



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS**

**“SIMULACIÓN EN MONTECARLO PARA UN
DETECTOR HÍBRIDO DE RAYOS CÓSMICOS”**

DIRECTOR:

Dr. Eduardo Moreno Barbosa.

ASESOR:

Dr. Ibrahim Daniel Torres Aguilar.

TESIS

Para Obtener el Grado de
Licenciado en Física.

PRESENTA:

C. Darío González Herrera

Puebla, Pue. 2 de Julio de 2019.

A mis queridos padres.

Resumen

Una manera de detectar Rayos C3smicos es detectando la cascada de part3culas provocada por el choque de los rayos primarios con la atm3sfera terrestre. Para conocer la identidad del rayo primario se calcula la raz3n de los e^\pm sobre los μ^\pm que llegan al arreglo de detectores pero individualmente ning3n detector que utilice solamente el efecto Cherenkov es capaz de distinguir entre 3stas part3culas. En 3sta tesis se presenta la simulaci3n y dise1o de dos modelos para un detector de part3culas que funciona con el efecto Cherenkov en el agua y el de Centelleo as3 como un an3lisis estad3stico de las diferentes se1ales producidas (dependiendo solamente de la energ3a) por e^+ y μ^+ incidiendo verticalmente sobre el detector.

Índice

Resumen	II
Índice de figuras	V
1. Introducción a los Rayos Cósmicos	1
1.1. Historia y Definición de los Rayos Cósmicos	1
1.2. Fuentes de Radiación	5
1.2.1. Procesos físicos	5
1.2.2. Supernovas	7
1.2.3. Galaxias con Núcleo Activo	7
1.3. Fenomenología de las Cascadas Atmosféricas	8
1.3.1. Introducción	8
1.3.2. Cascadas Atmosféricas iniciadas por Hadrónes	8
1.3.3. Cascadas Atmosféricas iniciadas por Rayos Gamma y Electrones	10
2. Detección de Cascadas Atmosféricas	12
2.1. Introducción a la Detección de Cascadas Atmosféricas	12
2.2. Efecto Cerenkov	13
2.3. Plástico Centellador	16
3. Método de Monte Carlo para la Simulación de Eventos de Altas Energías	18
3.1. Método de Montecarlo	18
3.2. GEANT4	19
3.2.1. Introducción	19
4. Simulación y Diseño del Detector Híbrido	22
4.1. Estructura y Materiales del Detector	22
4.1.1. Tanque con agua	23
4.1.2. Plástico Centellador	24
4.1.3. Recubrimiento Tyvek	26
4.1.4. Fotomultiplicadores	27
4.2. Procesos Físicos	29
4.2.1. Efecto Fotoeléctrico	29

4.2.2.	Disperción de Rayleigh	30
4.3.	Construcción de Histogramas	30
4.4.	Eventos	31
5.	RESULTADOS	35
5.1.	Histogramas	35
5.2.	Gráficas	36
5.2.1.	Detector con el Plástico Centellador instalado en la cima.	37
5.2.2.	Gráficas para el Detector con el Plástico Centellador instalado en el fondo.	40
6.	CONCLUSIONES	43
7.	BIBLIOGRAFÍA	44

Índice de figuras

1.	Gráfica del Flujo de Rayos Cósmicos (M Nagano,2009).	3
2.	Abundancia Química (Gille Ferrand, 2007)	4
3.	Cascada Producida por un Protón (Grieder, 2010)	9
4.	Simulación de Cascadas Atmosféricas para un γ , Protón y Núcleo de Fe (KASCADE group).	11
5.	Estructura de una Cascada Atmosférica (Greider,2010).	12
6.	Apreciación del caso cuando $v < (\frac{c}{n})$ y a la derecha cuando $v > (\frac{c}{n})$ (Antonio, 2017)	14
7.	Construcción de Huygens (Antonio,2017)	14
8.	Índices de Refracción y Energía umbral (Antonio,2017)	15
9.	Corrimiento de Stokes.	17
10.	Diagrama a bloques de una aplicación en Geant4 [20].	20
11.	Clases en Geant4 (Geant4 Collaboration)	21
12.	Tanque con agua (azul) para el Detector con el Centellador instalado en la parte inferior.	24
13.	Detector con el Plástico Centellador (rojo) instalado en el fondo.	25
14.	Detector con el Plástico Centellador (rojo) instalado en la cima.	26
15.	Vista de un Muro de Tyvek (blanco) instalado dentro del detector.	27
16.	Vista transversal del Detector con el Centellador (amarillo) en el fondo. Los Fotomultiplicadores se aprecian en rojo.	28
17.	Vista transversal del Detector con el Centellador (amarillo) en la cima. Los Fotomultiplicadores se aprecian en rojo.	28
18.	Arreglo de Fotomultiplicadores (amarillo).	29
19.	Histograma para un e^+ a 1150 MeV que muestra el tiempo de llegada de los fotones producidos en el Plástico Centellador a su respectivo fotomultiplicador.	32
20.	Se observa un e^+ incidiendo en el detector con el Plástico Centellador instalado en la Cima. Se observa la radiación Cherenkov (verde) y la de Centelleo (morado) y cómo ambas están confinadas.	32
21.	Se observa a un μ^+ (línea roja) incidiendo en el detector con el Plástico Centellador instalado en el fondo.	33

22.	Ajuste Gaussiano para el histograma correspondiente a los valores de la desviación estándar para 1000 e+ a 1150 MeV. .	34
23.	Histograma de 1000 e+ con energía inicial de 550 MeV. . . .	36
24.	Gráfica de la Desviación Estándar de los histogramas del tiempo de arribo.	37
25.	Gráfica del Tiempo de arribo de los Fotones.	38
26.	Gráfica del Número de Fotones detectados.	39
27.	Gráfica de La Desviación Estándar.	40
28.	Gráfica del Tiempo de Arribo.	41
29.	Gráfica del Número de Fotones.	42

1. Introducción a los Rayos Cósmicos

1.1. Historia y Definición de los Rayos Cósmicos

A principios del siglo XX, los físicos alemanes Julius Elster y Hans Friedrich [1] observaron mediante un electroscoPIO la presencia de iones en el aire dentro del vaso de Vessel (cerrado) del instrumento. La causa de esa ionización quedó como una incógnita. Casi al mismo tiempo, otro físico escocés, Charles Wilson [2] llegó a la misma conclusión del aire ionizado y propuso la existencia de fuentes de radiación fuera de la atmósfera.

Años más tarde en 1911, el físico austriaco Víctor Hess realizó una serie de experimentos utilizando electroscoPIOS mejorados y un globo aerostático. Logró medir la ionización de la atmósfera desde el nivel de tierra hasta una altura aproximada de 5 350 m [3].

Victor Hess pronunció que tenía más sentido pensar que la fuente de radiación viniera desde arriba cuyo origen estaría en alguna fuente en el espacio. También observó que los resultados eran los mismos de día o de noche, incluso con o sin eclipse solar [3].

Tras décadas de investigación, se ha podido medir aproximadamente el porcentaje de partículas que llegan a nuestra atmósfera. Dando así a descubrimientos como el positrón [4], el pión, muón entre otros. Haciendo la primera mitad del siglo XX, de gran importancia estudiar los rayos cósmicos para tener avances en la física de partículas ya que no se desarrolló tecnología suficiente para tener potentes aceleradores hasta después de los 50's.

Actualmente, la energía más alta jamás alcanzada por un acelerador de partículas es de 1.3×10^{13} eV en el centro de masa para un protón mientras que el Rayo Cósmico (registrado) más energético es de 10^{20} eV.

Por circunstancias históricas, a los núcleos incidentes en la atmósfera se les llama Rayos Cósmicos (RC) y a los fotones muy energéticos se les denomina Rayos Gamma (RG).

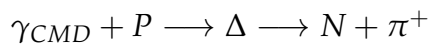
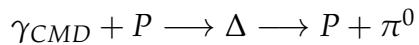
La composición de Rayos Cósmicos predominantemente son núcleos de

Hidrógeno (con diferentes números de Neutrones) y de Helio, 90% y 9%, respectivamente. El resto corresponde a los elementos faltantes.

Es muy difícil poder localizar la fuente de radiación que emite rayos cósmicos, a pesar de poder conocer la dirección de incidencia en la atmósfera. Esto se debe a que viajan a través de muchos campos magnéticos que encuentran en su camino en el espacio provocando que las partículas cargadas y iones experimentan una deflexión en su trayectoria.

Actualmente, luego de muchos arreglos experimentales como el Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger[5] o como el Observatorio de Neutrinos del Polo Sur IceCube [6] y años de toma de datos, se ha podido cuantificar estadísticamente la distribución del flujo de RC respecto a su energía, es decir, número de partículas por Estereoradián metro cuadrado energía y segundos. La figura 1 muestra tal distribución.

Teóricamente se ha propuesto que para los protones de muy alta energía, de al menos $5,4 \times 10^{19}$ eV, puedan interactuar con el Fondo Cósmico de Microondas (CMB por sus siglas en Inglés) provocando una producción de piones mediante la resonancia del baryon Δ [7] [8]:



A lo que puede existir un límite en la medición de la energía para los protones. Los Neutrones pueden decaer en fotones ultraenergéticos. Tal modelo se le conoce como el Límite GZK por Greisen-Zatsepin-Kusmin [7] [8]. Hasta el momento se han medido eventos que superan éste límite pero aún no se tiene una explicación concreta.

También en los Rayos Cósmicos podemos encontrar Neutrinos, una partícula de la que se sabe muy poco sobre su masa y el tipo de neutrino que es (Majorana o de Dirac). Pero ya existen importantes Observatorios de Neutrinos que han descubierto la oscilación de su carga sabor implicando que los Neutrinos tengan una masa (muy pequeña) y que se seguirá explorando nuevas fronteras.

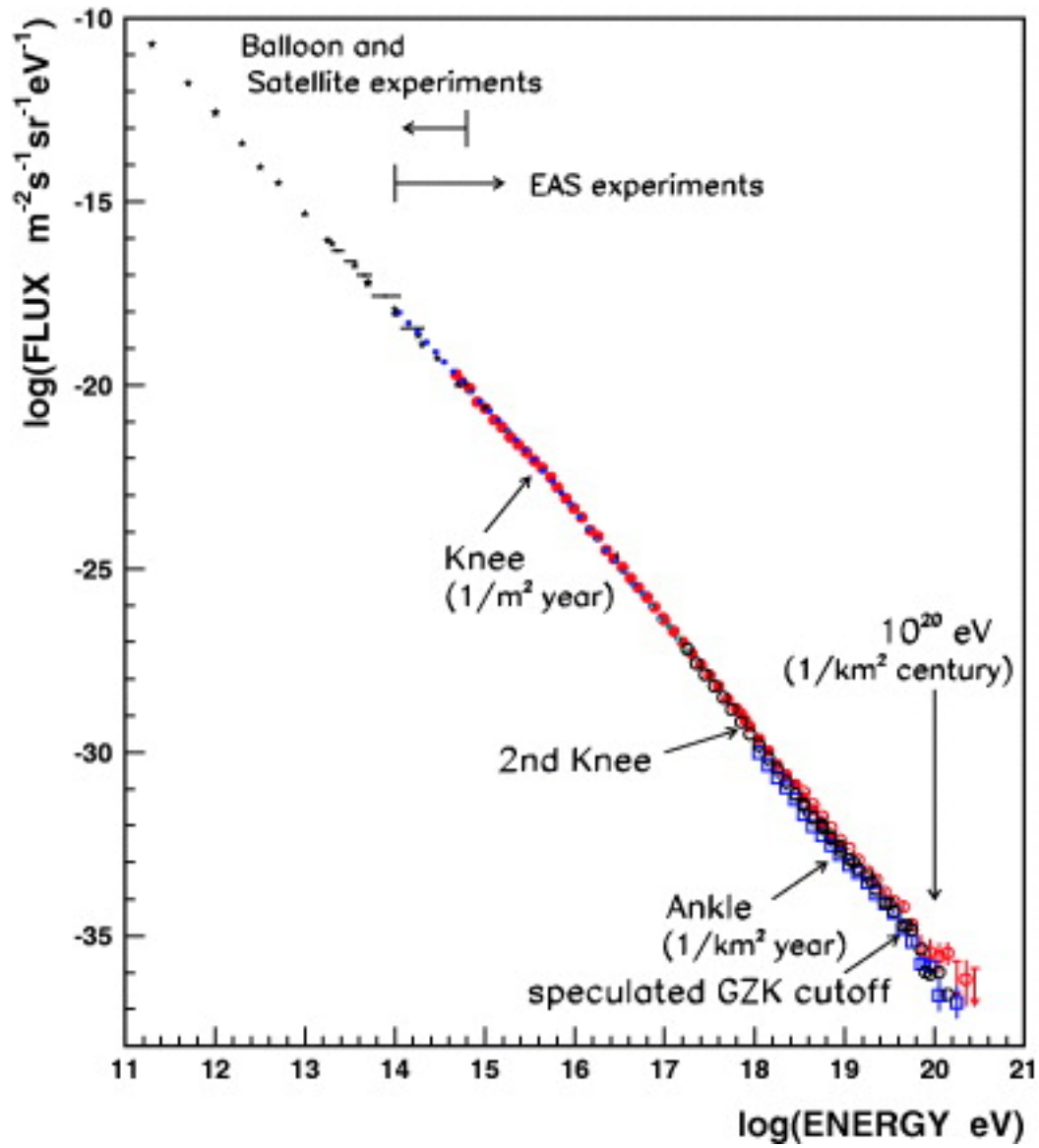


Figura 1: Gráfica del Flujo de Rayos Cósmicos (M Nagano,2009).

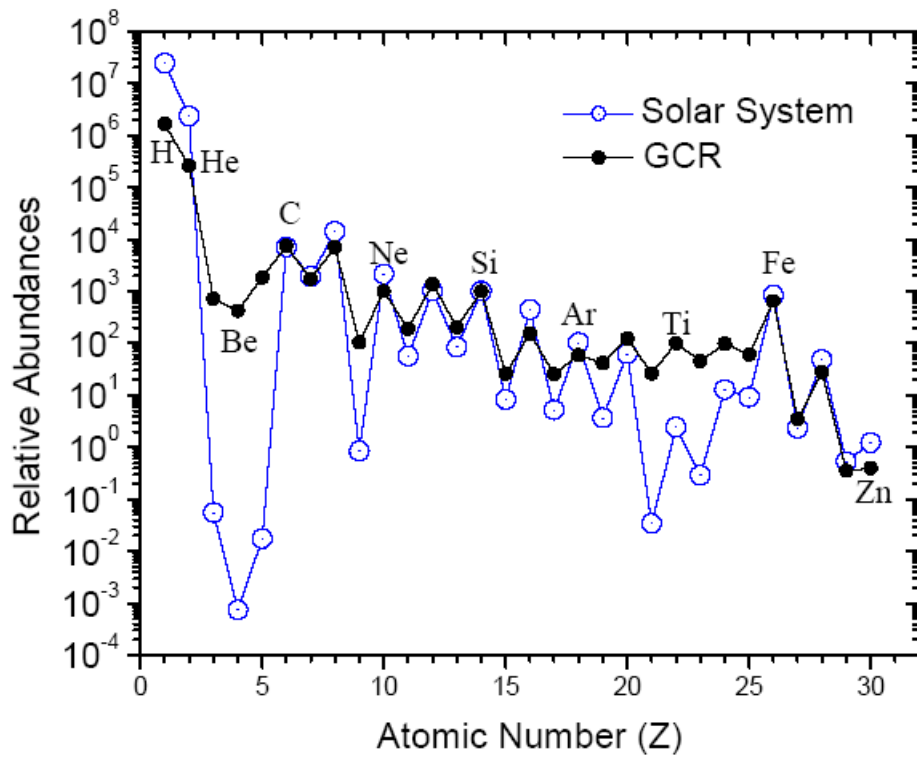


Figura 2: Abundancia Química (Gille Ferrand, 2007)

También se conoce la abundancia química de los Rayos Cósmicos Galácticos que cuando se compara con la abundancia química de nuestro Sol (Ver Figura 2), la diferencia es muy poca en algunos elementos pero en el caso del Berilio (Be) o del Titanio (Ti) la diferencia es notable, lo cual podría dar información de la abundancia de ciertos tipos de eventos galácticos.

1.2. Fuentes de Radiación

1.2.1. Procesos físicos

Luego de construir aceleradores de partículas, los Físicos de Altas Energías abandonaron parcialmente el estudio de los rayos cósmicos durante la segunda mitad del siglo XX. Han sido varias las preguntas que han surgido acerca del mecanismo de producción, aceleración y sus orígenes así que surgió la idea de utilizar a los RC para hacer observaciones astronómicas, una actividad que aún se realiza.

La Intensidad de los RC cuya energía E es $10^{10} < E < 3 \times 10^{15}$ eV es bien aproximada [27] a:

$$I_{CR} = [E(\text{GeV})]^{-1,7} \cdot \frac{\text{Particulas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}} \quad (1)$$

Para RC con energías E , $3 \times 10^{15} < E < 3 \times 10^{18}$ eV, la intensidad se describe aproximadamente [27] por:

$$I_{CR} = 3 \times 10^{-10} \left[\frac{E(\text{GeV})}{10^6} \right] \cdot \frac{\text{Particulas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}} \quad (2)$$

Antes de la primera **rodilla** (knee) en el espectro de la Figura 1. Se adjudican como causas de la aceleración de los RC a eventos violentos como supernovas dentro de nuestra galaxia. Para energías menores a 10^{10} eV el principal contribuyente es nuestro Sol. Se cree que la mayoría de los eventos provienen de Galaxias de Núcleo Activo y eventos explosivos de grandes escalas.

También se puede encontrar una contribución en la banda del microondas correspondiente a la desaceleración de los electrones a causa de grandes campos magnéticos en el espacio. Otras partículas cargadas en el espacio emiten radiación sincrotrón en la banda de radio y también en los gammas. La siguiente expresión [9] muestra la frecuencia máxima de la radiación electromagnética emitida por una partícula de masa m con una energía E y magnitud de carga eléctrica q atravesando un campo magnético homogéneo de magnitud H :

$$\nu_m = 0,07 \times \frac{qH_{\perp}}{mc} \times \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \quad (3)$$

O para un electrón [27]:

$$\nu_m = 4,6 \times 10^{-16} H_{\perp} [E(eV)]^2 \cdot \text{hz} \quad (4)$$

Los RC también emiten radiación electromagnética por Efecto Compton inverso, cuando un electrón libre se acerca a un Fotón, éste último puede aumentar su frecuencia si el electrón tiene suficiente energía. La siguiente ecuación (considerando al electrón en reposo) representa éste hecho:

$$\left[hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) + m_e c^2 \right]^2 = m_e^2 c^4 + c^2 p^2 \quad (5)$$

Dónde λ y λ' es la longitud de onda del electrón antes y después de interactuar, respectivamente. Además, m_e es la masa del electrón y p es su momento luego de la interacción.

Al momento existen varios mecanismos propuestos para la aceleración de núcleos pero todavía queda por explicar las causas de los RC de más alta energía. Uno de estos mecanismos es el mecanismo de Fermi de Primer Orden [10] [11], que explica aproximadamente bien el número de partículas con respecto a la energía para RC galácticos.

Tal mecanismo, especula que las partículas cargadas atravesando ondas de choque de un campo magnético puede ser deflectada una y otra vez hasta poder ganar suficiente energía. Éste mecanismo proporciona un espectro de partículas:

$$\frac{dN(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \varepsilon^{-\alpha} \quad (6)$$

Dando $\alpha \approx 2$. No muy diferente para el valor de RC extragalácticos observados con $\alpha \approx 2.7$.

1.2.2. Supernovas

Se considera que la mayor parte de los RC con energía entre 10^8 y 10^{17} eV provienen de remanentes de Supernovas. Ya que el Sol tiene una contribución muy mínima a esas escalas de energía y las Supernovas son los eventos más violentos en la galaxia.

Para llegar a ésta propuesta, los astrónomos realizaron un registro de la luminosidad de todas las estrellas de nuestra galaxia y ni todos ellos sumados producen la suficiente potencia para las partículas.

El término Supernova fué propuesto por los astrónomos Walter Baade y Fritz Zwicky en 1931. Además que las relacionaron con las estrellas de Neutrones y fuentes importantes de RC[12]. Las Supernovas pueden ocurrir de al menos dos maneras:

- Una estrella que ha consumido todo su combustible presenta una inestabilidad en su tamaño ya que la presión de degeneración de Electrones no puede sostener el peso de la estrella haciéndola colapsar. Luego, vuelven a aparecer nuevas reacciones nucleares que hacen estallar las capas superiores de la estrella generando una onda de choque (remanente) que viaja en muchas direcciones.
- La segunda forma y también más violenta de generar una Supernova es cuando una estrella enana blanca perteneciente a un sistema binario, absorbe la masa de su compañera superando el límite de Chandrasekhar, a lo que crea una muy fuerte explosión que puede liberar todo su material.

1.2.3. Galaxias con Núcleo Activo

A la fecha se discute exáctamente el rango de energía para RC provenientes de Galaxias con Núcleo Activo (AGN's en inglés) pero se acepta a éste tipo de galaxias como principal contribuyente para energías mayores a 10^{17} eV.

Las AGN's son los objetos más luminosos que se conocen. Son galaxias que pueden emitir predominantemente en cierto ancho de banda. Se asume que cada una posee un agujero negro supermasivo en su centro que

expulsa grandes cantidades de gas y polvo.

1.3. Fenomenología de las Cascadas Atmosféricas

1.3.1. Introducción

En 1938 los físicos Pierre Auger y J. Daudin descubrieron las Cascadas Atmosféricas Extensas [13] (EAS en inglés). Luego de décadas de investigación, se ha aprendido mucho sobre la fenomenología de la EAS así también sobre cómo identificar el rayo primario (el Rayo Cósmico que golpea primero la atmósfera).

Cuando una partícula, ya sea un núcleo o un fotón, choca con la atmósfera produce una reacción en cadena de partículas viajando en dirección al suelo, a éste fenómeno se le conoce como Cascadas Atmosféricas Extendidas. Actualmente se ha desarrollado mucho las técnicas de detección de las partículas secundarias así como la física detrás de las EAS luego de construir observatorios astronómicos para medir el flujo de RC a partir de las cascadas atmosféricas.

Como es de esperarse, muchos aspectos físicos de nuestro planeta y atmósfera influyen en la detección de partículas secundarias. Por ejemplo, el campo magnético del punto de observación, la altura sobre el nivel del mar, temperatura, etc.

Debemos tener en cuenta que la composición química de la atmósfera es 78 % Nitrógeno, 21 % Oxígeno y el resto se atribuye por conveniencia al Argón.

1.3.2. Cascadas Atmosféricas iniciadas por Hadrónes

Para que un hadrón pueda generar una EAS debe tener una energía mayor a 10^{13} eV [28]. Dada las colisiones con los núcleos de la atmósfera, predominantemente las partículas secundarias serán hadrones.

El muón es una partícula muy recurrente en las EAS, ya que hay un amplio espectro de partículas que pueden decaer en uno o en pares de μ^+ y μ^- . Además, ésta partícula tiene una pequeña sección transversal, es

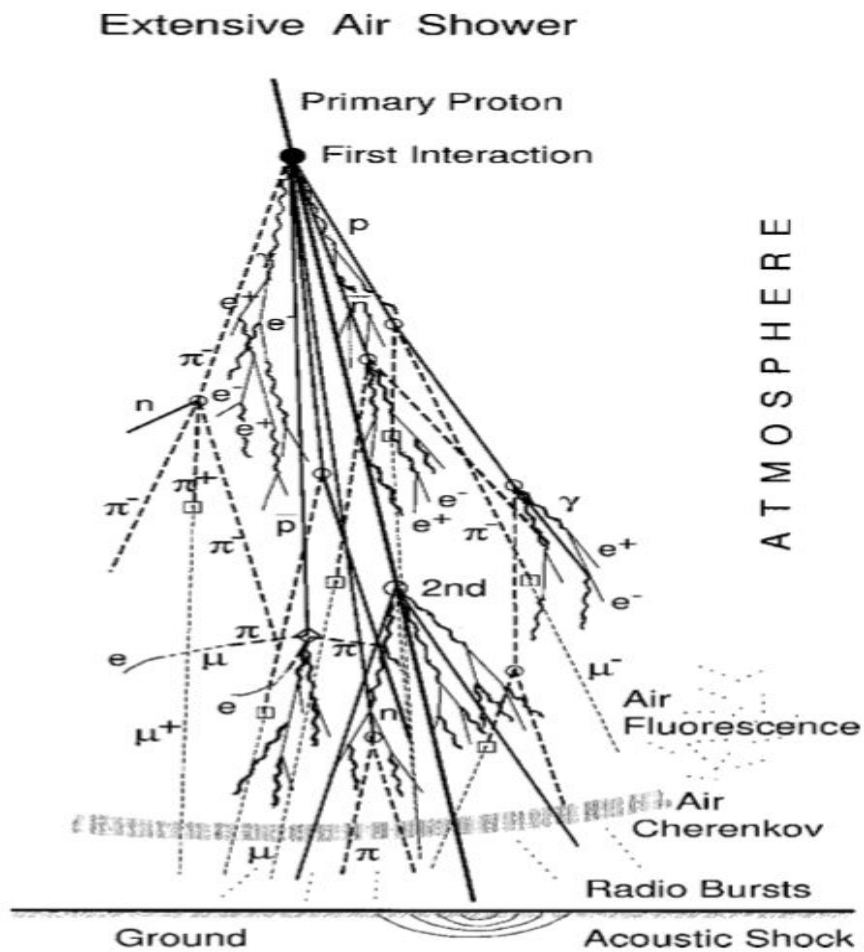


Figura 3: Cascada Producida por un Protón (Grieder, 2010)

decir, puede atravesar grandes capas de aire con una energía en escala de GeV. Por ejemplo, un μ^+ con 4 GeV puede pasar hasta 8 km de aire.

En una EAS se presentan fenómenos como luminiscencia, efecto Cherenkov, bremsstrahlung, efecto Compton entre otros. En la figura 3 podemos apreciar una cascada iniciada por un protón.

1.3.3. Cascadas Atmosféricas iniciadas por Rayos Gamma y Electrones

Para que un rayo gamma pueda generar una EAS debe tener una energía mayor a 1 TeV [28]. Los rayos gamma son muy importantes en la astronomía porque no son deflectados por los campos magnéticos como pasa con las partículas cargadas, incluso se piensa que nos pueden dar mucha información sobre el origen de éstas últimas (Cocconi,1960).

Los principales impedimentos para la propagación de radiación gamma en el medio interestelar[14] son:

- Interacción con campos de fotons como el Fondo Cósmico de Microondas.
- Interacciones fotonucleares con el medio interestelar.
- Producción de electrones por campos Magnéticos.

Existen varias diferencias entre las EAS iniciadas por hadrones y las de rayos gamma.

- Las cascadas de Rayos Gamma (RG) son más estrechas que la de los hadrones con una energía similar.
- Para los RG, las cascadas tienen un núcleo con muy pocos hadrones.
- No hay tantas fluctuaciones para los RG.
- El contenido de muones es de 99 % menor para las EAS de los RG que para los hadrones.

En el caso de que el rayo primario sea un electrón su cascada es prácticamente indistinguible a pesar que al principio casi toda su componente es electrónica. Éstos electrones son formados por colisiones de otro RC con el medio interestelar y si tienen una energía mayor que 1 TeV muy probablemente no llegarán a la tierra.

La diferencia en la componente muónica de las cascadas atmosféricas nos será de mucha utilidad para el diseño del detector de partículas híbrido.

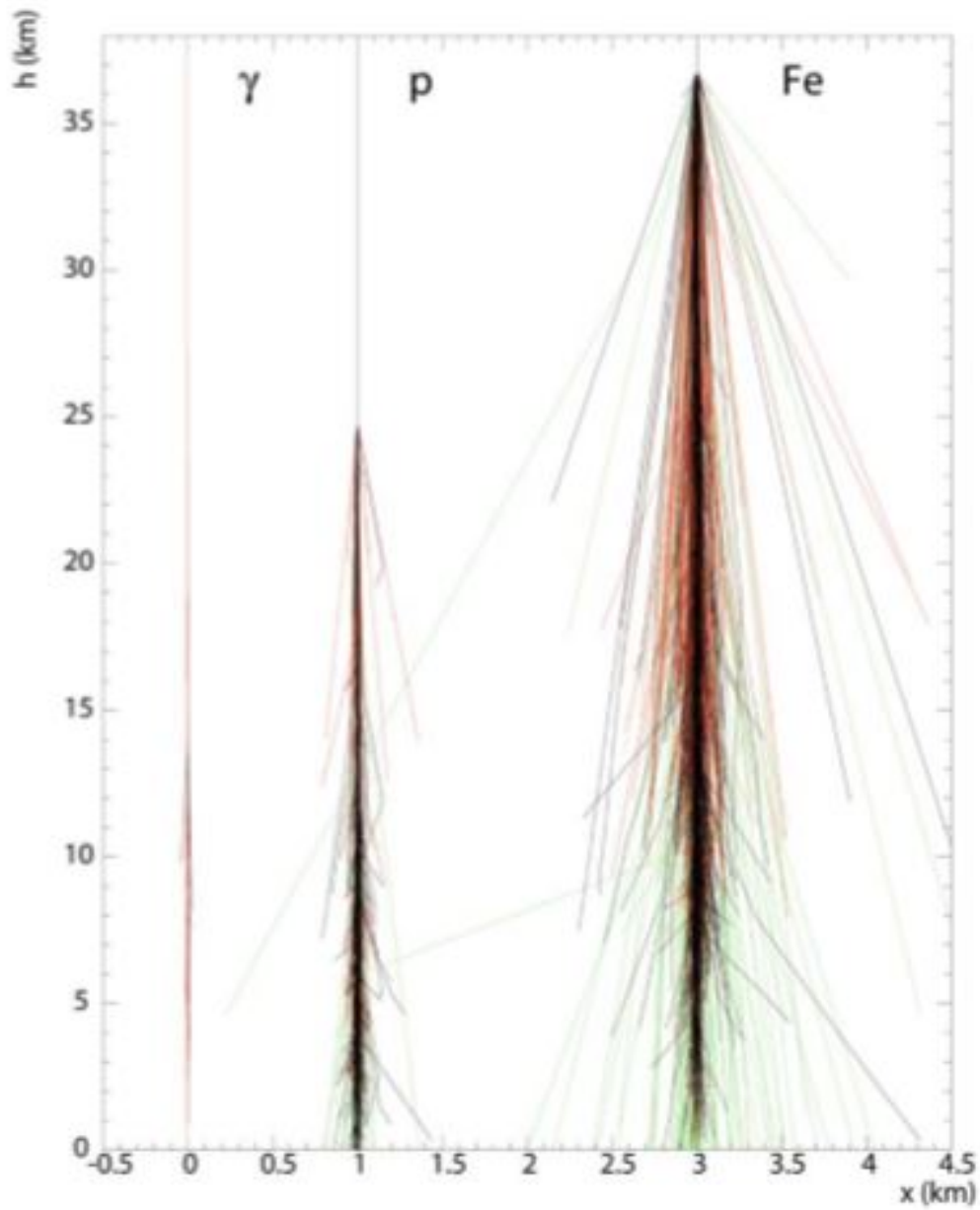


Figura 4: Simulación de Cascadas Atmosféricas para un γ , Protón y Núcleo de Fe (KASCADE group).

2. Detección de Cascadas Atmosféricas

2.1. Introducción a la Detección de Cascadas Atmosféricas

Puesto que cuando las partículas viajan por la atmósfera emiten radiación en longitudes de radio o se mueven suficientemente rápido como para generar luz Cherenkov, en principio es posible detectar ésta luz para seguir la trayectoria de las Cascadas Atmosféricas.

Actualmente, se instalan arreglos de detectores de partículas con la intención de poder atrapar una parte de la proyección de la EAS.

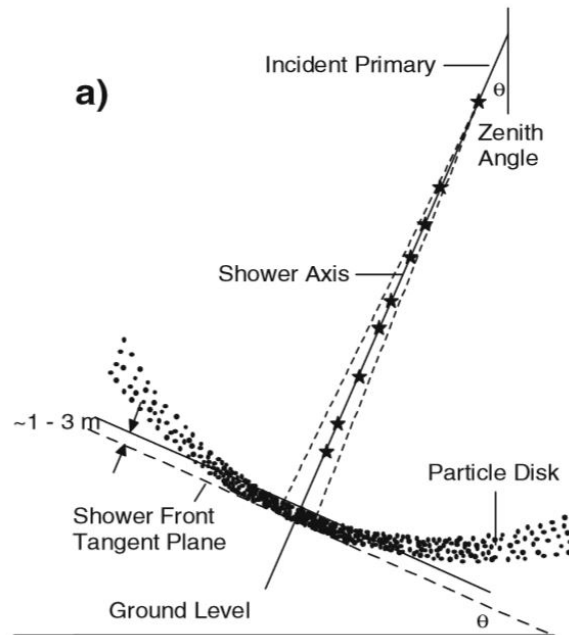


Figura 5: Estructura de una Cascada Atmosférica (Greider,2010).

Para poder tener suficiente información, los detectores deben funcionar con una alta resolución temporal además de estar sincronizados con una gran exactitud. Además, un arreglo de detectores es necesario para poder calcular la dirección del rayo primario y determinar el tipo de partícula.

Los detectores pueden funcionar con algún material centellador o utilizar agua ultra pura para captar información de las partículas secundarias. En la mayoría de los casos se utilizan Fotomultiplicadores para capturar la luz de centello o de Cherenkov.

2.2. Efecto Cherenkov

El físico ruso Pável Cherenkov propuso un mecanismo para poder explicar la emisión de radiación de partículas cargadas que viajaban por el agua [15]. Tal mecanismo se le conoce como efecto Cherenkov.

Para dar una visión cualitativa del fenómeno, supongamos que hay un medio dieléctrico homogéneo cuyo índice de refracción n es constante para todas las frecuencias.

Si un electrón atravieza el material a una velocidad v menor a la de la luz en el medio $\frac{c}{n}$ se podrá apreciar una polarización en el material cercano. Apesar de esto, se conserva la simetría azimutal sobre el eje en el que viaja la partícula, por lo que la contribución del campo eléctrico total de los dipolos es cero (no hay emisión de radiación).

Si la partícula viaja más rápido que la velocidad de fase de la luz, siendo $\beta = \frac{v}{c}$ la velocidad relativa del electrón respecto a la velocidad de la luz en el vacío, vemos que la partícula se aleja del punto dónde se está polarizando el material (Ver figura 6). En éste caso se produce una onda de choque (del campo eléctrico) y se forma un ángulo θ_c entre la trayectoria y el plano de radiación (ver figura 7).

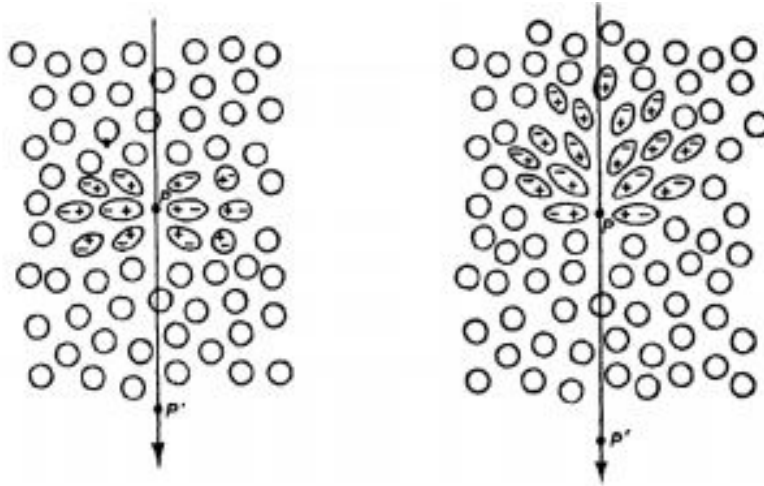


Figura 6: Apreciación del caso cuando $v < (\frac{c}{n})$ y a la derecha cuando $v > (\frac{c}{n})$ (Antonio, 2017)

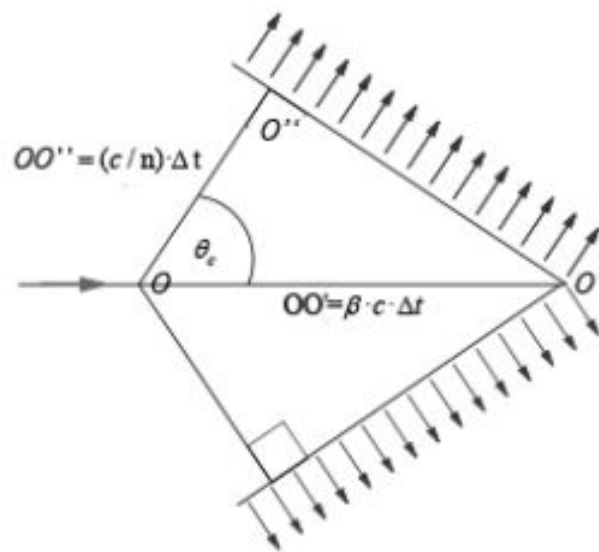


Figura 7: Construcción de Huygens (Antonio, 2017)

Medio material	Índice de refracción n	Energía umbral (MeV)		
		Electrón	Protón	Muón
Aire	1,0002926	20,62	37857,5	4260,6
Agua	1,3330	0,262	480,7	54,1
Vidrio	1,52	0,168	307,6	34,6
Cuarzo	1,544	0,160	293,2	33,0
Diamante	2,42	0,050	92,1	10,4

Figura 8: Índices de Refracción y Energía umbral (Antonio,2017)

Algunas características del efecto Cherenkov son:

- La velocidad mínima para generar radiación es de $\beta = \frac{1}{n}$.
- Para una partícula relativista, $v \simeq c$ entonces $\beta = 1$ con un Ángulo de Cherenkov máximo igual a $\text{Arc Cos}(\frac{1}{n})$.
- Cuando $n > 1$ el espectro de luz Cherenkov está principalmente en el visible.
- El número de fotones emitidos de acuerdo a la longitud de onda y distancia x recorrida:

$$\frac{d^2N}{dx\lambda} = \frac{\mu e^2}{\lambda^2} \cdot \sin^2(\theta_c) \quad (7)$$

donde $\theta_c = \text{Arc Cos}(\frac{1}{\beta n})$ y e es la carga eléctrica del electrón.

En la figura 8 se muestra los índices de refracción para diferentes materiales como el agua y al lado la energía mínima para que los protones, electrones y muones puedan emitir radiación Cherenkov.

2.3. Plástico Centellador

Un material centellador es aquel cuyas moléculas pueden absorber radiación y reemitir una parte de la energía absorbida (para regresar a su estado base). Dependiendo del tipo de transición puede clasificarse como material fluorescente o fosforescente.

La diferencia entre un material fluorescente y fosforescente es la cantidad de tiempo en que reemiten parcial o totalmente la radiación electromagnética absorbida. En el fluorescente es casi instantánea la reemisión mientras que el otro puede tardar horas.

Para que pueda ser utilizado, un plástico centellador en la detección de partículas, debe cumplir con ciertos requisitos:

- El espectro de emisión debe estar en una gran parte dentro del espectro visible ya que se tiene que utilizar fotomultiplicadores (usualmente) para poder medir la luz de centelleo.
- Debe ser sensible a las escalas de energía de las partículas cargadas que vamos a detectar.
- Que sea muy eficiente para reemitir la radiación absorbida.
- También debe ser transparente a la radiación que emite.
- Tener un tiempo de decaimiento corto para tener una rápida respuesta.

En física de Rayos Cósmicos y en particular en ésta tesis usamos un plástico centellador inorgánico. Ésto significa que son un tipo de cristal que a veces son dopados con capas de Ti o Ce. Tienen la ventaja de emitir más fotones que los orgánicos.

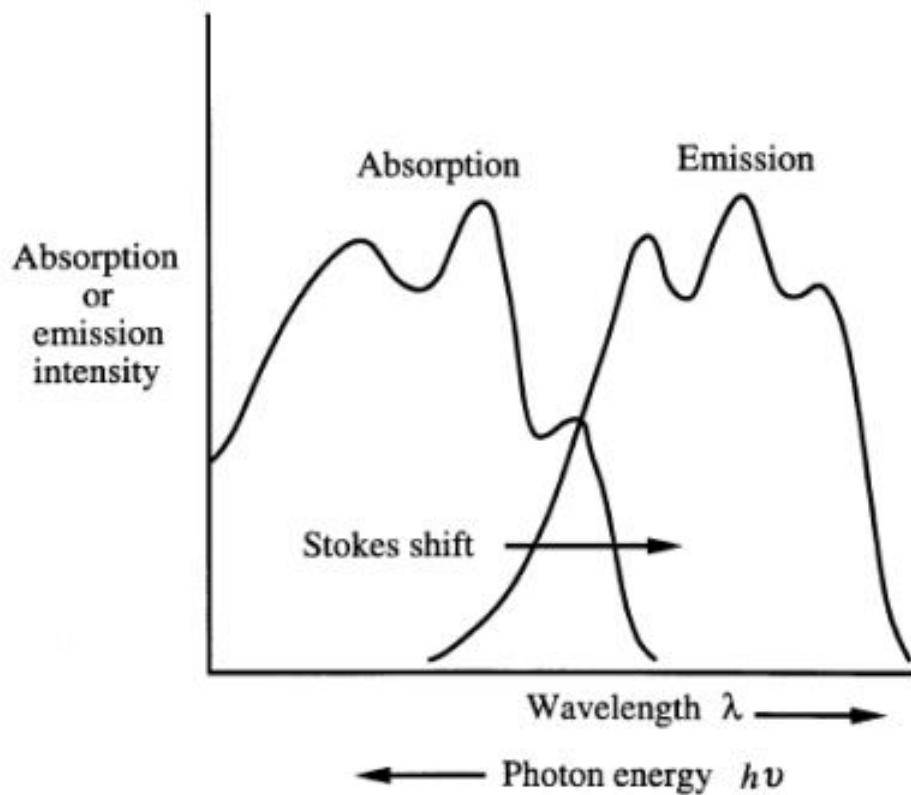


Figura 9: Corrimiento de Stokes.

Algunas propiedades de los Plásticos Centelladores son:

- **Eficiencia**, es el número promedio de fotones emitidos por unidad de energía de la radiación incidente.
- **Rendimiento de Centelleo** es la energía promedio emitida por unidad de energía de la radiación incidente.
- **Corrimiento de Stokes** es la diferencia entre el máximo en el espectro de emisión y el máximo del espectro de absorción (ver Figura 9).

3. Método de Monte Carlo para la Simulación de Eventos de Altas Energías

3.1. Método de Montecarlo

El método de Montecarlo (MC) es un método numérico para resolver integrales con buena exactitud [16]. Fué propuesto a mediados de la década de los 40 del siglo XX por integrantes del proyecto Manhattan para calcular los eigenvalores de la ecuación de Schrödinger para la desintegración de neutrones.

Para aproximar el valor de una integral unidimensional, se generan valores aleatorios para x y y . Dada una función $f(x)$ con dominio en (a, b) e imagen en (l, g) , los valores aleatorios x y y deben estar contenidos como $a \leq x \leq b$ y $l \leq y \leq g$. Quedando una aproximación al valor de una integral de la siguiente forma:

$$\int_a^b f(x) dx \simeq \frac{\text{Totald exitos}}{\text{TotaldeEventos}} \cdot (b - a) \cdot (g - l) \quad (8)$$

Dónde el total de éxitos son todos los $y \leq f(x)$ y el total de eventos son el número de pares (o puntos en el plano) (x, y) .

Gracias al surgimiento del cómputo de alto rendimiento, existen diversos generadores de números pseudoaleatorios [17] que hicieron de éste método casi indispensable para calcular magnitudes físicas. Para ésto, el usuario tiene que definir una "semilla", generalmente un número entero cualquiera para poder obtener un número aleatorio.

Para integrales unidimensionales es más común utilizar otros métodos numéricos pero en el caso de muchas dimensiones es muy conveniente utilizar el Método de Montecarlo. Particularmente en física de partículas, se necesita para calcular probabilidades (posición, energía, momento, sección transversal, etc.).

Para simular eventos en física de altas energías, se deben conocer las densidades de probabilidad, dadas ya sea por modelos teóricos de inter-

acción y/o de datos de un experimento.

Generalmente un generador de eventos de Física de altas energías calcula la matriz de elementos, luego la cascada de partones y finalmente realiza la hadronización.

3.2. GEANT4

3.2.1. Introducción

Geant4 [18] es un programa que utiliza el concepto de programación orientada a objetos para simular el paso de partículas por un determinado material. Su funcionamiento se basa en calcular largas y complicadas operaciones matemáticas utilizando el Método de Montecarlo. Así que para generar suficiente estadística de un evento en particular se debe cambiar también los valores de la semilla, en el caso de Geant4 sólo se necesitan dos valores enteros.

Actualmente, Geant4 es utilizado en muchas áreas de la ciencia e ingeniería como dosimetría, diseño de detectores espaciales, etc. A través de los años, Geant4 ha sido optimizado para aprovechar los cambios en la arquitectura del CPU, por ejemplo, la utilización de múltiples procesadores.

Para la simulación del detector híbrido se utilizó la versión Geant4-10-4-p02 y el visualizador QT5 [19]. Algunos de los conceptos [20] que reconoce Geant4 son:

- **Track:** Es un conjunto de información de una partícula en algún punto específico a lo largo del camino recorrido. Se manifiesta con la librería G4Track dónde se pueden utilizar algunas funciones para conocer la energía de la partícula, tiempo global, tiempo local, identidad, etc.
- **Step:** Es el conjunto de información que tiene una partícula entre dos puntos mínimos. También podemos conocer la energía de la partícula así como su tiempo local y global. Se manifiesta con la librería G4Step.
- **Trajectory:** Es una colección de Track's a lo largo del camino de la partícula.

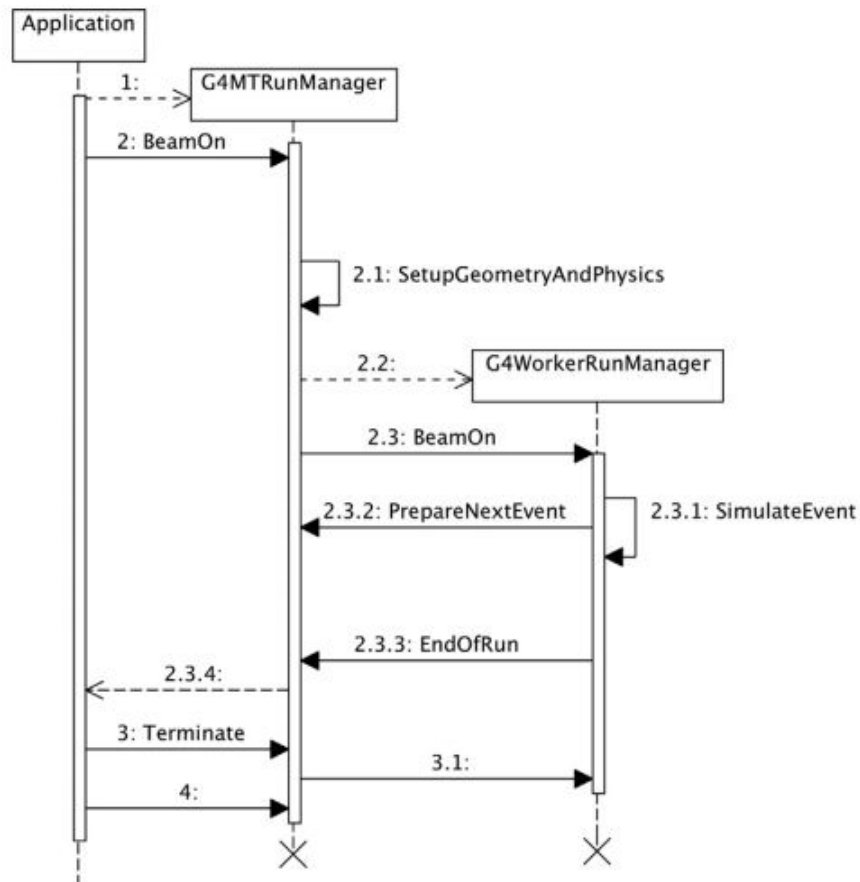


Figura 10: Diagrama a bloques de una aplicación en Geant4 [20].

- **Event:** Consiste en el decaimiento o interacción de la partícula primaria con algún medio, produciendo más partículas con sus respectivos cuadri-vectores.
- **Run:** Es una serie de eventos (Events) que comparten las mismas condiciones de detector.

Geant4 es un programa muy robusto y cuenta con herramientas estadísticas como G4Root en la que se pueden llenar histogramas (.root) y calcular errores de propagación.

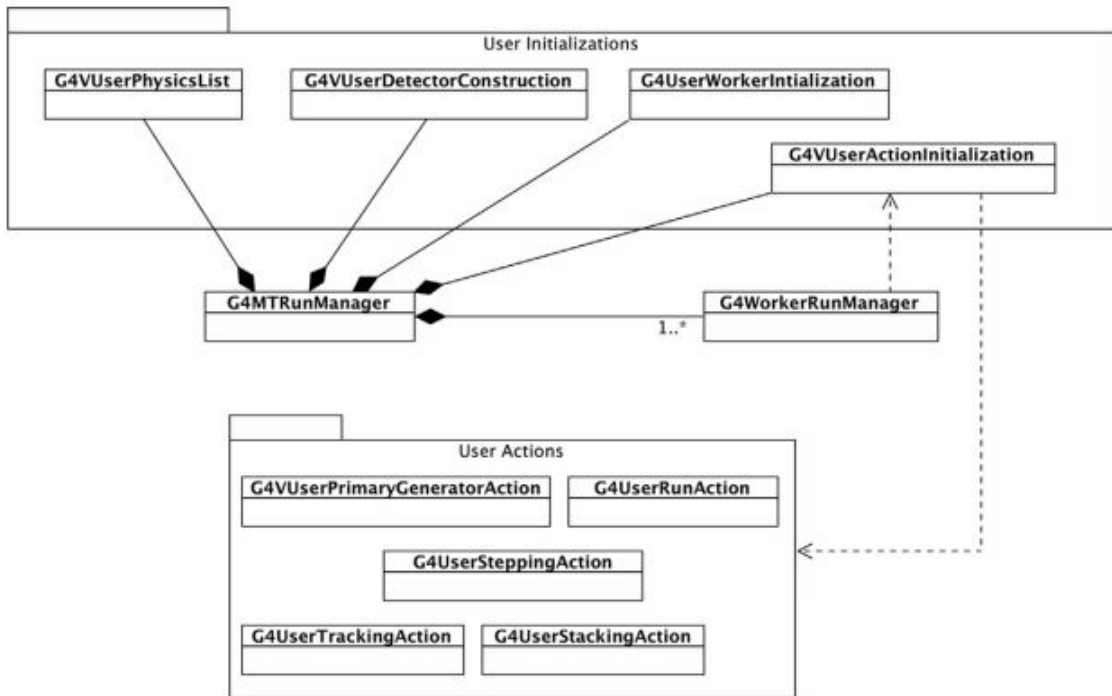


Figura 11: Clases en Geant4 (Geant4 Collaboration)

En la Figura 11 se muestran las clases necesarias para construir una simulación en Geant4. En cada una de ellas el usuario elige la física pertinente para su simulación así como la geometría y materiales del detector.

Geant4 también permite al usuario realizar una imagen del detector o materiales. Además de poder visualizar un número limitado de eventos (trazas), ya que se puede sobre cargar la memoria de la CPU.

4. Simulación y Diseño del Detector Híbrido

Para simular el funcionamiento del detector utilizamos el programa Geant4 basándonos en las librerías utilizadas en el ejemplo LXe. Se utiliza el mismo tipo de materiales como el Tyvek, Agua y Aluminio utilizados en las simulaciones de LAGO [21]. Para obtener la información requerida como el tiempo de llegada de cada Hit, se construyen histogramas con la tecnología G4Root. Se declaran las propiedades eléctricas (carga eléctrica, propiedades ópticas, etc.) de cada material y se construye el detector.

4.1. Estructura y Materiales del Detector

Para la simulación primero se declaran los elementos y luego los componentes químicos. Posteriormente, la geometría de cada componente junto con su material y propiedades eléctricas. Tanto la estructura física como los materiales se declaran en el archivo LXeDetectorConstruction.cc.

Dado que el objetivo de ésta tesis es averiguar si se puede distinguir entre la señal de un electrón de la de un muón, se consideran dos modelos o diseños para el detector. El primero tiene un plástico centellador en la cima, justo arriba de una capa de material reflejante. También en su interior se encuentran dos muros reflejantes perpendiculares para poder aislar la luz hacia un sólo fotomultiplicador (PMT). El segundo modelo tiene el mismo centellador al igual que los muros pero ésta vez el Plástico Centellador instalado en el fondo del tanque. Para poder aislar los fotones producidos por centello de los producidos por Cherenkov se coloca una capa de Tyvek entre el tanque de agua y el Plástico Centellador.

En ambos modelos del detector, se coloca una capa de material reflejante que cubre toda la parte exterior de la forma cilíndrica del detector (incluidas la tapa inferior y la superior). Todo el detector está montado en un tubo de aluminio (misma técnica de construcción que la utilizada para los tanques del Observatorio HAWC [22]).

Se utilizan 8 Fotomultiplicadores, cuatro instalados en el fondo del centellador y 4 en el fondo del tanque de agua. Los arreglos de Fotomultiplicadores son paralelos entre sí.

4.1.1. Tanque con agua

Se declara en Geant4 los componentes atómicos de la molécula del agua con la función G4Element y G4Material:

- G4Element* H = new G4Element("H", "H", z=1, a=1.01*g/mole);
- G4Element* O = new G4Element(O, O, z=8., a= 16.00*g/mole);
- G4Material* water = new G4Material("Water", density= 1.0*g/cm3, nelements=2);
water->AddElement(H, 2);
water->AddElement(O, 1);

Para poder simular el efecto Cherenkov se necesita ingresar la información de el índice de refracción y longitud de atenuación para una energía dada del fotón viajando por el medio. Además, se elige una razón de producción de fotones máxima por paso de 100 y la mínima de 10.

A continuación se dejan los datos utilizados para cada variable física:

- **Energía del Fotón:** 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.
- **Índice de Refracción:** 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
- **Longitud de atenuación:** 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

Recordemos que para cada valor de energía del fotón corresponde un valor paralelo de Absorción y de Refracción.

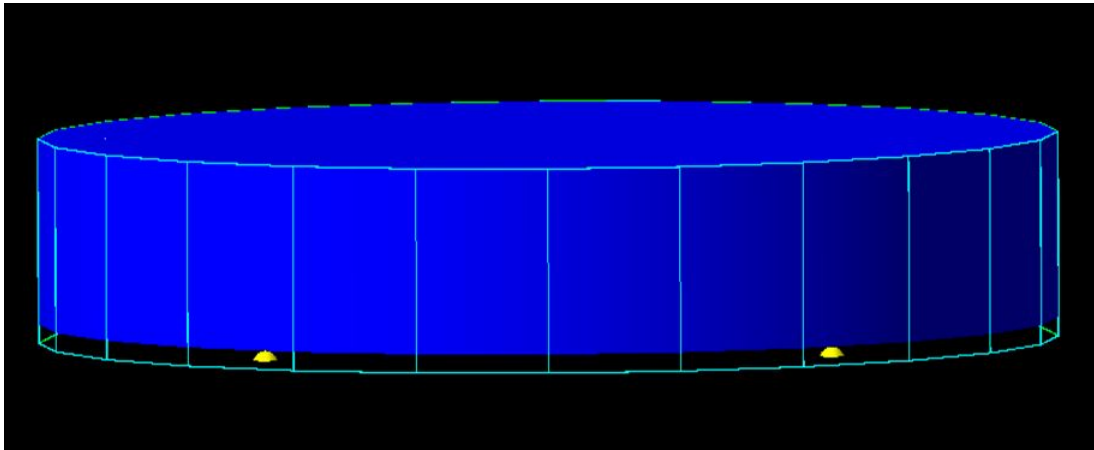


Figura 12: Tanque con agua (azul) para el Detector con el Centellador instalado en la parte inferior.

El tanque con agua mantiene su posición en ambos modelos del detector. Es un cilindro con 7.3 m de diámetro y su altura es de 1 m.

4.1.2. Plástico Centellador

El plástico que utilizamos en ésta simulación es el BC-408 fabricado por la compañía Saint-Gorbain [23]. Está hecho a base de carbono y su fórmula química es C_9H_{10} .

Según el fabricante, el BC-408 tiene un tiempo de decaimiento de 2.1 nanosegundos, un índice de refracción de 1.58 y una longitud de atenuación de 2.10 m para todas las longitudes de onda.

Para simular el centelleo se agregan las siguientes propiedades al código con sus respectivos valores:

- **Energía del fotón:** 2.00*eV, 2.03*eV, 2.06*eV, 2.09*eV, 2.12*eV, 2.15*eV, 2.18*eV, 2.21*eV, 2.24*eV, 2.27*eV, 2.30*eV, 2.33*eV, 2.36*eV, 2.39*eV, 2.42*eV, 2.45*eV, 2.48*eV, 2.51*eV, 2.54*eV, 2.57*eV, 2.60*eV, 2.63*eV, 2.66*eV, 2.69*eV, 2.72*eV, 2.75*eV, 2.78*eV, 2.81*eV, 2.84*eV, 2.87*eV, 2.90*eV, 2.93*eV, 2.96*eV, 2.99*eV, 3.02*eV, 3.05*eV, 3.08*eV, 3.11*eV,

3.14*eV, 3.17*eV, 3.20*eV, 3.23*eV, 3.26*eV, 3.29*eV, 3.32*eV, 3.35*eV,
3.38*eV, 3.41*eV, 3.44*eV, 3.47*eV.

■ **Componente Rápida de centelleo:** 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0.

■ **Coefficiente de Birks:** 0.126*mm/MeV.

La forma geométrica del plástico centellador es un cilindro de diámetro igual a 7.3 m y 0.1 m de altura.

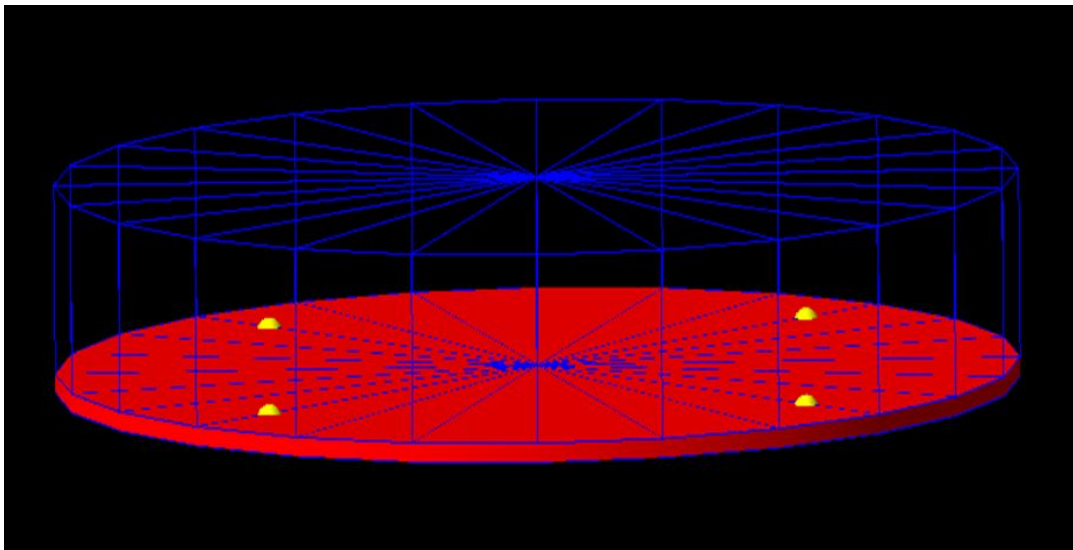


Figura 13: Detector con el Plástico Centellador (rojo) instalado en el fondo.

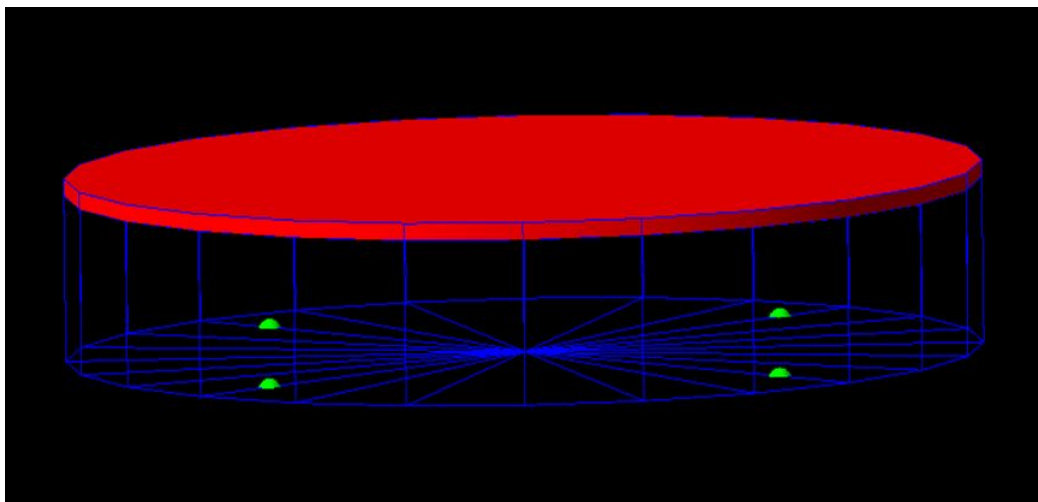


Figura 14: Detector con el Plástico Centellador (rojo) instalado en la cima.

4.1.3. Recubrimiento Tyvek

El propósito de éste recubrimiento es aislar los fotones producidos por radiación Cherenkov o centelleo hacia una parte determinada del detector dónde sólo existe un fotomultiplicador. El material llamado Tyvek tiene propiedades reflectivas y recubre totalmente el plástico centellador y el tanque de agua. Su fórmula química es C_2H_4 con una densidad de $0,935 * g/cm^3$.

Los valores de sus propiedades reflectivas son:

- **Energía del Fotón:** 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, 2.000*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.
- **Reflectividad:** 0.82, 0.86, 0.89, 0.92, 0.94, 0.95, 0.95, 0.95, 0.96, 0.96, 0.97.

El ancho del recubrimiento es de 0.2 mm en todas las capas que se utilizaron. Dentro del detector, se colocan dos muros perpendiculares entre si que abarcan tanto el plástico Centellador como el tanque. Lo anterior aplica para los dos modelos.

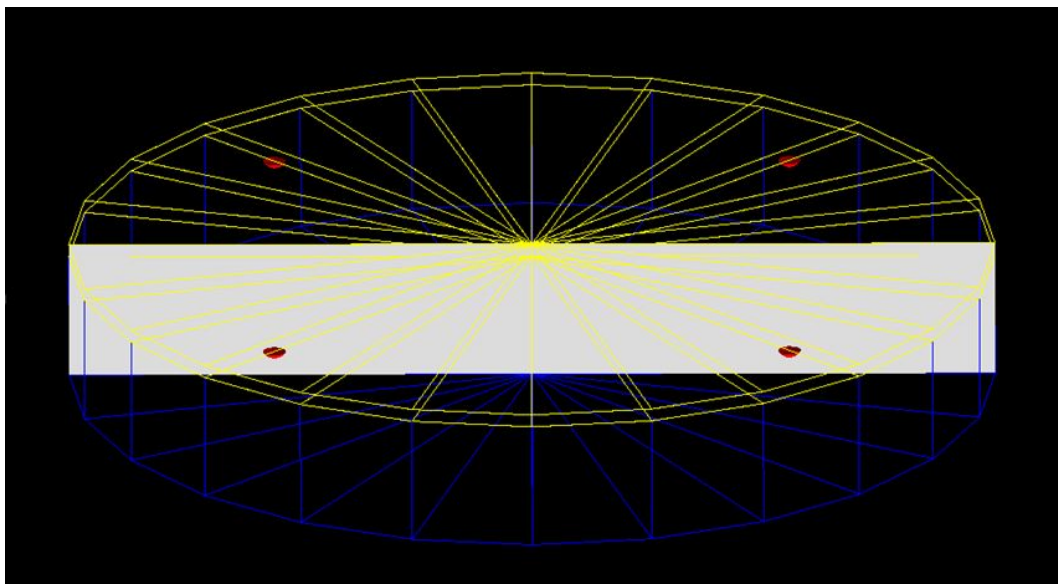


Figura 15: Vista de un Muro de Tyvek (blanco) instalado dentro del detector.

En la Figura 15 se aprecia la posición de un muro de Tyvek. El otro muro está posicionado perpendicularmente con las mismas dimensiones. En la parte amarilla es el recubrimiento Tyvek para el centellador y el azul para el tanque de agua.

4.1.4. Fotomultiplicadores

Los fotomultiplicadores tienen como función convertir la mayor parte de la energía de un fotón en una señal eléctrica medible para un osciloscopio u otro medidor de corriente. Particularmente en ésta simulación sólo se utiliza una media esfera de aluminio (densidad = $2,7g/cm^3$) con ciertas propiedades ópticas de absorción para poder medir el tiempo de hit de un fotón desde que se dispara la partícula madre.

Propiedades ópticas del Fotomultiplicador:

- **Eficiencia:** 0.15,0.18.
- **Reflectividad:** 0.0, 0.0.

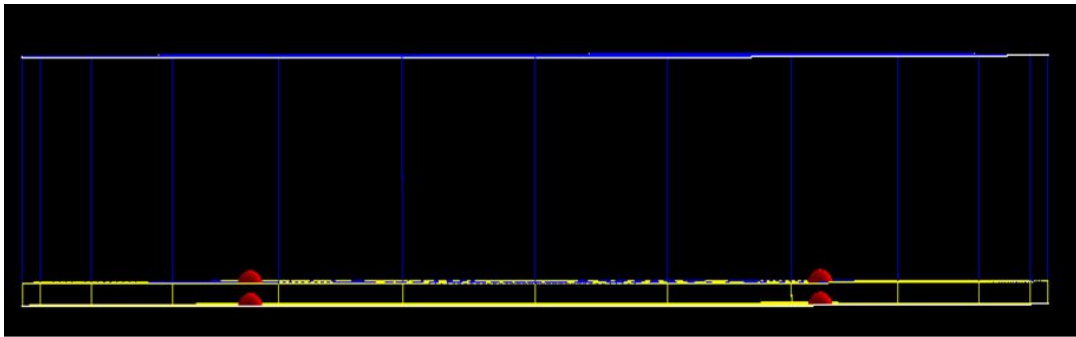


Figura 16: Vista transversal del Detector con el Centellador (amarillo) en el fondo. Los Fotomultiplicadores se aprecian en rojo.

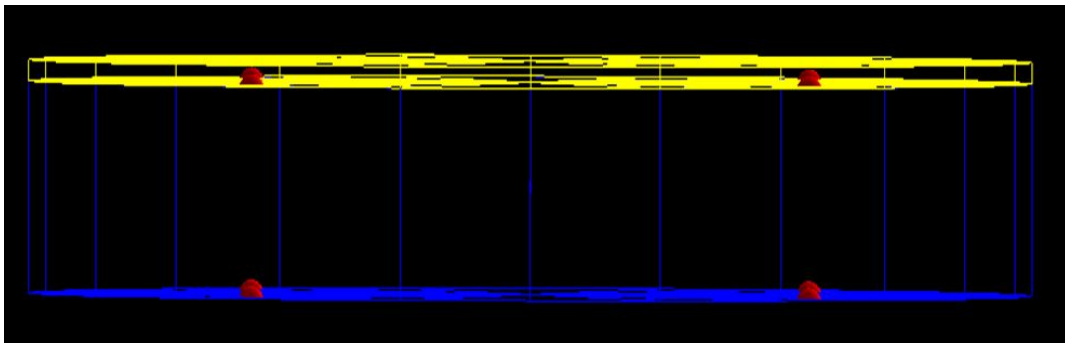


Figura 17: Vista transversal del Detector con el Centellador (amarillo) en la cima. Los Fotomultiplicadores se aprecian en rojo.

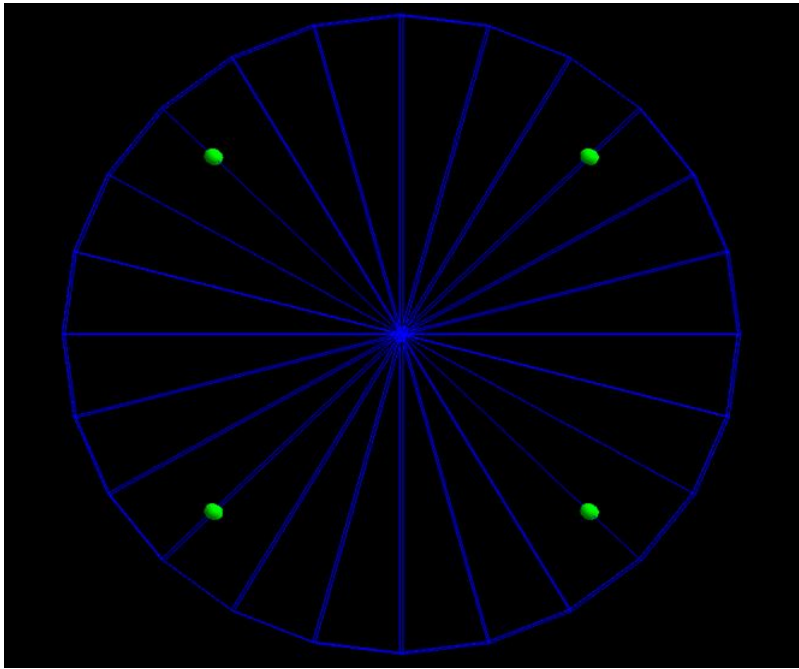


Figura 18: Arreglo de Fotomultiplicadores (amarillo).

4.2. Procesos Físicos

Para ambos modelos del detector se utilizan los mismos modelos teóricos preinstalados en Geant4 (Bremsstrahlung, dispersión múltiple de Coulomb, ionización y aniquilación de pares). Sin embargo se tiene que declarar el uso de ciertos procesos ópticos explicados en las siguientes partes de esta subsección.

4.2.1. Efecto Fotoeléctrico

El efecto Fotoeléctrico fué propuesto en 1905 por el físico Albert Einstein [24]. Postula la existencia de partículas o cuantos de luz llamados fotones cuya energía está asociada a su frecuencia de onda de luz (siguiendo las ideas de la cuantización de la energía de Max Plack).

Cuando un fotón incide con alguna molécula puede existir la emisión de un electrón si el fotón es lo suficientemente energético. Ésto se resume en la siguiente expresión [25]:

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{mv^2}{2} \quad (9)$$

Dónde h es la constante de Plank, f la frecuencia del fotón absorbido y f_0 la frecuencia del fotón emitido.

4.2.2. Dispersión de Rayleigh

Es un fenómeno de la luz visible llamado en honor a su descubridor, Lord Rayleigh [26]. Cuando un haz de luz óptica atraviesa materiales cuyas moléculas o partículas son de similar o menor tamaño que las longitudes de onda de la luz incidente, éstas ondas cambian de dirección de propagación.

La intensidad de la luz dispersada queda de la siguiente manera:

$$I = I_0 \frac{(a + \text{Cos}^2(\theta))}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \quad (10)$$

Donde R es la distancia a la partícula, θ es el ángulo de dispersión, d el radio de la partícula y n el índice de refracción.

4.3. Construcción de Histogramas

Geant4 puede construir u ordenar datos de acuerdo a la lógica que necesitemos, en éste caso son histogramas en root. Utilizando la tecnología G4Root podemos llenar los histogramas sin necesidad de utilizar ROOT CERN.

Para llenar los histogramas, declaramos el nombre del archivo root (#eventos;Partícula;Energía;Extra;Corrida) y de los histogramas. En nuestro caso, guardamos la información del tiempo de hit para los PMT's, tiempo de Hit para el tanque de agua y el plástico centellador.

Utilizamos un *AnalysisManager* para poder tomar la información que necesitamos y guardarla en el archivo (.root). A continuación se presenta la información tomada de cada archivo.

- En el archivo LXePMTSD.cc tomamos el tiempo de hit del fotón, es decir, el tiempo desde que se dispara un muón o electrón hasta que el fotón (de centelleo o Cherenkov) es absorbido en el Fotomultiplicador. Tal valor se guarda en el histograma "PMTtime".
- Del archivo LXeScintSD.cc identificamos las partículas que han sido creadas en el interior del tanque de agua.
- Del archivo LXePLASTICSD.cc identificamos las partículas que han sido creadas en el interior del plástico centellador.

También se construyen histogramas para cada PMT. El funcionamiento del registro de los histogramas está contenido en el archivo LXeRunAction.cc.

4.4. Eventos

Ya que podemos acceder a la información de cada histograma (Número de entradas, Desviación Estándar y Promedio) llenado en cada corrida, consideramos los siguientes puntos para el análisis estadístico:

- Se generan 1000 histogramas para una partícula incidiendo perpendicularmente sobre el plano del detector (xy) con las coordenadas iniciales $\mathbf{R} = (1.75 \text{ m}, 1.75 \text{ m}, 5 \text{ m})$.
- Se generaron 1000 eventos para cada energía inicial de 150, 350, 550, 750, 950, 1150, 1350, 1550, 1750, 2000, 2400, 2800, 3200 Mev.
- Ya que la luz va a quedar confinada a un cuadrante del detector, sólo dos Fotomultiplicadores tendrán lecturas (ver las figuras 20 y 21), el que está instalado en el tanque con agua y su paralelo instalado en el Plástico Centellador. Entonces, para éstos dos fotomultiplicadores extraemos la información estadística de sus histogramas del tiempo de Hit (ver figura 19).

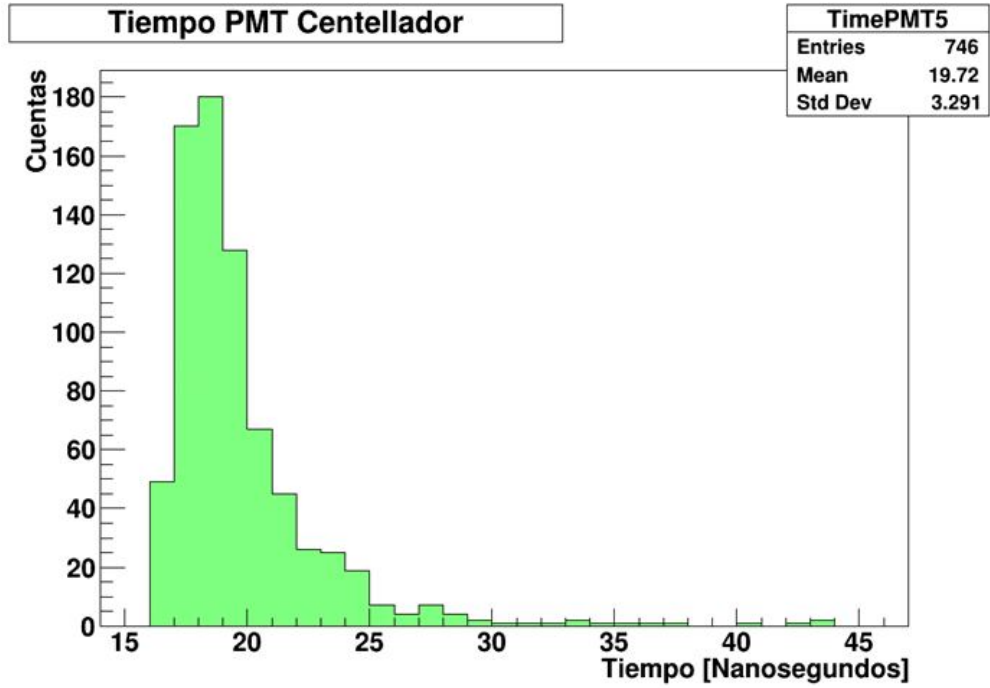


Figura 19: Histograma para un e^+ a 1150 MeV que muestra el tiempo de llegada de los fotones producidos en el Plástico Centellador a su respectivo fotomultiplicador.

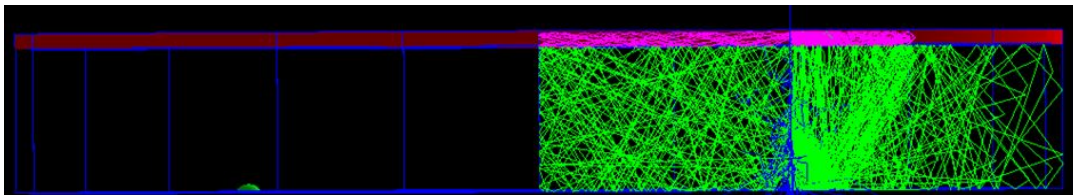


Figura 20: Se observa un e^+ incidiendo en el detector con el Plástico Centellador instalado en la Cima. Se observa la radiación Cherenkov (verde) y la de Centelleo (morado) y cómo ambas están confinadas.

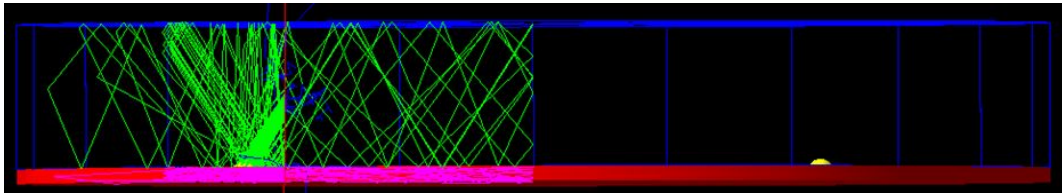


Figura 21: Se observa a un μ^+ (línea roja) incidiendo en el detector con el Plástico Centellador instalado en el fondo.

- Para generar diferentes reacciones nucleares en el detector, se tiene que cambiar la semilla del generador de números aleatorios de Geant4.
- Para automatizar el proceso de repetir 1000 veces el mismo evento con diferente semilla, se utilizó un pequeño programa en bash para poder exportar los datos de cada 1000 eventos a un archivo de texto.
- Del archivo de texto, utilizando ROOT CERN creamos 6 histogramas. Tales histogramas son Número de Fotones, Promedio del tiempo de hit y Desviación Estándar para los dos fotomultiplicadores.
- Para los 6 nuevos histogramas, se realiza un ajuste gaussiano (ver Figura 22).
- Se grafican con respecto a la energía inicial para ambos modelos del detector, los valores obtenidos con el ajuste gaussiano teniendo al promedio del ajuste como la coordenada y y al valor de sigma como el error estadístico para los respectivos datos.

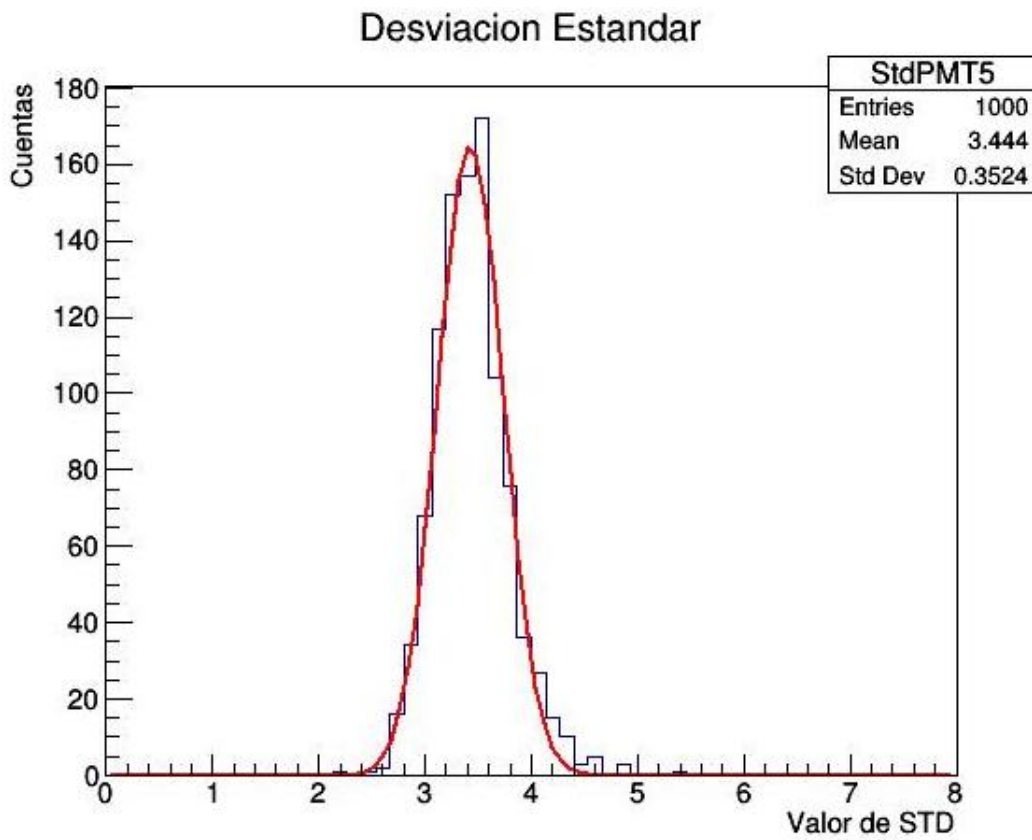


Figura 22: Ajuste Gaussiano para el histograma correspondiente a los valores de la desviación estándar para 1000 e+ a 1150 MeV.

5. RESULTADOS

5.1. Histogramas

Para los e^+ incidiendo sobre el detector (para ambos modelos) se obtuvieron histogramas cuyos datos estadísticos se reúnen en la sección de **Gráficas**.

Para el caso de los e^+ incidiendo en el detector con el plástico centellador instalado en la parte inferior con energías iniciales de 150 MeV, 350 MeV y 550 MeV, no se registró la llegada de suficientes fotones al fotomultiplicador colocado en el Centellador entonces no fué posible realizar un ajuste gaussiano, es decir, no converge a algún resultado. Lo mismo ocurre para el mismo detector pero un μ^+ incidente a 150 MeV.

La causa principal de no registrar suficientes fotones se debe a que la mayoría de los e^+ incidentes no logran llegar al Plástico Centellador. A pesar de producir muones en el tanque de agua, éstos son producidos con poca energía cinética.

En la figura 23, dado el aumento de la energía inicial de los e^+ aumenta el número de fotones que alcanzan a ser detectados por los Fotomultiplicadores, además de empezar a formarse una pretuberancia cerca de 1000 fotones (en el eje horizontal). Para cuando la energía cinética es de 750 MeV dicha pretuberancia ya es ajustable a una gaussiana.

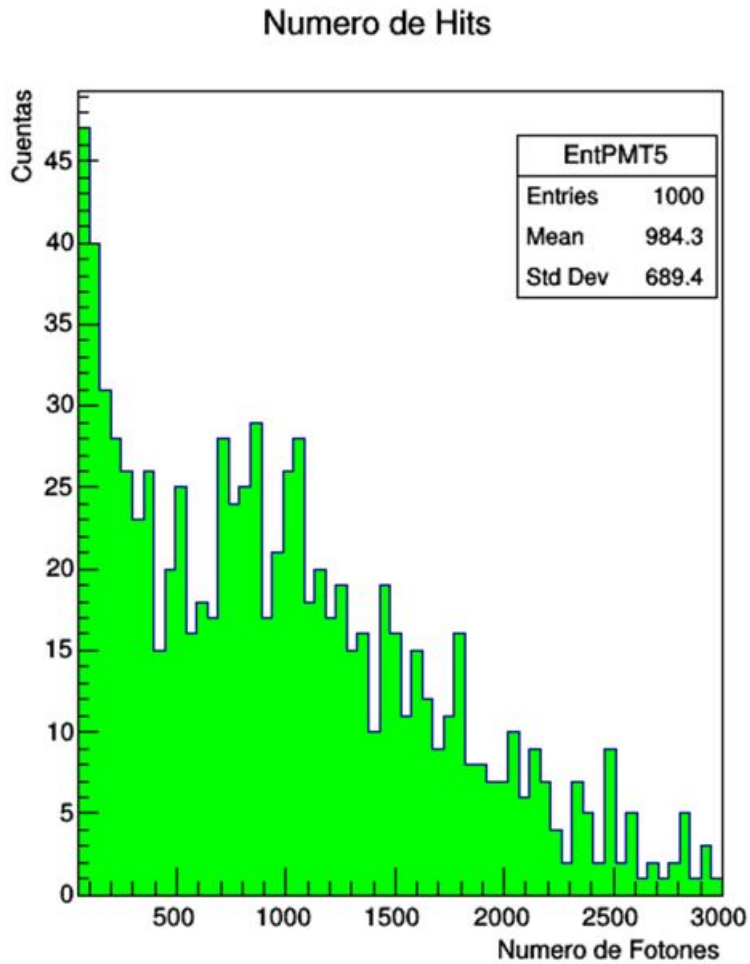


Figura 23: Histograma de 1000 e^+ con energía inicial de 550 MeV.

5.2. Gráficas

En las siguientes gráficas se reúne toda la información estadística de los histogramas del tiempo de hit para ambos modelos del detector con respecto a diferentes valores de energía inicial para los e^+ y μ^+ . Se presenta la desviación estándar y el tiempo promedio de llegada así como el número de Fotoness que arribaron al respectivo fotomultiplicador.

5.2.1. Detector con el Plástico Centellador instalado en la cima.

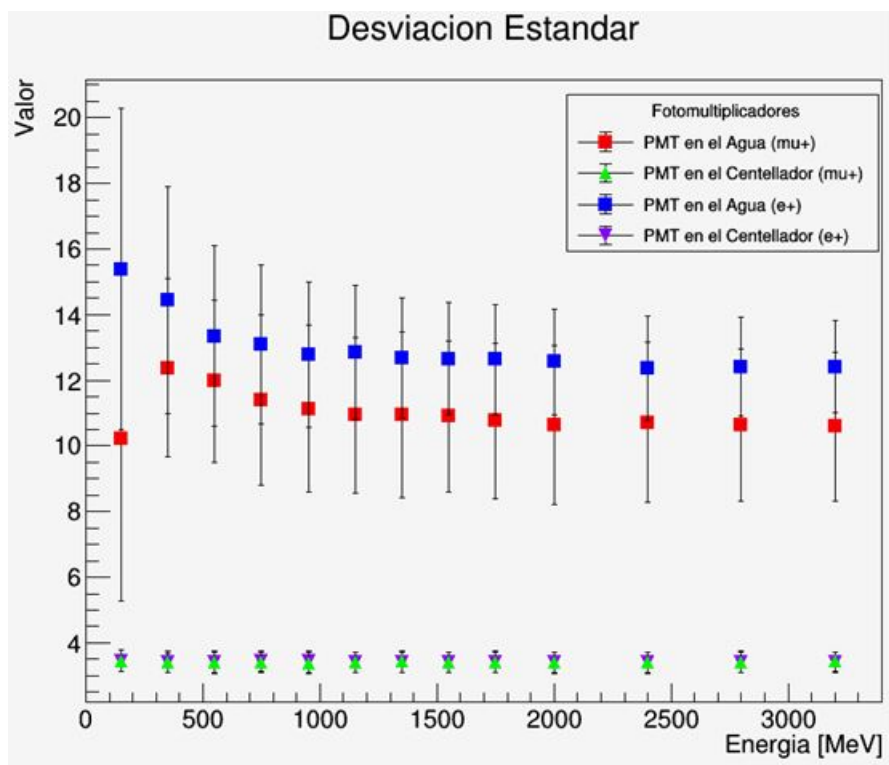


Figura 24: Gráfica de la Desviación Estándar de los histogramas del tiempo de arriba.

En la gráfica de la Desviación Estándar observamos que a 150 MeV hay una diferencia notable entre los e^+ y μ^+ detectados en el Fotomultiplicador instalado en el agua aunque estadísticamente no pueden diferenciarse. Se aprecia que a esa energía para los μ^+ disminuye la detección de fotones Cherenkov para luego mantenerse casi constante a partir de los 1000 MeV mientras que para los e^+ el mismo tipo de fotones detectados aumenta y disminuye ligeramente para mantenerse casi constante a partir de los 1000 MeV también.

En el caso del Fotomultiplicador instalado en el Plástico Centellador, la desviación estándar del tiempo de hit es muy similar para todos los valores de energía de los e^+ y μ^+ incidentes.

Tiempo de Llegada de los Fotones

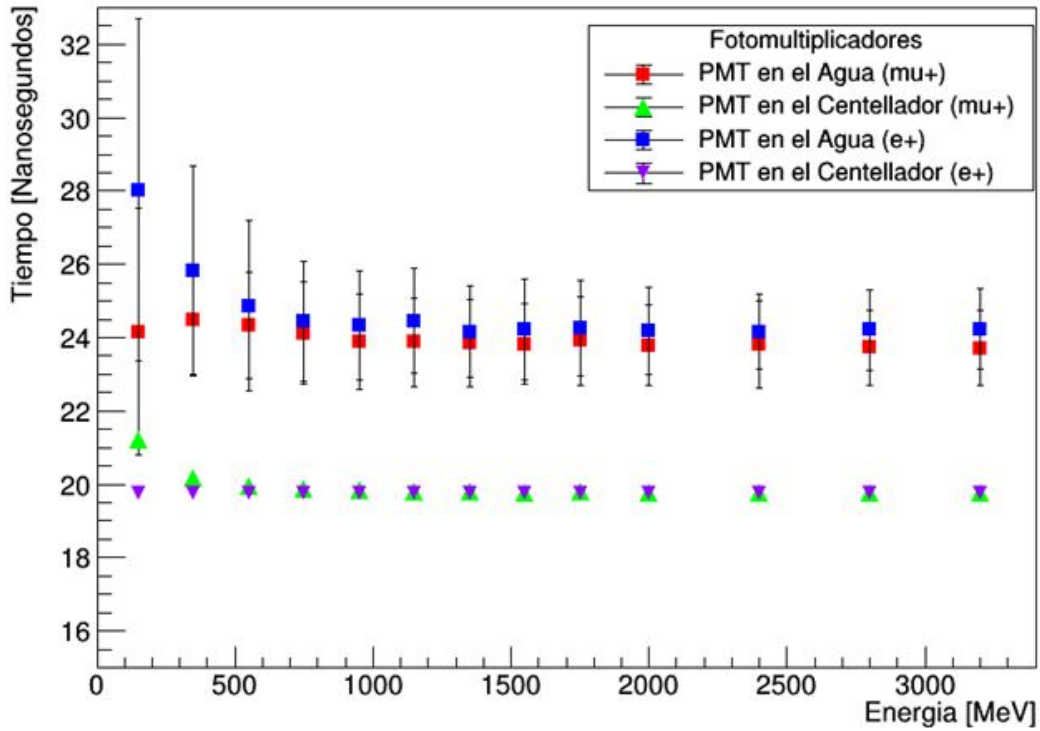


Figura 25: Gráfica del Tiempo de arribo de los Fotones.

En el caso del tiempo de arribo de los Fotones (ver Figura 25) para el Fotomultiplicador en el agua presenta el mismo fenómeno que en el caso de la desviación estándar.

En cuanto al Fotomultiplicador en el Plástico Centellador se aprecian valores estadísticamente diferentes entre los μ^+ y e^+ a bajas energías para que a partir de 550 MeV convergen aproximadamente al mismo valor.

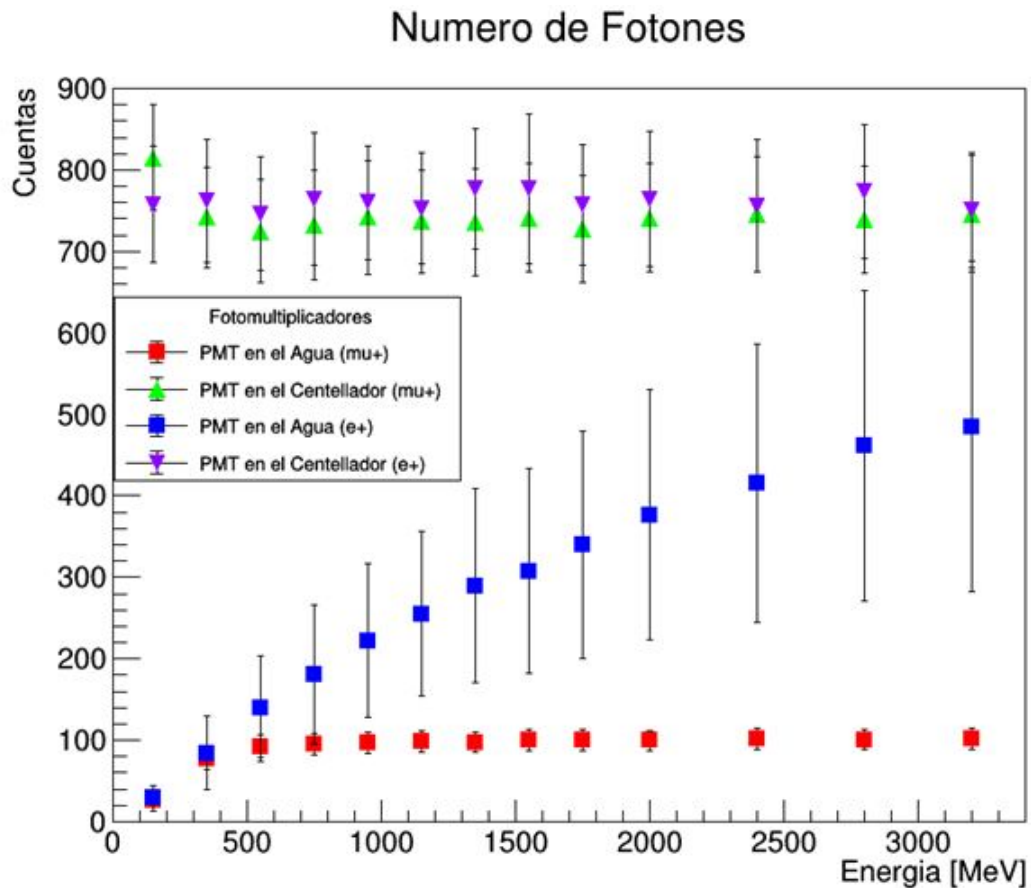


Figura 26: Gráfica del Número de Fotones detectados.

Para el Número de Fotones detectados (ver Figura 26), el Fotomultiplicador instalado en el tanque de agua registra una cantidad similar (estadísticamente indistinguible) de Fotones producidos por μ^+ y e^+ para todos los valores de energía.

El Fotomultiplicador en el Plástico Centellador muestra que a partir de 1000 MeV, la cantidad de fotones de centelleo es estadísticamente diferente entre los producidos por un μ^+ y un e^+ . Además, se aprecia mejor la diferencia respecto al aumento de energía.

5.2.2. Gráficas para el Detector con el Plástico Centellador instalado en el fondo.

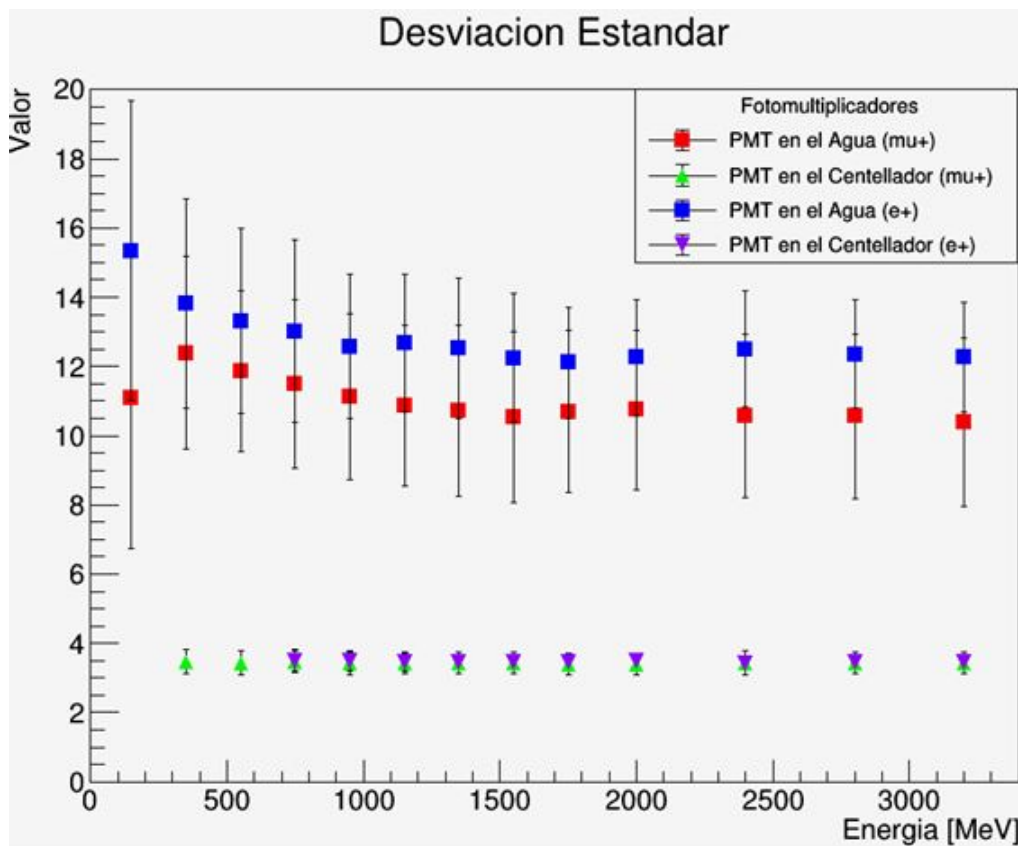


Figura 27: Gráfica de La Desviación Estándar.

La desviación estándar del tiempo de hit para el caso del detector con el Plástico Centellador instalado en el fondo no se diferencia mucho con el otro modelo. A reserva de que para el caso de los e^+ hasta los 550 MeV no se reúne suficiente estaística en el Fotomultiplicador instalado en el Plástico. El mismo caso para los μ^+ hasta los 150 MeV.

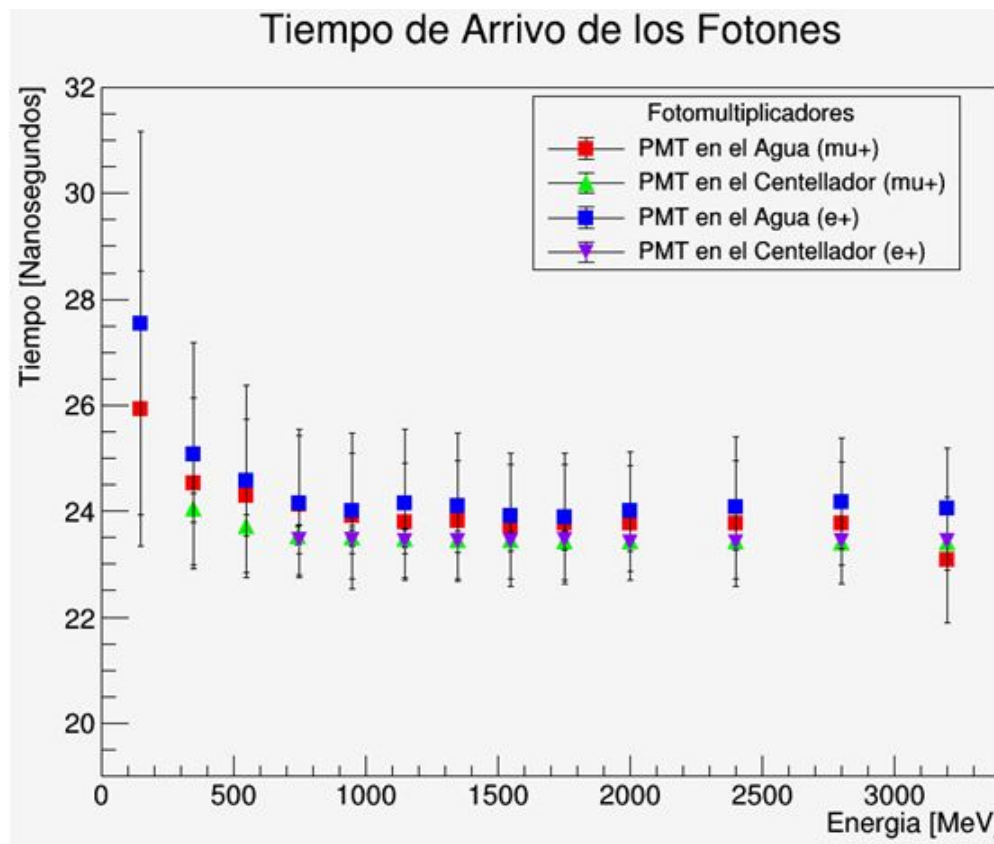


Figura 28: Gráfica del Tiempo de Arribo.

Los resultados del Tiempo de arribo de los Fotones al respectivo Fotomultiplicador (ver Figura 28) muestran que para ambos fotomultiplicadores y ambas partículas llegan aproximadamente al mismo tiempo a partir de los 550 MeV en adelante, estadísticamente indistinguibles.

Para antes de los 350 MeV, hay una notable diferencia en los valores de tiempo para muones y positrones medido en el tanque de agua. A pesar de esto siguen siendo estadísticamente indistinguibles.

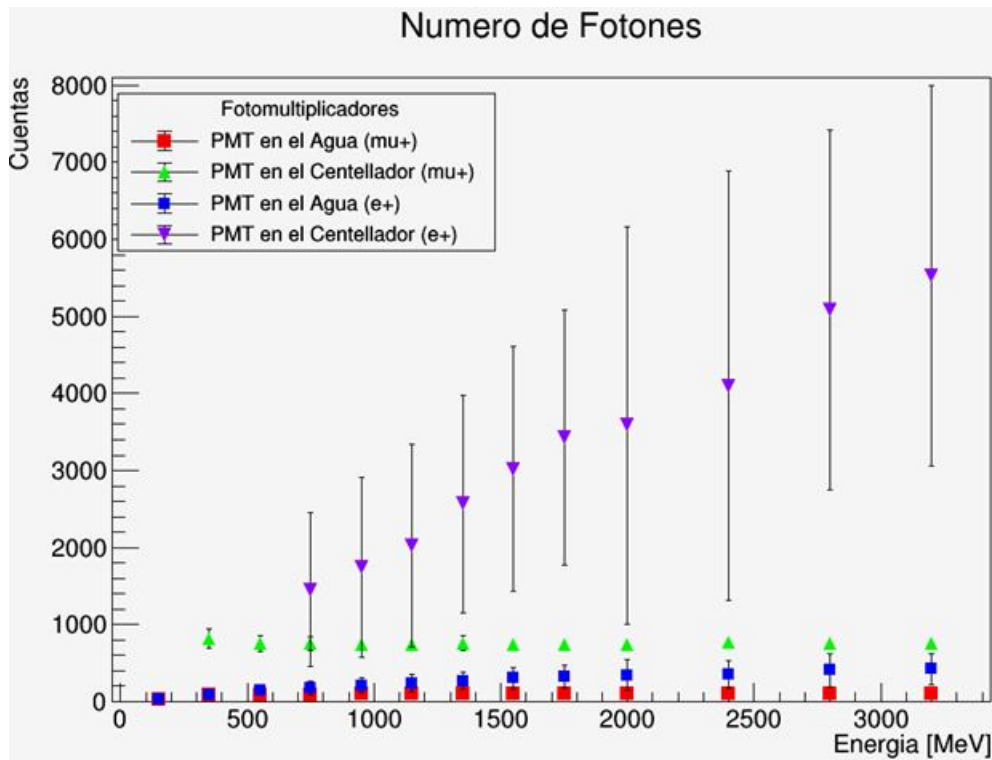


Figura 29: Gráfica del Número de Fotones.

Cuando se compara el Número de Fotones que arriban al Fotomultiplicador instalado en el Centellador (ver Figura 29) entre el μ^+ y el e^+ se nota un aumento en la diferencia de Fotonos detectados hasta que alrededor de una energía de 1350 MeV son estadísticamente distinguibles.

En el caso del Fotomultiplicador en el tanque de agua, ambas señales tanto para el μ^+ como para el e^+ son muy similares y apenas distiguible en todo el espectro energético.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con las gráficas presentadas en ésta tesis, para el modelo del Detector con el Centellador instalado en la cima se puede distinguir entre los fotones producidos por muones y electrones de acuerdo al número de fotones detectados en el tanque de agua ya que el μ^+ produce menos fotones que el e^+ dada su menor capacidad de interartuar con las moléculas del agua y del centellador. Se puede distinguir muy bien entre ambas señales aproximadamente desde los 950 MeV de energía.

En el modelo del Detector con el Plástico Centellador instalado en el fondo, también se puede distinguir la señal de los fotones a travez del Número de Fotones detectados pero en éste caso tomando en cuenta el Fotomultiplicador instalado en el Centellador, resaltando su funcionamiento a bajas y altas energías. A energías menores de 550 MeV prácticamente no hay fotones en el Centellador y es muy poco probable sean detectados. Para Energías entre 550 y 1350 Mev puede no ser posible determinar la identidad de la partícula incidente. Cuando la energía es mayor a 1350 empieza a marcarse una gran diferencia en el número de fotones detectados.

Ambos modelos del Detector híbrido pueden determinar la identidad de las partículas, entre un μ^+ y un e^+ a determinados rangos de energía, dando la posibilidad de que un arreglo de éste tipo de detectores pueda cuantificar la componente muónica y electrónica de una Cascada Atmosférica y así identificar la identidad del rayo primario.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Elster J, Geitel H Phys. Zs.2560 (1901); Geitel H Phys. Zs.2 116 (1900).
2. Wilson C T R Camb. Phys. Soc. Proc. 11 32 (1901).
3. Hess V F Phys. Zs. 13 1084 (1912).
4. Anderson C D Science 76 238 (1932); Phys. Rev. 43 491 (1933).
5. <https://www.auger.org/>
6. <https://icecube.wisc.edu/>
7. Greisen, K. (1966). End to the cosmic-ray spectrum?. Physical Review Letters, 16(17), 748.
8. Zatsepin, G. T., and Kuzmin, V. A. (1966). Upper limit of the spectrum of cosmic rays. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters), 4(3), 78-80.
9. Elder, F. R., Gurewitsch, A. M., Langmuir, R. V. and Pollock, H. C. (1947). Radiation from electrons in a synchrotron. Physical Review, 71(11), 829.
10. Krymskii, G. F. (1977, June). A regular mechanism for the acceleration of charged particles on the front of a shock wave. In Akademiia Nauk SSSR Doklady (Vol. 234, pp. 1306-1308).
11. Fermi, E. (1949). On the origin of the cosmic radiation. Physical Review, 75(8), 1169.
12. Zwicky, F. (1939). On the theory and observation of highly collapsed stars. Physical Review, 55(8), 726.
13. Auger, P., Ehrenfest, P., Maze, R., Daudin, J., & Fréon, R. A. (1939). Extensive cosmic-ray showers. Reviews of modern physics, 11(3-4), 288.
14. Peter K. F. Greider (2010). EXTENSIVE AIR SHOWERS: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects. Springer Volume I.

15. Cherenkov, P. A. (1934). Visible emission of clean liquids by action of γ radiation. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 2, 451.
16. Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247), 335-341.
17. De Micco, L., Larrondo, H. A., Plastino, A., & Rosso, O. A. (2009). Quantifiers for randomness of chaotic pseudo-random number generators. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1901), 3281-3296.
18. <https://geant4.web.cern.ch/>
19. https://wiki.qt.io/Install_Qt_5_on_Ubuntu
20. Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., ... & Beck, B. R. (2016). Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 835, 186-225.
21. Allard, D., Allekotte, I., Alvarez, C., Asorey, H., Barros, H., Bertou, X., ... & Murrieta, T. (2008). Use of water-Cherenkov detectors to detect gamma ray bursts at the Large Aperture GRB Observatory (LAGO). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 595(1), 70-72.
22. DeYoung, T., & HAWC Collaboration. (2012). The HAWC observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 692, 72-76.
23. <https://www.saint-gobain.com.mx>
24. Niaz, M., Klassen, S., McMillan, B., & Metz, D. (2010). Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks. *Science Education*, 94(5), 903-931.
25. Pais, A. (1979). Einstein and the quantum theory. *Reviews of Modern Physics*, 51(4), 863.

26. Howard, J. N. (1964). John William Strutt, third Baron Rayleigh. *Applied Optics*, 3(10), 1091-1101.
27. Ginzburg, V. L. (1996). Cosmic ray astrophysics (history and general review). *Physics-Uspekhi*, 39(2), 155.
28. Peter K. F. Greider (2010). *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects*. Bern, Switzerland. Springer.