.
- [8] Felix A. Aharonian. *Very high energy cosmic gamma radiation: A crucial window on the extreme universe*. Publishing Co. Pte. Ltd, 2004.

- [9] Peter K. F. Grieder. *Extensive Air Showers : High energy phenomena and astrophysical aspects*. Springer, 2010.
- [10] D. Allard, I. Allekotte, C. Alvarez, H. Asorey, H. Barros, X. Bertou, O. Burgoa, M. Gomez Berisso, O. Martínez, and P. Miranda Loza. Use of water-cherenkov detectors to detect gamma ray bursts at the large aperture grb observatory (lago). *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 595(1):70–72, 2008.
- [11] C. Portocarrero. *La componente de radiación cherenkov como elemento diferenciador entre cascadas atmosféricas iniciadas por rayos gamma y protones en el rango de energía de $10^{10} - 10^{16}$ e V*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 1998.
- [12] X. Bertou and D. Allard. Detection of grb with water cherenkov detectors. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A553:299–303, Jan 2005.
- [13] J. D Jackson. *Classical Electrodynamics*. 3a ed. New York,, 1999.
- [14] Suárez-Durán. Rigidity cut-off calculation method for the sites of the lago project. *Décima Conferencia Latinoamericana de Geofísica Espacial XCOLAGE*, Sept. 2014.