

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN DETECTOR DE ASTROPARTÍCULAS EN LA SIERRA ECUATORIAL CON GEANT4 PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÁREA EFECTIVA EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

ORLANDO VINICIO GUTIÉRREZ PROAÑO

orlando.gutierrez@epn.edu.ec

DIRECTOR: NICOLÁS ALEJANDRO VÁSQUEZ PAZMIÑO, PHD

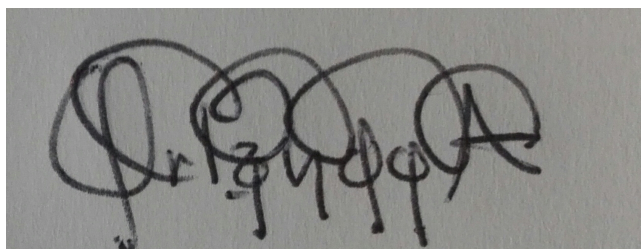
nicolás.vasquez@epn.edu.ec

Quito, Agosto, 2020

DECLARACIÓN

Yo, ORLANDO VINICIO GUTIÉRREZ PROAÑO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

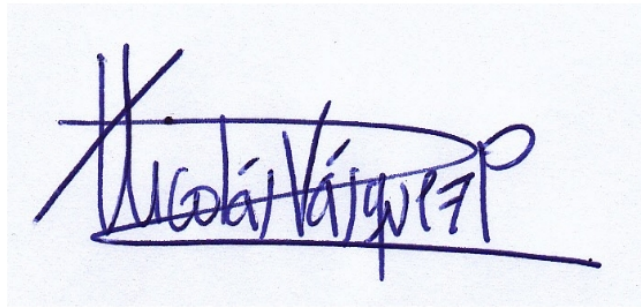
A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A black and white photograph of a handwritten signature in dark ink on a light-colored surface. The signature is stylized and appears to read 'Orlando Vinicio Gutiérrez Proaño'.

Orlando Vinicio Gutiérrez Proaño

CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue desarrollado por ORLANDO VINICIO GUTIÉRREZ PROAÑO, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, reading "Nicolás Vásquez Pazmiño", with a large, stylized flourish at the end.

Nicolás Alejandro Vásquez Pazmiño , PhD
Director del Proyecto

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por apoyarme durante toda la carrera.
A Nicolás por ser mi director de tesis y guía en el desarrollo de este trabajo.
A MODEMAT por haberme permitido utilizar el servidor.

DEDICATORIA

Este trabajo le dedico a todos los seres vivos y no vivos que aparecieron en esta etapa de mi vida.

Índice general

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. FÍSICA DE ASTROPARTÍCULAS	12
2.1. Desarrollo Histórico de las Astropartículas	12
2.2. Rayos Cósmicos	14
2.3. Fuentes de los Rayos Cósmicos	16
2.3.1. Brotes de Rayos Gamma	16
2.3.2. Pulsares	17
2.3.3. Remanentes de Supernova	18
2.3.4. Núcleos Galácticos Activos	19
3. DETECCIÓN DE ASTROPARTÍCULAS	21
3.1. Tipos de Detectores Cherenkov	21
3.1.1. Detectores Cherenkov de Aire	21
3.1.2. Detectores Cherenkov de Agua	22
3.1.3. Radiación Cherenkov	22
3.1.4. Tubo Fotomultiplicador (PMT)	24
3.2. Observatorios de altas energía	25
3.3. Zona Geográfica del Ecuador	26
3.4. Formación de las EASs	27
3.4.1. Producción de nuevas partículas	29
3.4.2. Secciones eficaces	29
3.4.3. Camino libre medio	31
3.5. Física de las EASs	32
3.5.1. Procesos Relevantes en la formación de EAS	33
3.6. Factores para la detección	34
3.7. Observables de las EASs	34
3.7.1. Método de Partícula Simple	35
3.7.2. Área Efectiva	35
4. SOFTWARES DE SIMULACIÓN	37
4.1. CORSIKA	37
4.1.1. Unidades en CORSIKA	37
4.1.2. Sistema de Coordenadas	38

4.1.3. Modelo atmosférico	38
4.1.4. Partículas implementadas en CORSIKA	39
4.2. GEANT4	39
5. SIMULACIONES	42
5.1. Simulación en CORSIKA	42
5.2. Simulación en GEANT4	44
5.2.1. Definición de Geometrías en GEANT4	44
5.2.2. Tanque Diseñado	45
5.3. Conexión CORSIKA - GEANT4	46
6. RESULTADOS	47
6.1. Resultados Obtenidos por CORSIKA	47
6.1.1. Primario Gamma	47
6.1.2. Primario Protón	50
6.2. Resultados Obtenidos por GEANT4	54
6.2.1. Datos Obtenidos por el Tanque	54
6.2.2. Área Efectiva	61
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
Appendices	67
A. Instalación y Scripts en CORSIKA	67
A.1. Instalación CORSIKA	67
A.2. Creación del corsikaread	67
A.3. Script entradas	68
A.4. Script procesa	70
A.5. Script prog-QUITO	71
A.6. Script seleccion	73
A.7. Script noprocesa	74
B. Instalación y Scripts en GEANT4	76
B.1. Instalación GEANT4	76
B.2. OpNoviceDetectorConstruction	78
B.3. LXePMTSD	91

Índice de figuras

1.1.	Geometría de la trayectoria de una EAS vista de un detector Cherenkov en tierra. Se observa el lugar de impacto y eje de la EAS, la posición del WCD, los ángulos zenith(θ) y azimuth(ψ), y los planos de impacto y plano que contiene a la EAS [1].	11
2.1.	Representación de la interacción de astropartículas con la atmósfera, se observa en color azul partículas cargadas y en color amarillo rayos γ (fotones) que interaccionan con núcleos presentes en la atmósfera, además se observa en color celeste el paso de neutrinos [2].	12
2.2.	(a)Electroscopio desarrollado por Elster y Geitel, (b)Variación de la ionización, el eje x representa la Altitud en km y el eje y representa el número pares de iones por volumen (en cm^3) y por segundo(seg) [3].	13
2.3.	Espectro de los CRs. En el eje vertical se muestra el flujo de CRs y en el eje horizontal la energía de los CRs (eV). Franja de color amarillo corresponde a CRs Solar, franja de color celeste corresponde a CRs Galácticos y franja de color violeta corresponde a CRs Extragalácticos [4].	14
2.4.	Procesos de aceleración no exótica que requiere una partícula dentro de una región (de tamaño L , eje x) donde están presentes los choques de campo magnético B (eje y). Una vez que la partícula alcanza su máxima energía, entonces el campo magnético no es capaz de mantener la partícula confinada dentro de la región de aceleración y por ende la partícula escapa. Esto proporciona un valor aproximado para la energía máxima alcanzable de $E_{max} \propto BL$, mostrada como una línea sólida/discontinua para núcleos protón/hierro de $10^{20}eV$ [5, 6].	16
2.5.	Mapa en coordenadas galácticas con más de 2700 eventos detectados por el experimento BATSE en sus 9 años de operación [7].	17
2.6.	Púlsar de la nebulosa del Cangrejo, la imagen combina información óptica del telescopio espacial Hubble (en rojo) e imágenes de rayos X del Observatorio de rayos X Chandra (en azul) [8].	18
2.7.	Imagen de rayos γ del remanente de supernova RXJ0852.0-4622 suavizado por un gaussiano de 0.06. [9].	19
2.8.	Modelo unificado de un AGN. Se observa el chorro de partículas en la parte superior izquierda del gráfico (Jet), región de línea estrecha y ancha (narrow line region y broad line region), región oscura (obscuring torus), en el centro el agujero negro (black hole) y el disco de acreción [10].	20
3.1.	En el panel izquierdo se observa el diseño de la matriz óptica Cherenkov TUNKA-133, ubicada en el valle Tunka (675 m.s.n.m.) en Rusia [1]. En el panel derecho se observa la caja óptica Tunka-HiSCORE [11]	21

3.2.	En la parte izquierda se observa el soporte del PMT de color rojo y el tanque con el dieléctrico de agua. Después el WCD se observa el WCD tapado y cubierto de fundas de color negro. En el lado derecho se observa el WCD construido en la EPN con la electrónica y panel solar que proporciona energía al mismo [12]	22
3.3.	Geometría básica del efecto Cherenkov, se observa el ángulo de emisión θ a partir de una partícula cargada relativista que se mueve a lo largo del eje z, el frente de onda instantáneo y la propagación de los fotones Cherenkov [1].	24
3.4.	Esquema general de los elementos de un PMT. Se observa a lado izquierdo la placa frontal en donde los fotones van a incidir y atravesar el fotocátodo para ser detectados y amplificados por los dínodos, donde finalmente la corriente amplificada llegará al ánodo y al sistema de adquisición de datos. En la parte derecha se observa la base del PMT, donde regularmente se conecta la fuente de poder para su funcionamiento. Todo este sistema esta al vacío [13].	25
3.5.	Andes Ecuatorianos [14]	26
3.6.	Tasa base de partículas secundarias cargadas en función de la altitud. El umbral de energía cinética utilizado en la simulación es 3 [MeV] para electrones y fotones, y 50 [MeV] para muones y hadrone [26].	27
3.7.	Anomalía del Sureste Atlántico [15].	27
3.8.	Vista lateral de trayectorias de partículas de energía $\geq 10[GeV]$ de un fotón, un protón y una EAS generada con un núcleo de hierro de energía de $10^5[GeV]$. La componente electroganética se observa en color rojo, la componente hadrónica se observa en color negro y la componente muónica se observa en color verde [1]. . . .	28
3.9.	Compilación de secciones eficaces inelásticas para interacciones protón-aire, los datos son extraídos de tres experimentos (Volcano Ranch, Akeno Hara y Fly's Eye). La curva entre cortada "G" se calculó con el modelo Glauber y la línea contínea "L" con la parametrización de Liland's [1].	31
3.10.	Camino libre medio de interacción de núcleo proyectil de alta energía en aire vs el número de masa del proyectil [1].	32
3.11.	Perfil longitudinal de una EAS. Se muestra la curva de la EAS y el disco de partículas delgadas de una EAS inclinada cerca del impacto a nivel del suelo [1].	35
4.1.	Sistema de coordenadas x,y,z en CORSIKA [16].	38
4.2.	Diagrama de las categorías de clases diseñadas en GEANT4 [17].	40
5.1.	Diseño del tanque Cherenkov de agua de 1000 litros en GEANT4	46
6.1.	Histograma de las partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ de $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$	48
6.2.	Posición en las coordenadas $x[cm]$ e $y[cm]$ en función de la energía [GeV] a la que alcanzan el suelo las partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV].	49
6.3.	Distribución energética de las partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ que incide verticalmente de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV]. . . .	50
6.4.	Histograma de las partículas secundarias de una EAS generadas por un protón como primario de $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$	51

6.5.	Posición en las coordenadas $x[cm]$ e $y[cm]$ en función de la energía [GeV] a la que alcanzan el suelo las partículas secundarias de una EAS generadas por un protón de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c)3 [TeV], (d)4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g)7 [TeV], (h)8 [TeV], (i)9 [TeV] y (j)10 [TeV].	52
6.6.	Distribución energética de las partículas secundarias de una EAS generadas por un protón como primario que incide verticalmente de:(a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV].	54
6.7.	Distribución de una EAS generada por un primario γ : (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c)3 [TeV], (d)4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g)7 [TeV], (h)8 [TeV], (i)9 [TeV] y (j)10 [TeV], en un área de $\pi \times 0,55^2 [m^2]$. El círculo de color celeste representa la base del detector. Las cruces representa los e^- , las x representa los γ y cuadrados representa los e^+	56
6.8.	Densidad de fotones Cherenkov (y reflejos) detectados (en el eje y) que fueron generados por una EAS de:(a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c)3 [TeV], (d)4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g)7 [TeV], (h)8 [TeV], (i)9 [TeV] y (j)10 [TeV], en función de la distancia radial medida desde el centro del WCD, $radioWCD=0,55 [m]$ (en el eje x). Se observa en color amarillo detecciones del PMT inferior y en color rojo detecciones del PMT superior.	57
6.9.	Distribución de una EAS generada por un primario protón: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c)3 [TeV], (d)4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g)7 [TeV], (h)8 [TeV], (i)9 [TeV] y (j)10 [TeV], en un área de $\pi \times 0,55^2 [m^2]$. El círculo de color celeste representa la base del detector. Las cruces representa los e^- , las x representa los γ , cuadrados representa los e^+ , círculo representa $\mu^{+/-}$ y el triángulo representa el $\pi^{+/-}$	59
6.10.	Densidad de fotones Cherenkov (y reflejos) detectados (en el eje y), generados por una EAS de:(a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c)3 [TeV], (d)4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g)7 [TeV], (h)8 [TeV], (i)9 [TeV] y (j)10 [TeV] en función de la distancia radial medida desde el centro del WCD, $radioWCD=0,55 [m]$ (en el eje x). Se observa en color amarillo detecciones del PMT inferior y en color rojo detecciones del PMT superior.	60
6.11.	Densidad de fotones Cherenkov de la diferencia de γ y protones de 10 [TeV]. Se observa en color amarillo detecciones del PMT inferior y en color rojo detecciones del PMT superior.	61
6.12.	Área efectiva [m^2] (en el eje y) en función da la Energía [GeV] (en el eje x) de rayos gamma como primarios que inciden verticalmente. Se observa la línea de color azul que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los puntos de color rojo. Éstos puntos representan el Área efectiva con energías de entre 1 – 10 [TeV] (1000 – 10000 [GeV]) que se obtuvo al simular GEANT4	62
6.13.	Área efectiva [m^2] (en el eje y) en función da la Energía [GeV] (en el eje x) de protones como primarios que inciden verticalmente. Se observa la línea de color azul que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los puntos de color rojo. Éstos puntos representan el Área efectiva con energías de entre 1 – 10 [TeV] (1000 – 10000 [GeV]) que se obtuvo al simular GEANT4	63

6.14. Área efectiva [m^2] (en el eje y) en función da la Energía [GeV] (en el eje x) de γ y protones como primarios que inciden verticalmente. Se observa la línea de color azul que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los datos de γ y línea de color morado que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los datos de protones. Éstos puntos representan el Área efectiva con energías de entre 1 – 10 [TeV] (1000 – 10000 [GeV]) que se obtuvo al simular GEANT4 64

Índice de tablas

3.1. Energía Umbral Cherenkov de partículas en agua y aire [1].	24
3.2. Procesos físicos iniciados por fotones y electrones [1].	32
4.1. Unidades usadas en CORSIKA[16].	37
4.2. Modelo atmosférico estándar de Estados Unidos. Se visualiza las 5 capas, la altitud de cada una y los valores de ajuste (a_i, b_i, c_i) para la modelización de la variación de la densidad de la atmósfera [16].	39
4.3. Identificación de principales partículas utilizadas en CORSIKA [16].	39
5.1. Estructura de los archivos <i>yan.dat</i> , se visualiza la primera y segunda línea.	43
5.2. Estructura de los archivos <i>daton.dat</i> , se muestra la primera línea	43
6.1. Tipo y cantidad de partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ de $1000 - 10000[GeV]$ de energía.	47
6.2. Tipo y número de partículas secundarias de una EAS generadas por un protón primario de energía de $1000 - 10000[GeV]$	51
6.3. Cantidad de partículas secundarias detectadas por el WCD de una EAS generadas por un primario γ de $1000[GeV] - 10000[GeV]$ de energía.	55
6.4. Cantidad de partículas secundarias detectadas por el WCD de una EAS generadas por un primario protón de $1000[GeV] - 10000[GeV]$ de energía.	58
6.5. Resultado del Fiteo Gaussiano para los datos obtenidos de rayos gamma de $1 - 10[TeV]$	62
6.6. Resultado del Fiteo Gaussiano para los datos obtenidos de protones de $1 - 10[TeV]$	63

RESUMEN

El Ecuador al estar atravesado por la cordillera de los Andes es considerado un lugar apropiado para el estudio de las astropartículas. Su posición geográfica presenta ventajas para desarrollar estudios de clima espacial por su ubicación cercana a la anomalía del Sudeste Atlántico. En este trabajo se presenta una reseña histórica del descubrimiento de las astropartículas, sus posibles fuentes, tipos de detectores Cherenkov y observatorios existentes, para estudiar el diseño y simulación de un detector Cherenkov de agua que sea adecuado para trabajar en la Escuela Politécnica Nacional. El estudio consta de dos partes: Primero, la simulación y generación de las lluvias atmosféricas extensas (EASs) de rayos γ y protones con energías de entre 1 a 10 TeV, mediante el software CORSIKA. Segundo, se construyó digitalmente un detector de 1000 litros de capacidad con dos tubos fotomultiplicadores (PMTs) ubicados en la tapa y la base del tanque, y sus componentes adicionales para la simulación de la detección mediante el software GEANT4. Finalmente, con la estimación de flujo de partículas y eficiencia del detector se presentará una estimación del área efectiva del detector en función de la energía. Se compara las EASs producto de rayos γ y protones, así mismo el aspecto negativo de usar un solo detector de dimensiones pequeñas en lugar de un arreglo de detectores. Este trabajo permite establecer un prototipo de detector capaz de distinguir una señal de origen electromagnético del ruido de fondo, producto introducido principalmente por protones.

ABSTRACT

Ecuador crossed by the Andes mountains is considered an appropriate place for the study of astroparticles physics. Its geographical position has advantages for developing space weather studies due to its location close to the South Atlantic Anomaly. This study presents a historical overview of the discovery of astroparticles, their possible sources, types of existing Cherenkov detectors and current working observatories, and the study of the design and simulation of a Cherenkov water detector that is suitable for work at the Escuela Politécnica Nacional. This work consists of two parts: First, the simulation and generation of extensive atmospheric showers (EASs) of gamma rays and protons with energies between 1 to 10 TeV, using the CORSIKA software. Second, a 1000-liter capacity detector was digitally constructed with two photomultiplier tubes (PMTs) located in the tank lid and base with their additional components to simulate detection using the GEANT4 software. Finally, with the estimation of particle flow and detector efficiency, an estimate of the effective area of the detector as a function of energy will be presented. The EASs produced by γ -rays and protons are compared, as well as the negative aspect of using a single detector of small dimensions instead of an array of detectors. This work allows establishing a prototype detector capable of distinguishing a signal of electromagnetic origin from the background noise produced mainly by protons.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las astropartículas, son partículas neutras como: neutrinos (ν), rayos gamma (γ), o partículas cargadas como: protones, electrones y átomos de elementos pesados provenientes de fuentes galácticas y extragalácticas. Estas interactúan con los elementos presentes en la atmósfera alta de la Tierra llamada exósfera. En la exósfera, aproximadamente el 2 % son electrones y el 98 % son protones y núcleos, de los cuales aproximadamente el 87 % son protones, el 12 % son núcleos de helio y el 1 % restante son núcleos más pesados. Las principales interacciones que se presentan en la exósfera son básicamente de dos tipos: electromagnética y hadrónica. Estas producen cascadas de partículas secundarias llamadas Extensive Air Showers (EASs, por sus siglas en inglés). Las EASs electromagnéticas se forman cuando un rayo γ o electrón impacta con la exósfera, y las EASs hadrónicas se forman cuando un núcleo de hidrógeno, núcleo de helio o núcleo pesado impacta con la exósfera. Las EASs hadrónicas son las más importantes en este estudio, porque están constituidas por tres componentes: electromagnética, hadrónica y muónica [2, 18].

La detección de las EASs se realiza de forma indirecta, con detectores Cherenkov de agua (Water Cherenkov Detector, por sus siglas en inglés WCD), la Figura 1.1 se puede visualizar un esquema de la geometría de una EAS que impacta sobre un WCD. Los WCDs constan de sensores llamados tubos fotomultiplicadores (Photomultiplier tubes, por sus siglas en inglés PMTs), que son sensibles a la radiación Cherenkov, es decir, detectan la radiación Cherenkov que se genera cuando una partícula viaja más rápido que la velocidad de la luz en un medio dieléctrico, al ocurrir esto se emite luz de color azulado propio de este efecto [19].

En este proyecto de titulación se simula EASs generadas por rayos γ y protones de energía de entre 1 a 10 [TeV], que llegan a nivel del suelo. Mediante el Software CORSIKA (COsmic Ray Simulations for Kascade) se determina el número de partículas secundarias y energía de arribo a nivel del suelo de cada una de las EASs. Con una estimación del flujo de partículas al nivel del detector, utilizando GEANT4 se construye un WCD de 1000 litros de capacidad, con dos PMTs en dos posiciones diferentes (tapa y base del tanque), y agua como dieléctrico. En el tanque Cherenkov diseñado en GEANT4 se introducirán las partículas secundarias obtenidas en CORSIKA para iniciar las simulaciones. La pequeña fracción de las partículas secundarias cargadas que logren impactar en la superficie del tanque producirán fotones Cherenkov, que serán registrados por los dos PMTs. Finalmente, los fotones Cherenkov se contabilizarán y posteriormente se utilizarán para calcular el área efectiva en función de las energías de los primarios (rayos γ y protones). Para todo esto se implementará las librerías (G4Cherenkov.hh y G4OpticalPhysics.hh) de GEANT4 [16, 17].

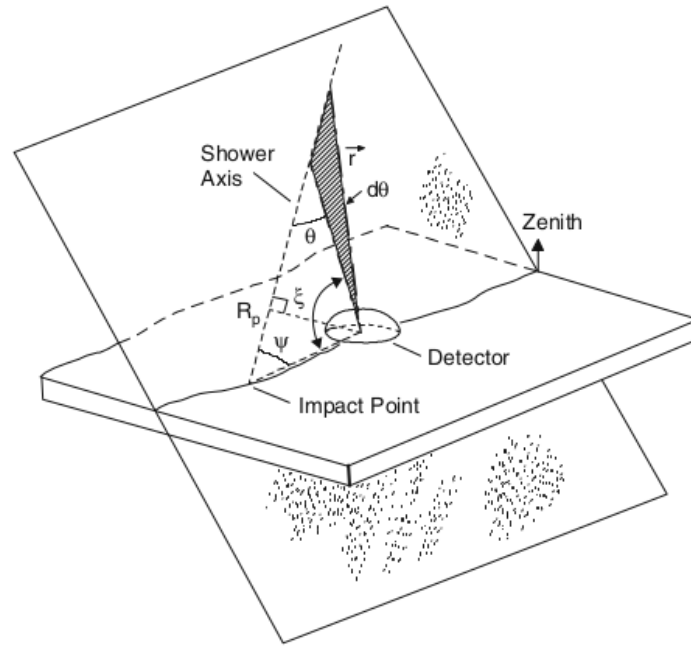


Figura 1.1: Geometría de la trayectoria de una EAS vista de un detector Cherenkov en tierra. Se observa el lugar de impacto y eje de la EAS, la posición del WCD, los ángulos zenith(θ) y azimuth(ψ), y los planos de impacto y plano que contiene a la EAS [1].

El objetivo de este trabajo es determinar el área efectiva de un detector de 1000 litros con la electrónica desarrollada en trabajos anteriores.

El trabajo está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se muestra una pequeña recopilación histórica del descubrimiento de las astro-partículas, y sus posibles fuentes.

El capítulo 3 trata sobre los diferentes tipos de detectores Cherenkov desarrollados en la actualidad (de agua y aire), su funcionamiento, los diferentes elementos que lo constituyen, y una descripción de los observatorios Cherenkov de altas energías que en la actualidad se encuentran en funcionamiento. Además, se describe la formación de las EASs desde un punto de vista fenomenológico y se menciona los procesos físicos relevantes que ocurren en la formación de las EASs. Adicionalmente, se explica los factores ambientales relevantes para la detección de EAS, posición geográfica y se proporciona un método para contabilizar el número de partículas secundarias llamado método de partícula simple, con el cual se podrá determinar el área efectiva.

El capítulo 4 analiza el funcionamiento de los softwares CORSIKA y GEANT4, los cuales serán utilizados para el desarrollo de éste trabajo.

El capítulo 5 explica las condiciones iniciales usadas para la simulación en CORSIKA y GEANT4.

En el capítulo 6 muestra los resultados obtenidos por las simulaciones en CORSIKA y GEANT4, que son usados para determinar el área efectiva en función de la energía de los dos tipos de primarios (rayo γ y protones).

Finalmente, el capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos que se puedan realizar para complementar y mejorar el mismo.

Capítulo 2

FÍSICA DE ASTROPARTÍCULAS

El universo muestra una enorme diversidad de fenómenos astronómicos muy energéticos como: brotes de rayos γ , explosiones de galaxias distantes, explosiones de supernovas, radiación de núcleos de galaxias activas, emisiones de masa coronaria solar, entre otros. El resultado de éstos eventos energéticos son los llamados rayos cósmicos los cuales viajan por todo el universo y una pequeña fracción impactan en la Tierra como se observa en la Figura 2.1 .

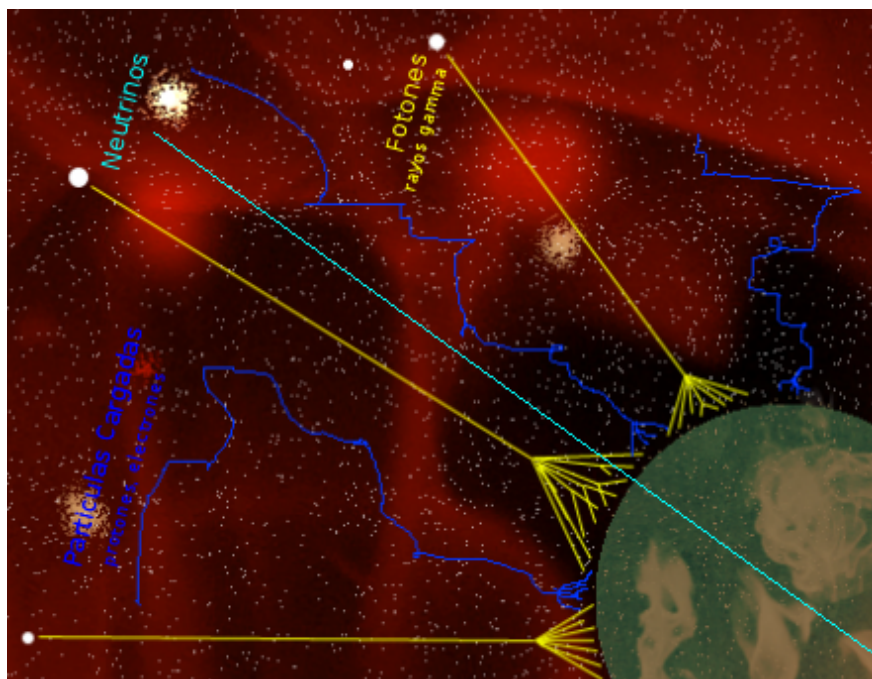


Figura 2.1: Representación de la interacción de astropartículas con la atmósfera, se observa en color azul partículas cargadas y en color amarillo rayos γ (fotones) que interaccionan con núcleos presentes en la atmósfera, además se observa en color celeste el paso de neutrinos [2].

2.1. Desarrollo Histórico de las Astropartículas

En el año de 1785, el físico francés Charles Coulomb analizando los electros copios, instrumentos utilizados para medir si un cuerpo está cargado electricamente, observó que éstos se descargaban espontáneamente, y no por defectos del instrumento. Aproximadamente un siglo después, en el año

de 1879 el físico británico Crookes, observó mediante experimentos que la rapidez de descarga del electroscoio disminuía cuando se reducía la presión del aire dentro del propio electroscoio. Años más tarde en el año de 1896, el físico Henri Becquerel descubrió la emisión de partículas de núcleos inestables, las cuales las denominó radiactividad espontánea.

Todos estos experimentos y descubrimientos concluyeron que un electroscoio se descarga debido a la emisión de partículas cargadas, y con interacción del mismo.

Alrededor de los años 1900, Charles Wilson en Gran Bretaña y Elster y Geitel en Alemania, mejoraron la sensibilidad del electroscoio aislándolo en un recipiente cerrado (el instrumento se muestra en la Figura 2.2(a)). Con la mejora, midieron cuantitativamente la tasa de descarga espontánea, y se observó que la descarga era causada por una radiación proveniente del exterior del recipiente.

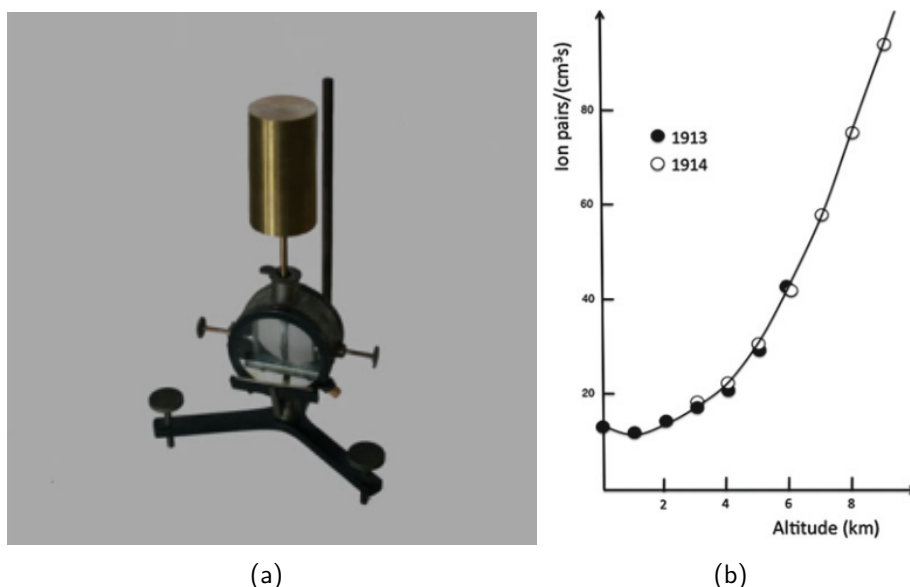


Figura 2.2: (a)Electroscoio desarrollado por Elster y Geitel, (b)Variación de la ionización, el eje x representa la Altitud en km y el eje y representa el número pares de iones por volumen (en cm^3) y por segundo(seg) [3].

Charles Wilson, sugirió que la ionización atmosférica podría ser causada por una radiación muy penetrante de origen extraterrestre, aunque no se pudo comprobar su idea, y se la abandonó durante años. En el año de 1909, las mediciones de la descarga espontánea habían demostrado que la radiación de fondo de descarga, también estaba presente en entornos aislados y podía penetrar los escudos metálicos. Este fenómeno era muy difícil explicarlo con rayos α o rayos β , ya descubiertos por anterioridad. Por lo que los rayos γ eran la última opción para explicar dicha descarga, debido que son fotones de muy alta energía y más penetrantes que los dos tipos de rayos conocidos por el momento(rayos α y rayos β). Posteriormente, se hipotetizaron tres posibles fuentes para dicha radiación: galáctica, corteza terrestre y radiactividad en la atmósfera. Aunque se determinó que la energía de los rayos γ era muy alta, así que se determinó que la fuente tenía que ser galáctica o extragaláctica [3].

En los años 1911 y 1912 el científico Víctor Hess, realizó estudios con globos atmosféricos para medir la ionización. El observó que el aumento en la tasa de ionización con la altitud (Figura 2.2(b)) se debe a una radiación proveniente de arriba, es decir, de origen extraterrestre. Además, las observaciones en el día y en la noche no mostraban variación alguna por lo que se excluyó al

Sol como fuente directa de esta hipotética radiación. Posteriormente los resultados de Hess fueron confirmados por Kolhorster, mediante vuelos a una altitud de hasta 9200 km. Kolhorster, encontró un aumento de la tasa de ionización de hasta diez veces su valor a nivel del mar lo que confirmaba lo expuesto por Hess. Finalmente, en el año de 1926 Millikan y Cameron, realizaron mediciones de absorción de la radiación a diferentes profundidades en lagos ubicados a gran altura, y llegaron a la conclusión de que la radiación estaba compuesta de rayos γ y partículas cargadas de alta energía que impactan a la tierra de todas las direcciones por igual, la cual la denominaron rayos cósmicos [3].

2.2. Rayos Cósmicos

Los Rayos Cósmicos (Cosmic ray, por sus siglas en inglés CRs), son partículas cargadas y neutras que viajan por todo el espacio en todas las direcciones. Cuando la energía de los CRs está aproximadamente entre 10^{10} - 10^{15} [eV], se dice que son de origen galáctico y cuando la energía está aproximadamente por encima de 10^{15} [eV] se dice que es de origen extragaláctico [4]. En la Figura 2.3 se observa un espectro de los rayos cósmicos.

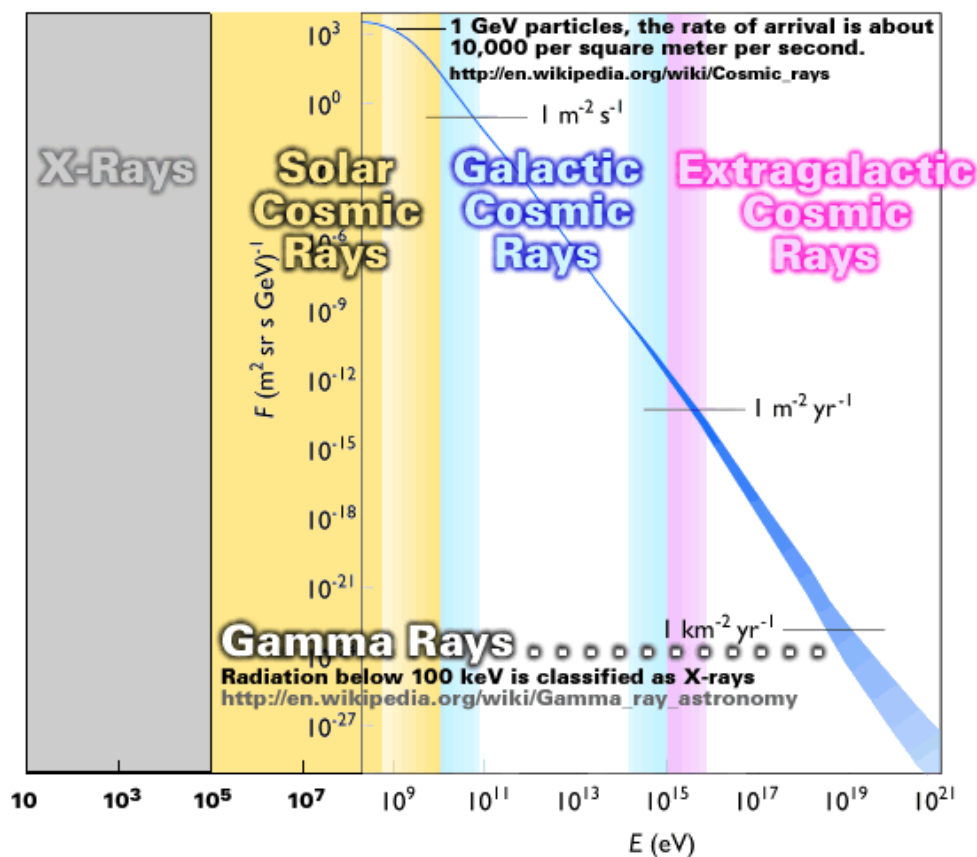


Figura 2.3: Espectro de los CRs. En el eje vertical se muestra el flujo de CRs y en el eje horizontal la energía de los CRs (eV). Franja de color amarillo corresponde a CRs Solares, franja de color celeste corresponde a CRs Galácticos y franja de color violeta corresponde a CRs Extragalácticos [4].

Una pequeña pero muy energética fracción de CRs impacta con la atmósfera de la Tierra, siendo

la exósfera su primera interacción. La exósfera se encuentra entre los 650 y 10000 km de altitud aproximadamente. La interacción de los CRs con la atmósfera produce reacciones nucleares donde se originan las EASs o duchas de partículas que impactan la superficie de la Tierra [20, 21].

Los CRs no emiten radiación térmica y obedecen procesos que se describen por la electrodinámica cuántica (QED). Además, son muy energéticos y alcanzan aceleraciones extremadamente altas. Para comprender el origen de estas aceleraciones se planteó la aceleración de Fermi, la cual consta de dos partes, la aceleración de segundo orden y la aceleración de primer orden. La aceleración de segundo orden, se basa en el principio de que las partículas cargadas pueden adquirir energía al chocar con nubes magnetizadas con velocidades distribuidas al azar. Y la aceleración de primer orden, se basa en que si en lugar de acelerar las partículas en nubes magnéticas distribuidas al azar, este proceso se realizará alrededor de los límites de una onda de choque, esto podría conseguir que los CRs adquieran energía de manera mucho más eficaz. Adicionalmente, para obtener aceleraciones altas se requiere de muchos cruces de frentes de onda, es decir se requiere una combinación de la intensidad del campo magnético y el radio de un ambiente de aceleración, que se conoce como criterio de Hillas [5].

La siguiente ecuación 2.1 muestra el presente criterio:

$$\frac{E}{PeV} < \left(\frac{B}{\mu G} \right) \left(\frac{R_L}{pc} \right) Z\beta, \quad (2.1)$$

donde B es el campo magnético en unidades $[\mu G]$, R_L es el radio de Larmor en unidades de parsecs $[pc]$, E es la energía de los CRs en unidades de $[PeV]$, Z es el número de unidades de carga y β es la velocidad de choque frontal como fracción de la velocidad de la luz. Ésta relación se visualiza en la siguiente Figura 2.4, donde se observa varios entes astrofísicos según su potencial para acelerar los CRs, hasta energías de $\sim 10^{20}$ o superior de acuerdo a su campo magnético B [5].

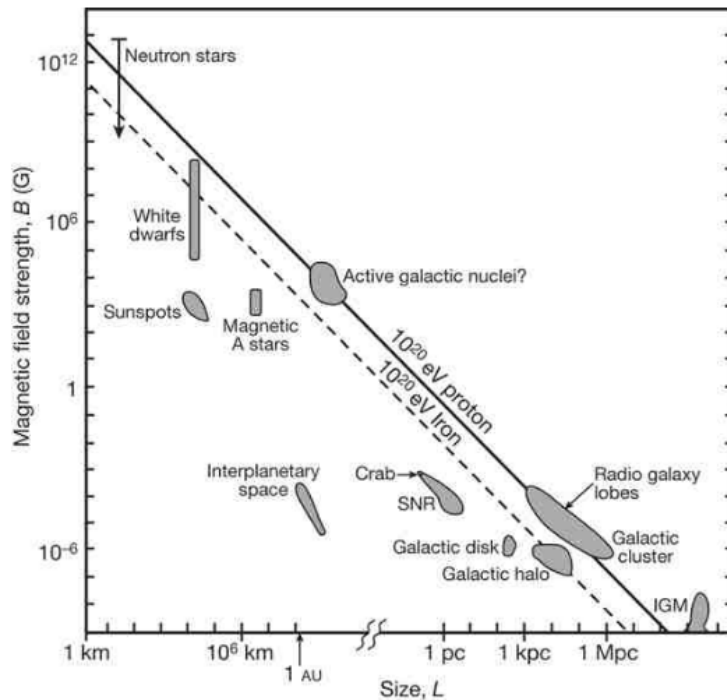


Figura 2.4: Procesos de aceleración no exótica que requiere una partícula dentro de una región (de tamaño L , eje x) donde están presentes los choques de campo magnético B (eje y). Una vez que la partícula alcanza su máxima energía, entonces el campo magnético no es capaz de mantener la partícula confinada dentro de la región de aceleración y por ende la partícula escapa. Esto proporciona un valor aproximado para la energía máxima alcanzable de $E_{max} \propto BL$, mostrada como una línea sólida/discontinua para núcleos protón/hierro de $10^{20} eV$ [5, 6].

2.3. Fuentes de los Rayos Cósmicos

En la actualidad no se conoce a ciencia cierta el origen exacto de los CRs. En esta sección se presenta las posibles fuentes.

2.3.1. Brotes de Rayos Gamma

Una fuente de los rayos γ son los brotes de rayos γ (Gamma-ray burst, por sus siglas en inglés GRBs). Los GRBs fueron descubiertos en el año de 1967 por el satélite militar estadounidense VELA, el cual tenía como fin monitorear explosiones nucleares dentro y fuera de la atmósfera de la Tierra [3].

Los GRBs son explosiones de alta energía (> 1 [keV]) con una duración de entre 0,01 y 100 [s], aproximadamente. De acuerdo a su duración pueden ser GRBs cortos o largos. Los GRBs cortos duran menos de dos segundos y presentan un espectro más compacto. Los GRBs largos duran más de dos segundos y presentan un espectro más suave [2].

Origen de los GRBs

El origen de los GRBs es cosmológico. En la Figura 2.5 se visualiza un mapa del cielo en coordenadas galácticas, en donde se han marcado todos los estallidos de GRBs detectados por el experimento BATSE en un periodo de 9 años [7].

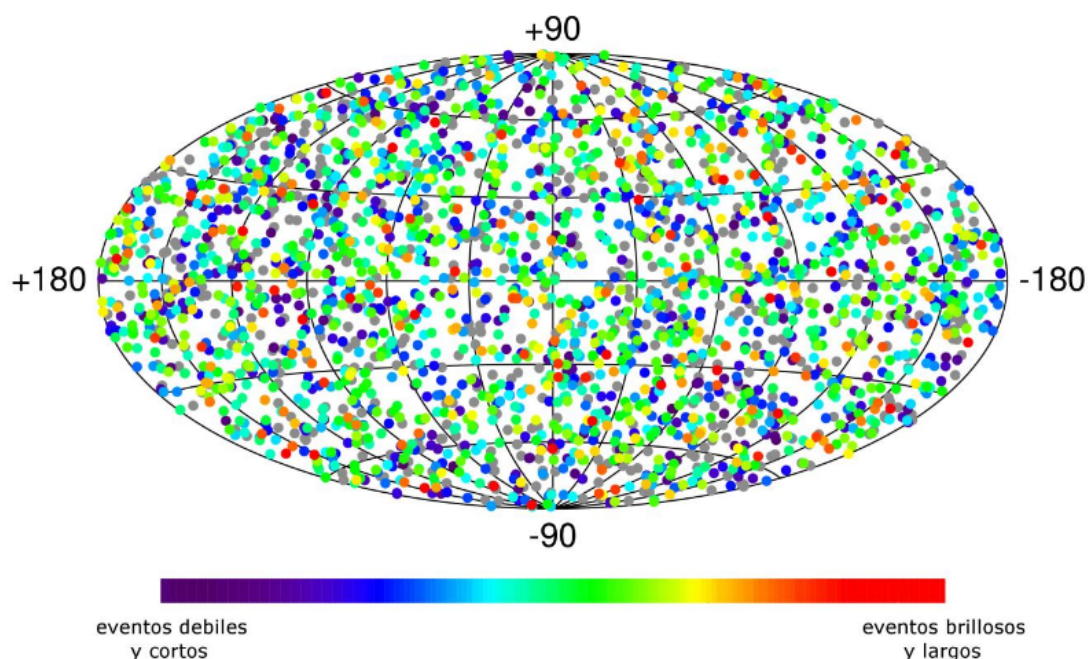


Figura 2.5: Mapa en coordenadas galácticas con más de 2700 eventos detectados por el experimento BATSE en sus 9 años de operación [7]

Cada punto de la Figura 2.5 representa un evento. Se esperaría que exista una mayor distribución de puntos en el plano de la galaxia, pero se observa que es una distribución de puntos homogénea. Esto significa que se detectan la misma cantidad de GRBs en todas las direcciones posibles observables, lo que nos indica que el origen de los eventos es extragaláctico [7].

2.3.2. Pulsares

Los pulsares son estrellas de neutrones altamente magnetizadas que giran a gran velocidad, con periodos desde 1,6 [ms] hasta algunos segundos. Los pulsares principalmente son fuentes de rayos γ y partículas cargadas [10].

Origen de los pulsares

Los pulsares se originan en las explosiones de supernovas (como la que formó la nebulosa del Cangrejo, mostrada en la Figura 2.6), tras el colapso de una estrella masiva, o bien, a partir de la acreción de materia por una enana blanca en un sistema binario. Hasta la fecha se han detectado 7 pulsares, de los cuales 3 de ellos presentan evidencia de una posible emisión periódica de rayos γ . La mayoría de pulsares son descubiertos por el detector EGRET y las energías están entre 100 [MeV] a 30 [GeV] [22, 10].



Figura 2.6: Púlsar de la nebulosa del Cangrejo, la imagen combina información óptica del telescopio espacial Hubble (en rojo) e imágenes de rayos X del Observatorio de rayos X Chandra (en azul) [8].

2.3.3. Remanentes de Supernova

Un remanente de supernova (Supernova Remnant, por sus siglas en inglés SNR), es la estructura resultante tras la explosión y expansión de una supernova. Una SNR está compuesta por una nube de gas caliente en expansión el cual adquiere aproximadamente el 1 % de la velocidad de la luz en su expansión [10].

Origen de los remanentes de las supernovas

Las SNRs se forman cuando el material exterior de las estrellas es eyectado a altas velocidades. La rápida liberación de energía, va acompañada de la formación de una onda de choque, que empuja el material interestelar calentándolo y comprimiéndolo, dando lugar a una delgada y densa cáscara que delimita el borde del remanente de supernova. Las SNRs se clasifican en dos grupos: pleriones, que contienen un púlsar en su interior y remanentes de tipo cáscara, a la que pertenecen el 90 % de los remanentes conocidos. Ambas pueden ser fuentes de rayos γ de alta energía [10].

En la actualidad existe pocos remanentes de supernova descubiertos. La mayoría han sido detectados por el High Energy Stereoscopic System (HESS, por sus siglas en inglés). El remanente de supernova tipo cáscara RXJ0852.0-4622 fue observado por HESS, entre Diciembre del 2004 y Mayo del 2005 por un tiempo observacional de 33 [horas]. En la Figura 2.7 se visualiza el remanente de esta supernova [9].

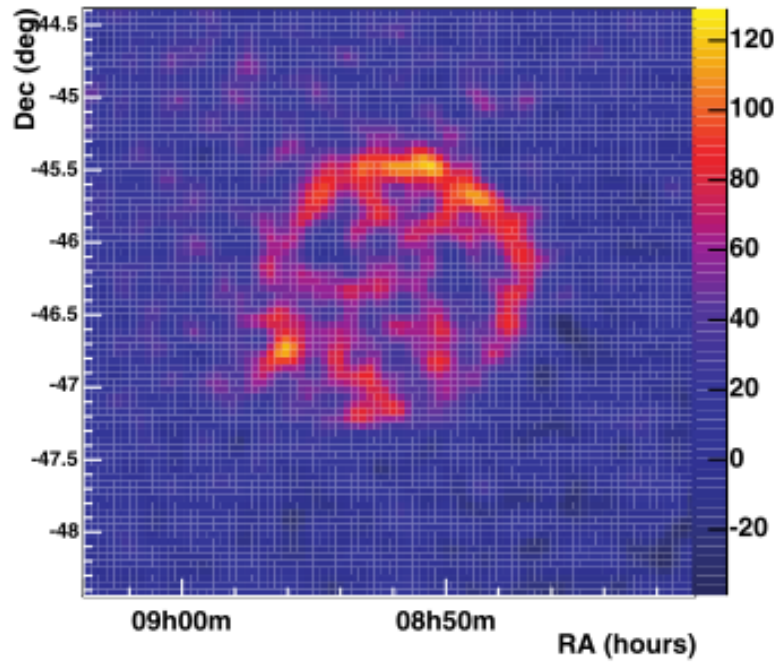


Figura 2.7: Imagen de rayos γ del remanente de supernova RXJ0852.0-4622 suavizado por un gaussiano de 0.06. [9].

2.3.4. Núcleos Galácticos Activos

Se llama núcleos galácticos activos (Active Galactic Nucleus, por sus siglas en inglés AGN), a la región central de las galaxias activas. Los AGNs se caracterizan por una alta luminosidad ($10^{48} - 10^{49}$), órdenes de magnitud superior a la emitida en el resto de la galaxia. La vía láctea es un ejemplo de AGN, ya que de su centro proviene la mayor parte de la radiación observada. Por lo que, en los AGNs se han observado rayos γ en el orden de los [TeV] [10].

Origen de los núcleos galácticos activos

Los AGNs se originan en el centro de galaxias activas, y la radiación observada en el centro de las mismas abarca todo el espectro electromagnético. Existe una gran diversidad de AGNs, por lo que se ha realizado un modelo unificado para explicar su origen. El modelo plantea la acreción de materia por un agujero negro supermasivo, situado en el centro de la galaxia. En la Figura 2.8 se visualiza el modelo unificado [10].

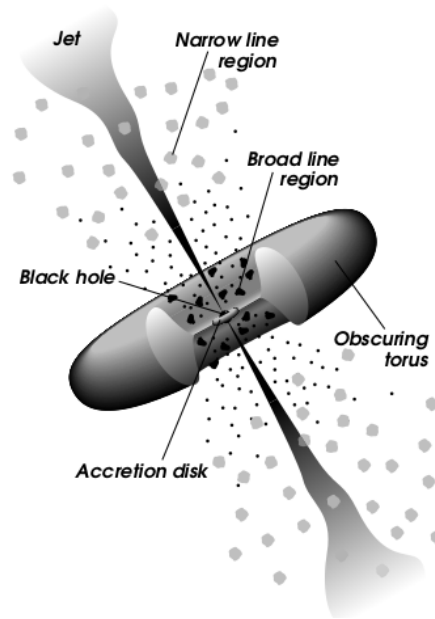


Figura 2.8: Modelo unificado de un AGN. Se observa el chorro de partículas en la parte superior izquierda del gráfico (Jet), región de línea estrecha y ancha (narrow line region y broad line region), región oscura (obscuring torus), en el centro el agujero negro (black hole) y el disco de acreción [10].

Un ejemplo de AGN es el blazar (TXS 0506+056) descubierto el 22 de Septiembre del 2017. El blazar estaba sufriendo una llamarada de rayos γ , lo que provocó una extensa campana de longitud de onda múltiple. Por otro lado, el observatorio IceCube examinó los neutrinos de baja energía detectados en los últimos años, encontrando un exceso de emisión en la ubicación del blazar, por lo que se concluyó que los blazares son una fuente de rayos γ y neutrinos [23].

Capítulo 3

DETECCIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

3.1. Tipos de Detectores Cherenkov

Los CRs que logran impactar en la atmósfera alta de la tierra, interaccionan con moléculas presente en ella por medio de interacciones fuertes y electrodébiles generando EASs de partículas secundarias. Para la detección indirecta de estas se tiene diferentes tipos de detectores terrestres. En esta sección se describe los detectores Cherenkov de aire y agua.

3.1.1. Detectores Cherenkov de Aire

Los detectores Cherenkov de aire tiene una gran eficiencia debido a su gran angular el cual cubre simultaneamente una gran fracción del cielo y detecta cualquier evento que esté en su campo de visión. Un ejemplo actual es el arreglo de detectores ópticos Tunka, mostrado en la Figura 3.1, donde se visualiza la configuración del detector y el detector [1].

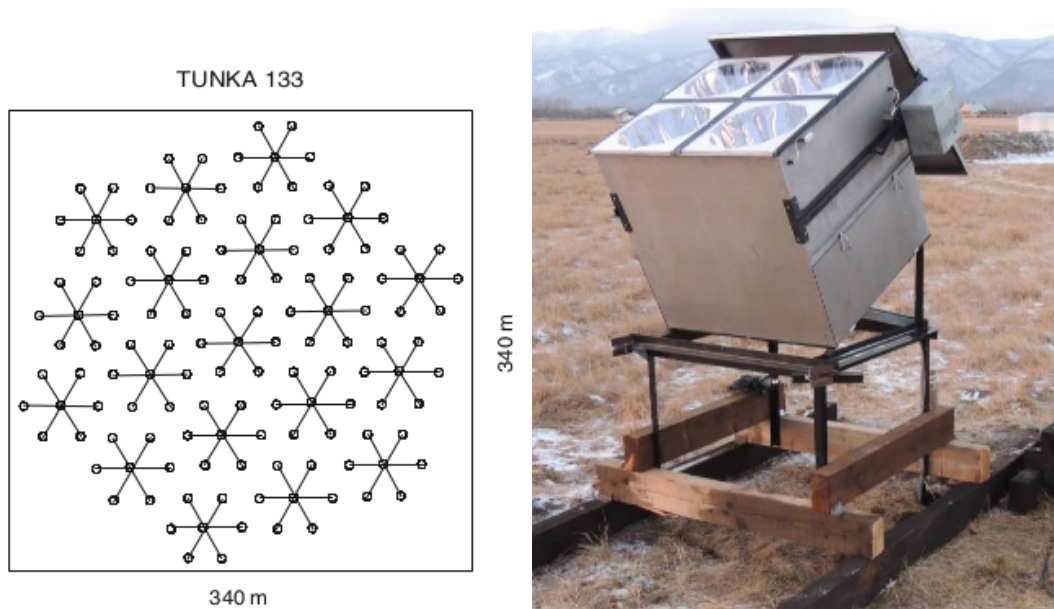


Figura 3.1: En el panel izquierdo se observa el diseño de la matriz óptica Cherenkov TUNKA-133, ubicada en el valle Tunka (675 m.s.n.m.) en Rusia [1]. En el panel derecho se observa la caja óptica Tunka-HiSCORE [11]

3.1.2. Detectores Cherenkov de Agua

Los WCD son tanques de metal o plástico que en su interior contienen agua libre de impurezas. Las paredes internas del WCD están recubiertas por un material reflectivo y difusivo llamado Tyvek. Para la detección de los fotones Cherenkov se cuenta con tubos fotomultiplicadores (PMT, por sus siglas en inglés) ubicados estratégicamente para una máxima detección. Éstos PMTs envían una señal eléctrica, la cual es digitalizada por dispositivos electrónicos. Los datos adquiridos son enviados a un sistema de adquisición cada cierto intervalo de tiempo [2]. En la Figura 3.2 se visualiza un WCD construido en la EPN.



Figura 3.2: En la parte izquierda se observa el soporte del PMT de color rojo y el tanque con el dieléctrico de agua. Después el WCD se observa el WCD tapado y cubierto de fundas de color negro. En el lado derecho se observa el WCD construido en la EPN con la electrónica y panel solar que proporciona energía al mismo [12] .

3.1.3. Radiación Cherenkov

La radiación Cherenkov se genera cuando una partícula cargada atraviesa un medio dieléctrico a velocidades mayores a la velocidad de la luz en ese medio, esto genera una luz de color azulado, la cual es coherente y tendrá la forma de cono como se muestra en la Figura 3.3. Es decir, matemáticamente éste efecto se produce cuando la velocidad de la partícula cargada $v_{partícula} = \beta c$ es mayor que la velocidad de la luz $v_{luz} = c/n$, donde n es el índice de refracción del medio. Por lo tanto, se intuye que para diferentes medios se va a tener un umbral de energía diferente para la emisión de luz Cherenkov, como se observa en la Tabla 3.1, es decir, va a depender del índice de refracción del medio, en nuestro caso el índice de refracción del agua es $n_{agua} = 1,33$ y la energía umbral es $E_{umbral} > m(1 - 1/n^2)^{1/2}$, donde m es la masa de la partícula cargada en MeV .

En consecuencia, la condición necesaria para la existencia del efecto Cherenkov, se observa en la inecuación 3.1:

$$v_{partícula} > v_{luz},$$
$$\beta c > \frac{c}{n},$$

$$\beta \geq \frac{1}{n}. \quad (3.1)$$

Los fotones Cherenkov son emitidos en forma de cono alrededor de la trayectoria de la partícula, con un ángulo θ de abertura. La ecuación 3.2 muestra su relación matemática [24]:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta}. \quad (3.2)$$

Se observa que para cada medio existe un ángulo máximo de emisión, llamado ángulo Cherenkov (se observa en la ecuación 3.3 y es alcanzado cuando $\beta = 1$. Por lo tanto,

$$\theta_{Cherenkov} = \arccos\left(\frac{1}{n}\right). \quad (3.3)$$

Para el caso del agua el $\theta_{max} \sim 41^\circ$ [24].

La energía radiada como luz Cherenkov por unidad de distancia a lo largo del camino de la partícula se define como la ecuación 3.4 :

$$\left(\frac{dE}{dl}\right)_{rad} = \frac{(Ze)^2}{c^2} \int_{\epsilon(\omega) > 1/\beta^2} \omega \left(1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon(\omega)}\right) d\omega \quad (3.4)$$

con $n(\omega) \simeq \sqrt{\epsilon(\omega)}$, donde ω es la frecuencia angular, Ze es la carga total de un núcleo con número atómico Z y $\epsilon(\omega)$ la constante dieléctrica del medio. Después de recorrer una longitud l en el agua, se habrán producido N fotones Cherenkov. De la ecuación 3.4 se puede considerar el rango de frecuencias del visible al cercano ultravioleta, por lo que se puede considerar el $n(\omega)$ como constante, lo cual la integral se simplifica. Por otro lado, la energía de un fotón es $E_\lambda = 2\pi\hbar c/\lambda$, con lo cual es posible conocer el número de fotones Cherenkov producidos en un intervalo de λ_1 y λ_2 , mediante la ecuación 3.5 :

$$N = \frac{2\pi e^2 l}{\hbar c} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \quad (3.5)$$

Por otro lado el momento de una partícula con masa m_0 y velocidad βc es $p \equiv \beta\gamma m_0 c$, o como la siguiente ecuación 3.6:

$$\beta(p) = \left[1 + \left(\frac{m_0 c}{p}\right)^2\right]^{-1/2} \quad (3.6)$$

con lo que se puede determinar el número de fotones Cherenkov emitidos por una partícula con momento p al recorrer una longitud l en un medio con índice de refracción n [24].

Se concluye lo siguiente:

1. Para diferentes medios dieléctricos se tendrá diferentes velocidades umbrales.
2. Para valores inferiores de la velocidad umbral no se tendrá el efecto Cherenkov.
3. Para cada medio dieléctrico existe su $\theta_{Cherenkov}$, el cual es el ángulo máximo de emisión.

4. El efecto Cherenkov solo se produce en medios dieléctricos a frecuencias $n(\omega) > 1$, eso quiere decir que la región del visible va a predominar y una pequeña región del infrarrojo [21].

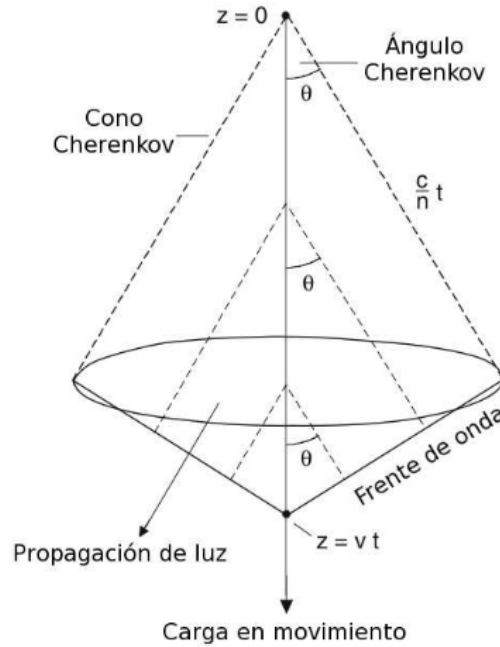


Figura 3.3: Geometría básica del efecto Cherenkov, se observa el ángulo de emisión θ a partir de una partícula cargada relativista que se mueve a lo largo del eje z , el frente de onda instantáneo y la propagación de los fotones Cherenkov [1].

Partícula	Agua	Aire
Electrón	257KeV	21MeV
Muón	53MeV	4,4GeV
Pión	70MeV	5,8GeV
Protón	475MeV	39GeV

Tabla 3.1: Energía Umbral Cherenkov de partículas en agua y aire [1].

3.1.4. Tubo Fotomultiplicador (PMT)

El tubo fotomultiplicador (Photomultiplier tubes, por sus siglas en inglés PMT), es un sensor extremadamente sensible a la luz que genera una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la luz incidente. El PMT es capaz de detectar eventos de un solo fotón, con una alta ganancia en el orden de 10^7 y una respuesta en el orden de los $[ns]$, con eficiencia cuántica típica de $\sim 20\%$. En la actualidad existe varios tipos de PMTs, pero su principio de funcionamiento es el mismo. Un PMT es un tubo sellado al vacío que tiene una ventana de entrada para la detección de partículas hecha de vidrio o cuarzo, con un depósito de un material alcalino, un fotocátodo, electrodos de enfoque, etapas de multiplicación de electrones llamados dínodos y un ánodo que usualmente se

encuentra fuera del tubo de vidrio [12, 24]. En la Figura 3.4 se observa las partes básicas de un PMT.

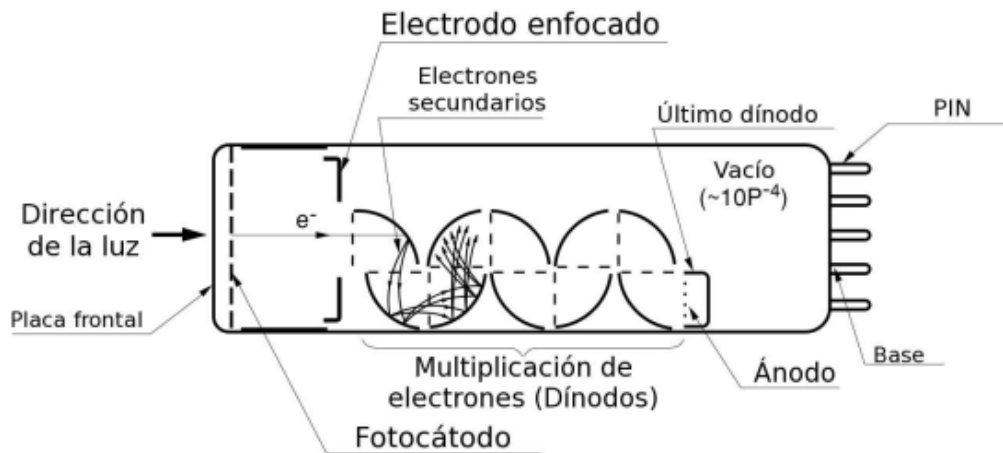


Figura 3.4: Esquema general de los elementos de un PMT. Se observa a lado izquierdo la placa frontal en donde los fotones van a incidir y atravesar el fotocátodo para ser detectados y amplificados por los dínodos, donde finalmente la corriente amplificada llegará al ánodo y al sistema de adquisición de datos. En la parte derecha se observa la base del PMT, donde regularmente se conecta la fuente de poder para su funcionamiento. Todo este sistema esta al vacío [13].

3.2. Observatorios de altas energía

Alrededor del mundo existen varios observatorios para la detección indirecta de CRs. A continuación, se detallan los siguientes observatorios.

1. **LAGO**: El proyecto Latin American Giant Observatory (LAGO), es un proyecto desarrollado en Latinoamérica. El proyecto consiste en la detección de astropartículas mediante el uso de detectores Cherenkov a varios cientos y miles de m.s.n.m. LAGO se encuentra en los meridianos 60 y 80 perpendiculares al plano ecuatorial y se extiende desde México hasta Argentina. Además, la ventaja de un arreglo de este estilo es la capacidad de registrar con gran detalle eventos transitorios solares [25].
2. **IceCube**: El observatorio IceCube, es un detector que tiene 5160 módulos ópticos instalados a una profundidad de entre 1450 y 2450 metros bajo la superficie de la capa de hielo en el Polo Sur. Ice Cube fue diseñado para detectar neutrinos provenientes de fuentes astrofísicas, pero también es capaz de detectar muones provenientes de EASs producidas por CRs con energías del orden de los TeV. IceCube usa como dieléctrico el hielo, el cual es necesario para generar fotones Cherenkov de muones que impactan en el detector. Los muones que ingresan al detector provienen de CRs, que posteriormente son detectados por el arreglo tridimensional de módulos ópticos [5].
3. **HAWC**: High Altitude Water Cherenkov (HAWC), es un observatorio de rayos γ de gran apertura. El observatorio HAWC es capaz de observar el cielo en el rango de energías de

ente 100 GeV a 100 TeV. Los rayos γ que observa HAWC provienen de objetos celestes bajo condiciones físicas extremas, en los que se producen CRs de las más altas energías [5].

4. **Pierre Auger:** El observatorio Pierre Auger se encuentra ubicado en la provincia de Malargue, Argentina, es el detector de rayos cósmicos más grande jamás construido. El observatorio cubre una superficie de aproximadamente 3000km^2 , con 1600 WCDs distribuidos en una cuadrícula de $1,5\text{km}$ de lado. Además, el observatorio cuenta con 27 telescopios de fluorescencia, ubicados en cuatro posiciones alrededor del área de los WCDs [3].

3.3. Zona Geográfica del Ecuador

El Ecuador al ser un país atravesado por la cordillera de los Andes es un gran candidato para la detección indirecta de astropartículas. Las principales elevaciones para una posible construcción de un observatorio de altas energías se observan en la Figura 3.5.

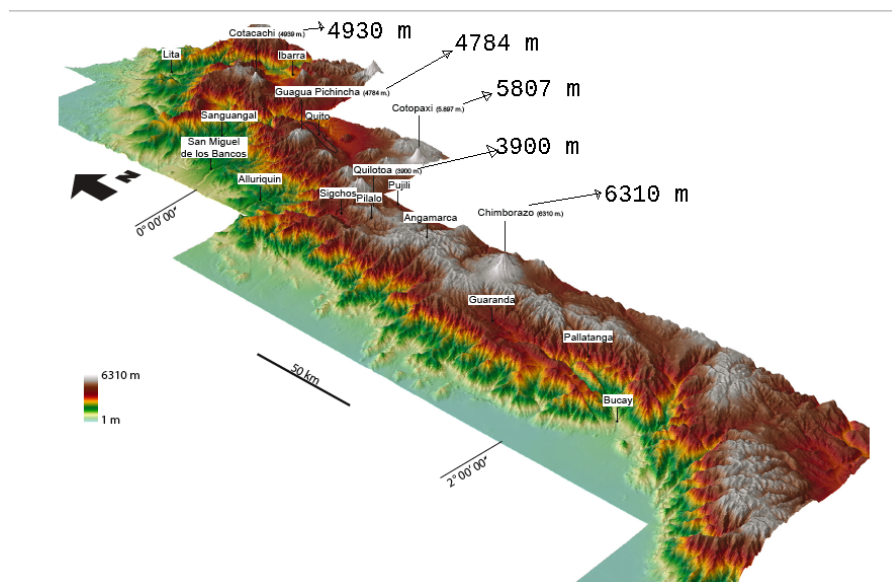


Figura 3.5: Andes Ecuatorianos [14]

La cantidad de astropartículas depende de la altitud, es decir, a mayor altura se obtendrá una mayor cantidad de astropartículas detectables, en la Figura 3.6 se observa este hecho.

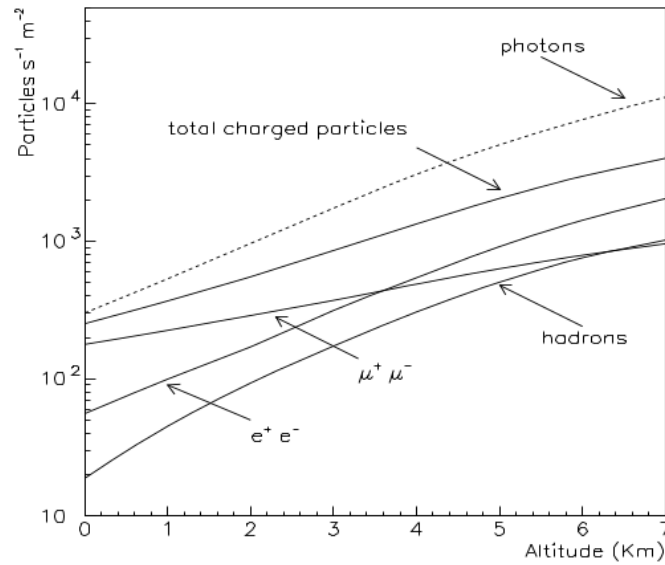


Figura 3.6: Tasa base de partículas secundarias cargadas en función de la altitud. El umbral de energía cinética utilizado en la simulación es 3 [MeV] para electrones y fotones, y 50 [MeV] para muones y hadrone [26].

Además, Ecuador se encuentra ubicado muy cerca de la anomalía del Sureste Atlántico, lo cual facilita el arribo de una mayor cantidad de astropartículas a nivel del suelo ($\sim 29000 \text{ nT}$), en la Figura 3.7 se puede vizualizar dicha anomalía.

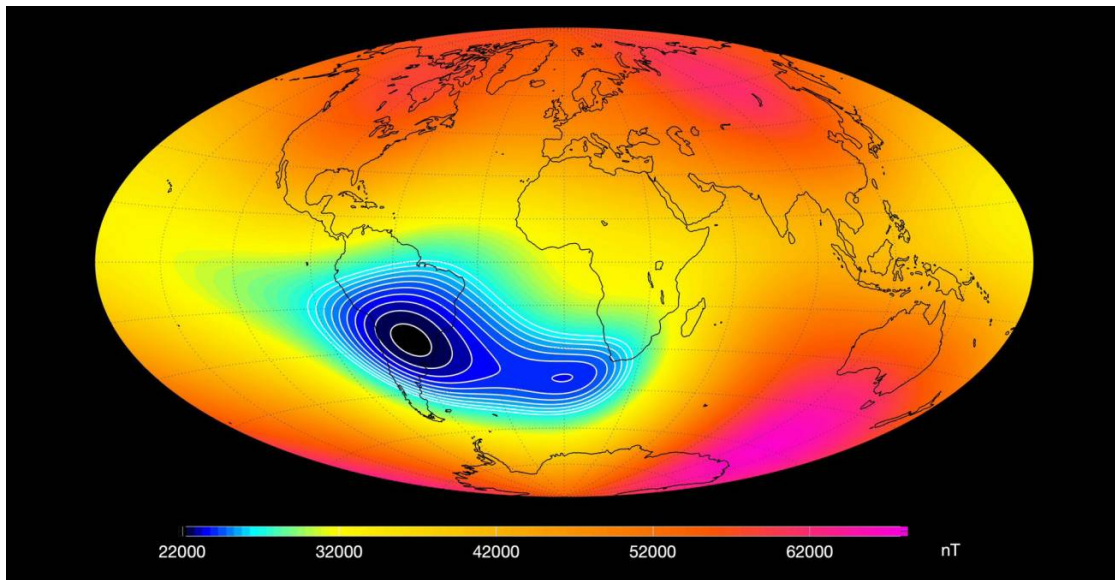


Figura 3.7: Anomalía del Sureste Atlántico [15].

3.4. Formación de las EASs

La mayor parte de EASs, son generadas por hadrones provenientes de CRs extremadamente energéticos, que ingresan en la atmósfera desde el espacio exterior, produciendo una gran cantidad

de partículas secundarias que colisionan sucesivamente con núcleos presentes en ella. Los procesos de interacción están dominados por hadrones, por lo tanto se formará una cascada de hadrones, la cual se propagará longitudinalmente a lo largo de la dirección del vector momento del primario de origen.

A causa del impulso transversal de las partículas secundarias que emergen de las colisiones y por procesos de dispersión, la EAS se extiende lateralmente dando lugar a la formación de muones y neutrinos, que son el resultado principalmente de la descomposición de los piones cargados, kaones cargados, descomposición de partículas encantadas y otros procesos de la cascada de hadrones progenitora, dando lugar a la formación de cascadas compuestas de muones y neutrinos. De la misma manera, los piones neutros y en menor medida los muones y otras partículas abren canales electromagnéticos cuando decaen, y desvian una fracción significativa de la energía de la cascada hadrónica progenitora en rayos γ y electrones de alta energía, dando lugar a la cascada electromagnética [1]. En la Figura 3.8 se visualizan EASs generados por diferentes primarios.

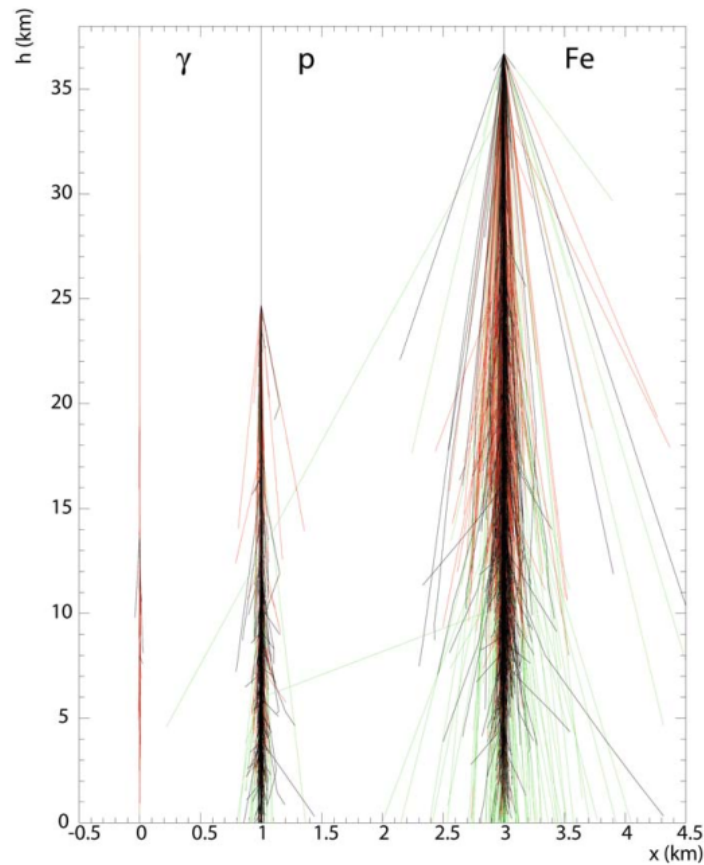


Figura 3.8: Vista lateral de trayectorias de partículas de energía $\geq 10[GeV]$ de un fotón, un protón y una EAS generada con un núcleo de hierro de energía de $10^5[GeV]$. La componente electroganética se observa en color rojo, la componente hadrónica se observa en color negro y la componente muónica se observa en color verde [1].

3.4.1. Producción de nuevas partículas

Un factor muy importante en las interacciones de alta energía es la multiplicidad de partículas, n_s , es decir, el número de partículas secundarias que se producen. A mayor energía mayor número de partículas secundarias generadas en las cascadas.

Distribución de Multiplicidad

La distribución de multiplicidad, $P(n)$, es muy amplia y está sujeta a grandes fluctuaciones. Por lo que se a propuesto diferentes formas matemáticas para describirlo. A continuación, se observa la ecuación 3.7 la distribución-NB (binomios negativos).

$$P_N(\bar{n}, k) = \frac{(n + k - 1)!}{n! (k - 1)!} \left(\frac{\bar{n}/k}{1 + \bar{n}/k} \right)^n \left(1 + \frac{\bar{n}}{k} \right)^{-k} \quad (3.7)$$

Donde P_n es la probabilidad de que exista un evento con n partículas cargadas. Los parámetros n y k están relacionados con la dispersión D , por medio de la siguiente ecuación 3.8:

$$D = \sqrt{(n^2 - \bar{n}^2)} \quad (3.8)$$

Por la ecuación 3.8, se obtiene finalmente la ecuación 3.9:

$$\frac{D^2}{\bar{n}^2} = \frac{1}{k} + \frac{1}{\bar{n}} \quad (3.9)$$

En los experimentos de colisión $p - p$ se descubrió que la distribución-NB describen la multiplicidad de partículas cargadas bastante bien [1].

3.4.2. Secciones eficaces

Las secciones eficaces, y principalmente las inelásticas juegan un papel importante para el desarrollo de EASs. La sección eficaz inelástica de una partículas que impacta con un núcleo en un medio, determina en promedio la ubicación donde tendrá lugar la colisión.

La sección eficaz total se compone de 5 procesos: (1) dispersión elástica, (b) dispersión inelástica difractiva del núcleo o núcleo objetivo, (3) dispersión inelástica difractiva de la partícula incidente, (4) dispersión difractiva doble y (5) dispersión inelástica resultante. En nuestro caso en la formación de EASs, la sección eficaz inelástica sólo se toma en cuenta los procesos (3),(4) y (5).

Finalmente, las secciones eficaces más importantes en la formación de EASs son las iniciadas por: hadrones, nucleones, piones y kaones que interaccionan con núcleos presentes en la atmósfera [1].

Sección eficaz (*Núcleo – Núcleo*) y (*Pión – Núcleo*) y dependencia energética

La sección eficaz ($N - N$), y más específicamente ($p - p$) y ($p - n$), se habían medido cuidadosamente en muchos aceleradores de partículas con energía de hasta aproximadamente $60 GeV$, y en general se creía que la sección eficaz estaba por acercarse a su valor asintótico a esa energía. Pero a finales de los años 50, experimentos realizados por CRs mostraban que las secciones eficaces de ($N - N$) y ($\pi - N$) parecían aumentar con energía por encima de los cientos de GeV . Años más

tarde, los experimentos ($p - p$) realizados en el CERN confirmó que las secciones eficaces aumentaban con el aumento de la energía [1].

Sección eficaz ($Núcleo - Aire$) y ($PiÓN - Aire$) y dependencia energética

Las mediciones de la sección eficaz de las interacciones hadrónicas, se llevaron a cabo a mediados del siglo pasado, mediante calorímetros de ionización. Los calorímetros de ionización, son instrumentos que miden la energía y la composición de los CRs. Las principales interacciones, que miden los calorímetros de ionización son hadron-núcleo y núcleo-núcleo. En la mayoría de los casos el núcleo objetivo es desconocido y solo puede estimarse mediante los núcleos conocidos en el aire (carbono, hierro, etc) para tener condiciones controladas. Por lo tanto, las secciones eficaces calculadas son de interacciones hadron-núcleo o núcleo-núcleo y nucleón-nucleón, éste último se lo calcula mediante algún modelo matemático.

Aunque los datos de las secciones eficaces recopilados por los calorímetros tenían bastantes errores todos apuntaban a un aumento de la sección eficaz con el incremento de la energía. Tiempo más tarde, experimentos realizados en el CERN confirmaron el aumento de la sección eficaz de $p - p$ con el incremento de la energía [1].

Sección eficaz ($Núcleo - Átomo$), ($Átomo - Átomo$), ($KaÓN - Átomo$) y ($PiÓN - Átomo$) y dependencia energética

Durante mucho tiempo se han recolectado datos sobre las interacciones: ($N - A$), ($A - A$), ($K - A$) y ($\pi - A$) en aceleradores de partículas en un rango de energía bajo ($\leq 300 GeV$). Así mismo, se tienen datos de las interacciones de los CRs en varios materiales objetivo, en combinación con datos obtenidos en calorímetros en el rango de energía ultra-alta, desafortunadamente los datos obtenidos contienen muchos errores por lo que los resultados no son viables. Los errores se duplican por la incertidumbre de la masa del primario y el aumento de su energía, en la Figura 3.9 se visualiza la dependencia energética de la sección eficaz [1].

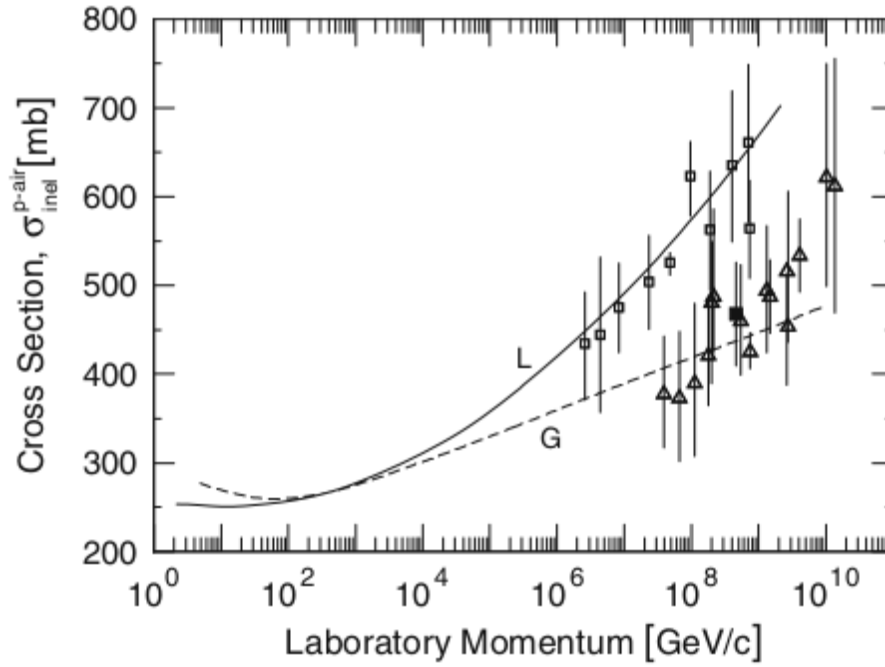


Figura 3.9: Compilación de secciones eficaces inelásticas para interacciones protón-aire, los datos son extraídos de tres experimentos (Volcano Ranch, Akeno Hara y Fly's Eye). La curva entre cortada "G" se calculó con el modelo Glauber y la línea contícua "L" con la parametrización de Liland's [1].

3.4.3. Camino libre medio

En la física de los rayos cósmicos, se usa con mayor frecuencia el concepto de camino libre medio de interacción, λ_{int} , en lugar de la sección eficaz de interacción, σ_{int} (generalmente sección eficaz inelástica, σ_{inel}). El camino libre medio, calcula la ubicación de las interacciones en la atmósfera o la cantidad de interacciones en promedio que experimenta una partícula cuando atravieza una cierta distancia en un medio (atmósfera). Las dos cantidades están relacionadas mediante la siguiente ecuación 3.10

$$\lambda_{int} = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} [gcm^{-2}] \quad (3.10)$$

Donde A es el número de masa del núcleo objetivo, N_A es el número de Avogadro y σ_{inel} es la sección eficaz inelástica en $[cm^{-2}]$. A continuación, en la Figura 3.10 se visualiza el comportamiento del camino libre medio de interacción para los núcleos energéticos desde el hidrógeno (protones) hasta el hierro (Fe^{56}) en el aire [1].

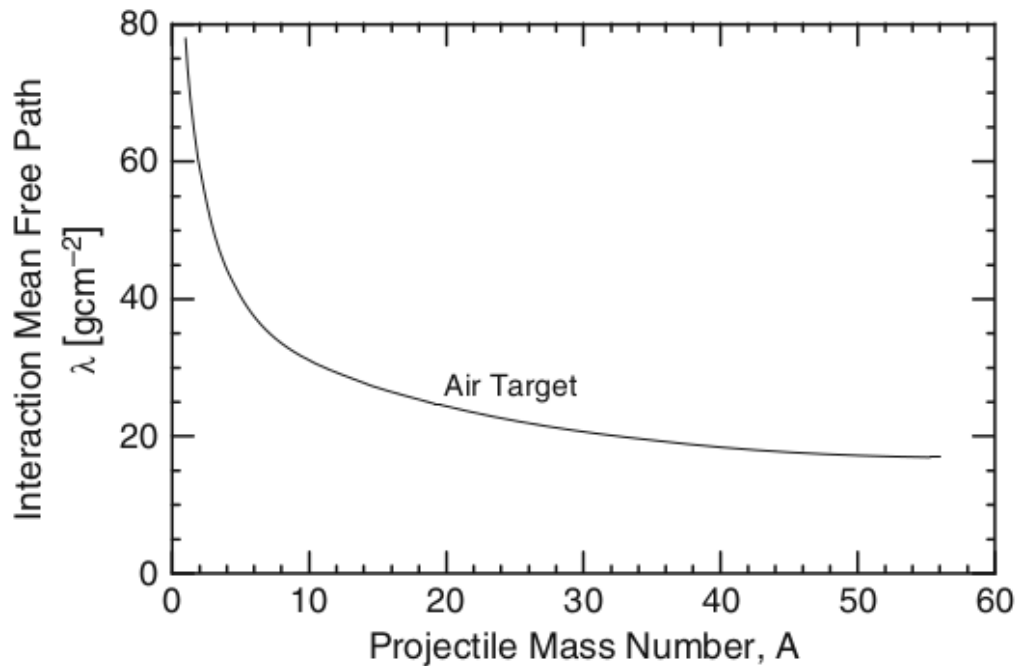


Figura 3.10: Camino libre medio de interacción de núcleo proyectil de alta energía en aire vs el número de masa del proyectil [1].

3.5. Física de las EASs

En general, una EAS se forma mediante la superposición de dos tipos diferentes de cascadas, una cascada hadrónica y una cascada electromagnética. Las cascadas hadrónicas, son la columna vertebral de una EAS y por lo tanto es el principal responsable del transporte de energía dentro de la EAS. Las cascadas electromagnéticas, las de muones y las de neutrinos, son productos secundarios de las EASs hadrónicas en la mayoría de los casos. Las cascadas electromagnéticas se generan por el impacto de primarios de rayos γ de alta energía, aunque tienen muy baja probabilidad de ocurrir [1].

A continuación, en la siguiente tabla 3.2 se observan los procesos físicos iniciados por fotones y electrones para la formación de cascadas electromagnéticas:

Procesos iniciados por fotones	Procesos iniciados por electrones
Dispersión de Rayleigh	Dispersión de Coulomb e inversa
Efecto fotoeléctrico	Ionización, Excitación, Proceso de Knock-on
Efecto Compton	Bremsstrahlung (Coulomb)
Producción de pares (Coulomb)	Radiación Cherenkov
Interacciones fotonucleares	Emisión de radio
Interacciones fotón-fotón	Radiación de transición y sincrotrónica
Producción de par magnético	Aniquilación de positrones

Tabla 3.2: Procesos físicos iniciados por fotones y electrones [1].

3.5.1. Procesos Relevantes en la formación de EAS

■ Bremsstrahlung por electrones

La principal pérdida de energía de un electrón es por bremsstrahlung. Según la teoría clásica de la radiación, una partícula en movimiento que tiene una unidad de carga eléctrica e , que pasa por un núcleo de carga Z a una distancia de aproximación definida (parámetro de impacto), d , ésta emite radiación cuya intensidad es proporcional a la ecuación 3.11:

$$\left(\frac{N_A Z^2}{A m^2} \right) E \quad (3.11)$$

Donde N_A es el número de Avogadro, A es el número de masa, m es la masa de la partícula y E la energía de la partícula [1].

■ Producción de pares de electrones

La producción de pares de electrones, se generan cuando la energía de un fotón excede el umbral de creación de pares de 1,052 MeV. La producción de pares, es el principal mecanismo de pérdida de energía de los fotones a energías superiores a la energía crítica [1].

■ Dispersión Coulomb de electrones

Este proceso es el dominante y es responsable de la propagación lateral de los electrones y, en consecuencia de los fotones, cuando se propaga en una columna de materia k . Esto se muestra en la siguiente ecuación 3.12:

$$k \approx \frac{N_A}{A} d^2 \quad (3.12)$$

Donde N_A es el número de Avogadro, A es el número de masa del medio, y d es el diámetro del centro de dispersión. Por lo tanto, en un medio denso hay aproximadamente 10^7 a 10^8 eventos de dispersión por $g \cdot cm^2$ [1].

■ Ionización y excitación por electrones

Todas las partículas cargadas están sujetas a pérdidas de energía por ionización mientras se propagan en un medio. El término ("pérdidas de ionización") incluye, además de la ionización de los átomos, también la excitación atómica y electrones de activación [1].

■ Efecto Compton

La dispersión de Compton y la absorción de Compton son relevantes a bajas energías, es decir, por debajo de la energía crítica, E_{crit} , donde se puede ignorar la creación de pares [1].

▪ Radiación Cherenkov y de Transición, Emisión de Fluorescencia

Son procesos electromagnéticos que aparecen como efectos en conjunto durante el paso de partículas cargadas y fotones a través de un medio refractivo. Éstos fenómenos se utilizan ampliamente como principios básicos en el diseño de detectores de partículas y para el análisis e interpretación de EASs [1].

3.6. Factores para la detección

La detección de astropartículas se toman en cuenta algunos factores relevantes:

1. La atmósfera terrestre es opaca a la radiación γ , de modo que en la alta atmósfera hay poca probabilidad de detección, por lo que se utiliza globos o satélites para detectar la radiación γ .
2. Se tiene una relación inversa entre los rayos γ y la energía, es decir, el flujo de rayos γ disminuye con el aumento de energía.
3. El estudio de los CRs es mediante detectores terrestres, debido a su bajo costo y tamaño [2].

3.7. Observables de las EASs

Una astropartícula que impacta en la atmósfera alta genera EASs que viajan en dirección al suelo. Las EASs tienen forma de disco delgado con una ligera curvatura, como se visualiza en la Figura 3.11. A medida que nos alejamos del centro del disco, disminuye exponencialmente la cantidad de partículas distribuidas a lo largo del plano perpendicular al eje de la EAS. La composición de las partículas secundarias en las EASs depende de los siguientes factores: partícula primaria, ángulo de incidencia zenith θ y etapa de desarrollo de la EAS (edad de la EAS, caracterizada por el parámetro de edad s). Se denominan EASs jóvenes, aquellas que no han alcanzado su máximo desarrollo observacional ($s < 1$) y EASs viejas aquellas que han superado su máximo desarrollo observacional ($s > 1$). Cuando $s = 1$ y $s = 2$, la EAS se ha extinguido en una sola partícula.

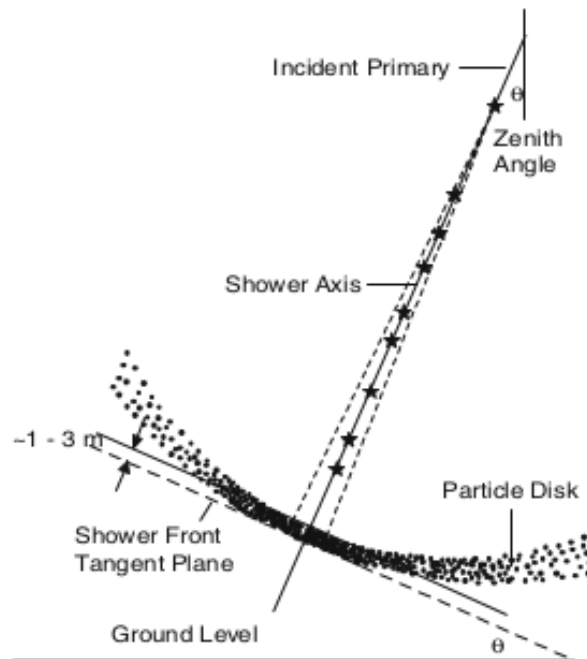


Figura 3.11: Perfil longitudinal de una EAS. Se muestra la curva de la EAS y el disco de partículas delgadas de una EAS inclinada cerca del impacto a nivel del suelo [1].

Una EAS promedio detectada a nivel del mar, está constituida por aproximadamente: 1 % hadrones, 10 % muones y alrededor de 90 % de electrones y positrones de energía relativamente baja [1].

Para la detección de estas partículas secundarias se usa el método de partículas simple, que se detalla a continuación.

3.7.1. Método de Partícula Simple

La forma más simple de analizar una EAS es mediante el método de partícula simple. Para implementarlo se realiza un experimento a nivel del suelo, el cual consta de un arreglo de detectores (WCDs), distribuidos en una superficie grande de manera homogénea. Una vez realizado lo anterior se realiza un conteo de todas las partículas secundarias que llegan al detector en un intervalo de tiempo, y a partir de éste, establecer la tasa de flujo base para el detector. De esta forma, se puede identificar eventos de gran energía, por ejemplo un GRB, puede ser identificado como un cambio en la tasa de flujo base del detector [26].

3.7.2. Área Efectiva

El área efectiva proporciona una medida de la eficiencia que tiene el detector, mediante la determinación de la fracción de eventos registrados por los PMTs. En este trabajo se obtendrá el área efectiva simulando un gran número de EASs, mediante el software CORSIKA. Por otro lado el área efectiva depende de las dimensiones del detector, la energía del primario, la altura en la que nos encontramos, el campo magnético y el ángulo de incidencia de los primarios .

Para el cálculo del área efectiva se tiene la siguiente ecuación 3.13:

$$A_{eff}(E, \theta) = A_{total} N_{PMT} \frac{N_{obs}(E, \theta)}{N_{total}(E, \theta)} \quad (3.13)$$

donde A_{total} es el área en donde se realizan los eventos simulados, N_{obs} es el número de EASs detectadas por uno de los PMTs, N_{total} es el número total de EASs simuladas y N_{PMT} es el número promedio de fotones detectados por los PMTs para una energía E y un ángulo cenital θ [24, 27, 28].

Capítulo 4

SOFTWARES DE SIMULACIÓN

En éste capítulo se muestra los parámetros de funcionamiento de los softwares CORSIKA y GEANT4 necesarios para las simulaciones de partículas de altas energías. El primer software, CORSIKA, tiene su sistema de unidades, sistema de coordenadas, modelo atmosférico y partículas con su respectivo número de identificación, todo esto permite las simulaciones de las EASs. Mientras que GEANT4 permite construir y simular detectores Cherenkov de agua mediante una serie de procesos que se describen a continuación.

4.1. CORSIKA

COsmic Ray Simulations for KAscade (CORSIKA) es un paquete computacional orientado a la física de altas energías que trabaja mediante el método Monte Carlo. CORSIKA realiza simulaciones de EASs provenientes de primarios como son: rayos γ , núcleos pesados y ligeros, protones, y otras partículas. CORSIKA trabaja con energías de entre $10^{11}eV$ a $10^{20}eV$ [21].

4.1.1. Unidades en CORSIKA

Las unidades que utiliza CORSIKA se visualiza en la siguiente Tabla 4.1:

Cantidad	Corsika
Longitud	cm
Energía	GeV
Masa	GeV
Tiempo	seg
Campo Magnético	μT
Densidad	g/cm^3
Masa Sobrecarga	g/cm^2
Ángulo	rad
Longitud de Onda	nm

Tabla 4.1: Unidades usadas en CORSIKA[16].

4.1.2. Sistema de Coordenadas

El sistema de coordenadas en CORSIKA, están definidas con respecto a las coordenadas cartesianas del sistema. El eje x positivo apunta al norte magnético, el eje y positivo al oeste y el eje z hacia arriba, y el origen se encuentra a nivel del mar. Esta definición es necesaria porque se toma en cuenta el campo magnético de la Tierra. El ángulo cenital θ se lo mide entre el vector momento de las partículas y el eje z negativo, y el ángulo azimut φ entre el eje x positivo y la componente horizontal del vector momento de las partículas (es decir, con respecto al Norte) en sentido anti-horario, la Figura 4.1 muestra el sistema coordenado [16].

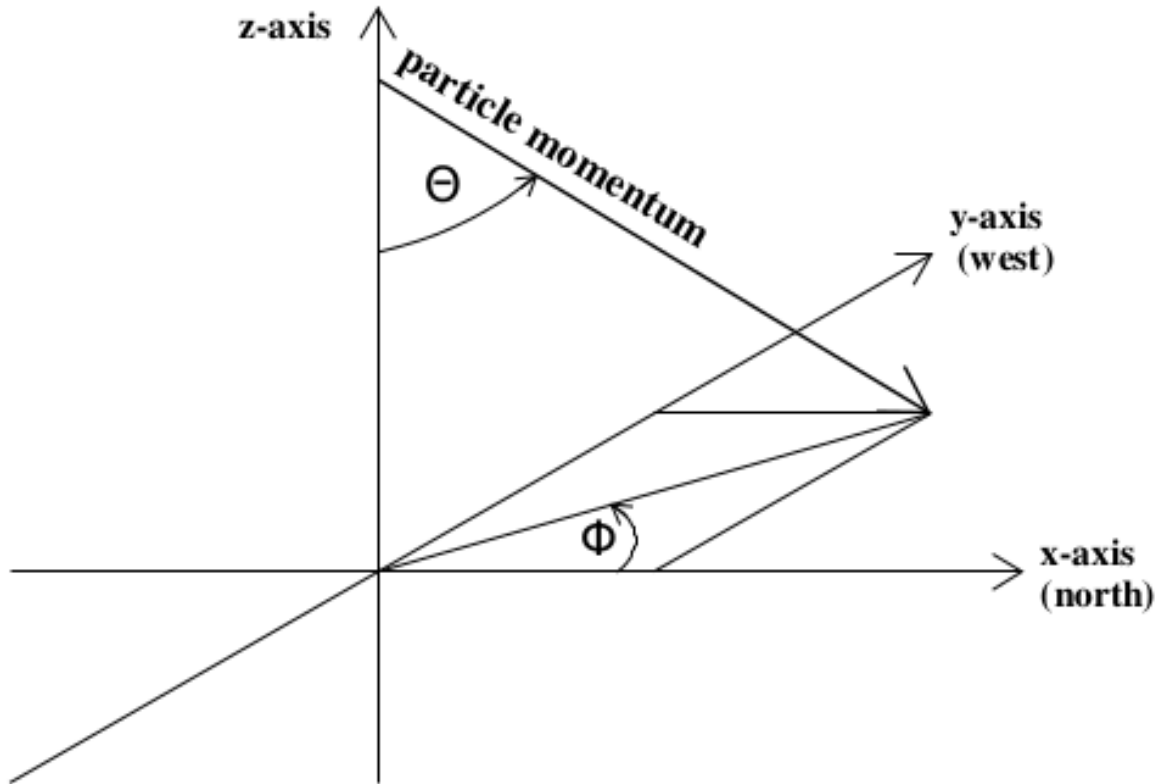


Figura 4.1: Sistema de coordenadas x, y, z en CORSIKA [16].

4.1.3. Modelo atmosférico

El modelo atmosférico usado consiste en N_2 , O_2 y Ar con fracciones de volumen del 78,1 %, 21,0 % y 0,9 %, respectivamente. La variación de la densidad atmosférica con la altura esta modelada por 5 capas. En las cuatro primeras capas, la densidad obedece una dependencia exponencial con la altura. Esto conlleva a una relación entre la presión $T(h)$ de la atmósfera y la altura según la siguiente ecuación 4.1:

$$T(h) = a_i + b_i e^{-h/c_i}, i = 1, \dots, 4, \quad (4.1)$$

donde, a_i , b_i y c_i son parámetros ajustables de tal manera que $T(h)$ es una función continua. En la quinta capa la variación de la densidad decrece linealmente con la altura, mediante la siguiente

ecuación 4.2:

$$T(h) = a_5 - b_5 \frac{h}{c_5} \quad (4.2)$$

Donde $T(h)$ se anula a una altura de 112,8 km [16].

En el presente trabajo se utilizó el modelo atmosférico estándar el cuál sus características se presentan en la siguiente Tabla 4.2.

Capa i	Altitud h [km]	$a_i[g/cm^2]$	$b_i[g/cm^2]$	$c_i[g/cm^2]$
1	0...4	-186.5562	1222.6562	994186.38
2	4...10	-94.919	1144.9069	878153.55
3	10...40	0.61289	1305.5948	636143.04
4	40...100	0.0	540.1778	772170.16
5	mayor a 100	0.01128292	1	10^9

Tabla 4.2: Modelo atmosférico estándar de Estados Unidos. Se visualiza las 5 capas, la altitud de cada una y los valores de ajuste (a_i, b_i, c_i) para la modelización de la variación de la densidad de la atmósfera [16].

4.1.4. Partículas implementadas en CORSIKA

Las partículas que simula CORSIKA se enlistan en la siguiente Tabla 4.3, donde cada una tiene su propio código para su respectiva identificación, éste código de identificación elegido está ligado a los códigos de simulación de GEANT4 [16].

Identificación	Partícula
1	γ
2	e^+
3	e^-
4	μ^+
5	μ^-
6	π^0
7	π^+
8	π^-

Tabla 4.3: Identificación de principales partículas utilizadas en CORSIKA [16].

4.2. GEANT4

GEometry ANd Tracking (GEANT4), es un paquete computacional orientado a la simulación de la interacción de partículas fundamentales con la materia. GEANT4 nos sirve para diferentes áreas de la ciencia como son: física nuclear, física de partículas, diseño de aceleradores, ingeniería espacial y física médica. GEANT4 trabaja mediante el método Monte Carlo debido a la naturaleza estocástica de sus procesos (colisiones o transporte de partículas y el rango de energía que trabaja

es de aproximadamente 250eV hasta algunos TeV) [17].

Para la realización de una simulación en GEANT4 se sigue el siguiente diagrama ilustrado en la Figura 4.2.

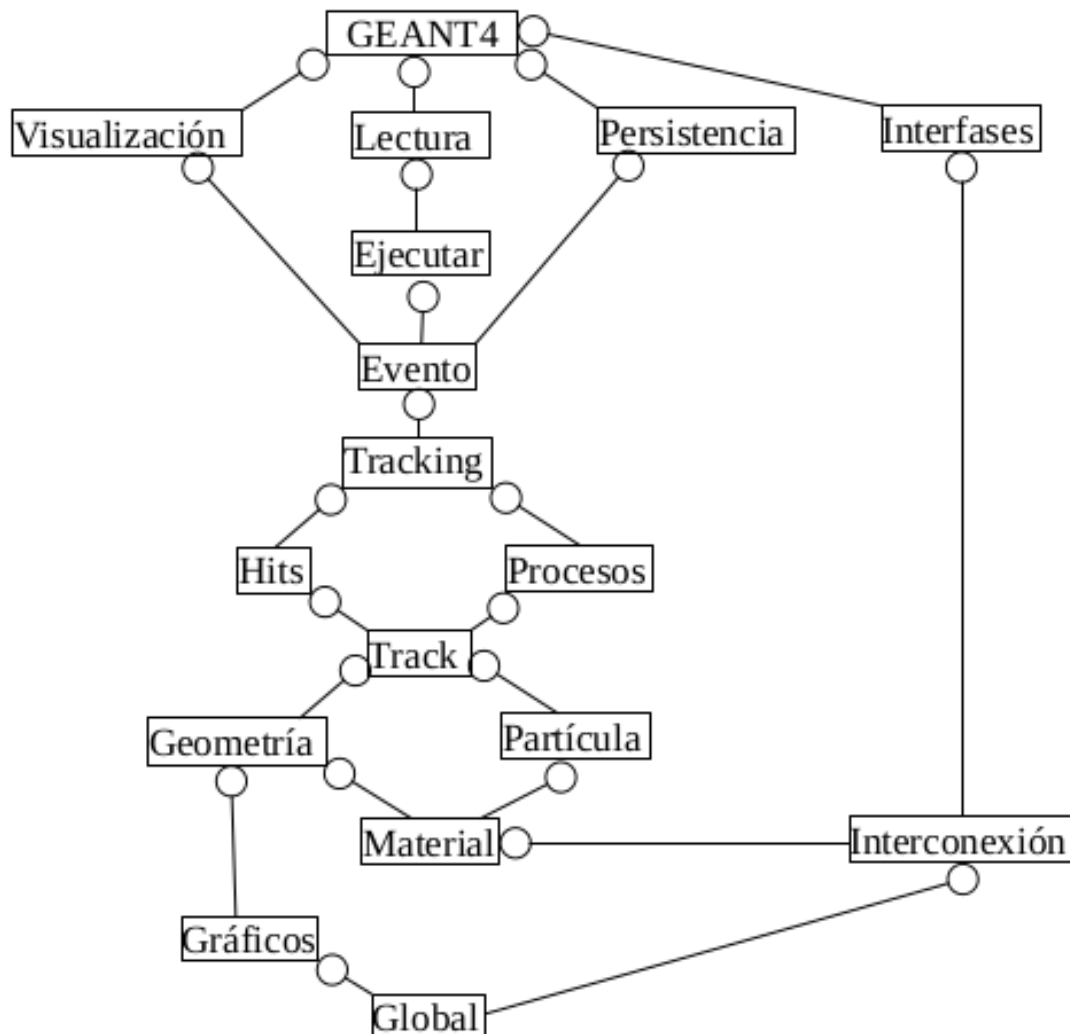


Figura 4.2: Diagrama de las categorías de clases diseñadas en GEANT4 [17].

A continuación, se describe las principales funciones utilizadas en este trabajo de las categorías de clases en GEANT4.

1. **Global:** Define las unidades del sistema, constantes físicas y generadores de números aleatorios.
2. **Materiales, partículas:** Implementan las clases necesarias para describir todas las propiedades físicas de las partículas y de los materiales.
3. **Geometría:** Provee las clases que describen la geometría del arreglo experimental a simular.

4. **Procesos:** Incluye modelos y datos para reproducir las interacciones electromagnéticas y hadrónicas, define el cambio de estado en una partícula en cada rastreo.
5. **Track:** Da la evolución del estado de cada partícula durante la transportación.
6. **Hits:** Incluye las clases para definir la sensibilidad en los volúmenes del detector así como de la categoría de rastreo.
7. **Eventos:** Se constituye de todas las partículas generadas por una interacción inicial.
8. **Run-Ejecutar:** Consiste en una secuencia de eventos que comparten el mismo generador primario de acción y arreglo geométrico.
9. **Visualización, lectura y interconexión:** Incluye la clase para consruir la interfaz [24].

GEANT4 incluye ejemplos de toda categoría los cuales se los puede modificar para el propósito deseado. Las principales modificaciones que se pueden realizar son las siguientes [17, 21]:

- Geometría del sistema a simular.
- Materiales involucrados.
- Partículas fundamentales.
- Generación de eventos primarios.
- Paso de partículas a través de un material y a través de campos electromagnéticos.
- Procesos físicos en interacciones.
- Respuesta de los componentes de un detector.
- Generación de datos de un evento.
- Almacenamiento de eventos y tracks.
- Visualización del detector y trayectorias de partículas .

Capítulo 5

SIMULACIONES

En el presente capítulo se detalla el proceso para realizar una simulación en el software CORSIKA. Por otro lado, se muestra los ejemplos que se modificaron para la realización del diseño y simulación del WCD en GEANT4. Finalmente, se menciona el script con el cual las EASs simuladas en CORSIKA se inyectan en el WCD diseñado en GEANT4. Las simulaciones se realizaron en los servidores de Modemat y Cedia.

5.1. Simulación en CORSIKA

Para la simulación de las EASs en CORSIKA, primero se descargó e instaló la versión *corsika* – 75600 (la instalación se detalla en el Anexo A.1). Posteriormente, se implementó como partículas primarias rayos γ y protones con energías de entre 1 a 10 TeV por medio del script **entradas.sh**, (el script se visualiza en el Anexo A.3). La simulación se ejecutó mediante la siguiente línea de comando en la terminal.

```
$ ./entradas.sh
```

Con el script anterior se simuló 100 eventos en formato binario, los cuales fueron comprimidos en formato *.bz2*, donde cada evento contiene 100 EASs. Primero, se simuló los rayos γ (con número de identificación 1) y luego los protones (con número de identificación 14). El ángulo cenital se lo colocó en el rango de $0^\circ - 0^\circ$, esto nos indica que los primarios inciden verticalmente en la atmósfera y ángulo azimut entre los rango $0^\circ - 360^\circ$. La altura de Quito se estableció en 2850 *m.s.n.m.* El campo magnético de Quito que se consideró es de aproximadamente 26.835 μT , en la dirección horizontal del campo magnético de la tierra y 10.499 μT en la dirección vertical del campo magnético de la tierra. Los demás parámetros se los dejó por defecto.

El archivo de salida de **entradas.sh**, es un archivo binario con nombre DAT0000N.bz2, donde N es el número de eventos simulados, en nuestro caso en particular N=100, por lo que se tendrá 100 archivos binarios de la forma DAT00001.bz2, DAT00002.bz2, ..., DAT00100.bz2. Para usar la información de los archivos binarios se implementa el ejecutable **procesa.sh** mediante la siguiente línea de comando en la terminal, (el script se visualiza en el Anexo A.4).

```
$ ./procesa.sh
```

El ejecutable **procesa.sh** descomprime los binarios *.bz2* y los guarda en una carpeta llamada *binarios*, donde se crean 100 carpetas con el nombre *datn* (con $n=1, \dots, 100$), es decir *dat1*, *dat2*

y así sucesivamente. Cada una de éstas carpetas contiene 100 archivos de nombre *yan.dat* (con $n=1, \dots, 100$), es decir *ya1.dat*, *ya2.dat* y así sucesivamente. En su interior se visualiza si existió o no generación de EASs.

De forma más detallada, para utilizar la información de los binarios descomprimidos, se utiliza una herramienta de CORSIKA llamada *corsikaread* (la creación del ejecutable *corsikaread* se visualiza en el Anexo A.2), el cual es un ejecutable que nos sirve para transformar los binarios a fort.7. El archivo fort.7 contiene toda la información de los EASs en desorden, para ordenar la información de las EASs de fort.7 se implementa el ejecutable **prog-QUITO.cpp** (el script de **prog-QUITO.cpp** se visualiza en el Anexo A.5). El resultado de la información separada y ordenada es *yan.dat* archivos individuales en su respectiva carpeta *datn* (con $n=1, \dots, 100$).

A continuación, en la Tabla 5.1 se presenta la configuración de *yan.dat*.

1 ^{ra} línea	Area	Energía del Primario	Ángulo θ	Ángulo ϕ	Posición co- re x [cm]	Posición co- re y [cm]	0	0
2 ^{da} línea	ID de la partícula	Momento en x [GeV]	Momento en y [GeV]	Momento en z [GeV]	Posición en la coordena- da x [cm]	Posición en la coordena- da y [cm]	tiempo des- de la pri- mera inter- acción [ns]	Energía de la partícula en [GeV]

Tabla 5.1: Estructura de los archivos *yan.dat*, se visualiza la primera y segunda línea.

Para que las EASs (*yan.dat*) simuladas en CORSIKA se inyecten y comience la simulación en GEANT4, se ejecuta el script **seleccion.sh** mediante la siguiente línea de comando en la terminal, (el script de **seleccion.sh** se visualiza en el Anexo A.6).

```
$. /seleccion.sh
```

El script **seleccion.sh**, ejecuta GEANT4 con las EASs (*yan.dat*) simuladas en **entradas.sh**, va seleccionando una por una. Las que generaron secundarios corre GEANT4 con el ejecutable **./Op-Novice** y las que no generaron secundarios corre el ejecutable **./noprocasa** (el script **noprocasa** se visualiza en el Anexo A.7). Todos los archivos de salida de **seleccion.sh** se guardan en una carpeta llamada *d*. En el interior de la carpeta *d* se crean 100 archivos llamados *daton.dat* (la configuración de los archivos *daton.dat* se muestran en la siguiente Tabla 5.2).

Area	Energía del Pri- mario	Ángulo θ	Ángulo ϕ	Posición del core x [cm]	Posición del core y [cm]	0	0	Código PMT	Radio PMT [cm]
------	---------------------------	-----------------	---------------	-----------------------------	-----------------------------	---	---	---------------	-------------------

Tabla 5.2: Estructura de los archivos *daton.dat*, se muestra la primera línea

Finalmente, de los 100 archivos *daton.dat* nos interesa la información del lugar de impacto de los secundarios en el interior del tanque, detección de fotones Cherenkov y reflejos por los dos PTMs, área y energía del primario.

5.2. Simulación en GEANT4

Para la simulación del WCD en GEANT4, primero se descargó la versión geant4.10.0.0p04 de la página oficial <https://geant4-data.web.cern.ch/geant4-data/releases/geant4.10.00.p04.tar.gz>, posteriormente se realizó la instalación. En el Anexo B.1 se describe detalladamente el procedimiento utilizado para la instalación.

Instalado GEANT4 se modificaron las librerías de dos ejemplos ubicados en la carpeta *optical* de GEANT4.

1. LXe
2. OpNovice

Cada uno de ellos tiene su propia función:

LXe

Configura el detector en multiusos:

- Proceso de centelleo dentro de un material centellador con PMTs
- Gran número de PMTs para la obtención del cono de luz Cherenkov.
- Centellador de plástico con longitud de onda variable.

OpNovice

- Simulación de generación y transporte de fotones ópticos.
- Define superficies ópticas y proporciona procesos de física óptica (Cherenkov, centelleo, absorción, Rayleigh, etc).
- Mecanismo para contar las partículas secundarias generadas.

5.2.1. Definición de Geometrías en GEANT4

Para la geometría y características del detector, se usó el ejemplo **OpNovice**, en su interior se modificó el script **OpNoviceDetectorConstruction.cc** (el script se visualiza en el Anexo B.2), en donde se modificó los siguientes parámetros: dimensiones del espacio mundo, dimensiones del detector, posición del detector, posición de los PMTs, elementos utilizados en la composición de la construcción, reflexión interna con el material tyvek, dieléctrico el agua y efecto Cherenkov. A continuación se describe cada uno de ellos.

1. **Espacio Mundo:** Para la realización de una simulación en GEANT4, primero se debe definir un espacio en donde se va a realizar todas las simulaciones. Éste espacio se llama espacio mundo ó espacio de Hall, el cuál sera más grande que las simulaciones que se vayan a realizar.

2. **Definición del tanque:** Para construir el tanque de 1000 litros, se modificó las dimensiones en las coordenadas x , y y z del tanque. Como se consideró un cilindro se tiene que la base de un cilindro está definida por las coordenadas x e y las cuales son el diámetro del cilindro y la altura está definida por el eje z . Además, se ubicó al tanque en el centro del espacio de mundo (en el punto $(0, 0)$).
3. **Definición del tamaño de los PTMs:** Se construyó PTMs en forma de casquetes esféricos de radio 10 cm.
4. **Definición del grosor del Tyvek y del Aluminio:** Se definió el grosor del material tyvek que va a ser utilizado en el interior del WCD (tyvek es un material altamente reflectante). Y se definió el grosor del Aluminio el cual va a recubrir el exterior del WCD.
5. **Definición de Materiales:** Se definió los elementos necesarios que van a ser usados en la composición de los materiales del WCD (aluminio, vacío, agua, nitrógeno, oxígeno, carbono).
6. **Definición Tanque de Agua:** Se construyó un tanque lleno de agua adentro del WCD. Se usa el agua debido a que es un dieléctrico y por ende va generar el efecto Cherenkov.
7. **Definición del cilindro de Tyvek:** Para que exista reflexión interna se construye y se cubre internamente de tyvek.
8. **Definición de la Tapa y base del Cilindro:** Se construyó la tapa y base del cilindro hecha de tyvek para tener una mayor reflectividad interna.
9. **Definición del cilindro de Aluminio:** Se construyó un cilindro de Aluminio que cubre al detector con el grosor ya definido anteriormente.

Todas las modificaciones echas anteriormente se pueden visualizar en el anexo B.2.

5.2.2. Tanque Diseñado

El tanque diseñado tiene la forma de un cilindro de 1000 litros de capacidad, consta de un cilindro exterior recubierto exteriormente de aluminio y un cilindro interior recubierto interiormente de tyvek. Además, en su interior se introdujo agua para que sirva como medio dieléctrico. De igual manera la tapa y base se las simuló de Aluminio exteriormente y tyvek interiormente. Finalmente, se colocaron los PMTs en la tapa y base. Se visualiza el diseño y dimensiones del tanque en la Figura 5.1.

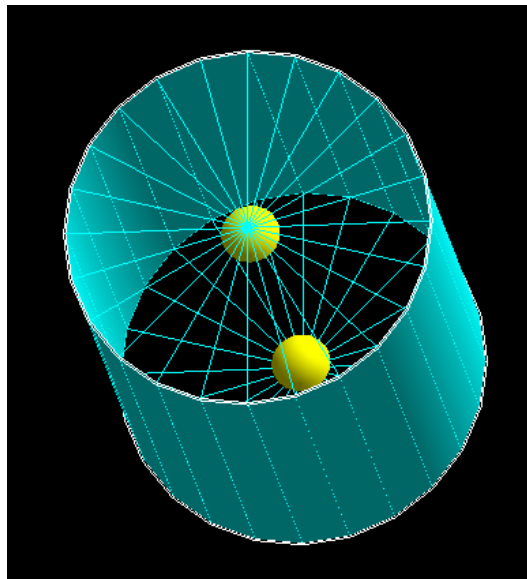
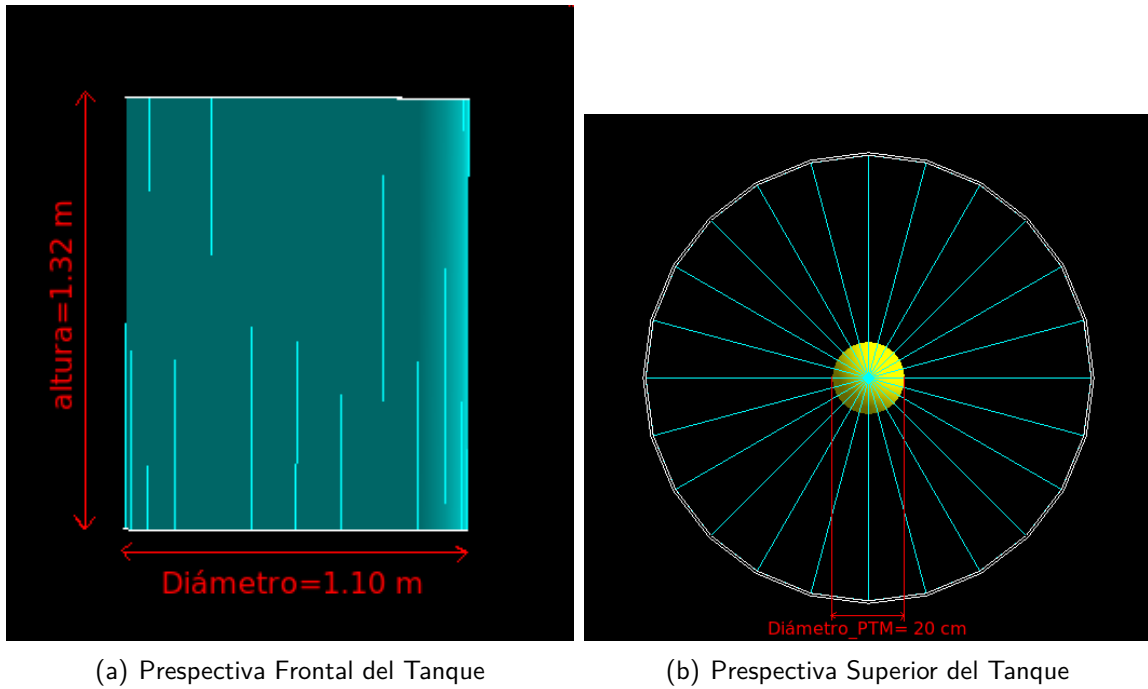


Figura 5.1: Diseño del tanque Cherenkov de agua de 1000 litros en GEANT4

5.3. Conexión CORSIKA - GEANT4

Para la conexión de los secundarios generados por CORSIKA y el detector realizado en GEANT4, se implementó el script llamado **LXePMTSD.cc** (el script se visualiza en el Anexo B.3). Éste script utiliza los secundarios inyectándolos en GEANT4 para que la simulación comience y retorna la carpeta *datn* que en su interior contiene la información las detecciones y no detecciones de los secundarios que impactaron a nivel del suelo, los cuales se utilizaron para calcular el área efectiva.

Capítulo 6

RESULTADOS

En el presente capítulo, se muestra los resultados obtenidos por CORSIKA y GEANT4. En CORSIKA, se visualiza histogramas, distribución en el espacio y distribución energética de partículas secundarias. En GEANT4, se visualiza los secundarios que impactan en el tanque, densidad de fotones Cherenkov y el área efectiva en función de la energía de rayos γ y protones de 1 a 10 $[TeV]$.

6.1. Resultados Obtenidos por CORSIKA

Para la simulación en CORSIKA, se utilizó los parámetros utilizados en el capítulo 5 del script *entradas.sh*. Los resultados obtenidos para rayos γ y protones se muestran a continuación :

6.1.1. Primario Gamma

En la simulación de primarios γ los procesos que predominan son: Dispersión de Rayleigh, Efecto Fotoeléctrico y Compton, Producción de Pares, Interacción foto-nuclear y fotón-fotón [21]. En la siguiente Tabla 6.1 se observa el tipo y cantidad de partículas secundarias de una EAS generadas de un primario gamma de 1 a 10 $[TeV]$ (1000-10000 $[GeV]$).

Partículas	1000 GeV	2000 $[GeV]$	3000 $[GeV]$	4000 $[GeV]$	5000 $[GeV]$	6000 $[GeV]$	7000 $[GeV]$	8000 $[GeV]$	9000 $[GeV]$	10000 $[GeV]$
γ	123849	323876	534337	814305	1052903	1237620	1593507	2053257	2164614	2643698
e^+	3944	11111	18177	28324	37125	43002	57582	75221	77617	98209
e^-	7832	21304	34996	54635	70414	82287	108107	140693	145655	183096
μ^+	9	29	46	117	144	143	174	215	215	309
μ^-	12	26	55	93	150	166	151	213	213	286

Tabla 6.1: Tipo y cantidad de partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ de 1000 – 10000 $[GeV]$ de energía.

A continuación, en la Figura 6.1 se visualiza la Tabla 6.1 en forma de histograma.

Rayos Gamma de 1000 - 10000 GeV

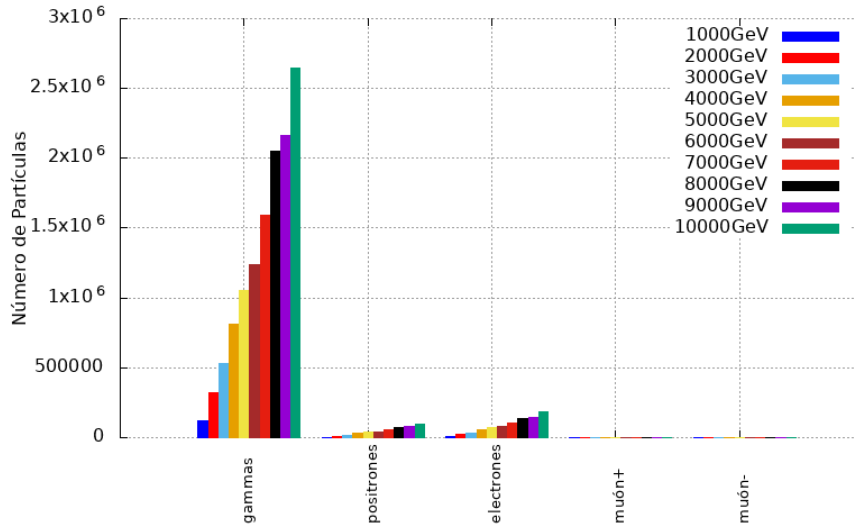
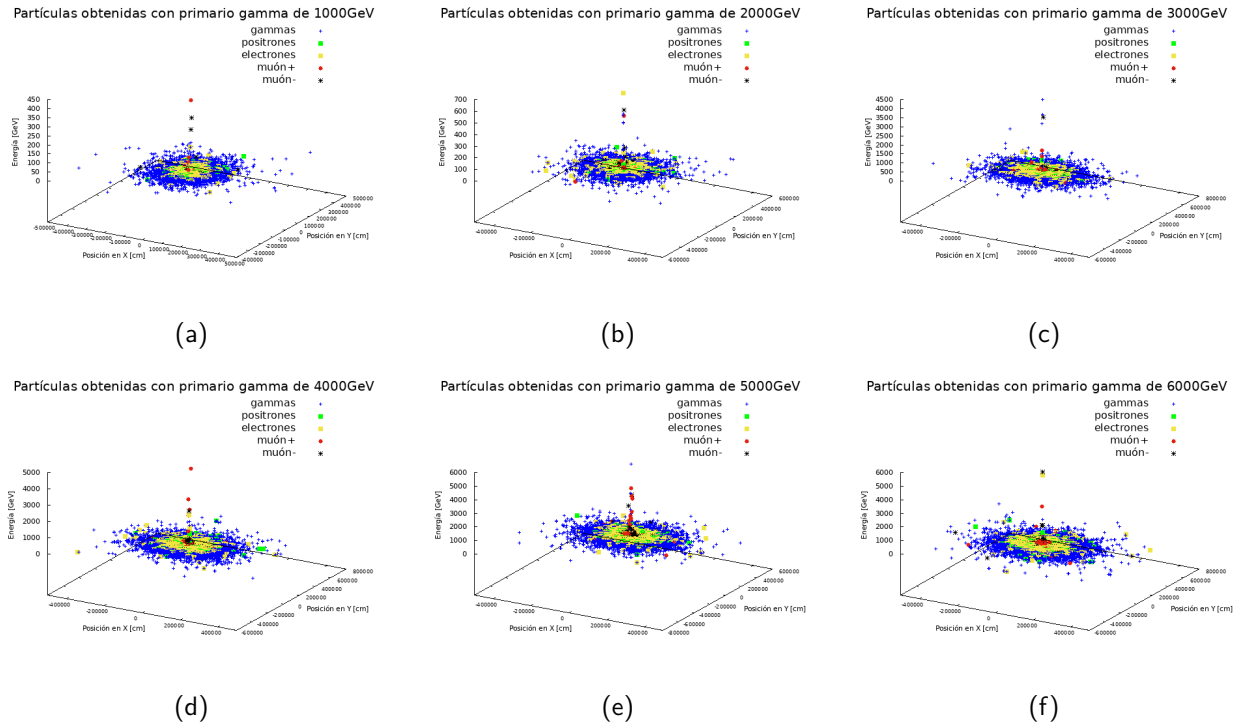
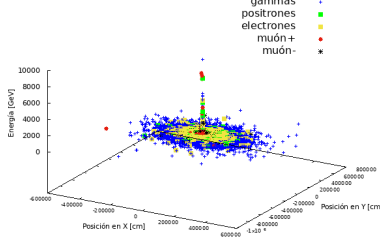


Figura 6.1: Histograma de las partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ de $1 - 10 [TeV] (1000 - 10000 [GeV])$

A continuación, en la Figura 6.2 se observa la distribución en el plano (x, y) de partículas secundarias, de una EAS generada por un primario γ de $1 - 10 [TeV] (1000 - 10000 [GeV])$ que llegan a nivel del suelo en función de su energía de arribo.

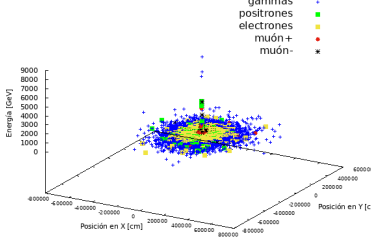


Partículas obtenidas con primario gamma de 7000GeV



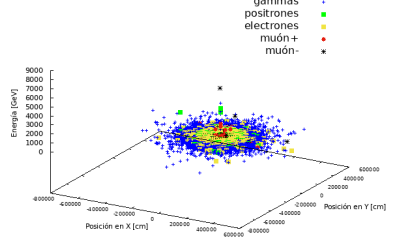
(g)

Partículas obtenidas con primario gamma de 8000GeV



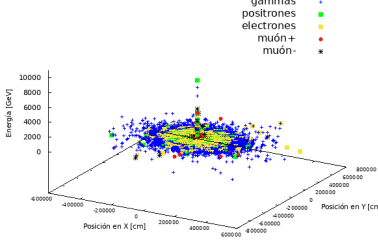
(h)

Partículas obtenidas con primario gamma de 9000GeV



(i)

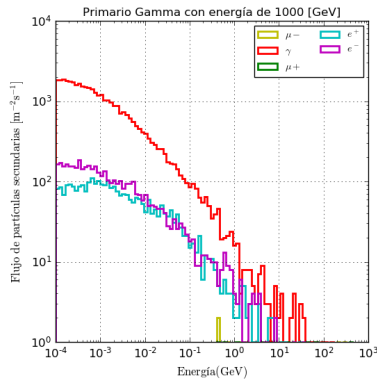
Partículas obtenidas con primario gamma de 10000GeV



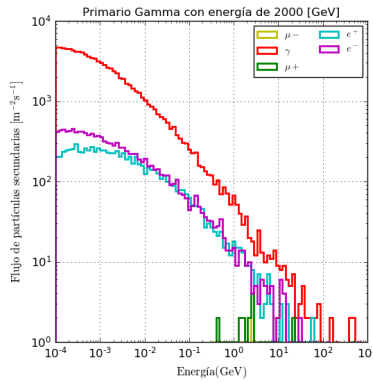
(j)

Figura 6.2: Posición en las coordenadas $x[cm]$ e $y[cm]$ en función de la energía [GeV] a la que alcanzan el suelo las partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV].

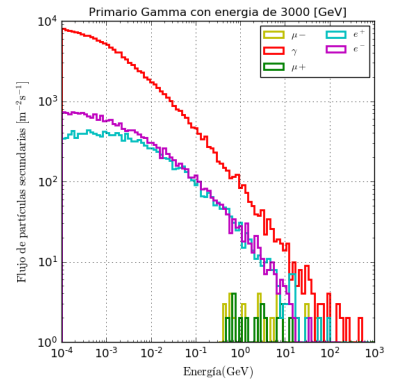
Finalmente, en la Figura 6.3 de las 100 EASs simuladas se escogió una de ellas para una mejor visualización de la distribución energética de las partículas secundarias, generadas por un γ que inciden verticalmente en el suelo con energía de entre $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$.



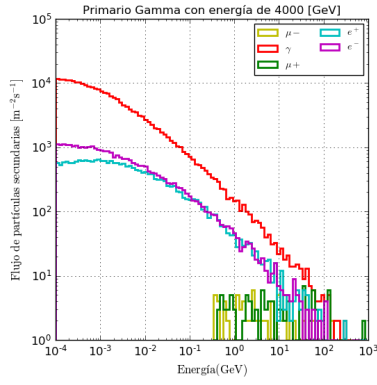
(a)



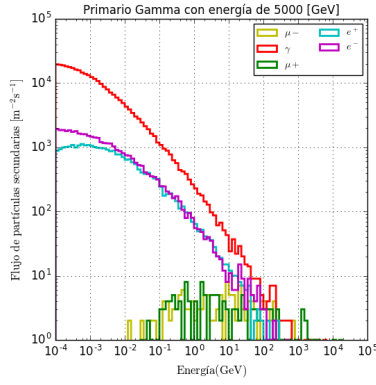
(b)



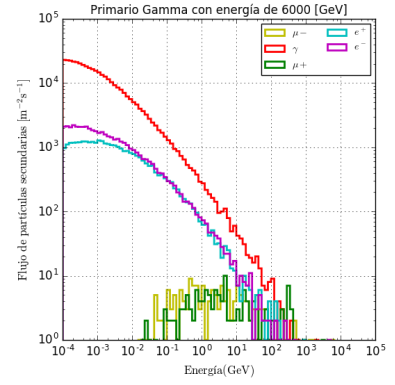
(c)



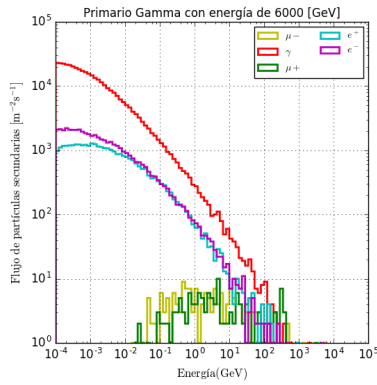
(d)



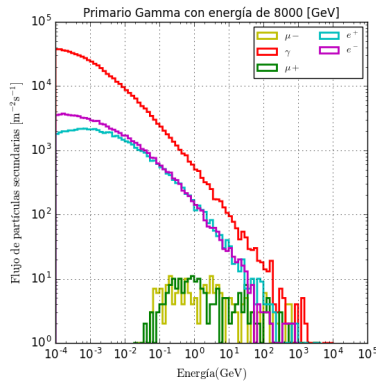
(e)



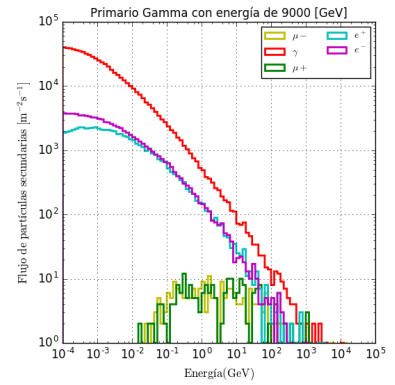
(f)



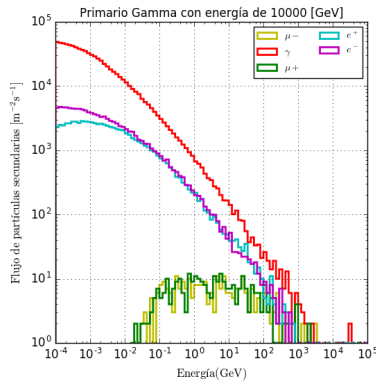
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.3: Distribución energética de las partículas secundarias de una EAS generadas por un primario γ que incide verticalmente de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV].

6.1.2. Primario Protón

En la simulación de primarios protones los procesos que predominan son: Dispersión Coulomb, Bremsstrahlung, Radiación Cherenkov, Radiación Sincrotrón, Efecto Compton inverso y Aniquila-

ción positrón [21]. En la siguiente Tabla 6.2 se observa el tipo y cantidad de partículas secundarias de una EAS generadas por un primario protón de $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$.

Partículas	1000 [GeV]	2000 [GeV]	3000 [GeV]	4000 [GeV]	5000 [GeV]	6000 [GeV]	7000 [GeV]	8000 [GeV]	9000 [GeV]	10000 [GeV]
γ	66507	169115	284477	490941	665468	700923	926683	1136375	1220038	1403749
e^+	2510	6648	10876	20209	26821	26934	36384	45517	47589	55545
e^-	4603	12016	19886	36587	48230	49638	66184	83124	87018	101135
μ^+	1350	2492	3306	4355	5339	5844	6886	8202	8478	9305
μ^-	1319	2428	3217	4230	5049	5801	6663	7891	8259	9062

Tabla 6.2: Tipo y número de partículas secundarias de una EAS generadas por un protón primario de energía de $1000 - 10000[GeV]$

A continuación, se visualiza la Figura 6.4 que representa el histograma de la Tabla 6.2:

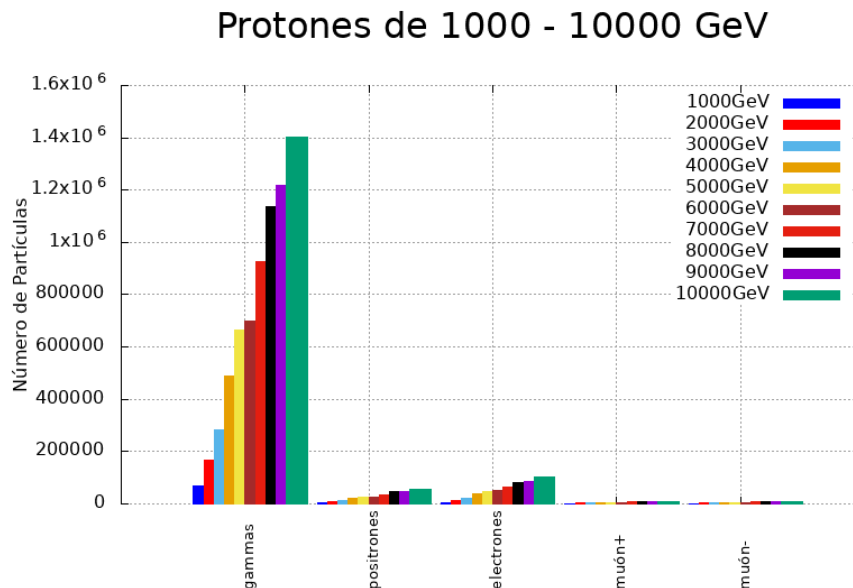


Figura 6.4: Histograma de las partículas secundarias de una EAS generadas por un protón como primario de $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$

A continuación, en la Figura 6.5 se observa la distribución en el plano (x, y) de partículas secundarias de una EAS generada por un protón como primario de energía de entre $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$ que llegan a nivel del suelo en función de su energía de arribo.

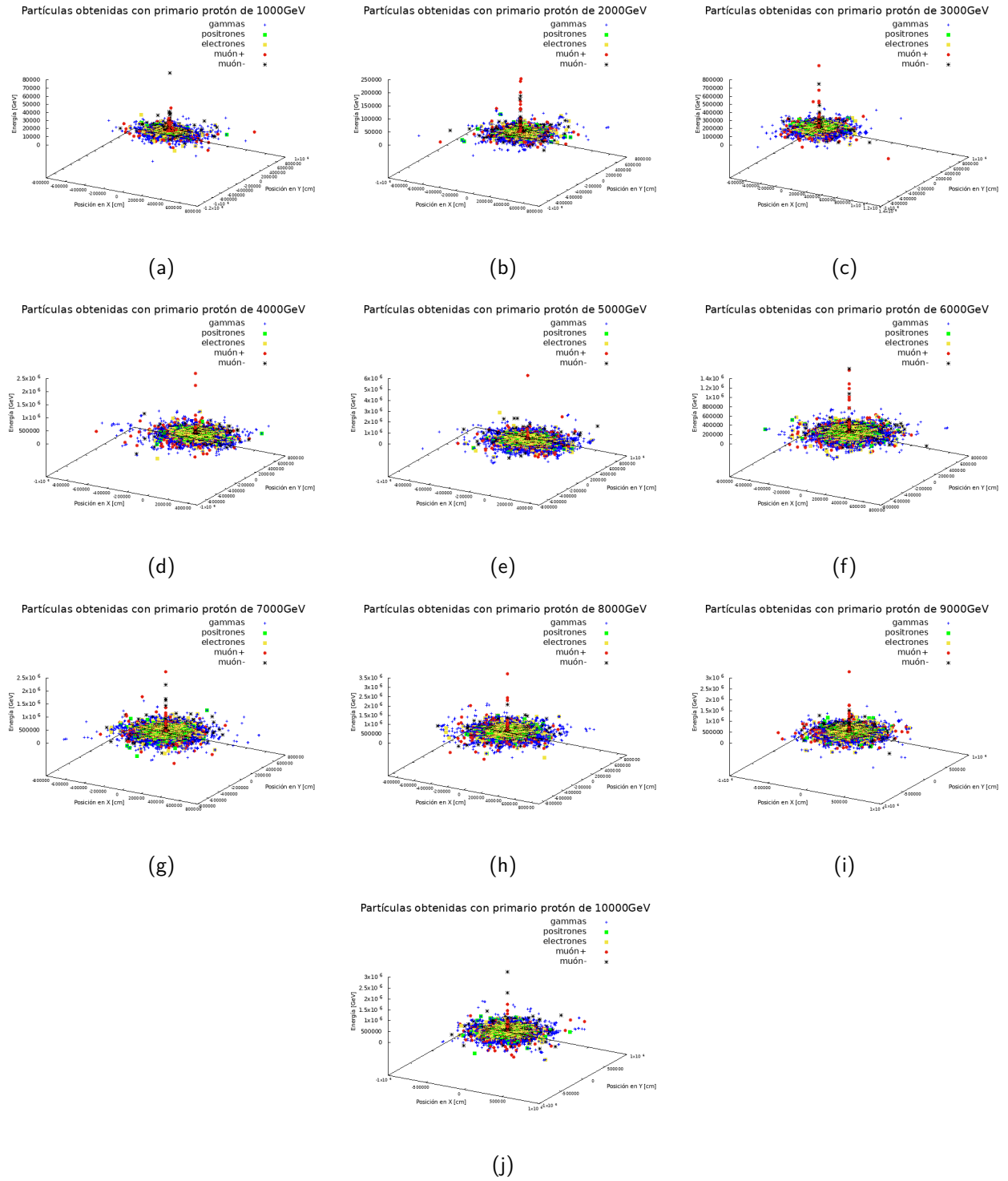
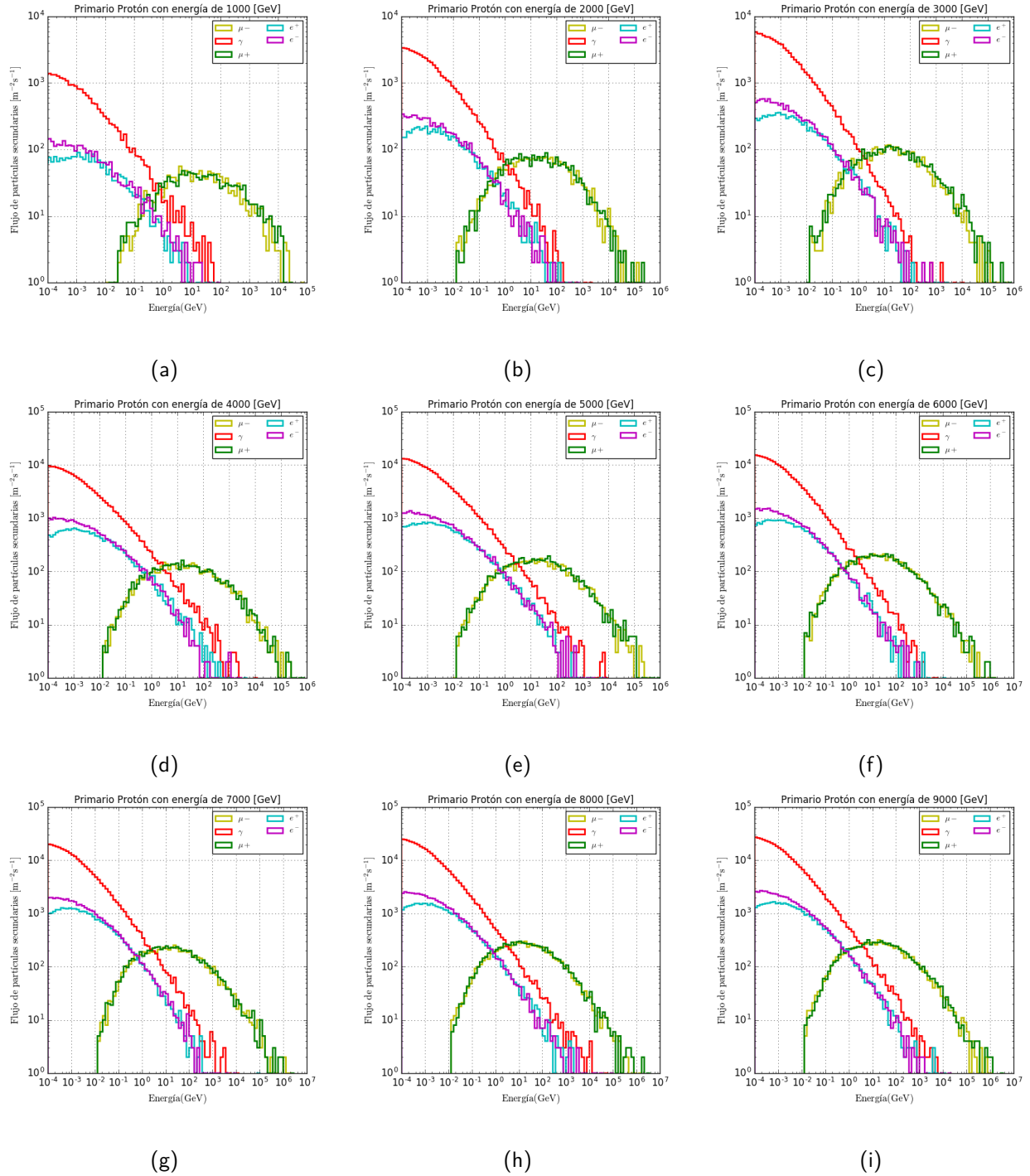
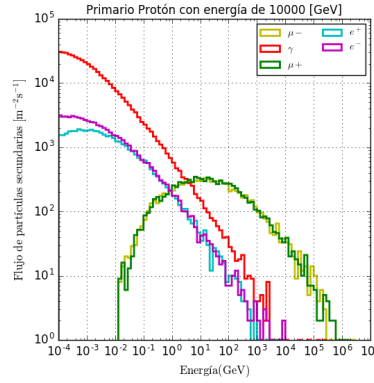


Figura 6.5: Posición en las coordenadas $x[cm]$ e $y[cm]$ en función de la energía [GeV] a la que alcanzan el suelo las partículas secundarias de una EAS generadas por un protón de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV].

Finalmente, en la Figura 6.6 de las 100 EASs simuladas se escogió una de ellas para una mejor visualización de la distribución energética de las partículas secundarias, generadas por un protón que incide verticalmente en el suelo con energía de entre $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$.





(j)

Figura 6.6: Distribución energética de las partículas secundarias de una EAS generadas por un protón como primario que incide verticalmente de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV].

6.2. Resultados Obtenidos por GEANT4

Se simularon 100 primario de rayos γ y protones, cada uno de ellos generó 100 EASs de $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$ de energía. Las partículas secundarias generadas por interacciones hadrónicas, muónicas y electromagnéticas se inyectaron en el espacio mundo simulado en GEANT4.

Una pequeña cantidad de partículas secundarias incidieron en el área del tanque diseñado, generando fotones Cherenkov los cuales fueron registrados por los dos PMTs, y las partículas que no impactaron en el tanque se las descarta. Finalmente, para la determinación del área efectiva en función de la energía se utilizó la ecuación 3.13 y se realizó un Fit Gaussiano para conocer su eficiencia.

6.2.1. Datos Obtenidos por el Tanque

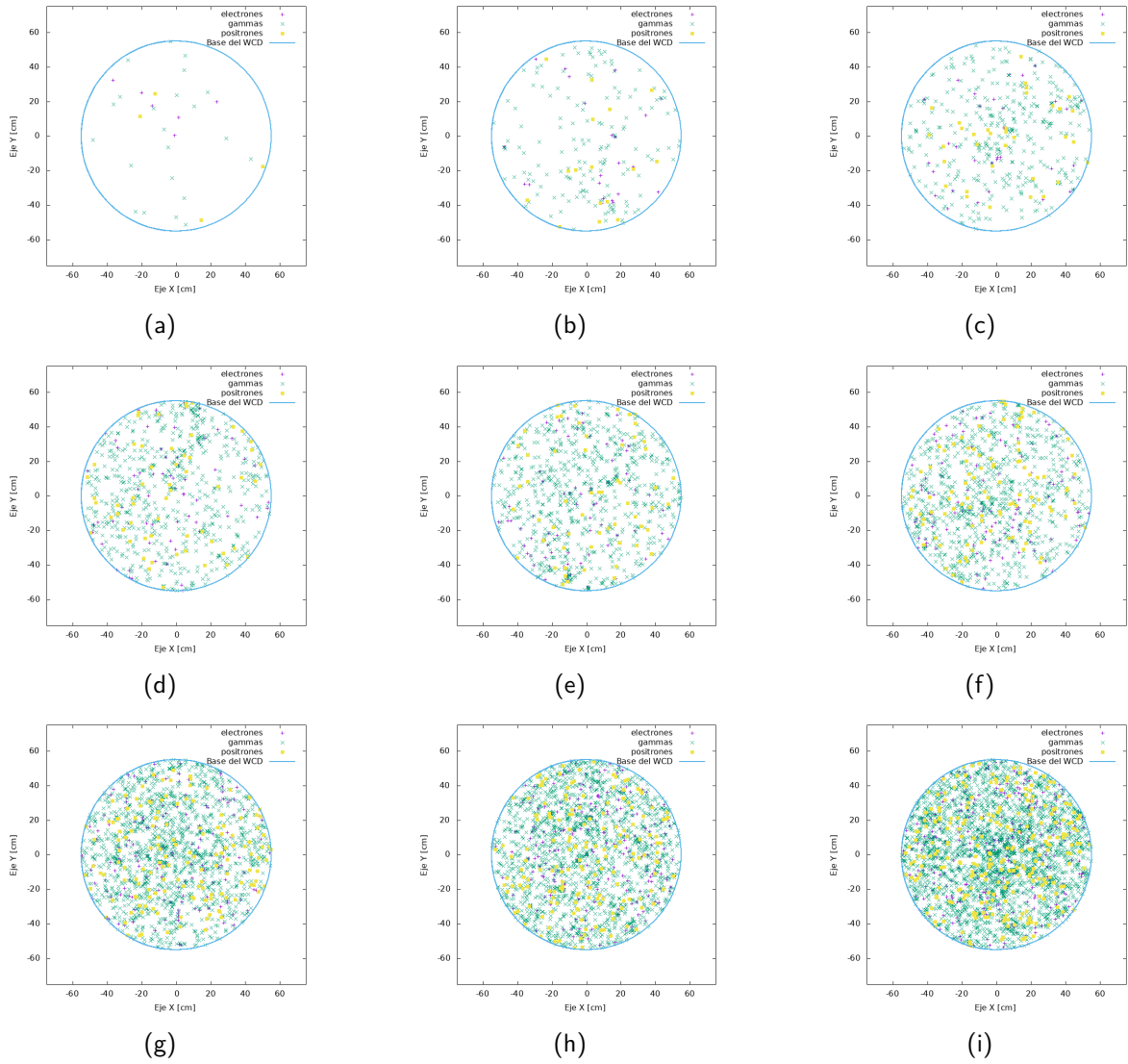
Las partículas secundarias generadas por una EAS de rayos gamma y protones de $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$ se analizan en las siguiente Tabla 6.3 y Tabla 6.4 :

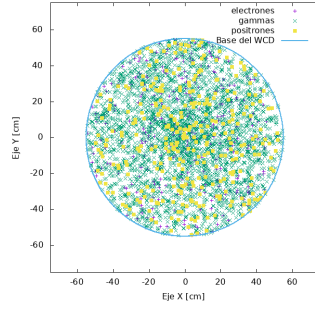
Incidencia de Primario Gamma

Secundarios	1000 [GeV]	2000 [GeV]	3000 [GeV]	4000 [GeV]	5000 [GeV]	6000 [GeV]	7000 [GeV]	8000 [GeV]	9000 [GeV]	10000 [GeV]
γ	23	161	384	659	765	969	1529	1801	2816	3668
e^+	4	16	34	57	58	101	143	170	257	324
e^-	6	22	32	70	75	102	159	200	307	379
$\mu^{+/-}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6.3: Cantidad de partículas secundarias detectadas por el WCD de una EAS generadas por un primario γ de $1000[GeV] - 10000[GeV]$ de energía.

A continuación, en la Figura 6.7 se observa la distribución de secundarios generados por un primario γ de energía de entre $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$, que impactan en el interior del WCD simulado.

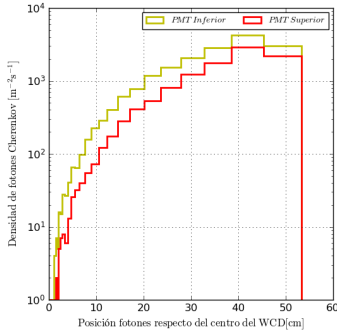




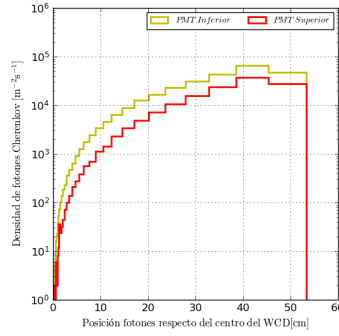
(j)

Figura 6.7: Distribución de una EAS generada por un primario γ : (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV], en un área de $\pi \times 0,55^2 [m^2]$. El círculo de color celeste representa la base del detector. Las cruces representa los e^- , las x representa los γ y cuadrados representa los e^+ .

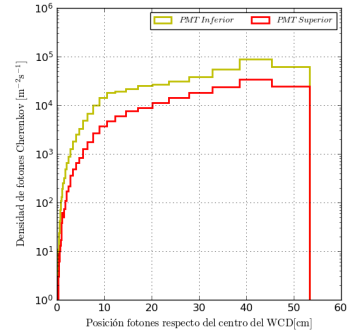
Finalmente, en la Figura 6.8 se visualiza la densidad de fotones Cherenkov(y reflejos) que se generaron y fueron detectados en el interior del WCD por los dos PMTs en función de la distancia de impacto, generados por una EAS de 1 a 10 [TeV]. La distancia de impacto es medida respecto del centro del WCD hasta el radio del detector(radio=0,55 [m]).



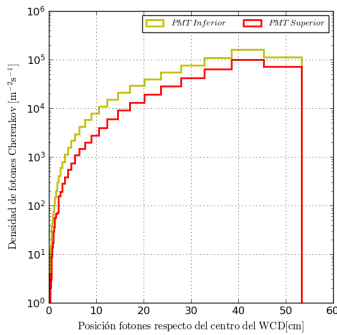
(a)



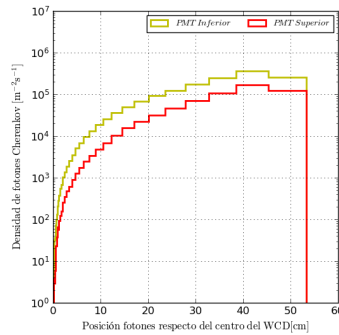
(b)



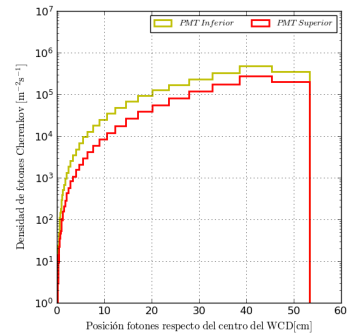
(c)



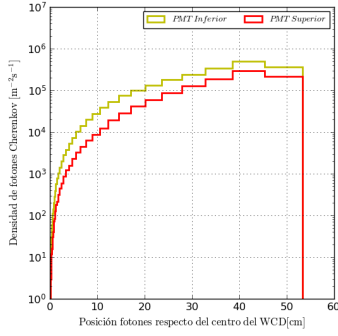
(d)



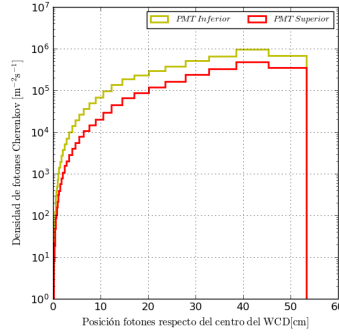
(e)



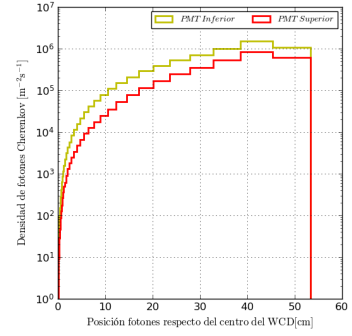
(f)



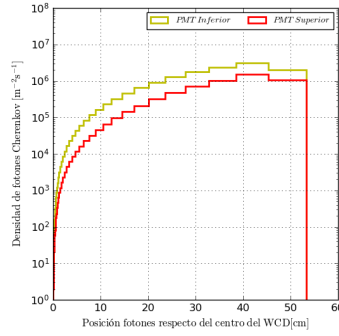
(g)



(h)



(i)



(j)

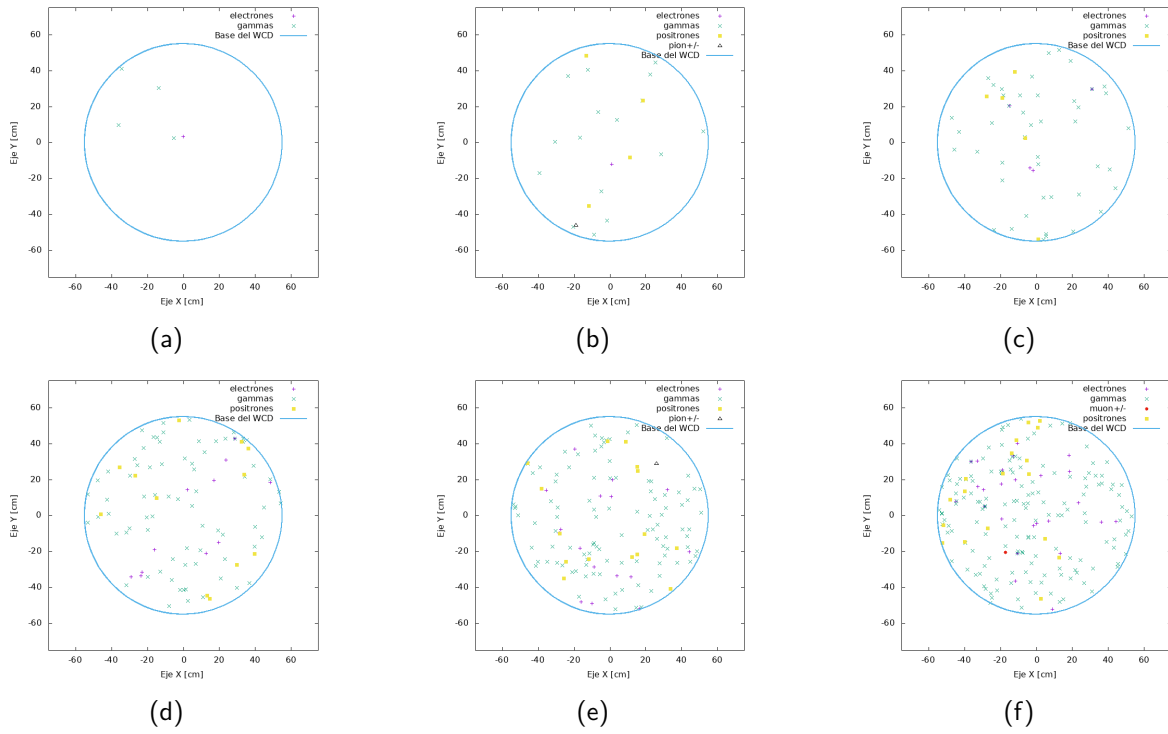
Figura 6.8: Densidad de fotones Cherenkov (y reflejos) detectados (en el eje y) que fueron generados por una EAS de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV], en función de la distancia radial medida desde el centro del WCD, $\text{radioWCD}=0,55$ [m] (en el eje x). Se observa en color amarillo detecciones del PMT inferior y en color rojo detecciones del PMT superior.

Incidencia de Primario Protón

Secundarios	1000 [GeV]	2000 [GeV]	3000 [GeV]	4000 [GeV]	5000 [GeV]	6000 [GeV]	7000 [GeV]	8000 [GeV]	9000 [GeV]	10000 [GeV]
γ	4	17	45	75	104	156	253	322	381	491
e^+	0	4	5	12	15	18	26	41	45	37
e^-	1	1	4	11	17	25	24	41	49	63
$\mu^{+/-}$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
$\pi^{+/-}$	0	1	0	0	1	0	1	0	0	2

Tabla 6.4: Cantidad de partículas secundarias detectadas por el WCD de una EAS generadas por un primario protón de $1000[GeV] - 10000[GeV]$ de energía.

A continuación, en la Figura 6.9 se observa la distribución de secundarios generados por un primario protón de energía de entre $1 - 10[TeV](1000 - 10000[GeV])$, que impactan en el interior del WCD simulado.



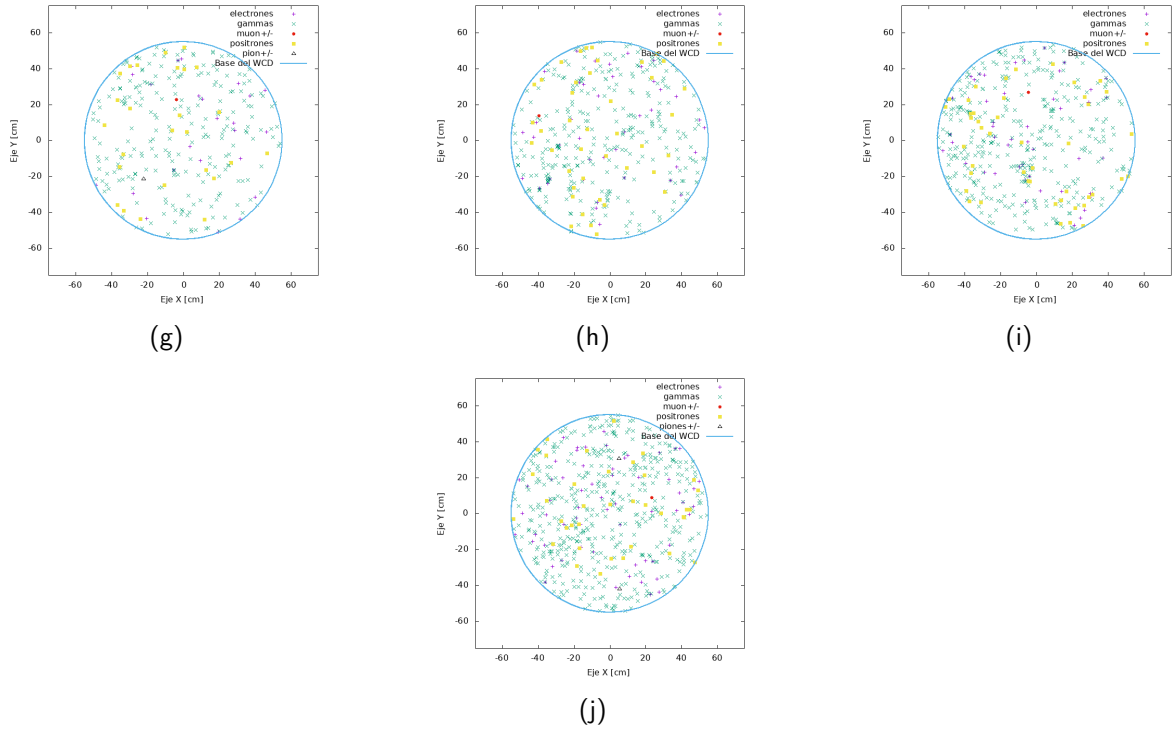
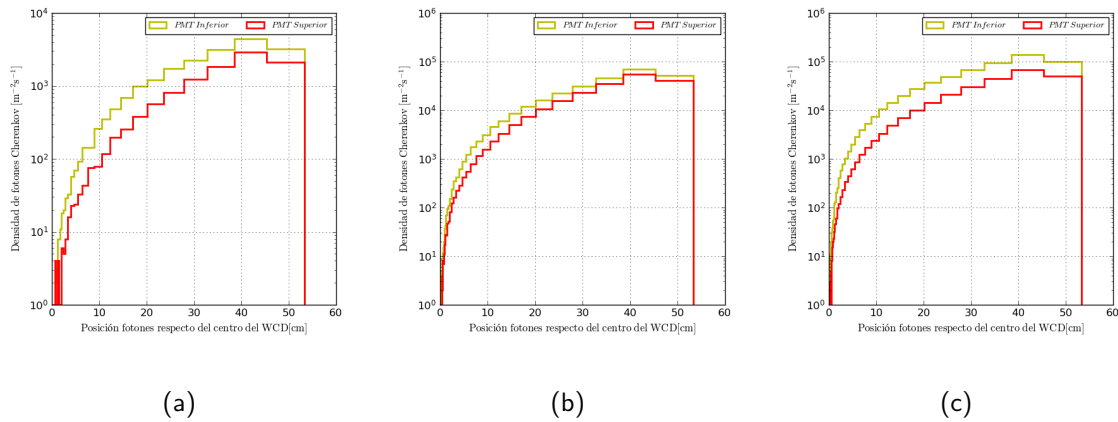


Figura 6.9: Distribución de una EAS generada por un primario protón: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV], en un área de $\pi \times 0,55^2 [m^2]$. El círculo de color celeste representa la base del detector. Las cruces representa los e^- , las x representa los γ , cuadrados representa los e^+ , círculo representa $\mu^{+/-}$ y el triángulo representa el $\pi^{+/-}$.

Finalmente, en la Figura 6.10 se visualiza la densidad de fotones Cherenkov(y reflejos) que se generaron y fueron detectados en el interior del WCD por los dos PMTs en función de la distancia de impacto, generados por una EAS de 1 a 10 [TeV]. La distancia de impacto es medida respecto del centro del WCD hasta el radio del mismo(radio=0,55 [m]).



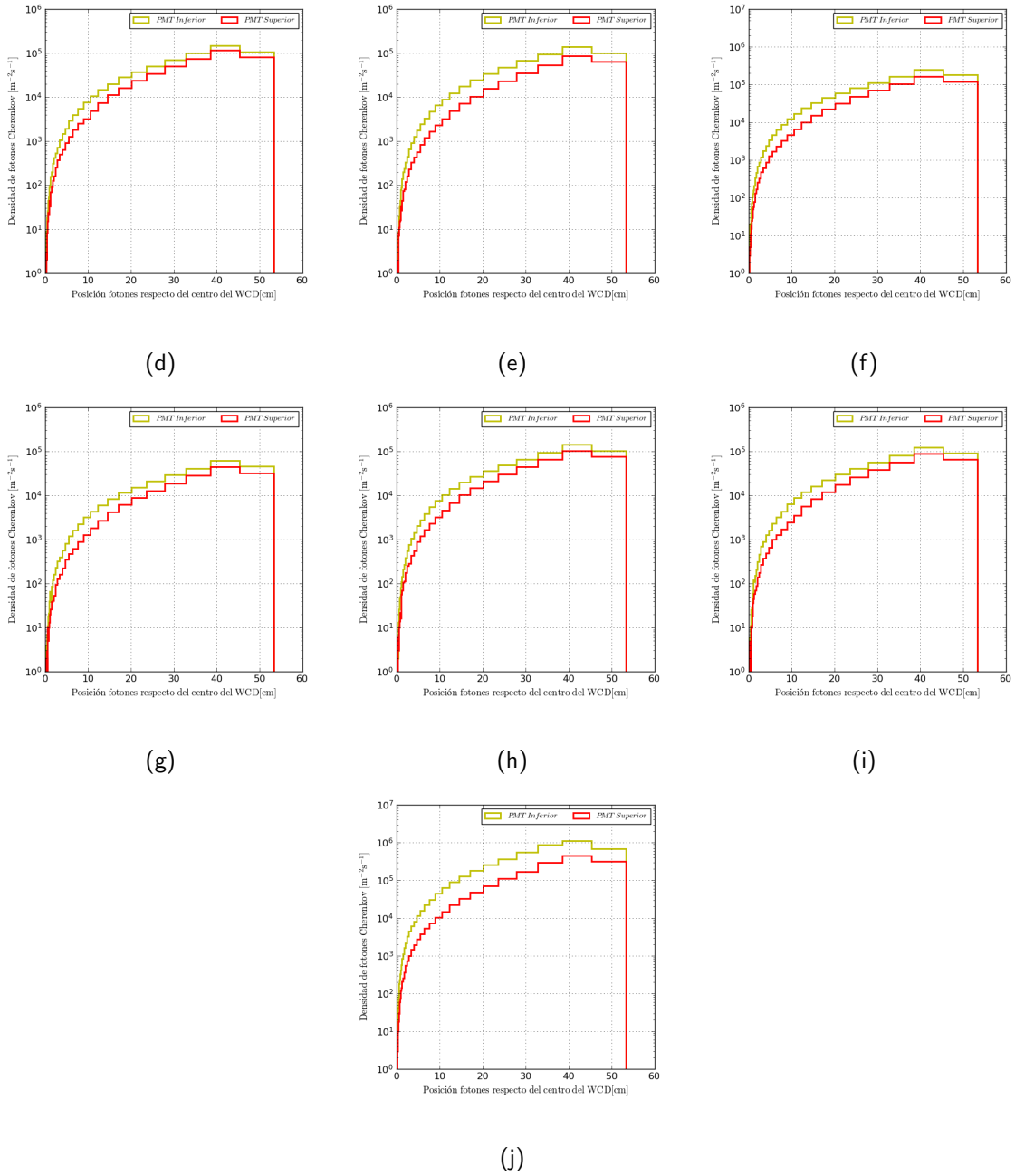


Figura 6.10: Densidad de fotones Cherenkov (y reflejos) detectados (en el eje y), generados por una EAS de: (a) 1 [TeV], (b) 2 [TeV], (c) 3 [TeV], (d) 4 [TeV], (e) 5 [TeV], (f) 6 [TeV], (g) 7 [TeV], (h) 8 [TeV], (i) 9 [TeV] y (j) 10 [TeV] en función de la distancia radial medida desde el centro del WCD, $\text{radioWCD}=0,55$ [m] (en el eje x). Se observa en color amarillo detecciones del PMT inferior y en color rojo detecciones del PMT superior.

Para diferenciar entre γ y protón como primario, se debe observar el número de detecciones que tienen los PMTs (inferior y superior). Si el número de detecciones es grande posiblemente sea generado por un rayo γ . Además, se conoce que el PMT inferior detecta más γ que protones, y por lo tanto permite diferenciar mejor entre los dos, éste hecho se observa en la Figura 6.11.

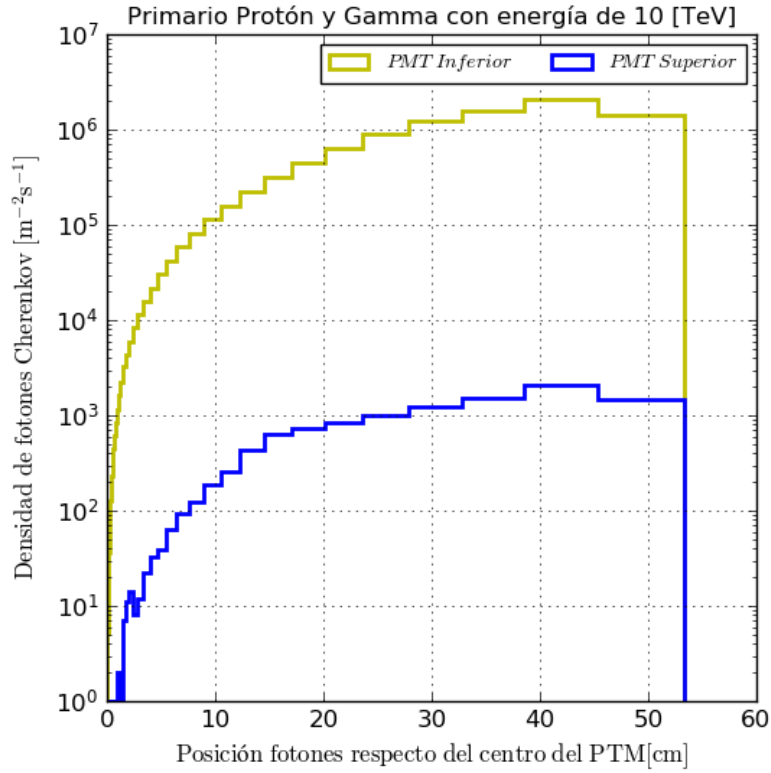


Figura 6.11: Densidad de fotones Cherenkov de la diferencia de γ y protones de 10 [TeV]. Se observa en color amarillo detecciones del PMT inferior y en color rojo detecciones del PMT superior.

6.2.2. Área Efectiva

Para el cálculo del área efectiva en función de la energía se simuló 100 EASs de primarios γ y protones de 1 a 10 [TeV] de energía en un área total de 10000 m^2 . Posteriormente, generaron partículas secundarias que se inyectaron en el espacio mundo de GEANT4, en donde se encuentra el tanque Cherenkov diseñado. Las detecciones obtenidos por el tanque se los utilizó en la fórmula de la ecuación 3.13 para calcular el área efectiva y se realizó un fit Gaussiano para conocer su eficiencia (Tabla 6.5 y Tabla 6.6). A continuación, en la Figura 6.12 y Figura 6.13 se visualiza el área efectiva de rayos γ y protones.

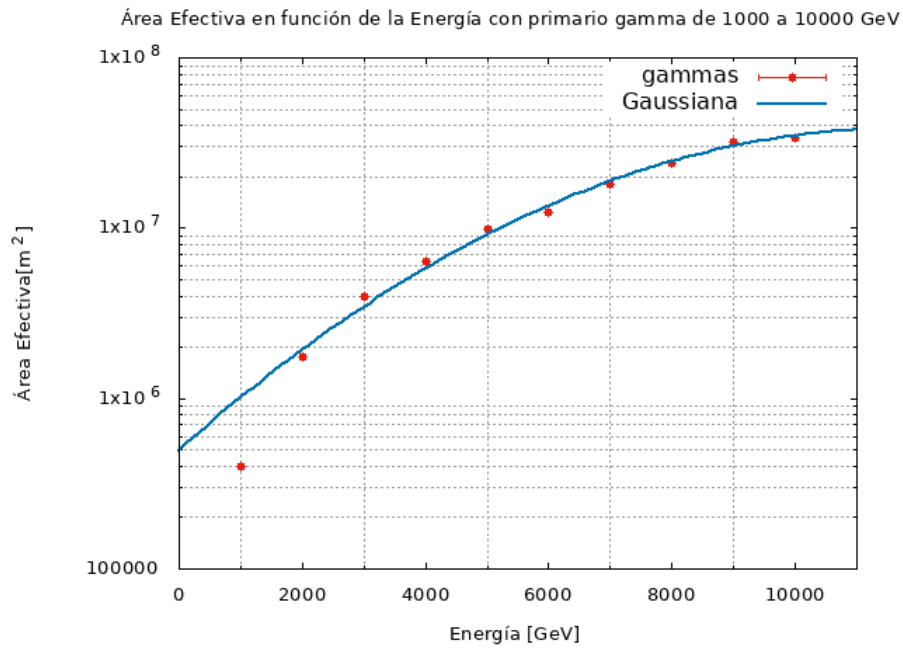


Figura 6.12: Área efectiva [m^2] (en el eje y) en función da la Energía [GeV] (en el eje x) de rayos gamma como primarios que inciden verticalmente. Se observa la línea de color azul que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los puntos de color rojo. Éstos puntos representan el Área efectiva con energías de entre 1 – 10 [TeV] (1000 – 10000 [GeV]) que se obtuvo al simular GEANT4

Datos	Valor	Error
Valor de ajuste de la Amplitud A	3.85408e+07	+/-3.409e+06(8.846 %)
Valor de ajuste de la media μ	11800	+/-772.5(6.547 %)
Valor de ajuste de la desviación estándar σ	3998.87	+/-368.9(9.225 %)

Tabla 6.5: Resultado del Fiteo Gaussiano para los datos obtenidos de rayos gamma de 1 – 10[TeV]

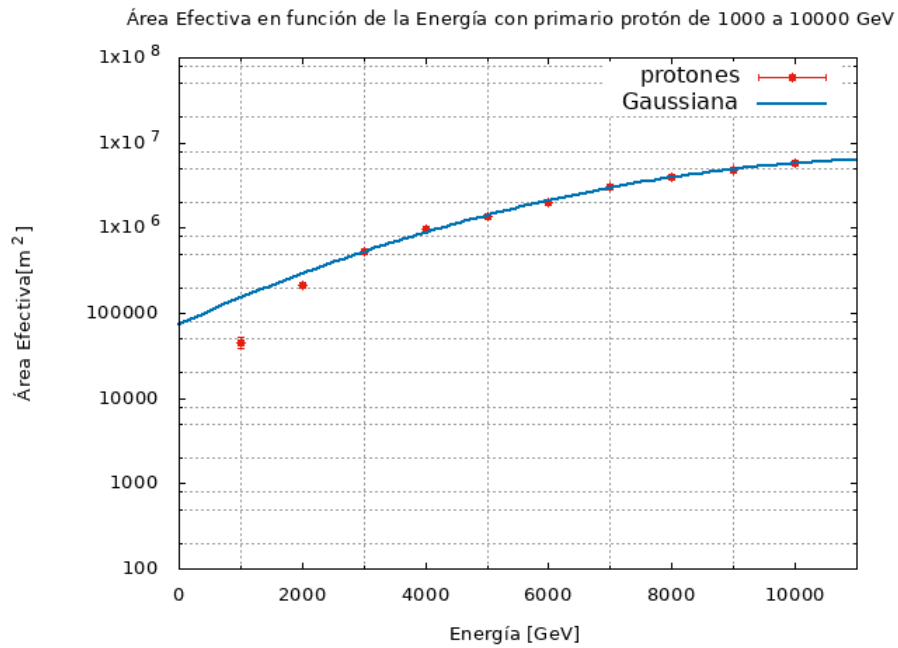


Figura 6.13: Área efectiva [m^2] (en el eje y) en función da la Energía [GeV] (en el eje x) de protones como primarios que inciden verticalmente. Se observa la línea de color azul que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los puntos de color rojo. Éstos puntos representan el Área efectiva con energías de entre 1 – 10 [TeV] (1000 – 10000 [GeV]) que se obtuvo al simular GEANT4

Datos	Valor	Error
Valor de ajuste de la Amplitud A	6.5712e+06	+/-4.288e+05(6.525 %)
Valor de ajuste de la media μ	12106.7	+/-539.5(4.456 %)
Valor de ajuste de la desviación estándar σ	4038.26	+/-245.5(6.08 %)

Tabla 6.6: Resultado del Fiteo Gaussiano para los datos obtenidos de protones de 1 – 10[TeV]

Para visualizar de mejor manera las diferencias de las áreas efectivas de rayos γ y protones, se observa la siguiente Figura 6.14.

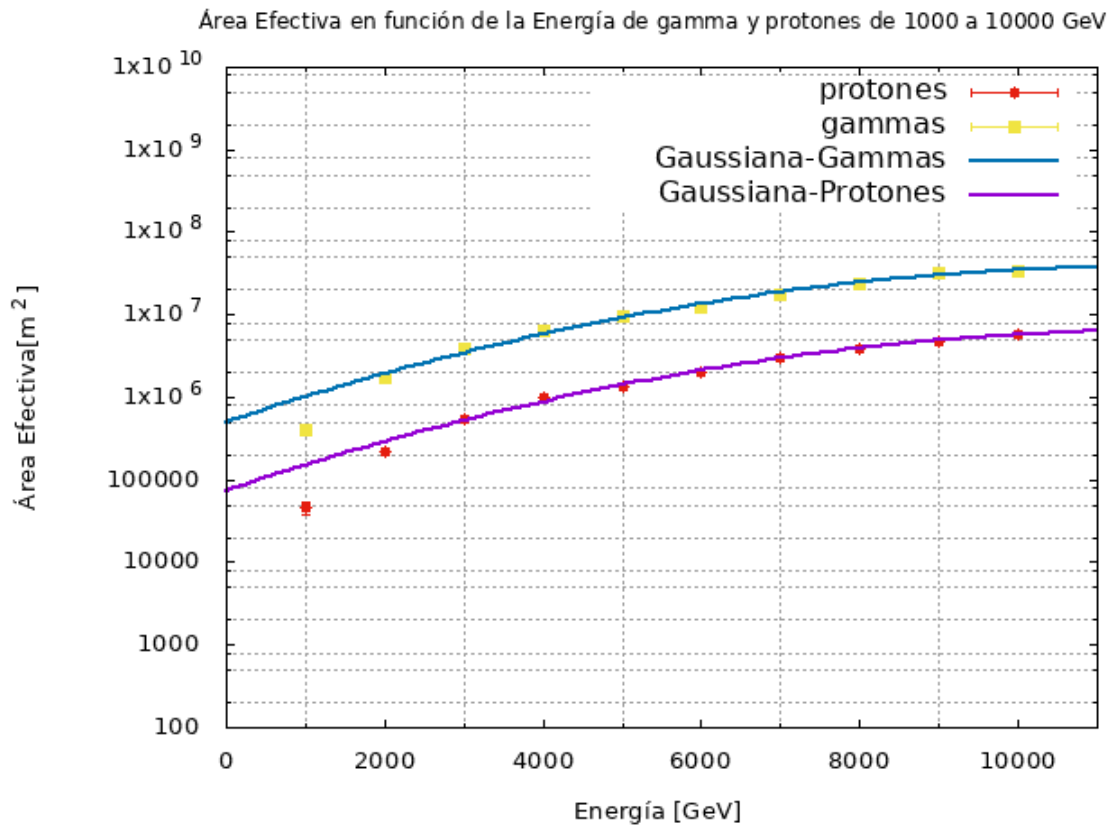


Figura 6.14: Área efectiva [m^2] (en el eje y) en función da la Energía [GeV] (en el eje x) de γ y protones como primarios que inciden verticalmente. Se observa la línea de color azul que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los datos de γ y línea de color morado que representa la función gaussiana que mejor se ajusta a los datos de protones. Éstos puntos representan el Área efectiva con energías de entre 1 – 10 [TeV] (1000 – 10000 [GeV]) que se obtuvo al simular GEANT4

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se simuló en CORSIKA EASs generadas por rayos γ y protones de energía de entre 1 a 10 [TeV], y se encontró las diferentes partículas secundarias generadas que llegan a nivel del suelo. Con ello, se logró observar la diferencia entre una EAS de rayos γ y una EAS de protones debido a que las EASs de rayos γ son más compactas, es decir, sus partículas secundarias se encuentran más juntas que las EASs de protones que son más abiertas, es decir, sus partículas secundarias se encuentran más dispersas en el plano de incidencia. De la misma manera se logró observar que la mayor densidad de partículas secundarias que llegan a nivel del suelo son γ , electrones y positrones. Todas estas diferencias se debe al hecho de que los procesos físicos involucrados son distintos para rayos γ y protones como primarios. Es decir, para primarios protones el proceso de dispersión de Coulomb hace que las partículas secundarias estén más dispersas en el plano de incidencia, mientras que, cuando usamos primarios γ el proceso de producción de pares genera una mayor producción de fotones que impactan en el suelo.

Se simuló un WCD con dos PTMs en ubicados en las posiciones base y tapa para la detección de astropartículas en GEANT4. Los secundarios generados por CORSIKA se los inyectó en GEANT4 de los cuales un bajo porcentaje logró impactar en el WCD. Los secundarios generaron fotones Cherenkov, por lo que, validó el correcto funcionamiento del WCD. Para la estimación de la detección se consideró la producción de radiación Cherenkov y la reflexión de los fotones en el tyvek.

Los resultados de este trabajo muestran que al colocar un WCD en la sierra ecuatorial es viable, debido a su posición geográfica, altura y campo magnético. Estos factores benefician en gran medida, para la detección de astropartículas y para una posible reconstrucción de EASs.

La configuración geométrica de los dos PMTs permite diferenciar entre un rayo γ y protón mediante el número fotones Cherenkov detectados. La diferencia entre la luz detectada en el PMT de arriba y de abajo permite determinar la componente hadrónica de la electromagnética. El diseño de un detector con dos PMTs es un buen candidato para la construcción de un arreglo de detectores WCD. Las EASs generadas por fotones requieren una área efectiva más grande que el área efectiva de protones, el diseño de un arreglo de tanques tendrá que tomar en cuenta una distribución específica de detectores.

A pesar de tener un solo WCD de dimensiones pequeñas, si existieron impactos que generaron fotones Cherenkov que posteriormente se utilizaron para el cálculo de el área efectiva. La altura de la ciudad de Quito, presenta una ventaja para el uso de detectores relativamente pequeños. Además,

para el cálculo del área efectiva cabe recalcar que se requiere de mucho tiempo de simulación y de muchas simulaciones de EASs. En éste trabajo de titulación, se tuvo que recurrir a varios servidores para poder calcularla, ya que el área efectiva de rayos γ y protones de 1 a 10 [TeV] requiere de un poder computacional considerable.

Finalmente para futuros trabajos, se recomienda simular un arreglo más grande de detectores y un mayor número de EASs para obtener una mejor estadística y reducir los errores. Con ello se obtendrá una mayor probabilidad de detección de partículas secundarias y se aumentará la posibilidad de reconstruir EASs que impactan en la ciudad de Quito. Otra forma de mejorar la eficiencia de la detección sería utilizar un tanque más alto.

Apéndice A

Instalación y Scripts en CORSIKA

A.1. Instalación CORSIKA

En este anexo se detalla la instalacion de corsika-75600.

Para su instalación primero se descargó de la página oficial de Corsika <https://www.ikp.kit.edu/corsika/>. Se descomprimió [corsika-75600.tar.gz](#) en la terminal mediante la línea de comando :

```
$ tar -xzf corsika-75600.tar.gz
```

Después, adentro de la carpeta de corsika-75600 creada se ejecuta en la terminal el ejecutable [coconut](#) con la siguiente línea de comando:

```
$ ./coconut
```

En esta parte se establece las siguientes configuraciones de instalación:

1. Compilador de 64bit
2. Modelo de interacción hadrónica de alta energía QGSJET
3. Modelo de interacción hadrónica de baja energía GHEISHA
4. Matriz de detector plano horizontal
5. Otras características se instalan por default.

A.2. Creación del corsikaread

Terminada la instalación nos dirigimos a la ruta [/corsika-75600/src/utils/](#), donde creamos el ejecutable [corsikaread](#) mediante la siguiente línea de comando :

```
$ gfortran -fbounds-check corsikaread.f -o corsikaread
```


El ejecutable `corsikaread` nos va a transformar los binarios en archivos modificables.

Finalmente, se copia y pega el ejecutable `corsikaread` en la ruta `/corsika-75600/run/`.

A.3. Script entradas

Para implementar el script `entradas.sh` se abre una terminal en la carpeta que lo contiene. Antes de ejecutarlo el script, se modifican los parámetros iniciales como son: primario, altitud, campo magnético, entre otros.

```
#!/bin/bash
echo ""
echo "Programa para generar los archivos binarios DATnnnnnn"
echo ""
echo "Introduce el numero total de archivos DATnnnn a generar en Corsika"
read count
declare -i x=100
declare -i y=200
declare -i z=300
declare -i t=50

echo "Corriendo simulaciones... espere..."
for i in `seq 1 $count`
do
touch quit
echo "RUNNR      $i      run number" >> quit
echo "EVTNR      1      number of first shower event" >> quit
echo "NSHOW      100     number of showers to generate" >> quit
echo "PRMPAR      1/14    particle type of prim. particle" >> quit
echo "ESLOPE      -2.7    slope of primary energy spectrum" >> quit
echo "ERANGE      1000.0  1000.0 energy range of primary particle(GeV)" >> quit
echo "THETAP      0.  0.   range of zenith angle (degree)" >> quit
echo "PHIP        0.  360.  range of azimuth angle (degree)" >> quit
echo "SEED $x 0 0      seed for 1. random number sequence" >> quit
echo "SEED $y 0 0      seed for 2. random number sequence" >> quit
echo "SEED $z 0 0      seed for 3. random number sequence" >> quit
echo "QGSJET      T 0" >> quit
echo "QGSSIG      T" >> quit
echo "OBSLEV      285000  observation level (in cm)" >> quit
echo "FIXCHI      0.      starting altitude (g/cm**2)" >> quit
echo "MAGNET      26.835  10.499  magnetic field centr. Europe" >> quit
#echo "CSCAT      1  200000  200000" >> quit
echo "HADFLG      0  0  0  0  0  2  flags hadr.interact.&fragmentation" >> quit
echo "ECUTS       0.5  0.05  5.E-05  5.E-05  energy cuts for particles" >> quit
echo "MUADDI      T      additional info for muons" >> quit
```

```

echo "MUMULT T          muon multiple scattering angle" >> quit
echo "ELMFLG F  T      em. interaction flags (NKG,EGS)" >> quit
echo "STEPFC 1.0       mult. scattering step length fact." >> quit
echo "RADNKG 200.E2    outer radius for NKG lat.dens.distr. " >> quit
echo "ARRANG 0." >> quit
echo "LONGI  T 10.  T T  longit.distr. & step size & fit & out" >> quit
echo "ECTMAP 1.E3      cut on gamma factor for printout" >> quit
echo "MAXPRT 1         max. number of printed events" >> quit
echo "DIRECT /home/guti/Corsika/corsika-75600/run/ " >> quit
echo "DATBAS F" >> quit
echo "PAROUT T F ">> quit
echo "USER geant4      user " >> quit
echo "DEBUG F 6 F 1000000 debug flag and log.unit for out ">> quit
echo "EXIT           terminates input ">> quit

```

```

cd /home/guti/Corsika/corsika-75600/run/
./corsika75600Linux_QGSJET_gheisha </home/guti/1000010000/quit>
INFORMACION.txt
echo ""
echo "Simulaci n numero $i realizada con exito"

```

```

if [ $i -le 999 ] && [ $i -ge 100 ]
then
dir="/home/guti/Corsika/corsika-75600/run/DAT000$i"
fi

```

```

if [ $i -le 99 ] && [ $i -ge 10 ]
then
dir="/home/guti/Corsika/corsika-75600/run/DAT0000$i"
fi

```

```

if [ $i -le 9 ]
then
dir="/home/guti/Corsika/corsika-75600/run/DAT00000$i"
fi

```

```

bzip2 $dir

```

```

#-----

```

```

if [ $i -le 999 ] && [ $i -ge 100 ]
then
rm DAT000$i.long
fi

```

```

if [ $i -le 99 ] && [ $i -ge 10 ]

```

```

then
rm DAT0000$i.long
fi

if [ $i -le 9 ]
then
rm DAT00000$i.long
fi

cd /home/guti/10001000/
rm quit

x=$(( x + t ))
y=$(( y + t ))
z=$(( z + t ))

echo "$x y $y y $z"

done

exit

```

A.4. Script procesa

```

#!/bin/bash
echo ""
echo "Programa para obtener las carpetas con los chubascos"

for i in `seq 1 100`
do
cd /home/guti/Corsika/corsika -75600/run/

if [ $i -le 999 ] && [ $i -ge 100 ]
then
dir="/home/guti/Corsika/corsika -75600/run/DAT000$i.bz2"
fi

if [ $i -le 99 ] && [ $i -ge 10 ]
then
dir="/home/guti/Corsika/corsika -75600/run/DAT0000$i.bz2"
fi

if [ $i -le 9 ]
then
dir="/home/guti/Corsika/corsika -75600/run/DAT00000$i.bz2"

```

```

fi

bunzip2 $dir

touch input ### input se crea en run

if [ $i -le 999 ] && [ $i -ge 100 ]
then
echo "/home/guti/Corsika/corsika -75600/run/DAT000$i" > input
fi

if [ $i -le 99 ] && [ $i -ge 10 ]
then
echo "/home/guti/Corsika/corsika -75600/run/DAT0000$i" > input
fi

if [ $i -le 9 ]
then
echo "/home/guti/Corsika/corsika -75600/run/DAT000000$i" > input
fi

./corsikaread <input
mkdir /home/guti/400400/binarios/dat$i
mv fort.7 /home/guti/400400/binarios/dat$i
cp /home/guti/400400/binarios/progc-QUITO /home/guti/400400/
/binarios/dat$i

cd /home/guti/400400/binarios/dat$i

./progc-QUITO

cd /home/guti/Corsika/corsika -75600/run

#bzip2 $dir
#gzip $dir

done
exit

```

A.5. Script progc-QUITO

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <math.h>
#include <stdio.h>

```

```

#include <string.h>
#include <cstring>
using namespace std;
int main() {
    ifstream archivo("fort.7",ios::in);
    double c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7;
    double energia,eprimario;
    double masa;
    double v1,v4;
    int contador=100;
    int shower=0;
    char file[20];
    ofstream salida;

    salida.open("ya1.dat");
    while(archivo>>c1>>c2>>c3>>c4>>c5>>c6>>c7)
    {
        if(c1==33333300)
        {
            salida.close();
            shower=shower+1;
            eprimario=c4;
            contador=1;
            sprintf(file,"ya%d.dat",shower);
            salida.open(file);
        }
        contador=contador+1;
        if(contador==3)
        {
            salida<<"10000"<<" "<<eprimario<<" "<<c4<<" "<<c5;
        }
        if(contador ==16)
        {
            salida<<" "<<c1;
        }
        if(contador==18)
        {
            salida<<" "<<c7<<" "<<0<<" "<<0<<endl;
        }
        if ((c1>1000)&&(c1<9999)&& (c1!=33333300))
        {
            v1=c1/1000;
            v4=(int(c1))%10;
            int particula = int(v1);
            if (v1==1)
            {

```

```

        masa=0;
    }
    if (v1==2 || v1==3)
    {
        masa=510.998928*10E-6;
    }
    if (v1==5 || v1==6)
    {
        masa=105.658*10E-3;
    }
    if (v1==7)
    {
        masa=134.9766*10E-3;
    }
    if (v1==8 || v1==9)
    {
        masa =139.57018*10E-3;
    }
    energia= sqrt(pow(masa,2))+ (pow(c2,2)+ pow(c3,2)+pow(c4,2));
    if ((v4==1)&&(c1!=33333300))
    {
        salida<<"particula"<<" "<<c2<<" "<<c3<<" "<<c4<<" "<<c5<<" "<<c6<<" "<<c7<<" "<<energia<<endl;
    }
}
}
}
salida.close();
cout<<"proceso terminado, revisar archivo salida.txt"<<endl;
return 0;
}

```

A.6. Script seleccion

```

#!/bin/bash
#Este programa corre geant4 con las entradas generadas en corsika
#de la carpeta "entradas", selecciona la entrada con secundarios y
#corre esas entradas, las que no generaron secundarios simplemente
#corre otro programa que guardar los datos del shower para obtener
#el rea efectiva.
source /home/guti/soft/geant4/bin/geant4.sh
count=100
for j in `seq 1 $count`
do
    carpeta=""
    carpeta="/home/guti/400400/binarios/dat$j"
    for i in `seq 1 $count`
    #

```

```

do                                     #inicializa el ciclo for

#cd /home/guti/100100/binarios/dat$j

#touch counter
#echo "$i">counter

cd $carpeta
file=""
file="ya$i.dat"

output=$( wc -l $file )
numero=${output:0:2}
#echo $numero

cp $file ya.dat
mv ya.dat /home/guti/400400/build/
cd /home/guti/400400/build

if (( numero <= 1 ))
then
    ./noprocesa
    # echo "Archivo no se procesa"
fi

if (( numero > 1 ))
then
    ./OpNovice -m OpNovice.in
    # echo "Se corre GEANT4"
fi
done
dato=""
dato="dato$j.dat"
mv dato.dat /home/guti/400400/d/$dato
#cd /home/guti/100100/binarios/dat1

done

```

A.7. Script noprocesa

//Programa que s lo agrega los datos al archivo dato.dat para
//evitar el geant4 de Quito se inicialice.

```

#include <iostream>
#include <fstream>

```

```

#include <iomanip>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <cstring>

using namespace std;

int main(){

    ifstream FILE("ya.dat",ios::in);
    ofstream dat("dato.dat",ios::app);

    float area , pEnergy , angle , phi , xCore , yCore , a , b , c , d , e;

    area = 0;
    angle = 0;
    pEnergy = 0;
    phi = 0;
    xCore = 0;
    yCore = 0;

    while ( FILE>>area>>pEnergy>>angle>>phi>>xCore>>yCore>>d>>e){
        dat<<area<<" "<<pEnergy<<" "<<angle<<" "<<phi<<" "<<xCore
        <<" "<<yCore<<"_0_0_0_0"<<endl;}

        dat.close();
        FILE.close();

        return 0;
    }
}

```


Apéndice B

Instalación y Scripts en GEANT4

B.1. Instalación GEANT4

En este anexo se detalla la instalación de geant4.10.00.p04.

Para su instalación primero se descargó de la página oficial de Geant4, <https://geant4-data.web.cern.ch/geant4-data/releases/geant4.10.00.p04.tar.gz>. Se descomprimió [geant4.10.00.p04.tar.gz](#) en la terminal mediante la línea de comando :

```
$ tar -xzf geant4.10.00.p04.tar.gz
```

Siguiendo la guía de instalación que se encuentra en la página web oficial se instalan las siguientes librerías en una terminal en orden como se describe a continuación:

- sudo apt-get install openssh-server
- sudo apt-get install git
- sudo apt-get install g++
- sudo apt-get install nemiver
- sudo apt-get install build-essential

Se descarga e instala la versión más actual de cmake de la página oficial <https://cmake.org/files/v3.11/cmake-3.11.2.tar.gz>. Se descomprime mediante la siguiente línea de comando:

```
$ tar -xzf cmake-3.11.2.tar.gz
```

Se crea un carpeta llamada cmake-3.11.2, en su interior se encuentra el ejecutable [configure](#), y se lo ejecuta con la línea de comando que sigue:

```
$ ./configure
```

Después :

```
$ make
```

Y finalmente :

```
$ sudo make install
```

Se descarga la versión más actual de sublime-text de la página web oficial <https://download.sublimetext.com/pub.gpg>. En terminal se ejecuta las siguientes líneas de comando:

```
$ wget -qO - https://download.sublimetext.com/sublimehq-pub.gpg — sudo apt-key add -
```

```
$ sudo apt install apt-transport-https
```

```
$ echo "deb https://download.sublimetext.com/ apt/stable/" — sudo tee /etc/apt
```

```
$ sudo apt update
```

```
$ sources.list.d/sublime-text.list
```

Finalmente:

```
$ sudo apt install sublime-text
```

Luego, con el comando `sudo apt-get install` se instala las siguientes librerías: `matplotlib, cmake-curses-gui, libafterimage-dev, libxmu-dev, libftgl-dev, libfreetype6-dev, davix-dev, libxml2-dev, libxpm-dev, libxft-dev, libsqlite3-dev, libsfft3-dev, libgsl-dev, libglew-dev, libglewmx-dev, libssl-dev, libmotif-dev, libxaw7-dev, libxaw7, mesa-common-dev, libglu1-mesa-dev -y`

Para instalación de Geant4 nos ubicamos a la ruta donde descomprimos Geant4 `/home/.../geant4.10.00.p0` se crean dos carpetas llamadas `geant4-install` y `geant4-build`.

En la carpeta `geant4-build` abrimos un nuevo terminal y ejecutamos lo siguiente:

```
$ cmake -DGEANT4_INSTALL_DATA=ON
-DGEANT4_USE_GDML=ON
-DGEANT4_USE_QT=ON
-DGEANT4_BUILD_EXAMPLES=OFF
-DGEANT4_BUILD_CXXSTD=c++14
DGEANT4_USE_OPENGL_X11=ON
DGEANT4_BUILD_MULTITHREADED=ON
-DGEANT4_USE_SYSTEM_ZLIB=ON
DGEANT4_USE_SYSTEM_EXPAT=ON
DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/home/.../geant4-install
/home/.../geant4.10.00.p04/
```

Ejecutamos los núcleos a utilizar en las simulaciones :

```
$ make -j4
```

Y finalmente:

```
$ make install
```

Si no existió algún error la instalación queda terminada.

B.2. OpNoviceDetectorConstruction

```
#include "OpNoviceDetectorConstruction.hh"
#include "LXePMTSD.hh"
#include "LXeScintSD.hh"

#include "G4Material.hh"
#include "G4Element.hh"
#include "G4LogicalBorderSurface.hh"
#include "G4LogicalSkinSurface.hh"
#include "G4OpticalSurface.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"
#include "G4VSensitiveDetector.hh"

#include "G4Tubs.hh"
#include "G4Sphere.hh"
#include "G4PhysicalConstants.hh"
#include "G4RotationMatrix.hh"
#include "G4Cons.hh"

#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Colour.hh"
#include "G4SDManager.hh"
#include "G4VTouchable.hh"
#include "G4TouchableHistory.hh"
#include "G4Track.hh"
#include "G4Step.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "G4VProcess.hh"

// #include "G4VPrimitiveSensitivity.hh"
```

```

OpNoviceDetectorConstruction::OpNoviceDetectorConstruction()
: G4VUserDetectorConstruction()
{
    fExpHall_x = 100.0*m;//Distancia en x del espacio mundo
    fExpHall_y = 100.0*m;//Distancia en y del espacio mundo
    fExpHall_z = 5.0*m;//Distancia en z del espacio mundo
//Con los fExpHall_x,fExpHall_y, fExpHall_z volumen total:
Volumen_Total=(fExpHall_x)*(fExpHall_y)*(fExpHall_z)
    fBubble_x = fBubble_y = fBubble_z = 0.5*m;

    scint_x = scint_y = 1.10*m; //Diámetro
    Scint_z = 1.39*m;          //Artura

    outerRadius_pmtL = 10.3*cm; //Radio de los fototubos laterales 8 pulgadas

//desplazamiento tanque central
// move_x4 = 0.0*m;
// move_y4 = 0.0*m;

    wtyvek=0.2*mm; //grosor tyvek=200 micras
    d_mtl=0.635*cm; //width aluminum cylinder
}

//*****

OpNoviceDetectorConstruction::~OpNoviceDetectorConstruction(){;}

//*****

G4VPhysicalVolume* OpNoviceDetectorConstruction::Construct()
{
//*****
//** DEFINICIÓN DE MATERIALES ****
//*****

    G4double a, z, density;
    G4int nelements;

//-----
//---ALUMINIO---
//-----
G4Material* Al = new G4Material("Al",z=13.,a=26.98*g/mole,density=2.7*g/cm3);
//-----
//---VACIO-----

```

```

//-----
G4Material* Vacuum =
new G4Material("Vacuum",z=1.,a=1.01*g/mole,density=universe_mean_density,
kStateGas, 0.1*kelvin, 1.e-19*pascal);
//-----
//-----ELEMENTOS (NITRÓGENO, OXÍGENO Y CARBONO)-----
//-----
G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", z=7 , a=14.01*g/mole);
G4Element* O = new G4Element("Oxygen" , "O", z=8 , a=16.00*g/mole);
G4Element* C = new G4Element("C", "C", z=6., a=12.01*g/mole);
//-----
//-----AIRE Y ELEMENTOS QUE LO COMPONEN (NITRÓGENO AL 70% Y OXÍGENO AL 30 %)---
//-----
G4Material* air = new G4Material("Air", density=1.29*mg/cm3, nelements=2);
air->AddElement(N, 70.*perCent);
air->AddElement(O, 30.*perCent);
//-----
//AGUA Y LOS MATERIALES QUE LO COMPONEN (2 DE HIDRÓGENO Y 1 DE OXÍGENO)-
//-----
G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", z=1 , a=1.01*g/mole);

G4Material* water =
new G4Material("Water", density= 1.0*g/cm3, nelements=2);
water->AddElement(H, 2);
water->AddElement(O, 1);
//-----
//TYVEK Y LOS MATERIALES QUE LO COMPONEN (2 DE CARBONO Y 4 DE HIDRÓGENO)----
//-----
G4Material* Tyvek = new G4Material("Tyvek",density=0.935*g/cm3,2);
Tyvek->AddElement(C,2);
Tyvek->AddElement(H,4);
//-----
// ----Generate & Add Material Properties Table -----
//-----
G4double photonEnergy[] =
{ 2.034*eV, 2.068*eV, 2.103*eV, 2.139*eV,
  2.177*eV, 2.216*eV, 2.256*eV, 2.298*eV,
  2.341*eV, 2.386*eV, 2.433*eV, 2.481*eV,
  2.532*eV, 2.585*eV, 2.640*eV, 2.697*eV,
  2.757*eV, 2.820*eV, 2.885*eV, 2.954*eV,
  3.026*eV, 3.102*eV, 3.181*eV, 3.265*eV,
  3.353*eV, 3.446*eV, 3.545*eV, 3.649*eV,
  3.760*eV, 3.877*eV, 4.002*eV, 4.136*eV };

const G4int nEntries = sizeof(photonEnergy)/sizeof(G4double);

```

```

//
// Water
//
G4double refractiveIndex1[] =
    { 1.3435, 1.344, 1.3445, 1.345, 1.3455,
      1.346, 1.3465, 1.347, 1.3475, 1.348,
      1.3485, 1.3492, 1.35, 1.3505, 1.351,
      1.3518, 1.3522, 1.3530, 1.3535, 1.354,
      1.3545, 1.355, 1.3555, 1.356, 1.3568,
      1.3572, 1.358, 1.3585, 1.359, 1.3595,
      1.36, 1.3608};

assert(sizeof(refractiveIndex1) == sizeof(photonEnergy));

G4double absorption[] =
    {3.448*m, 4.082*m, 6.329*m, 9.174*m, 12.346*m, 13.889*m,
     15.152*m, 17.241*m, 18.868*m, 20.000*m, 26.316*m, 35.714*m,
     45.455*m, 47.619*m, 52.632*m, 52.632*m, 55.556*m, 52.632*m,
     52.632*m, 47.619*m, 45.455*m, 41.667*m, 37.037*m, 33.333*m,
     30.000*m, 28.500*m, 27.000*m, 24.500*m, 22.000*m, 19.500*m,
     17.500*m, 14.500*m };

assert(sizeof(absorption) == sizeof(photonEnergy));

G4double scintilFast[] =
    { 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00 };

assert(sizeof(scintilFast) == sizeof(photonEnergy));

G4double scintilSlow[] =
    { 0.01, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00,
      7.00, 8.00, 9.00, 8.00, 7.00, 6.00, 4.00,
      3.00, 2.00, 1.00, 0.01, 1.00, 2.00, 3.00,
      4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00, 9.00, 8.00,
      7.00, 6.00, 5.00, 4.00 };

assert(sizeof(scintilSlow) == sizeof(photonEnergy));

G4MaterialPropertiesTable* myMPT1 = new G4MaterialPropertiesTable();

myMPT1->AddProperty("RINDEX", photonEnergy, refractiveIndex1, nEntries)
    ->SetSpline(true);

```

```

myMPT1->AddProperty("ABSLNGTH",photonEnergy,absorption,nEntries)
    ->SetSpline(true);
myMPT1->AddProperty("FASTCOMPONENT",photonEnergy, scintilFast,nEntries)
    ->SetSpline(true);
myMPT1->AddProperty("SLOWCOMPONENT",photonEnergy, scintilSlow,nEntries)
    ->SetSpline(true);

myMPT1->AddConstProperty("SCINTILLATIONYIELD",50./MeV);
myMPT1->AddConstProperty("RESOLUTIONSCALE",1.0);
myMPT1->AddConstProperty("FASTTIMECONSTANT", 1.*ns);
myMPT1->AddConstProperty("SLOWTIMECONSTANT",10.*ns);
myMPT1->AddConstProperty("YIELDRATIO",0.8);

G4double energy_water[] = {
    1.56962*eV, 1.58974*eV, 1.61039*eV, 1.63157*eV,
    1.65333*eV, 1.67567*eV, 1.69863*eV, 1.72222*eV,
    1.74647*eV, 1.77142*eV, 1.7971 *eV, 1.82352*eV,
    1.85074*eV, 1.87878*eV, 1.90769*eV, 1.93749*eV,
    1.96825*eV, 1.99999*eV, 2.03278*eV, 2.06666*eV,
    2.10169*eV, 2.13793*eV, 2.17543*eV, 2.21428*eV,
    2.25454*eV, 2.29629*eV, 2.33962*eV, 2.38461*eV,
    2.43137*eV, 2.47999*eV, 2.53061*eV, 2.58333*eV,
    2.63829*eV, 2.69565*eV, 2.75555*eV, 2.81817*eV,
    2.88371*eV, 2.95237*eV, 3.02438*eV, 3.09999*eV,
    3.17948*eV, 3.26315*eV, 3.35134*eV, 3.44444*eV,
    3.54285*eV, 3.64705*eV, 3.75757*eV, 3.87499*eV,
    3.99999*eV, 4.13332*eV, 4.27585*eV, 4.42856*eV,
    4.59258*eV, 4.76922*eV, 4.95999*eV, 5.16665*eV,
    5.39129*eV, 5.63635*eV, 5.90475*eV, 6.19998*eV
};

const G4int numentries_water = sizeof(energy_water)/sizeof(G4double);

//assume 100 times larger than the rayleigh scattering for now.
G4double mie_water[] = {
    167024.4*m, 158726.7*m, 150742 *m,
    143062.5*m, 135680.2*m, 128587.4*m,
    121776.3*m, 115239.5*m, 108969.5*m,
    102958.8*m, 97200.35*m, 91686.86*m,
    86411.33*m, 81366.79*m, 76546.42*m,
    71943.46*m, 67551.29*m, 63363.36*m,
    59373.25*m, 55574.61*m, 51961.24*m,
    48527.00*m, 45265.87*m, 42171.94*m,
    39239.39*m, 36462.50*m, 33835.68*m,
    31353.41*m, 29010.30*m, 26801.03*m,
    24720.42*m, 22763.36*m, 20924.88*m,

```

```

19200.07*m, 17584.16*m, 16072.45*m,
14660.38*m, 13343.46*m, 12117.33*m,
10977.70*m, 9920.416*m, 8941.407*m,
8036.711*m, 7202.470*m, 6434.927*m,
5730.429*m, 5085.425*m, 4496.467*m,
3960.210*m, 3473.413*m, 3032.937*m,
2635.746*m, 2278.907*m, 1959.588*m,
1675.064*m, 1422.710*m, 1200.004*m,
1004.528*m, 833.9666*m, 686.1063*m
};

assert(sizeof(mie_water) == sizeof(energy_water));

// gforward, gbackward, forward backward ratio
G4double mie_water_const[3]={0.99,0.99,0.8};

myMPT1->AddProperty("MIEHG",energy_water,mie_water,numentries_water)
->SetSpline(true);
myMPT1->AddConstProperty("MIEHG_FORWARD",mie_water_const[0]);
myMPT1->AddConstProperty("MIEHG_BACKWARD",mie_water_const[1]);
myMPT1->AddConstProperty("MIEHG_FORWARD_RATIO",mie_water_const[2]);

G4cout << "Water G4MaterialPropertiesTable" << G4endl;
myMPT1->DumpTable();

water->SetMaterialPropertiesTable(myMPT1);

// Set the Birks Constant for the Water scintillator

water->GetIonisation()->SetBirksConstant(0.126*mm/MeV);

//
// Air
//
G4double refractiveIndex2[] =
    { 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00,
      1.00, 1.00, 1.00, 1.00 };

G4MaterialPropertiesTable* myMPT2 = new G4MaterialPropertiesTable();
myMPT2->AddProperty("RINDEX", photonEnergy, refractiveIndex2, nEntries);

G4cout << "Air G4MaterialPropertiesTable" << G4endl;
myMPT2->DumpTable();

```



```

air->SetMaterialPropertiesTable(myMPT2);

//*****
//*****VOLUMENES*****
//*****
//-----
//----- The experimental Hall-----
//-----
G4Box* expHall_box = new G4Box("World",fExpHall_x,fExpHall_y,fExpHall_z);

G4LogicalVolume* expHall_log
    = new G4LogicalVolume(expHall_box,Vacuum,"World",0,0,0);

G4VPhysicalVolume* expHall_phys
    = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(),expHall_log,"World",0,false,0);
//-----
//----- The Water Tank-----
//-----
//tanque central
G4Tubs* waterTank_box_c = new G4Tubs("Tank_c",//Nombre
                                     0., //radio interno
                                     scint_x/2.,//radio externo
                                     Scint_z/2.,//mitad de longitud en z
                                     0.*deg, //comienzo en phi
                                     360.*deg); //segmento del ángulo

G4LogicalVolume* waterTank_log_c
    = new G4LogicalVolume(waterTank_box_c,water,"Tank_c",0,0,0);
G4VPhysicalVolume* waterTank_phys4
    = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0,0,0),waterTank_log_c,"Tank4",
                        expHall_log,false,4);

//*****
//The Tyvek cylinder
//*****
//tanque central
G4Tubs* tivek_cylinder_c = new G4Tubs("tivek_cylinder_c",
                                     scint_x/2.,
                                     scint_x/2.+ wtyvek,
                                     Scint_z/2.,
                                     0.*deg,
                                     360.*deg); //cilindro completo

G4LogicalVolume* tyvek_log_c =
new G4LogicalVolume(tivek_cylinder_c,G4Material::GetMaterial("Tyvek"),

```

```

"tivek_log",0,0,0);

G4VPhysicalVolume* tyvek_phys4 =
new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0,0.0,0.0),//en (x, y, z)//sin rotaci3n
                  tyvek_log_c,      //su vol3men l3gico
                  "tivek_cylinder4", //su nombre
                  expHall_log, //su vol3men madre
                  false,        //sin operaciones booleanas
                  4);

//*****
//Tyvek top
//*****
//tanque central
G4Tubs* tyvektop_c =
new G4Tubs("tyvektop_c",0,scint_x/2.+wtyvek,wtyvek/2.,0.*deg,360.*deg);//tapa
G4LogicalVolume* tyvektop_log_c =
new G4LogicalVolume(tyvektop_c,G4Material::GetMaterial("Tyvek"),
"tyvektop_log_c",0,0,0);

G4VPhysicalVolume* tyvektop_phys4 =
new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0,0.0,Scint_z/2.+wtyvek/2.),
                  tyvektop_log_c,
                  "tyvektop4",
                  expHall_log,
                  false,
                  4);

//*****
//Tyvek bottom
//*****

//tanque central
G4Tubs* tyvekbotttom_c =
new G4Tubs("tyvekbotttom_c", 0., scint_x/2.+wtyvek,
wtyvek/2., 0.*deg, 360.*deg);//base
G4LogicalVolume* tyvekbotttom_log_c =
new G4LogicalVolume(tyvekbotttom_c,G4Material::GetMaterial("Tyvek"),
"tyvekbotttom_log_c",0,0,0);
G4VPhysicalVolume* tyvekbotttom_phys4 =
new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0,0.0,-Scint_z/2.-wtyvek/2.),
                  tyvekbotttom_log_c,
                  "tyvekbotttom1_c",
                  expHall_log,
                  false,

```

```

4);
//*****
// The Air Bubble
//*****
G4Box* bubbleAir_box = new G4Box("Bubble",fBubble_x,fBubble_y,fBubble_z);

G4LogicalVolume* bubbleAir_log
    = new G4LogicalVolume(bubbleAir_box,air,"Bubble",0,0,0);

//G4VPhysicalVolume* bubbleAir_phys =
//    new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0,2.5*m,0),bubbleAir_log,"Bubble",
//    waterTank_log,false,0);

//-----
//PMTs spere
//-----
G4double sphere_w = 0.5*mm; //sphere_width
G4double cone_w = 0.0*mm; //cone_width
G4double long_cone = 30*cm;//long cone
G4RotationMatrix* rm = new G4RotationMatrix();
rm->rotateY(180*deg);
G4double sshift=outerRadius_pmtL*0.5;

G4Sphere* photocathL =
new G4Sphere("photocathL",outerRadius_pmtL-sphere_w,
outerRadius_pmtL,0.*deg,360.*deg,0.*deg,60.*deg);

G4LogicalVolume* photocath_logL= new G4LogicalVolume(photocathL,
G4Material::GetMaterial("Al"),
"photocath_logL");

//*****
//Aluminum cylinder
//*****
//tanque central
G4Tubs* AlCylinder_c = new G4Tubs("AlCylinder_c",
scint_x/2.+wtyvek,
scint_x/2.+wtyvek + d_mtl,
Scint_z/2.,
0.*deg,
360.*deg);//base
G4LogicalVolume* AlCylinder_log_c =
new G4LogicalVolume(AlCylinder_c,G4Material::GetMaterial("Al"),
"AlCylinder_log_c",0,0,0);

```

```

G4VPhysicalVolume* AlCylider_phys4 = new G4PVPlacement(0,
                                                    G4ThreeVector(0.0,0.0,0.0),
                                                    AlCylinder_log_c,
                                                    "AlCylinder4",
                                                    expHall_log,
                                                    false,
                                                    4);

//-----
//-----PMTs en tanque central-----
//-----
G4VPhysicalVolume* photocatht1_phys_c =
    new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0,0.0, - 0.70*m),
                      photocath_logL,"photocatht1",
                      waterTank_log_c,false,10);
G4VPhysicalVolume* photocatht2_phys_c =
    new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0,0.0, + 0.58*m),
                      photocath_logL,"photocatht1",
                      waterTank_log_c,false,11);


//***** PMT-Sensitive detector *****

/*
G4MultiFunctionalDetector* myScorer = new G4MultiFunctionalDetector("myPMTScorer");
G4SDManager::GetSDMpointer()->AddNewDetector(myScorer);
photocath_logL->SetSensitiveDetector(myScorer);
*/
/*
G4MultiFunctionalDetector* detector = new G4MultiFunctionalDetector("MyDetector");
G4SDManager::GetSDMpointer()->AddNewDetector(detector);
photocath_logL->SetSensitiveDetector(detector);
*/

/*G4VPrimitiveSensitivity* number = new G4PSNofCollision("NofCollision");
detector->Register(number);
*/

/*G4VSensitiveDetector* pSensitivePMT =  new MyDetector("/mydet");
G4SDManager* SDManager = G4SDManager::GetSDMpointer();
SDManager->AddNewDetector(pSensitivePMT);
photocath_logL->SetSensitiveDetector(pSensitivePMT);*/

// PMT SD

```

```

if (!fPmt_SD.Get()) {
    //Created here so it exists as pmts are being placed
    G4cout << "Construction /LXeDet/pmtSD" << G4endl;
    LXePMTSD* pmt_SD = new LXePMTSD("/LXeDet/pmtSD");
    fPmt_SD.Put(pmt_SD);
    pmt_SD->InitPMTs(16); //let pmtSD know # of pmts
    //pmt_SD->SetPmtPositions(fMainVolume->GetPmtPositions());
}

SetSensitiveDetector(photocath_logL, fPmt_SD.Get());

// Scint SD

if (!fScint_SD.Get()) {
    G4cout << "Construction /LXeDet/scintSD" << G4endl;
    LXeScintSD* scint_SD = new LXeScintSD("/LXeDet/scintSD");
    fScint_SD.Put(scint_SD);
}
SetSensitiveDetector(waterTank_log_c, fScint_SD.Get());

// ----- Surfaces -----
//

//
// Generate & Add Material Properties Table attached to the optical surfaces
//
const G4int num = 2;
G4double Ephoton[34] = {
4.960*eV,4.769*eV,4.428*eV,4.133*eV,
3.875*eV,3.647*eV,3.444*eV,3.351*eV,
3.263*eV,3.170*eV,3.100*eV,3.024*eV,
2.952*eV,2.883*eV,2.818*eV,2.755*eV,
2.695*eV,2.583*eV,2.530*eV,2.480*eV,
2.384*eV,2.296*eV,2.138*eV,2.066*eV,
2.00*eV,1.938*eV,1.879*eV,1.823*eV,
1.771*eV,1.722*eV,1.675*eV,1.631*eV,
1.590*eV,1.550*eV};
//
/** Tyvek surface properties
//
G4double TRef[34] ={
0.82,0.86,0.89,0.92,0.94,
0.95,0.95,0.95,0.96,0.96,
0.97,0.97,0.97,0.97,0.97,

```

```

0.97,0.97,0.97,0.97,0.97,
0.97,0.97,0.97,0.97,0.97,
0.97,0.97,0.97,0.97,0.97,
0.97,0.97,0.97,0.97});
//
//Tyvek
//
G4MaterialPropertiesTable* optyvek = new G4MaterialPropertiesTable();
optyvek->AddProperty("REFLECTIVITY", Ephoton, TRef,num);
G4OpticalSurface* OpTyvekSurface =
new G4OpticalSurface("TyvekSurface",unified,polished,dielectric_metal);
OpTyvekSurface->SetMaterialPropertiesTable(optyvek);
/**Create logical skin surfaces
new G4LogicalSkinSurface("tyvekw_surface",tyvek_log_c,OpTyvekSurface);
new G4LogicalSkinSurface("tyvekb_surface",tyvekbotttom_log_c,OpTyvekSurface);
new G4LogicalSkinSurface("tyvekt_surface",tyvektop_log_c,OpTyvekSurface);
//
/**Photocathode surface properties
//
G4double photocath_EFF[num]={0.15,0.18}; //Enables 'detection' of photons
G4double photocath_REFL[num]={0.,0.};
G4MaterialPropertiesTable* photocath_mt = new G4MaterialPropertiesTable();
photocath_mt->AddProperty("EFFICIENCY",Ephoton,photocath_EFF,num);
photocath_mt->AddProperty("REFLECTIVITY",Ephoton,photocath_REFL,num);
G4OpticalSurface* photocath_opsurf=
    new G4OpticalSurface("photocath_opsurf",glisur,polished,
                        dielectric_metal);
photocath_opsurf->SetMaterialPropertiesTable(photocath_mt);

new G4LogicalSkinSurface("photocath_surf",photocath_logL,photocath_opsurf);

//
// Water Tank
//
G4OpticalSurface* opWaterSurface = new G4OpticalSurface("WaterSurface");
opWaterSurface->SetType(dielectric_dielectric);
opWaterSurface->SetFinish(ground);
opWaterSurface->SetModel(unified);

new G4LogicalBorderSurface("WaterSurface",
                        waterTank_phys4,expHall_phys,opWaterSurface);
//
// Air Bubble
//
G4OpticalSurface* opAirSurface = new G4OpticalSurface("AirSurface");
opAirSurface->SetType(dielectric_dielectric);

```

```

opAirSurface->SetFinish(polished);
opAirSurface->SetModel(glisur);

G4LogicalSkinSurface* airSurface =
    new G4LogicalSkinSurface("AirSurface", bubbleAir_log, opAirSurface);

G4OpticalSurface* opticalSurface = dynamic_cast <G4OpticalSurface*>
    (airSurface->GetSurface(bubbleAir_log)->GetSurfaceProperty());

if (opticalSurface) opticalSurface->DumpInfo();

//
// Generate & Add Material Properties Table attached to the optical surfaces
//
G4double ephoton[num] = {2.034*eV, 4.136*eV};

//OpticalWaterSurface
G4double refractiveIndex[num] = {1.35, 1.40};
G4double specularLobe[num]    = {0.3, 0.3};
G4double specularSpike[num]   = {0.2, 0.2};
G4double backScatter[num]     = {0.2, 0.2};

G4MaterialPropertiesTable* myST1 = new G4MaterialPropertiesTable();

myST1->AddProperty("RINDEX",          ephoton, refractiveIndex, num);
myST1->AddProperty("SPECULARLOBECONSTANT", ephoton, specularLobe, num);
myST1->AddProperty("SPECULARSPIKECONSTANT", ephoton, specularSpike, num);
myST1->AddProperty("BACKSCATTERCONSTANT", ephoton, backScatter, num);

G4cout << "Water Surface G4MaterialPropertiesTable" << G4endl;
myST1->DumpTable();

opWaterSurface->SetMaterialPropertiesTable(myST1);

//OpticalAirSurface
G4double reflectivity[num] = {0.3, 0.5};
G4double efficiency[num]   = {0.8, 1.0};

G4MaterialPropertiesTable *myST2 = new G4MaterialPropertiesTable();

myST2->AddProperty("REFLECTIVITY", ephoton, reflectivity, num);
myST2->AddProperty("EFFICIENCY", ephoton, efficiency, num);

G4cout << "Air Surface G4MaterialPropertiesTable" << G4endl;
myST2->DumpTable();

```

```

    opAirSurface->SetMaterialPropertiesTable(myST2);

//central
G4VisAttributes* water_va_c= new G4VisAttributes(G4Colour(0.0, 1.0, 1.0));
waterTank_log_c -> SetVisAttributes(water_va_c);
water_va_c -> SetForceAuxEdgeVisible (true); //visualización del cilindro
water_va_c -> SetForceWireframe(true);
water_va_c -> SetForceSolid(false);
water_va_c -> SetVisibility(true);

//always return the physical World

G4VisAttributes* photocath_vaL= new G4VisAttributes(G4Colour::Yellow()) ;
photocath_logL -> SetVisAttributes(photocath_vaL);
photocath_vaL-> SetForceSolid(true);
photocath_vaL-> SetVisibility(true);

//central
G4VisAttributes* tyvek_blue_c= new G4VisAttributes(G4Colour(0.0, 1.0, 1.0)) ;
tyvek_log_c -> SetVisAttributes(tyvek_blue_c);
tyvek_blue_c-> SetForceSolid(true);
tyvek_blue_c-> SetVisibility(true);

    return expHall_phys;
}

```

B.3. LXePMTSD

```

#include "LXePMTSD.hh"
#include "LXePMTHit.hh"
#include "OpNoviceDetectorConstruction.hh"
#include "LXeUserTrackInformation.hh"
#include "OpNovicePrimaryGeneratorAction.hh"

#include "G4VPhysicalVolume.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4Track.hh"
#include "G4Step.hh"
#include "G4VTouchable.hh"
#include "G4TouchableHistory.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "G4ParticleTypes.hh"
#include "G4ParticleDefinition.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"

```



```

#include "G4SystemOfUnits.hh"

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <stdlib.h>
#include <string>
using namespace std;

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

LXePMTSD::LXePMTSD(G4String name)
: G4VSensitiveDetector(name),fPMTHitCollection(0),fPMTPositionsX(0)
,fPMTPositionsY(0),fPMTPositionsZ(0)
{
    collectionName.insert("pmtHitCollection");
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

LXePMTSD::~~LXePMTSD() {}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....
void LXePMTSD::SetPmtPositions(const std::vector<G4ThreeVector>& positions)
{
    for (G4int i=0; i<G4int(positions.size()); ++i) {
        if(fPMTPositionsX)fPMTPositionsX->push_back(positions[i].x());
        if(fPMTPositionsY)fPMTPositionsY->push_back(positions[i].y());
        if(fPMTPositionsZ)fPMTPositionsZ->push_back(positions[i].z());
    }
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

void LXePMTSD::Initialize(G4HCofThisEvent* hitsCE){
    fPMTHitCollection = new LXePMTHitsCollection
        (SensitiveDetectorName,collectionName[0]);
    //Store collection with event and keep ID
    static G4int hitCID = -1;
    if(hitCID<0){
        hitCID = GetCollectionID(0);
    }
    hitsCE->AddHitsCollection( hitCID, fPMTHitCollection );
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

```

```

G4bool LXePMTSD::ProcessHits(G4Step* ,G4TouchableHistory* ){
    return false;
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

//Generates a hit and uses the postStepPoint's mother volume replica number
//PostStepPoint because the hit is generated manually when the photon is
//absorbed by the photocathode

G4bool LXePMTSD::ProcessHits_constStep(const G4Step* aStep,
                                         G4TouchableHistory* ){

    //need to know if this is an optical photon
    if(aStep->GetTrack()->GetDefinition()
        != G4OpticalPhoton::OpticalPhotonDefinition()) return false;

    //User replica number 1 since photocathode is a daughter volume
    //to the pmt which was replicated
    G4double t1= aStep->GetPostStepPoint()->GetGlobalTime();
    G4int pmtNumber=
        aStep->GetPostStepPoint()->GetTouchable()->GetReplicaNumber();
    G4VPhysicalVolume* physVol=
        aStep->GetPostStepPoint()->GetTouchable()->GetVolume(1);

    //How far is the PE from the PMT's center
    G4int repNo =
        aStep->GetPostStepPoint()->GetTouchable()->GetReplicaNumber();

    G4int tankNo =
        aStep->GetPostStepPoint()->GetTouchable()->GetVolume(1)->GetCopyNo();

    double posX =
        aStep->GetPostStepPoint()->GetPosition().x();

    double posY =
        aStep->GetPostStepPoint()->GetPosition().y();
    //in cm
    posX = posX/10.;
    posY = posY/10.;

    //move PE from tank 2 & 3
    // if(tankNo==2){posX = posX - 2474.;}

```

```

// if(tankNo==3){posX = posX - 1756.;
//                posY = posY + 2164.;}
//if(tankNo==4){posX = posX ;
//                posY = posY ;

//}

//get distance from PE's position to PMT's center

//posX = abs(posX);
//posY = abs(posY);

double radi;

//if (tankNo==4)
//{
//    //cout<<posX<<" " <<posY<<endl;
//    // radi = sqrt((posX)*(posX)+(posY)*(posY));
//}
//else {radi = sqrt((posX-203.)*(posX-203.)+(posY-203.)*(posY-203.));}
//radi = sqrt((posX-203.)*(posX-203.)+(posY-203.)*(posY-203.));
radi = sqrt((posX)*(posX)+(posY)*(posY));
    ifstream inc("ya.dat",ios::in);
    ofstream dat("dato.dat",ios::app);

        if (inc.good())
        { string sLine;
          getline(inc, sLine);
          dat<<sLine;}
//G4cout<<tankNo<<" "<<repNo<<" "<<posX<<" "<<posY<<G4endl;
dat<<" "<<tankNo<<repNo<<" "<<radi<<" "<<posX<<" "<<posY<<endl;

//Find the correct hit collection
G4int n=fPMTHitCollection->entries();
LXePMTHit* hit=NULL;
//ofstream cosa("time.txt",ios::app);
//G4double test = t1/ns;
//cosa<<tankNo<<" "<<repNo<<" "<<test<<G4endl;
for(G4int i=0;i<n;i++){
    if((*fPMTHitCollection)[i]->GetPMTNumber()==pmtNumber){
        hit=(*fPMTHitCollection)[i];
        break;
    }
}

if(hit==NULL){//this pmt wasnt previously hit in this event

```

```

    hit = new LXePMTHit(); //so create new hit
    hit->SetPMTNumber(pmtNumber);
    hit->SetPMTPhysVol(physVol);
    hit->SetTime(t1);
    fPMTHitCollection->insert(hit);
    hit->SetPMTPos((*fPMTPositionsX)[pmtNumber],(*fPMTPositionsY)[pmtNumber],
                  (*fPMTPositionsZ)[pmtNumber]);
}

hit->IncPhotonCount(); //increment hit for the selected pmt

/* if(!LXeDetectorConstruction::GetSphereOn()){
    hit->SetDrawit(true);
    //If the sphere is disabled then this hit is automatically drawn
}
else{//sphere enabled
    LXeUserTrackInformation* trackInfo=
        (LXeUserTrackInformation*)aStep->GetTrack()->GetUserInformation();
    if(trackInfo->GetTrackStatus()&hitSphere)
        //only draw this hit if the photon has hit the sphere first
        hit->SetDrawit(true);
}*/

return true;

}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

void LXePMTSD::EndOfEvent(G4HCofThisEvent* ) {}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

void LXePMTSD::clear() {}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

void LXePMTSD::DrawAll() {}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

void LXePMTSD::PrintAll() {}

```

Bibliografía

- [1] Peter KF Grieder. *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects-A Tutorial, Reference Manual and Data Book*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] Alejandro Nava Martinez. Simulación del experimento lago en sierra negra. 2012.
- [3] Alessandro De Angelis and Mário João Martins Pimenta. *Introduction to Particle and Astroparticle Physics: Questions to the Universe*. Springer, 2015.
- [4] Malagabay. cosmic-ray-spectrum-gap. url <https://malagabay.wordpress.com/2014/05/31/carbon-14-seeing-the-light/cosmic-ray-spectrum-gap-2/>, May 31, 2014.
- [5] Juan Carlos Díaz Vélez Berghouse. *ANISOTROPÍA DE RAYOS CÓSMICOS A ENERGÍAS DE 10 TEV CON LOS DETECTORES ICECUBE Y HAWC*. PhD thesis, Universidad de Guadalajara, 2017.
- [6] Pablo M Bauleo and Julio Rodríguez Martino. The dawn of the particle astronomy era in ultra-high-energy cosmic rays. *Nature*, 458(7240):847, 2009.
- [7] Florencia Vieyro. Erupciones de rayos gamma. *Boletín Radio@stronómico*, 11, 2013.
- [8] Hubble Site. The hubble classification of galaxies, 2008.
- [9] F Aharonian, Ashot G Akhperjanian, AR Bazer-Bachi, Matthias Beilicke, W Benbow, David Berge, K Bernlöhr, Catherine Boisson, O Bolz, V Borrel, et al. Hess observations of the supernova remnant rx j0852. 0–4622: Shell-type morphology and spectrum of a widely extended very high energy gamma-ray source. *The Astrophysical Journal*, 661(1):236, 2007.
- [10] Marcos López Moya. *Astronomía Gamma con el Telescopio MAGIC: Observaciones de la Nebulosa y Pulsar del Cangrejo*. PhD thesis, Ph. D. thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2006.
- [11] N Budnev, I Astapov, N Barbashina, A Bogdanov, D Bogorodskii, V Boreyko, M Büker, M Brückner, A Chiavassa, O Chvalaev, et al. The tunka detector complex: from cosmic-ray to gamma-ray astronomy. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 632, page 012034. IOP Publishing, 2015.
- [12] J Cando and C Rosero. *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN AUTÓNOMA DE MONITOREO DE RAYOS CÓSMICOS Y VARIABLES AMBIENTALES*. PhD thesis, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [13] Hamamatsu Photonics. Photomultiplier tubes: Basics and applications. *Edition 3a*, 310, 2007.

- [14] RONO Bienes Raices. Ecuador, américa. url<http://mapasdecostarica.blogspot.com/2012/03/ecuador.html>, 30th March 2012.
- [15] RONO Bienes Raices. Descubren 'anomalía del atlántico sur' que debilita campo magnético de la tierra. url<https://www.milenio.com/ciencia-y-salud/anomalia-atlantico-sur-campo-magnetico-tierra-debilita>, January 2019.
- [16] Dieter Heck, Tanguy Pierog, and Johannes Knapp. Corsika: An air shower simulation program. *Astrophysics Source Code Library*, 2012.
- [17] GEANT Collaboration, S Agostinelli, et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 506(25):0, 2003.
- [18] Malcolm S Longair. *High energy astrophysics*. Cambridge university press, 2011.
- [19] Pavel A Cherenkov. Visible emission of clean liquids by action of γ radiation. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 2(451):252, 1934.
- [20] Hector Dominguez. *Nuestra atmósfera: cómo comprender los cambios climáticos*. LD Books, 2004.
- [21] Andrés Delgado. Caracterización de los detectores cherenkov de agua de lago-méxico mediante simulación, para la determinación del área efectiva de partículas secundarias generadas por un gamma primario de energías entre 200 gev y 1.1 tev. Master's thesis, 2017.
- [22] JM Fierro, Z Arzoumanian, M Bailes, JF Bell, DL Bertsch, KTS Brazier, J Chiang, N D'Amico, BL Dingus, JA Esposito, et al. Egret high-energy gamma-ray pulsar studies. ii. individual millisecond pulsars. *The Astrophysical Journal*, 447:807, 1995.
- [23] IceCube Collaboration et al. Neutrino emission from the direction of the blazar txs 0506+ 056 prior to the icecube-170922a alert. *Science*, 361(6398):147–151, 2018.
- [24] Aline Galindo Téllez. *CALIBRACIÓN E INSTALACIÓN DE UN DETECTOR CHERENKOV DE AGUA DEL SITIO LAGO SIERRA NEGRA*. PhD thesis, PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- [25] Stephany Elizabeth Vargas Piedra. Implementación y calibración de un detector terrestre cherenkov de agua para rayos cósmicos en la escuela politécnica nacional. B.S. thesis, Quito, 2016., 2016.
- [26] Silvia Vernetto. Detection of gamma-ray bursts in the 1 gev–1 tev energy range by ground-based experiments. *Astroparticle physics*, 13(1):75–86, 2000.
- [27] R Atkins, W Benbow, D Berley, ML Chen, DG Coyne, BL Dingus, DE Dorfan, RW Ellsworth, D Evans, A Falcone, et al. The high-energy gamma-ray fluence and energy spectrum of grb 970417a from observations with milagrito. *The Astrophysical Journal*, 583(2):824, 2003.
- [28] G Aielli, C Bacci, F Barone, B Bartoli, P Bernardini, XJ Bi, C Bleve, P Branchini, A Budano, S Bussino, et al. Scaler mode technique for the argo-ybj detector. *Astroparticle Physics*, 30(2):85–95, 2008.