



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD DE CIENCIAS EN FÍSICA Y
MATEMÁTICAS



ESTUDIOS DE SIMULACIÓN PARA LA
ACTUALIZACIÓN DEL DETECTOR ACORDE
DEL EXPERIMENTO ALICE-LHC DEL
CERN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS FÍSICAS

PRESENTA:

PEDRO ALFONSO VALENCIA ESQUIPULA
X151006

DIRECTOR:

DR. MARIO RODRÍGUEZ CAHUANTZI
FCFM - BUAP

Co - DIRECTORA:

DRA. KAREN SALOMÉ CABALLERO MORA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MÉXICO.
NOVIEMBRE 2020.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS EN FÍSICA Y MATEMÁTICAS
DIRECCIÓN
CONTROL ESCOLAR POSGRADO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
 14 de Octubre de 2020
Oficio No. FCFM/0340/20

Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi

Presidente y Director de Tesis

Dra. Karen Salomé Caballero Mora

Co-Directora de tesis

Presente

Por este medio me permito informarle que una vez efectuada la revisión de la tesis denominada:

“ESTUDIOS DE SIMULACIÓN PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL DETECTOR ACORDE DEL EXPERIMENTO ALICE-LHC DEL CERN”

Ha sido aceptado para sustentar el Examen de Grado de Maestro en Ciencias Físicas del **Lic. Pedro Alfonso Valencia Esquipula** con matrícula escolar X151006.

Se autoriza su impresión en virtud de cumplir con los requisitos correspondientes.

Atentamente

“Por la conciencia de la necesidad de servir”

Dra. Karen Salomé Caballero Mora
Directora



DIRECCIÓN
FCFM

C.c.p. Dr. Florencio Corona Vázquez, Secretario Académico de la FCFM.
 CP. Juan Manuel Aguiar Gámez.- Encargado de Posgrado FCFM
 Archivo / Minutario
 KSCM /jmag

FCFM- UNACH – Ciudad Universitaria, Carretera Emiliano Zapata Km 8, Rancho San Francisco, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
 C. P. 29050.

Correo electrónico: fcfm.posgrado@gmail.com Tel. 61 7 80 00 ext. 8104





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE DESARROLLO BIBLIOTECARIO



Código: FO-113-09-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Pedro Alfonso Valencia Esquipula,
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Estudios de simulación para la actualización del detector ACORDE del experimento ALICE-LHC del CERN"
presentada y aprobada en el año 2020 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en Ciencias Físicas, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 15 días del mes de Octubre del año 2020.

Pedro Alfonso Valencia Esquipula

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Dedicatoria

*A la memoria de mi Madrina Mercedes Pérez y
de mi Abuelo Jose Esquipulas Rodríguez.*

*¡A mis padres,
mis hermanas y mi familia!*

Agradecimientos

A mis Padres, primero por darme la vida y por los valores que me han enseñado. A mi Padre, Pedro Alfonso Valencia Salinas, por siempre aconsejarme a ser una persona trabajadora y siempre dar el máximo, a mi Madre, Cesiah Esquipula Clemente, que por mas temprano que iniciaran mis actividades escolares, nunca me mando a la escuela con el estomago vacío, por siempre alentarme a conseguir mis objetivos.

A mis hermanas mayores, Lizeth Valencia García y Arianne Valencia García, sin su cuidados cuando era niño, no seria la persona que soy hoy, a mi hermanita Cesiah Abigail Ruiz Esquipula, por hacerme reír siempre, aún cuando estaba muy presionado por mis tareas.

A Rocío Ríos Sierra, por estar a mi lado todos estos años y estar ahí cuando lo he necesitado. Por todas sus palabras de aliento en momentos complicados y por siempre motivarme a seguir trabajando arduamente.

Al Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi, por la confianza brindada desde que participe en el proyecto Delfín de 2016, ahora siendo su estudiante de maestría, agradezco la paciencia brindada mientras obtenía los resultados de este trabajo de tesis, y por la amabilidad con la que resolvía mis dudas.

A la Dra. Karen Salomé Caballero Mora, por todo la confianza que me ha dado desde el proyecto de congreso de 2015, por todos sus consejos, además del infinito apoyo académico y personal.

A los profesores, Dr. Arturo Fernández Téllez (FCFM - BUAP), Dr. Sendic Estrada Jiménez y Dr. Roberto Arceo Reyes, por aceptar ser parte de mi comité de sinodales.

Al Dr. Heber Cristian Zepeda Fernández (FCFM – BUAP), por todo el apoyo computacional brindado.

A todos mis profesores de la carrera, que durante sus clases compartieron sus conocimientos y experiencias para mi formación académica.

A todo el personal administrativo de la Facultad, quienes con gran amabilidad, siem-

pre están dispuestos a ayudarte en todos los tramites que necesites.

A todos mis amigos dentro y fuera de la Facultad, por brindarme su amistad y confianza.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al proyecto CB-2014-243290-F-4239 por el apoyo otorgado.

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta una propuesta para actualizar la geometría del sistema principal de disparo para rayos cósmicos del experimento ALICE-LHC (ACORDE) que fue utilizado entre 2009 y 2015 para la detección de muones atmosféricos. La geometría propuesta busca incrementar la eficiencia de detección de muones atmosféricos respecto a la obtenida con el sistema utilizado entre 2009 y 2015. Se muestra que con la geometría propuesta para su actualización, el detector ACORDE, incrementará su eficiencia de disparo en la identificación de eventos de rayos cósmicos.

Introducción

El estudio de los rayos cósmicos nos ayuda a conocer cómo funciona el universo. Actualmente se sabe que para energías que están por debajo del área de la rodilla del espectro de energía de los rayos cósmicos (sección 1.2.1) las fuentes de estas partículas provienen de nuestra galaxia mientras que para energías que están configuradas a partir del área del tobillo, que se les conoce como Rayos Cósmicos Ultra-Energeticos (RCUE), su origen es aun desconocido [1]. Mediante la interacción que tienen estas partículas con las partículas que conforman nuestra atmósfera es posible realizar su estudio indirecto, ya que la colisión provocada por el rayo cósmico primario con alguna de las partículas en nuestra atmósfera producirá un chubasco atmosférico (sección 1.2.4). Estos chubascos contienen tres componentes: electromagnética, leptónica y hadrónica, que son detectadas gracias a los distintos arreglos experimentales posicionados dentro o fuera de nuestro planeta tierra. Como se menciona en la sección 1.2.5, existen distintos tipos de detectores, con sus respectivos métodos de detección y sus distintos tamaños; en la sección 1.3.2 se habla del Gran Colisionador de Hadrones, que cuenta con 4 experimentos principales, cada uno teniendo un objetivo de estudio distinto. Tal es el caso del experimento ALICE (capítulo 2), que siendo su labor principal el estudio de colisiones de iones pesados a valores extremos, también realiza el estudio de rayos cósmicos; el detector ACORDE (sección 2.4.1) es de los detectores principales para realizar este estudio en ALICE y el detector de interés en este trabajo de tesis. En el capítulo 3 se desglosa el trabajo de tesis realizado, en el que se describen las herramientas de software utilizadas, las características de las simulaciones y la comparación entre la respuesta a la geometría propuesta en este trabajo de tesis y la que se utilizó entre 2009 y 2018. En el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos de este trabajo de tesis.

Índice general

Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Introducción	VIII
1. Rayos Cósmicos y Aceleradores de Partículas	1
1.1. Procesos de interacción de la radiación con la materia	1
1.1.1. Partículas cargadas masivas (protones, iones)	1
1.1.2. Partículas cargadas ligeras (electrones, positrones)	2
1.1.3. Partículas neutras (neutrones, fotones)	3
1.2. Rayos Cósmicos	4
1.2.1. Espectro de energía	4
1.2.2. Mecanismos de Propagación	5
1.2.3. Mecanismos de Aceleración	6
1.2.4. Chubasco de Rayos Cósmicos	7
1.2.5. Métodos de Detección	8
1.3. Aceleradores de Partículas	11
1.3.1. Tipos de aceleradores	12
1.3.2. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)	15
2. El Experimento ALICE	17
2.1. Detectores de Trayectorias	18
2.1.1. Sistema Interno de Trayectorias (ITS)	18
2.1.2. Cámara de Proyección de Tiempo (TPC)	19
2.2. Identificación de partículas	20
2.2.1. Detector de Transición de Radiación (TRD)	20
2.2.2. Identificación de Partículas con Momentos Grandes (HMPID)	20
2.2.3. Tiempo de Vuelo (TOF)	21
2.3. Detección de Fotones	21
2.4. Detectores delanteros y de disparo	22
2.4.1. ACORDE	23

2.5. Simulaciones y reconstrucción de datos	24
2.5.1. Simulación de datos	24
2.5.2. Reconstrucción de datos	25
3. Simulaciones para la actualización y comparaciones	26
3.1. Aprendiendo a usar el Software	26
3.2. Simulación de ambos detectores	27
3.3. Comparaciones	28
4. Resultados	30
Conclusiones	33
Bibliografía	34

Capítulo 1

Rayos Cósmicos y Aceleradores de Partículas

1.1. Procesos de interacción de la radiación con la materia

Se entiende por radiación a las partículas en movimiento, que tienen la suficiente energía para ionizar el material que están atravesando. Existen varios tipos de radiación las cuales se pueden clasificarlas naturales y artificiales. Como ejemplo de radiación natural, tenemos a la radiación cósmica [1.2] y a la radioactividad ambiental (^{40}K , ^{222}Rn). Ejemplos de fuentes artificiales: los aceleradores de partículas [1.3], aceleradores para aplicación médica y reactores nucleares. Estas partículas pueden interactuar con los electrones atómicos y los núcleos, mediante colisiones elásticas (cambiando la trayectoria pero manteniendo la energía cinética) e inelásticas (cambiando la trayectoria de manera ligera y perdiendo energía cinética), lo que ocasionará una pérdida de energía transformada en excitación e ionización y absorción o atenuación en el material ¹.

1.1.1. Partículas cargadas masivas (protones, iones)

Las partículas cargadas pueden interactuar con el medio de diferentes formas:

- ◇ Pueden perder energía cinética cuando colisionan con los electrones en el material, lo que producirá radiación de frenado, lo que a su vez hará que los electrones sientan el campo coulombiano provocando que asciendan de capa (excitación) o salgan del átomo (ionización).
- ◇ Por radiación Cherenkov, proceso que ocurre cuando la partícula cargada atraviesa un medio dieléctrico alcanzando velocidades mayores al de la luz en ese medio.

¹ [2-5]

- ◇ Si la partícula cargada está sujeta a campos magnéticos y cambia su trayectoria, perderá energía por radiación sincrotrón.

Se conoce como *Stepping Power* al diferencial de energía dividido por el diferencial de trayectoria

$$S = -\frac{dE}{dX} \quad (1.1)$$

La ecuación 1.1 describe que para una partícula con energía dada, S incrementa a medida que la velocidad de la partícula decrece. Lo anterior puede comprenderse mejor por la ecuación de *Bethe-Bloch* [5], ecuación que describe la cantidad de pérdida de energía.

$$-\frac{dE}{dX} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N Z \left[\text{Ln} \left(\frac{2m_0 v^2}{I} \right) - \text{Ln} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (1.2)$$

Propiedades de la partícula:

- ▷ v velocidad
- ▷ z carga (en múltiplos de la carga del electrón)

Propiedades del material:

- ▷ N densidad del material
- ▷ Z número atómico
- ▷ I potencial de excitación e ionización del medio

Esta ecuación es válida, cuando la velocidad de la partícula pesada sea mayor, en comparación con las velocidades de los electrones en órbitas de los átomos del material.

1.1.2. Partículas cargadas ligeras (electrones, positrones)

Para este tipo de partículas o cualquiera con masa similar, las partículas incidentes interaccionarán con los electrones del material a través de la fuerza de Coulomb. Esto puede verse reflejado en la trayectoria que puedan seguir este tipo de partículas, además de que las colisiones que se produzcan provocarán una pérdida de energía mayor. Estas partículas perderán energía cinética mediante las distintas colisiones con los electrones del medio ya que el intercambio de energía será mayor, dado que las masas de ambas partes son similares. Esta pérdida de energía se puede expresar mediante la siguiente ecuación, que lleva por nombre *poder de frenado por colisiones* [6].

$$\begin{aligned} -\left(\frac{dE}{dX}\right)_c &= \frac{2\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N Z \left[\text{Ln} \left(\frac{m_0 v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} \right) - (\text{Ln} 2)(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \right] \\ &+ \frac{2\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N Z \left[(1-\beta^2) + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \end{aligned} \quad (1.3)$$

Las partículas cargadas ligeras, también pueden perder energía por radiación de frenado, el *poder de frenado por procesos radiactivos* está definida mediante la siguiente ecuación:

$$-\left(\frac{dE}{dX}\right)_r = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2c^4} \left[4Ln\left(\frac{2E}{m_0c^2}\right) - \frac{4}{3} \right] \quad (1.4)$$

E y Z^2 señalan que la pérdida de energía es más significativa para electrones con alta energía. Para electrones con energía promedio, la energía de los fotones producidos por radiación de frenado es baja, siendo absorbidos casi desde su producción. El poder de frenado total para partículas ligeras es la suma de la ecuación 1.3 con la ecuación 1.4.

$$\left(\frac{dE}{dX}\right) = \left(\frac{dE}{dX}\right)_c + \left(\frac{dE}{dX}\right)_r \quad (1.5)$$

1.1.3. Partículas neutras (neutrones, fotones)

Los neutrones dada sus propiedades físicas, tiene la posibilidad de penetrar mas materia sin ser detectados por detectores convencionales, éstos son más penetrantes que la radiación alpha y beta, incluso en ciertos casos pueden llegar a ser más penetrantes que la propia radiación gamma. Los neutrones interactúan principalmente con los núcleos del material o a través de interacciones secundarias, como por ejemplo, al absorberse un neutrón se producen gammas lo que a su vez podrá interactuar con algún átomo del material. Para los fotones, se destacan tres interacciones.

- El *efecto fotoeléctrico* es el proceso en el cual un fotón que incide en el material, es absorbido por algún electrón, el cual adquiere la suficiente energía para escapar del átomo al cual está confinado, a estos electrones se les conoce como *fotoelectrones*.
- El *efecto Compton* se origina cuando un fotón colisiona con un electrón del medio, provocando un cambio en la trayectoria del fotón a cierto ángulo, además, éste transfiere parte de su energía al electrón.
- La *creación de pares* se da cuando un fotón con un rango de energía mínima atravesando un material, produce un electrón y un positrón a la vez, donde ambos salen con la mitad de la energía total del fotón incidente.

1.2. Rayos C3smicos

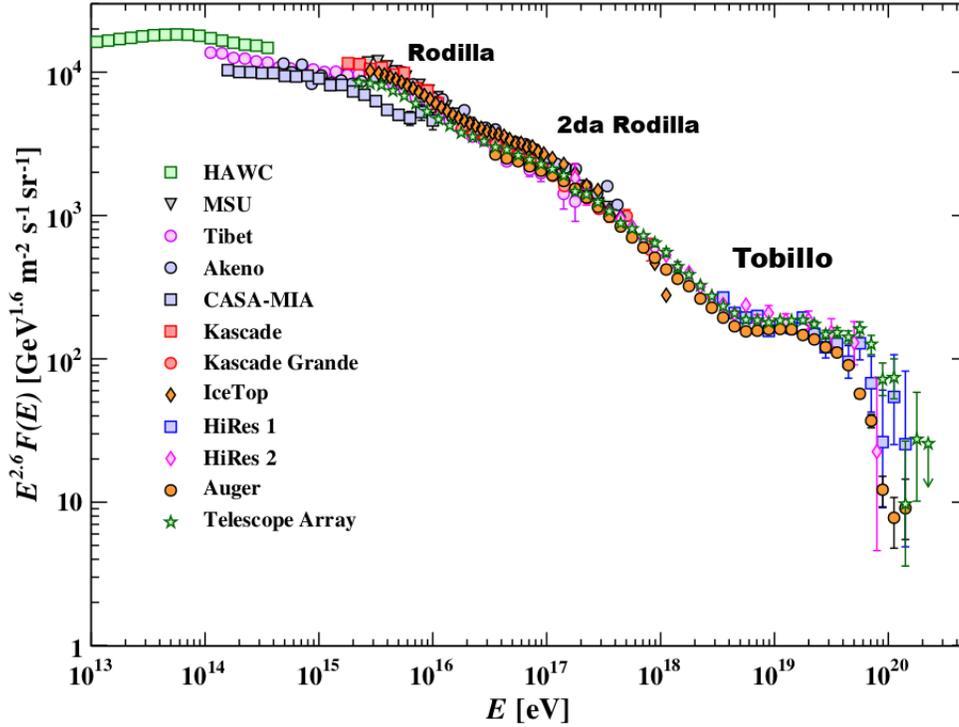


Figura 1.1: Espectro de energía de los Rayos C3smicos [7].

Los rayos cósmicos son partículas que llegan a la tierra con energías de 10^9 GeV hasta los 10^{20} GeV, se tiene evidencia que para partículas con bajas energías, se originan dentro de nuestra galaxia, pero conforme las energías de estas suben su origen es aún desconocido [Sec:1.2.1]. De igual manera, la forma en que viajan por el medio interestelar no está bien entendida, ya que desde su origen hasta la llegada al planeta pueden ocurrir muchos procesos físicos [1], como su interacción con los campos magnéticos que desvian su trayectoria original. Junto con los rayos cósmicos, también llegan a la tierra neutrinos y rayos gamma de alta energía, todos son llamados *astropartículas*. Estas astropartículas colisionan con moléculas de nuestra atmósfera ocasionando una lluvia de partículas secundarias, denominada *Chubasco atmosférico* [Sec:1.2.4]. Estudiando al chubasco originado se puede tener información del rayo cósmico primario, usando distintos métodos de detección [Sec:1.2.5].

1.2.1. Espectro de energía

El espectro de energía [Fig:1.1] de los rayos cósmicos se obtiene al graficar el flujo de llegada con respecto a la energía, y cuenta con tres zonas importantes:

- **REGIÓN APLANADA:** Esta parte del espectro corresponde a energías que están por debajo de los 10 GeV, y las partículas han sido medidas colocando detectores en

equipos meteorol3gicos, estas part3culas son afectadas por los ciclos solares [8], es decir, el flujo de part3culas decrece cuando hay actividad solar alta, y alcanzan su m3ximo cuando la actividad solar es muy baja.

- **REGI3N DE LA RODILLA:** En la regi3n de la rodilla las energ3as van de 10^{15} GeV a los 10^{17} GeV; se piensa que estos rayos c3smicos altamente energ3ticos deben provenir de fuera de nuestra galaxia, ya sea de colisiones de estrellas o remanentes de supernovas [9].
- **REGI3N DEL TOBILLO:** Para esta regi3n las energ3as son mayores a los 10^{18} GeV y funciona como un punto de separaci3n entre los rayos c3smicos gal3cticos y extra gal3cticos, son llamados ultraenerg3ticos. Para detectarlos se necesita cubrir un 3rea muy extensa ya que su flujo equivale a una part3cula por km^2 por siglo. En principio se consideraba que el flujo de estas part3culas era isotr3pico [10], es decir, independiente de su direcci3n de llegada, sin embargo estudios recientes muestran una asimetr3a a gran escala, lo que apunta a un origen extragal3ctico de estos rayos [11–13].

CORTE GZK: El corte GZK, fue predicho y calculado por primera vez por: Kenneth Greisen, Vadim Kuz'min y Georgiy Zatsepin [14], para lo cual se basaron en las interacciones que tienen los rayos c3smicos con los fotones de la radiaci3n c3smica de fondo (CMB, por sus siglas en ingles). Como principal informaci3n el corte GZK nos dice que a partir de cierto nivel de energ3a, los rayos c3smicos interactuacionan con esta radiaci3n de fondo. Fotopiones producidos por protones y foto-desintegraci3n de los n3cleos, permean el universo, provocando las interacciones de los RC de muy alta energ3a con esta radiaci3n de fondo, lo que les provoca una p3rdida de energ3a. Por lo tanto ya no pueden alcanzar la tierra, lo cual se traducir3a en una dr3stica reducci3n del flujo, o ‘‘corte’’, a partir de dicho nivel de ultra alta energ3a. Gracias al estudio acerca de la evoluci3n del espectro de rayos c3smicos extra gal3cticos a trav3s del fondo de microondas [15] en 1994, F. A. Aharonian y J. W. Cronin, llegaron a la conclusi3n de que, no importa la energ3a de la part3cula primaria, si tiene una energ3a mayor o igual a los 3×10^{20} eV, su fuente de origen tendr3 que estar a 50 Mpc de distancias de la Tierra.

1.2.2. Mecanismos de Propagaci3n

En el modelo est3ndar se establece que la potencia que requieren las fuentes de los rayos para mantener la densidad de energ3a que observamos es $Q \sim \frac{\rho_E}{\tau_e}$ donde ρ_E es la densidad de energ3a de τ_e es el tiempo que le toma a la part3cula escapar de la galaxia. Adem3s, la relaci3n entre el espectro de la fuente y el espectro diferencial observado depende de la propagaci3n de los rayos c3smicos en la galaxia, la ecuaci3n b3sica de la propagaci3n es:

$$\dot{n}_i = q_i - n_i \left(\frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\gamma \tau_{d,i}} \right) + \sum_{j>i} B_{j \rightarrow i} \frac{n_j}{\tau_j} \quad (1.6)$$

Donde q_i es el término correspondiente a la fuente, n_i es la densidad de los rayos cósmicos, \dot{n}_i es la diferencial de esta variable con respecto al tiempo, $1/\tau_d$ la razón de pérdida desde la región de propagación, $1/\tau_i$ es la razón de pérdida por colisiones de partículas con el gas, $1/\tau_a$ la razón de pérdida por decaimiento y $B_{j \rightarrow i}$ la razón de fraccionamiento para que un núcleo produzca un fragmento i , además de que $1/\tau_i = n_H c \sigma$, con n_H la densidad en el medio interestelar, c la velocidad del rayo cósmico y σ la sección transversal de colisión.

Lo anterior puede ayudarnos a entender que para núcleos secundarios estables, el tiempo que pueda llevar a la partícula para que abandone la fuente decrece con la energía y se sabe mediante observaciones que la dirección de llegada de los rayos cósmicos es isotrópica al menos a pequeña escala [11–13]. Considerando como rayos cósmicos a los protones y sabiendo que el número de protones originales es mayor, y sabiendo que son estables, la ecuación anterior puede escribirse como:

$$q_p(E) = \frac{n_p(E)}{\tau(E)} \left(1 + \frac{\tau_e}{\tau_i}\right) \quad (1.7)$$

Con esta ecuación se establece una relación entre el espectro de la fuente con el observado, dado que si $\tau_e > \tau_i$, es decir, cuando las partículas interactúan más con el medio antes de salir de la galaxia, tenemos que $q_p(E) \approx n_p(E)/\tau_i(E)$ donde el espectro observado tendrá el mismo índice que el espectro de la fuente. De lo anterior se puede concluir que tanto para partículas con baja energía que interactúan más con el medio antes de salir del sistema, como para partículas muy energéticas que salen pronto, el espectro de alta energía para ambas es el mismo [17, 18].

1.2.3. Mecanismos de Aceleración

Uno de los modelos que explica la forma en que los rayos cósmicos pueden ser acelerados es la *aceleración de Fermi*, también conocida como el modelo *Bottom-Up*, este modelo describe la transferencia de energía cinética del movimiento a gran escala de una nube de plasma a partículas individuales cargadas [17, 18]. Para que este proceso ocurra se necesita de la velocidad del movimiento diferencial de la nube y del acoplamiento de las partículas cargadas, de tal manera que la longitud de difusión sea mucho menor que la distancia del camino libre medio de las colisiones con el gas en la nube. Este acoplamiento se da mediante los campos magnéticos que provocan que las partículas cargadas sean esparcidas en el medio interestelar. Una partícula con energía E_1 y velocidad v_1 entrando a una región adyacente $R2$, la cual se mueve con una velocidad v_2 , se propagará en esa región hasta que su vector promedio de velocidad sea igual a v_2 . Si la partícula regresa e ingresa a su región original $R1$, tendrá una energía definida como:

$$E_2 = E_1 + \Delta E \quad (1.8)$$

donde $\Delta E = f(\theta_1, \theta_2)(v_1/c)E_1$, ΔE puede ser negativa o positiva, la magnitud y el coeficiente f dependerá de los ángulos θ_1 y θ_2 siendo éstos la orientación de la partícula

cuando entra y sale de R2. Simplificando la ecuaci3n 1.8 podemos obtener que:

$$\Delta E \propto \epsilon E \quad (1.9)$$

con $\epsilon \propto (v_1/c)^2$ para interacciones con nubes de plasma (mecanismo de Fermi de segundo orden) y $\epsilon = (4/3) \times (v_1/c)$ para las interacciones con frentes planos de onda de choque (mecanismo de Fermi de primer orden), v_1/c es la velocidad relativa del flujo del plasma, no de los rayos c3smicos.

Aceleraci3n por Gradiente de velocidades: este proceso puede darse cuando en una regi3n llena de irregularidades magn3ticas existe un fuerte gradiente de velocidades, las part3culas que son muy energ3ticas pueden ‘‘ver’’ regiones con diferente velocidad [19]. La ganancia de energ3a se expresa como:

$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \propto E^2 \quad (1.10)$$

Esto implica que el proceso se mantiene hasta que la part3cula se escapa de la regi3n de aceleraci3n; la distribuci3n resultante es una ley de potencias con un 3ndice espectral $p = 1 + \alpha$, donde α se relaciona con el camino libre medio por $\lambda \propto E^\alpha$.

Otra de las formas en que puede propagarse un rayo c3smico es mediante las distintas interacciones que pueda tener cuando colisiona con el gas interestelar, mediante alguno de los procesos de interacci3n con la materia:

- a) $p + H \longrightarrow \pi^0 + X$ seguido por $\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$ y π^0 neutro
- b) $e + H \longrightarrow e + \gamma + X$ (Radiaci3n de frenado)
- c) $e + \gamma \longrightarrow \gamma + X$ (Dispersi3n Compton inversa)

Un remanente de supernova (SNR) que pueda ceder parte de su energ3a a los rayos c3smicos, se le puede considerar como una potencial fuente de fotones de alta energ3a. Para que el proceso de aceleraci3n ocurra debe existir la suficiente cantidad de gas para retardar el proceso de expansi3n del SNR, as3, los rayos c3smicos acelerados pueden interactuar para producir piones neutros y fotones. Los electrones acelerados irradiar3n fotones con energ3as menores a causa de la radiaci3n sincrotr3n y los rayos gamma por radiaci3n de frenado [17, 18].

1.2.4. Chubasco de Rayos C3smicos

Los chubascos atmosf3ricos extendidos recibieron este nombre por el f3sico franc3s Pierre Auger, quien se dio cuenta de que al colocar dos detectores separados entre si, se ten3an coincidencias en las mediciones, lo que lo llev3 a pensar que este fen3meno tendr3a que ser provocado por los rayos c3smicos colisionando en alg3n punto con las part3culas de la atm3sfera [16]. Se sabe entonces que los chubascos atmosf3ricos son producidos cuando los rayos c3smicos colisionan con part3culas que conforman la atm3sfera (ver figura 1.2), a su vez estas part3culas secundarias, que se originan de la colisi3n primaria, seguir3n interactuando con part3culas en la atm3sfera, originando nuevos chubascos, as3 hasta llegar a un l3mite de part3culas creadas.

Un chubasco atmosférico está compuesto de tres componentes: electromagnética, leptónica y hadrónica. En el desarrollo del chubasco los hadrones se esparcen junto con la componente electromagnética, la cual se origina a partir de los decaimientos de piones neutros y partículas η , lo que a su vez producirá fotones con muy alta energía, generando así la parte electromagnética la cual está compuesta de electrones y positrones. Los piones y núcleos cargados se mantienen paralelos conforme el chubasco se propaga, lo cual genera de nuevas interacciones. Los piones y kaones con más baja energía, forman parte de la parte electromagnética y leptónica. Los electrones y muones muy poco energéticos se propagan de manera que abarcan un área más grande, lo que ocasiona que la densidad de partículas sea más pequeña con respecto al centro del chubasco. Podemos recalcar que el número y tipo de partícula depende del chubasco, en la forma que éste se propague, pero el tamaño y la energía inicial dependen de la composición de la partícula.

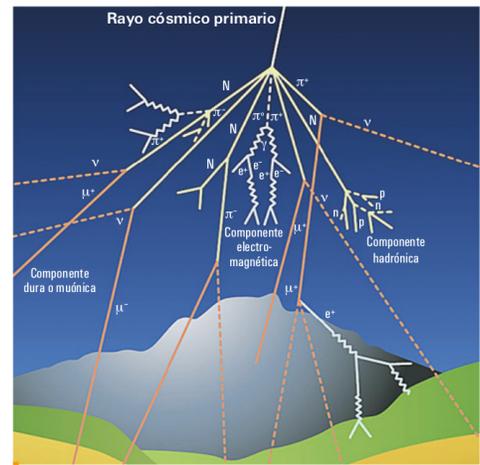


Figura 1.2: Chubasco atmosférico producido por los rayos cósmicos. La primera interacción con la atmósfera ocurre a una altura entre 8 y 10 km, se observan las distintas componentes [20].

1.2.5. Métodos de Detección

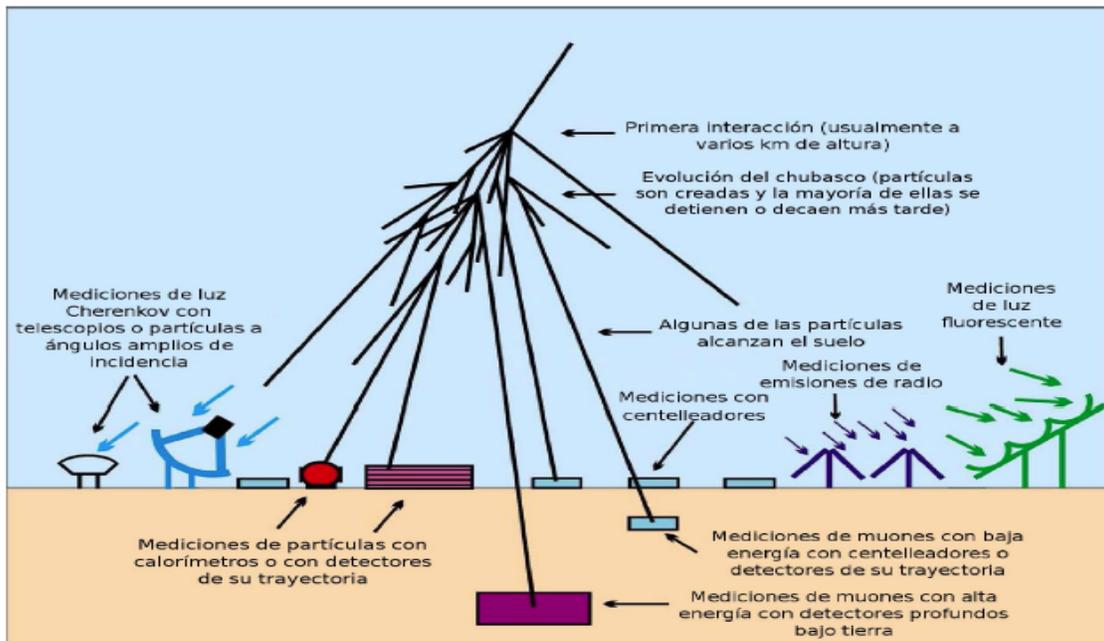


Figura 1.3: Ejemplos de las distintas formas de detección de rayos cósmicos [21].

A lo largo de los a1os los m3todos para detectar rayos c3smicos, han variado a tal punto de construir aparatos muy avanzados. Por esta raz3n se han desarrollado diferentes tipos de detectores de part3culas dedicados a estudiar las diferentes componentes de los chubascos atmosf3ricos. En la figura 1.3 se observan varios ejemplos de detectores de rayos c3smicos [21] y a continuacion se explican algunos de ellos.

- **DETECTORES CHERENKOV EN AGUA:** Los detectores Cherenkov en agua, utilizan la Radiaci3n Cherenkov como herramienta principal de la detecci3n. Este tipo de detectores son utilizados por los Observatorios Pierre Auger ² [22] y HAWC (High Altitude Water Cherenkov) [23], la diferencia es el tipo de arreglo, es decir, Pierre Auger est3 dise1ado para detectar los chubascos extendidos producidos por rayos c3smicos que est3n en la regi3n del tobillo del espectro de energ3a, mientras que HAWC fue dise1ado con la finalidad de detectar los chubascos originados por fotones de muy alta energ3a. Las part3culas ultrarelativistas que atraviesan grandes vol3menes de agua, producen la radiaci3n Cherenkov al viajar m3s rapido que la velocidad de la luz en ese medio, dicha luz es captada por tubos fotomultiplicadores y digitalizada posteriormente.
- **DETECTORES PARA PART3CULAS ESPECIFICAS:** Los detectores son construidos para detectar part3culas con cierto rango de energ3a, pero a su vez tambi3n se construyen con la finalidad de solo detectar una part3cula en espec3fico, tal es el caso de SNOLab (Sudbury Neutrino Observatory) [24] y IceCube (South Pole Neutrino Observatory) [25]. SNOLab (Materia Oscura y Neutrinos) trabaja con c3maras de burbujas dise1adas con un l3quido especial sensible al paso de diferentes tipos de part3cula. Una part3cula que logre atravesar el contenedor provocar3 una serie de burbujas y sonidos que depender3n de la part3cula incidente. Con esto se toman fotograf3as de la calidad de las burbujas y mediante simulaciones de los modelos de los detectores se logra discriminar la calidad de los eventos. IceCube (Neutrinos) utiliza fotomultiplicadores colocados en cuerdas incrustadas en la profundidad del hielo del polo sur, as3 cuando una part3cula interactu3 con el hielo provocar3 una luz que llegar3 hasta los fotomultiplicadores. Cabe destacar que en ambos experimentos las part3culas atraviesan una gran cantidad de materia, antes de llegar al detector.

Detectores de Centelleo

Los detectores de centelleo (ver figura 1.4) utilizan materiales que al ser expuestos a radiaci3n ionizante, emiten un destello de luz. Este proceso ocurre cuando la radiaci3n que interact3a con el material excita e ioniza a las mol3culas y 3tomos del material, los cuales al regresar a su estado base producir3n fotones en el rango de energ3a del espectro visible o cercanos a 3l. En este trabajo de tesis se planea seguir haciendo uso de este tipo de material, para realizar la actualizaci3n del detector ACORDE [Sec:2.4.1] que forma parte de los detectores del experimento ALICE [Cap:2], modificando las dimensiones de

²Se le considera un detector h3brido, ya que combina t3cnicas de detecci3n cherenkov en agua con telescopios de fluorescencia.

la geometr3a de la run2 (actual), con el objetivo de provocar un aumento en la detecci3n de muones atmosf3ricos. Existen distintos tipos de centelladores que se usan habitualmente, 3stos podr3an clasificarse de la siguiente manera: los org3nicos que est3n basados en l3quidos y pl3sticos, los inorg3nicos, siendo el centellador con Yoduro de Sodio el favorito de algunos experimentos a partir de 1950, y los del tipo gaseoso. Los centelladores org3nicos son r3pidos en cuanto al tiempo de respuesta, pero la luz de salida tiene una menor intensidad, mientras que los centelladores inorg3nicos son lentos en el tiempo de respuesta, pero tienen una buena producci3n de luz. De entre los inorg3nicos podemos mencionar a los siguientes tipos de materiales: Yoduro de Cesio, Sulfato de Zinc, Fluoruro de Calcio y Bigermanato de Bismuto, que son usados por su alta eficiencia en cuanto a la emisi3n de luz, cada uno de estos compuestos puede trabajar bajo distintos ambientes, como por ejemplo, el Fluoruro de Calcio, que puede ser usado en severas condiciones ambientales [26].



Figura 1.4: Esquema b3sico del funcionamiento de un detector con pl3stico centellador.

Entre los org3nicos podemos destacar al del tipo pl3stico, ya que es el tipo de centellador que se usa para los m3dulos de ACORDE [Sec:2.4.1] [53], tanto para la geometr3a de la run2 como para la nueva versi3n. Este tipo de centellador es la polimerizaci3n de un centellador org3nico vertido en un solvente; dado que su producci3n es relativamente f3cil se han hecho muy populares dentro de algunos experimentos, pero tiene una cierta desventaja, pueden presentar un desgaste significativo [26].

1.3. Aceleradores de Partículas

Los aceleradores de partículas son máquinas que permiten cambiar la velocidad y/o dirección de las partículas cargadas, cada acelerador puede ser utilizado para propósitos distintos: ciencia, medicina y fines industriales.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.11)$$

De la fuerza de Lorentz (Ecuación 1.11) [27], con E el campo eléctrico, v la velocidad de la partícula y B el campo magnético, podemos ver que se necesita un campo eléctrico para poder acelerar la partículas, ya que la parte magnética no realiza trabajo sobre esta. Por otro lado, para provocar un cambio en la trayectoria de la partícula, se usa al campo magnético.

Los elementos básicos para describir cómo funciona un acelerador son los siguientes:

- 1 La fuente de partículas que serán aceleradas.
- 2 Lugar en el que el haz circulará durante todo el proceso.
- 3 Posicionamiento de la partícula, donde los campos eléctricos dirigidos en la dirección de su movimiento, aumentarán la velocidad de la partícula.
- 4 Haciendo uso de electroimanes, se genera un campo magnético para tener control de la trayectoria del haz.
- 5 Posición en la que se generará la colisión o un objetivo en específico.

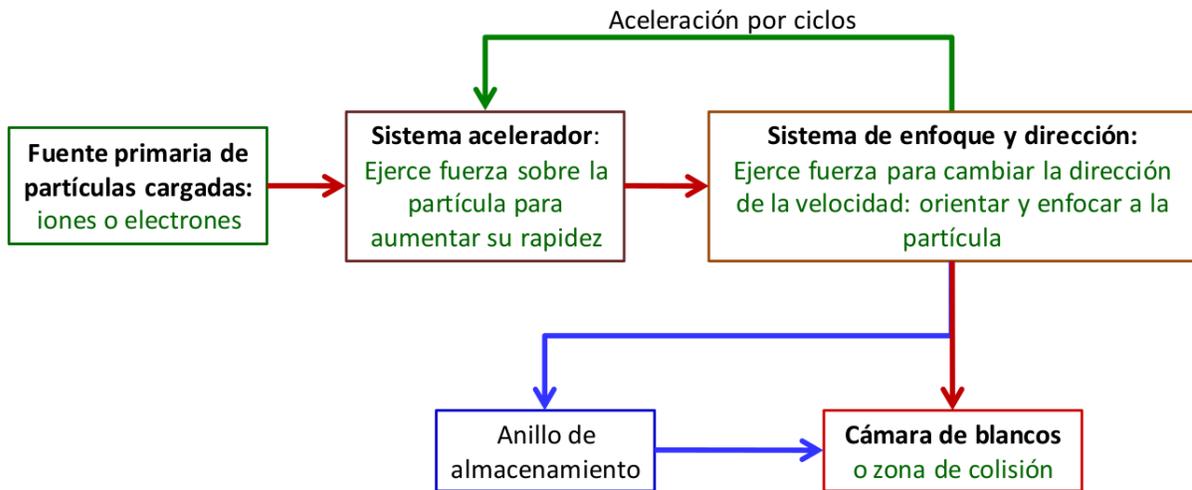


Figura 1.5: Esquema básico del funcionamiento de un acelerador de partículas [29].

En la figura 1.5 se muestra un diagrama del proceso general de un acelerador [29]:

- La flechas rojas indican el proceso mas simple.
- La flecha verde se1ala el hecho de que algunos aceleradores regresan el haz a la zona de aceleraci3n, siendo sometida de nuevo al campo el3ctrico para as3 aumentar su energ3a nuevamente.
- La flecha azul representa la forma en que algunos aceleradores logran que la part3cula, a trav3s de la guia del haz, permanezca movi3ndose en un “anillo de almacenamiento”, antes de ser enviada al punto de colisi3n.

1.3.1. Tipos de aceleradores

Los aceleradores de part3culas, pueden ser clasificados por su forma, por el objetivo por el cual son creados o por el tipo de haces producidos.

Lineales

Estos aceleradores se ayudan de trayectorias rectil3neas para acelerar part3culas (electrones, protones o iones), pero cuentan con un limitante, ya que la velocidad que alcanzar3n depende en gran parte de la longitud del acelerador. A diferencia de los aceleradores que producen luz sincrotron y que provoca una p3rdida significativa del haz, en los aceleradores lineales se aprovecha al m3ximo toda la energ3a que acumule durante todo su trayecto.

Como ejemplo tenemos al SLAC National Accelerator Laboratory [31], que se encuentra



Figura 1.6: Imagen a3rea del territorio que abarca el acelerador SLAC [30].

ubicado al oeste de las instalaciones de la Universidad de Stanford en Menlo Park [Fig: 1.6], siendo la Universidad de Stanford la encargada de la administración del acelerador. Cuenta con muchas áreas de investigación, siendo la principal el estudio de las partículas elementales, tanto experimental como teórico. Además, como parte ampliada de su programa de investigación utiliza la radiación, para realizar estudios en las áreas de la Química, Biología, y Medicina, por menciona algunas [32]. SLAC forma parte del Departamento de Energía de los Estados Unidos, dedicándose principalmente a la investigación científica.

Circulares

Existen dos tipos de aceleradores circulares, el Ciclotrón que utiliza campos magnéticos y eléctricos constantes y el Sincrotrón en el cual los campos magnéticos y eléctricos varían.

CICLOTRONES

Los aceleradores tipo ciclotrón aceleran iones alcanzando velocidades muy altas sin usar alto voltaje [33], la figura 1.7 muestra el diagrama del primer ciclotrón. En la figura 1.8 se puede ver el diseño principal, consiste en dos electrodos huecos en forma de “D’s” bajo el efecto de un campo magnético generado por electroimanes; las placas están conectadas a un generador de frecuencias el cual provocara un campo eléctrico oscilante. Cercano

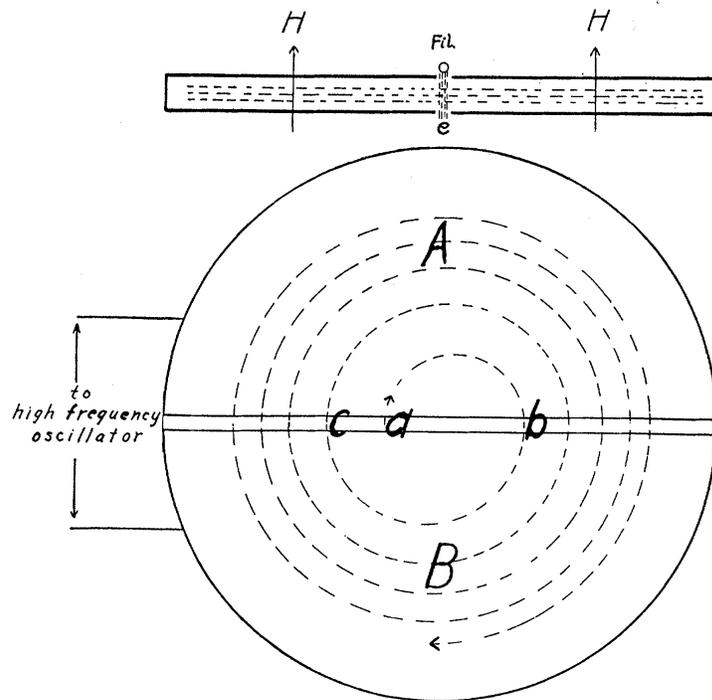


Figura 1.7: Diagrama del método experimental para aceleración múltiple de iones [33].

a uno de los electrodos se localiza una fuente de iones, los cuales se dirigirán al otro electrodo cuando su potencial sea negativo, esto provoca una primera aceleración y a causa del campo magnético comenzarán a girar en relación a la forma de los electrodos hasta llegar nuevamente a la región intermedia de las D's. Cuando esto ocurra, el otro electrodo tendrá un potencial negativo, el campo eléctrico habrá cambiado de dirección, lo que provocara que los iones se dirijan al otro electrodo, ocasionando una segunda aceleración para los iones. Este proceso se repite hasta alcanzar la cantidad de energía deseada para después extraer a los iones de los electrodos. Usando la ecuación del radio

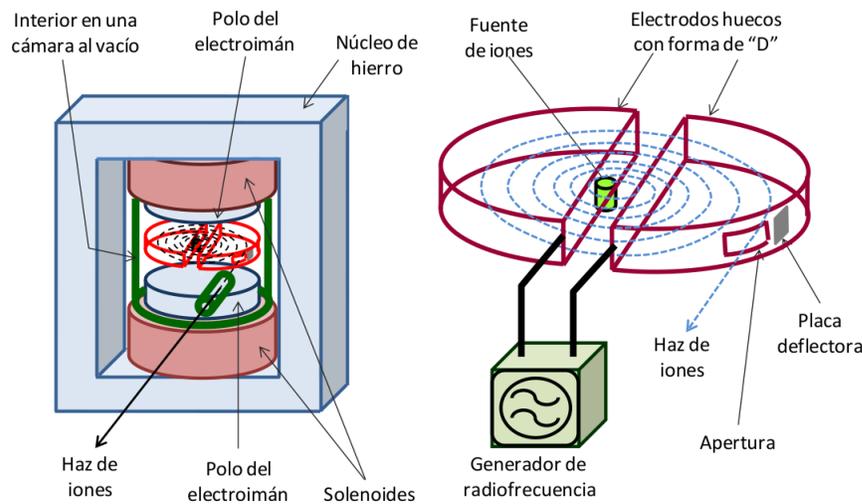


Figura 1.8: Esquema del acelerador ciclotrón [29].

de giro de Larmor y del periodo, podemos decir que el movimiento de la partícula solo dependerá del campo magnético, de la masa y carga de la partícula; al ser el periodo independiente de la velocidad de la partícula, sirve escoger la variación del potencial en los electrodos, de tal forma que cuando crucen de un electrodo a otro, estas partículas se acelerarán cada vez [29]. Cabe destacar, que si a las partículas les tomó un determinado ciclo cubrir la semicircunferencia, para las vueltas posteriores se comportarán de la misma manera, ocasionando un movimiento espiral, así, hasta ser extraídas.

SINCROTRONES

El tipo de acelerador sincrotrón permite acelerar partículas a mayores energías, pero a diferencia del ciclotrón, éste necesita de un acelerador lineal para inyectar a las partículas al anillo del acelerador. Con la ayuda de electroimanes el haz gira a través del anillo hasta pasar por una unidad de aceleración (cavidades de radiofrecuencia y campos eléctricos), lo que ocasionará que éstas tengan una mayor energía. Dado que el haz dará "n" vueltas en el anillo, el campo magnético (dipolos magnéticos) provocado por los electroimanes deben ajustarse para poder mantener a las partículas en su respectiva trayectoria [29], además de contar con otro campo magnético (cuadropolos magnéticos) que ayudará a enfocar y centrar al haz, así hasta conseguir la energía deseada y llevarlas al punto de colisión o

extracción. En la figura 1.9 a) se muestra un acelerador sincrotrón en el que se aprecia la inyección y extracción de las partículas [34] y en la figura 1.9 b) se muestra un bosquejo del acelerador sincrotrón LHC del CERN.

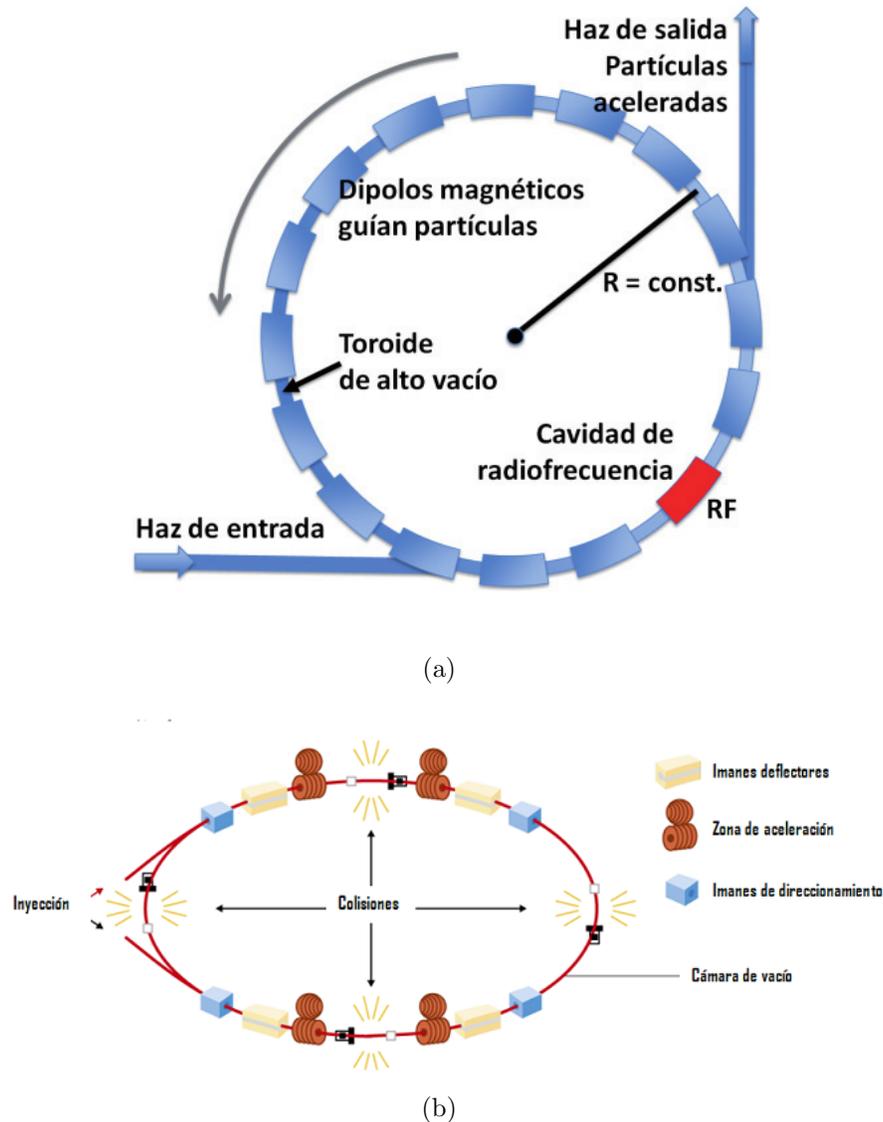


Figura 1.9: Esquemas de un acelerador sincrotrón.

1.3.2. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

El LHC [35] es el acelerador de partículas con mayor diámetro que se ha construido hasta la fecha. Su circunferencia total es de 27 Km y se encuentra a mas de 50 metros bajo la superficie terrestre, abarcando parte de los países de Francia y Suiza [Fig:1.10].

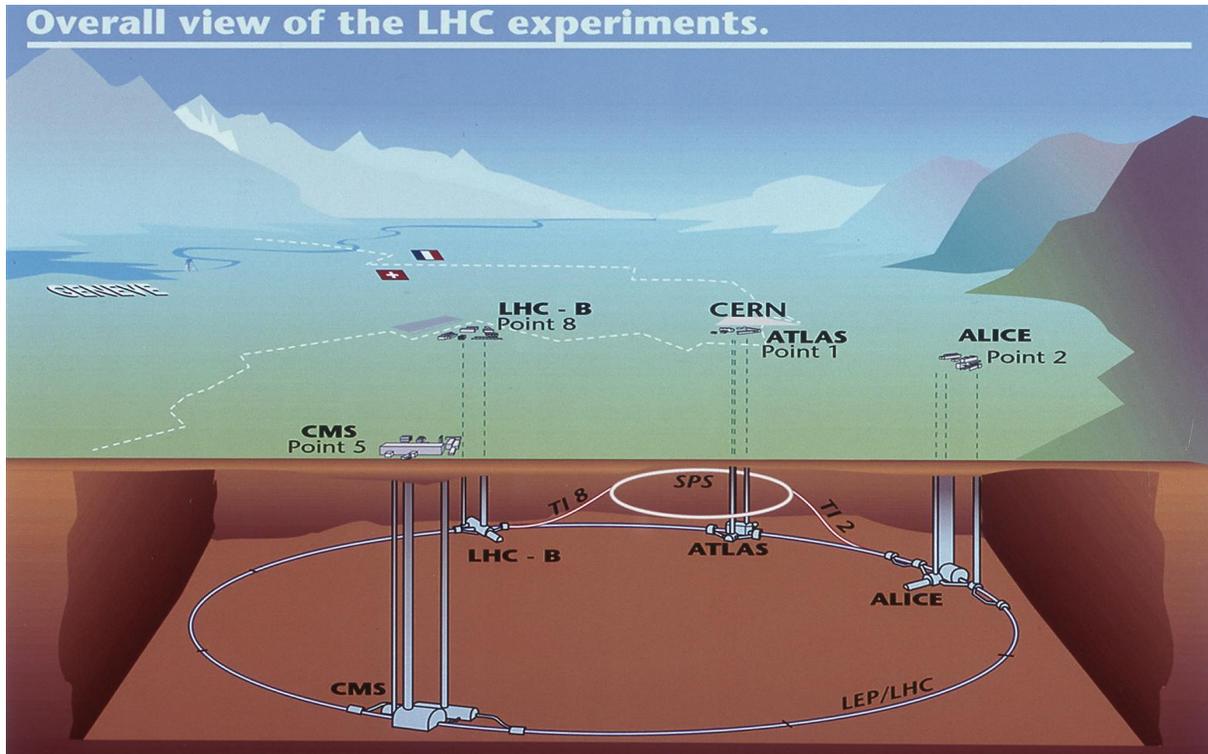


Figura 1.10: Vista del LHC junto con los 4 puntos principales de colisión.

Cuenta con dos anillos sincrotrón en los cuales iones son acelerados en sentidos opuestos para así hacerlos chocar en 4 puntos específicos de la circunferencia. A continuación se menciona cada uno de ellos, y sus objetivos principales.

- **ATLAS:** A Toroidal LHC ApparatuS: fue diseñado con el objetivo de detectar nuevas partículas en un amplio rango de energías, independientemente del proceso del cual hayan surgido [36], fue de los experimentos enfocados en la búsqueda del Bosón de Higgs.
- **CMS:** Compact Muon Solenoid: junto a ATLAS su diseño fue planificado para encontrar evidencias del Bosón de Higgs y explorar energías en el rango de los TeV [37].
- **LHCb:** Large Hadron Collider beauty: Se especializa en la física de los quark b (quark bottom), teniendo como objetivo medir el parámetro de la violación de la simetría CP durante la desintegración de los hadrones en los cuales esté implicado el quark bottom [38].
- **ALICE:** A Large Ion Collider Experiment: se especializa en el estudio de colisiones de iones pesados, analizando las interacciones fuertes de la materia y del plasma de quarks y gluones a valores extremos de densidad y energía [39].

Capítulo 2

El Experimento ALICE

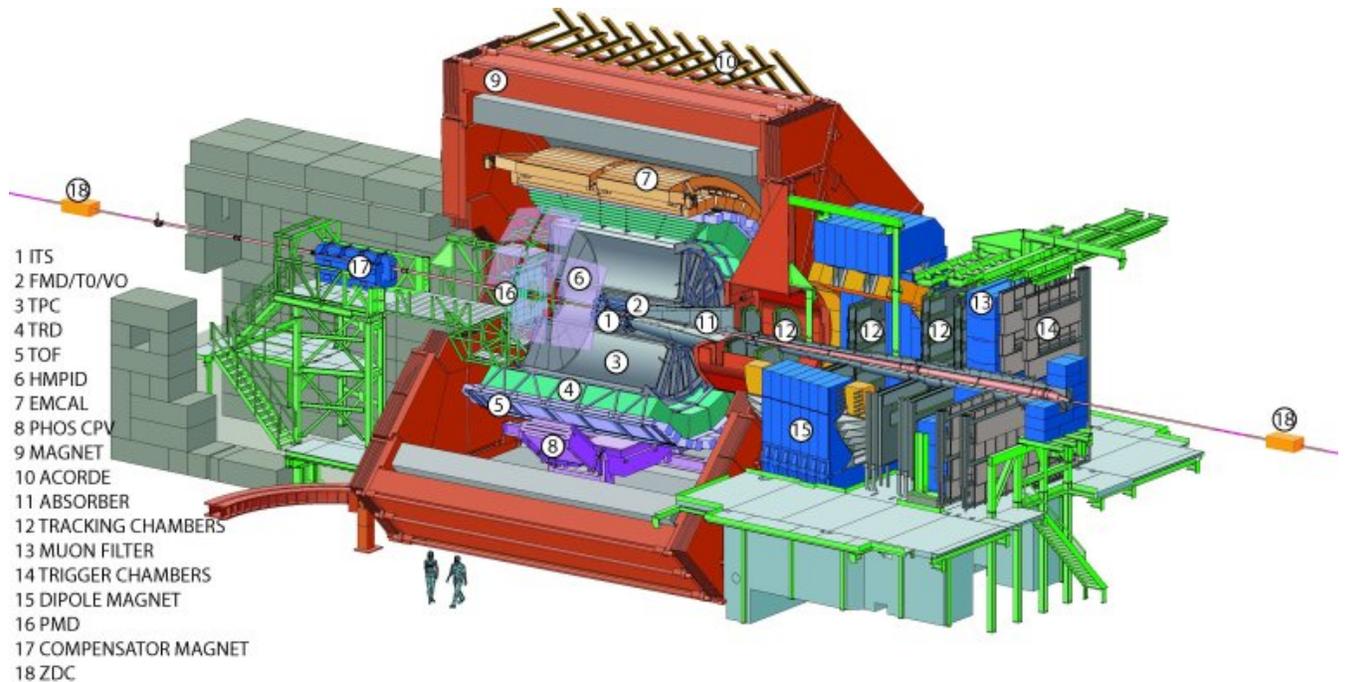


Figura 2.1: Vista transversal del experimento ALICE.

El experimento ALICE [Fig: 2.1] es uno de los 4 experimentos principales del LHC [39], su objetivo principal es el estudio de las interacciones fuertes a valores extremos de densidad, energía y temperatura, es en estas condiciones que surge el conocido plasma de quarks y gluones, fase de la materia creada después del Big-Bang. ALICE también estudia colisiones protón-protón con la intención de conocer la física de las interacciones hadrónicas, y tener una comparación en las colisiones de iones pesados. Fue construido a 60 metros bajo tierra, con una colaboración de 120 instituciones de 35 países, tiene un peso aproximado de 10,000 toneladas, sus dimensiones totales son de $16 \times 16 \times 26 \text{ m}^3$ y cuenta con un campo magnético de 0.5 Teslas que es producido por un magneto sinusoidal

que fue utilizado en el experimento $L3$ del LEP (*Large Electron-Positron collider*) [40]. Cada detector de ALICE aporta una información específica, pero están adaptados para estudiar eventos con muy alta multiplicidad en rangos muy amplios del momento, que oscilan desde 0.1 GeV hasta más de 100 GeV, además cuenta con detectores especializados como ACORDE [Sec: 2.4.1] que se dedica al estudio de los rayos cósmicos que llegan a ALICE. Con esto, se combinan las siguientes técnicas: radiación Cherenkov, medición de la pérdida de energía a causa de la ionización (dE/dx), tiempo de vuelo y transición, calorímetros electromagnéticos, filtro de muones y reconstrucción de la topología de los decaimientos.

2.1. Detectores de Trayectorias

La identificación de partículas en ALICE es única en el LHC, le es posible medir el espectro y producción de una gran variedad de hadrones. Se puede conocer con claridad si la partícula es un electrón, pión, kaón o protón. Esto con el objetivo de tener un mayor entendimiento durante las colisiones de iones pesados. Un ensamble de detectores cilíndricos (ITS, TPC y TRD) miden en varias regiones el paso de cada partícula con carga eléctrica, de las cuales su trayectoria es bien conocida cuando están bajo campos magnéticos. Dado que estos detectores se encuentran bajo un campo magnético, provocan una curvatura de estas partículas, con lo cual se puede reconstruir el momento correspondiente de cada una de estas.

2.1.1. Sistema Interno de Trayectorias (ITS)

El ITS [Fig: 2.2] está conformado por una serie de capas de silicio. Este arreglo es útil ya que la densidad de partículas generadas durante las colisiones de iones pesados es muy alta en el LHC [41]. Las capas más internas son del tipo *Silicon Pixel Detector (SPD)*, las intermedias del tipo *Silicon Drift Detector (SDD)*, y las capas exteriores son del tipo *Silicon Strip Detector (SSD)*.

La parte más cercana del punto de interacción está a solo 3 cm y la parte más lejana se encuentra a 23.8 cm, con respecto al punto de interacción. El SPD cuenta con 9.8 millones de pixeles con dimensiones de $50 \times 425 \mu\text{m}^2$. Con eso alcanza su máxima resolución posible; el SDD cuenta con 260 sensores que dan como resultado una resolución espacial de (35,25) μm en $(r\phi, z)$ (coordenadas cilíndricas) y por último el SSD que cuenta con 1698 sensores alcanzando una resolución de (20, 800) μm en $(r\phi, z)$. Los objetivos principales del ITS son:

- Reconstruir el vértice primario con una resolución mínima de 100 μm
- Trazar e identificar partículas con momentos menores a los 100 MeV.
- Reconstruir los vértices secundarios.

- Tener una mejora de la resolución angular y del momento para partículas reconstruidas por la TPC.

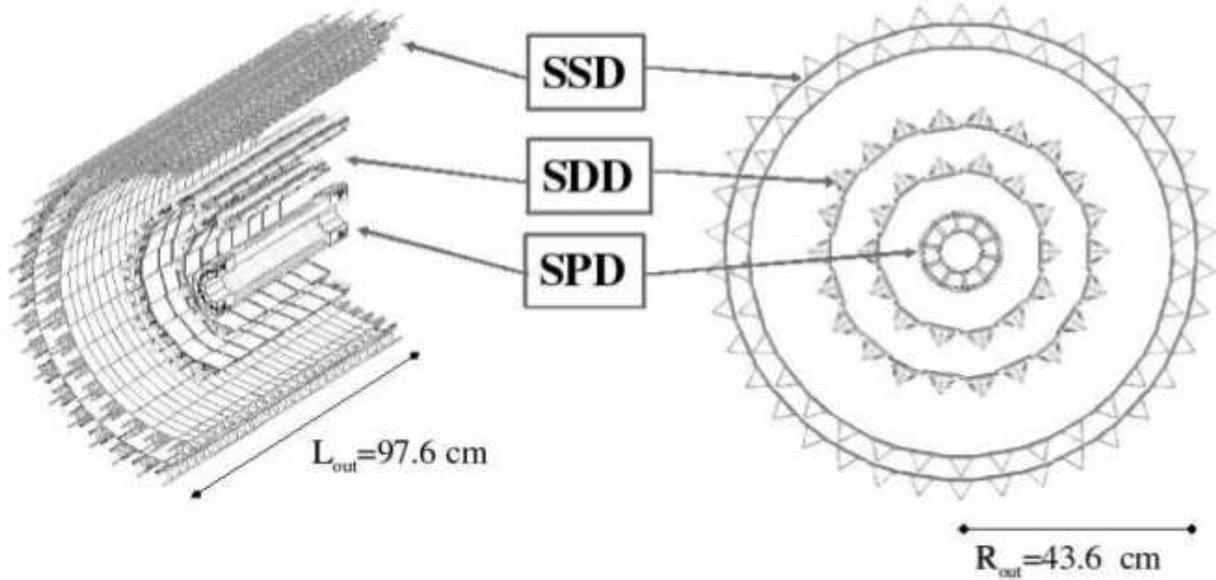


Figura 2.2: Sistema interno de trayectorias [41].

2.1.2. Cámara de Proyección de Tiempo (TPC)

La TPC [Fig:2.3] es el identificador de trayectorias principal de ALICE [42], tiene una pequeña desventaja en cuanto a la velocidad y volumen de los datos, pero garantiza un funcionamiento óptimo ante 10,000 partículas cargadas por evento de colisión. Ofrece información sobre el momento de las partículas cargadas, identificación de partículas, y determina el vértice primario de la interacción. Cubre una región de pseudorapidez $|\eta| < 0,9$ para trayectorias de longitud radial, para trayectorias reducidas en longitud tiene una aceptación cerca de $|\eta| < 1,5$. Un amplio rango del momento transversal es visto por este detector, va de los 0.1 GeV/c hasta los 100 GeV/c con una muy buena resolución. Es a causa de la gran multiplicidad de las partículas que se producen durante las colisiones, que se dificulta el predecir un número para colisiones Pb-Pb, es por eso que, para el diseño del detector, se utilizó la multiplicidad máxima, $dN_y/dy = 8000$, es decir, unas 20,000 trayectorias de partículas primarias y secundarias en la TPC [43].

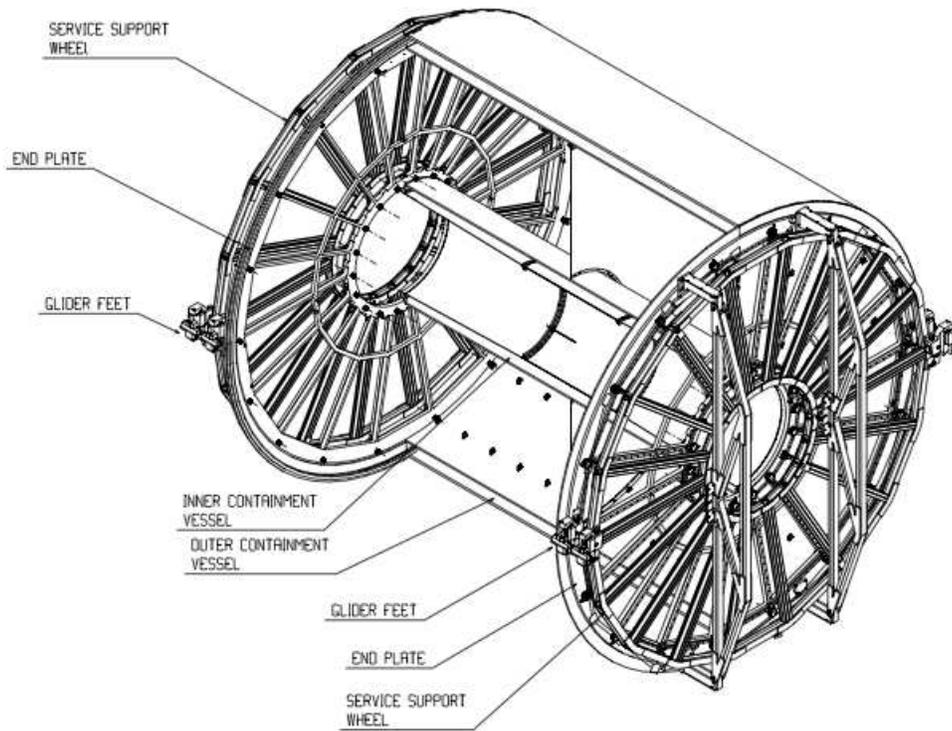


Figura 2.3: Cámara de Proyección de Tiempo, [43] .

2.2. Identificación de partículas

2.2.1. Detector de Transición de Radiación (TRD)

Se usa la radiación generada de las partículas cargadas cuando cruzan dos materiales diferentes con diferentes índices de refracción, esta radiación llega al TRD y se puede discernir entre partículas ligeras que poseen un factor relativista γ grande. Dado que la TRD se concentra en observar electrones, con ayuda de la TPC e ITS nos da información necesaria para la identificación de electrones [44].

2.2.2. Identificación de Partículas con Momentos Grandes (HM-PID)

El HMPID tiene como función mejorar la identificación de partículas con momentos muy grandes, dado que los números son bajos para estas partículas su diseño consiste en un solo brazo, cubriendo un 5 % del barril central. La radiación Cherenkov que se produce al atravesar una capa delgada de 15 mm de líquido C_6F_{14} (perfluorohexano) es detectada por un contador de fotones que consiste en 7 módulos independientes [45].

2.2.3. Tiempo de Vuelo (TOF)

El detector TOF (ver figura 2.4) está conformado por 1638 MRPC's (Multi-gap Resistive Plate Chambers) y se divide en 18 sectores con respecto a la componente azimutal. Cubre un área total de $160 m^2$, su diseño se basa en alcanzar una resolución global de tiempo alrededor de 100 ps con el objetivo de identificar kaones y piones con energías mayores a los 2.5 GeV/c y protones con energías arriba de los 4 GeV/c en un intervalo de pseudorapidez $\eta < |0,9|$, usando la información de la TPC e ITS se puede calcular la masa de las partículas [46].

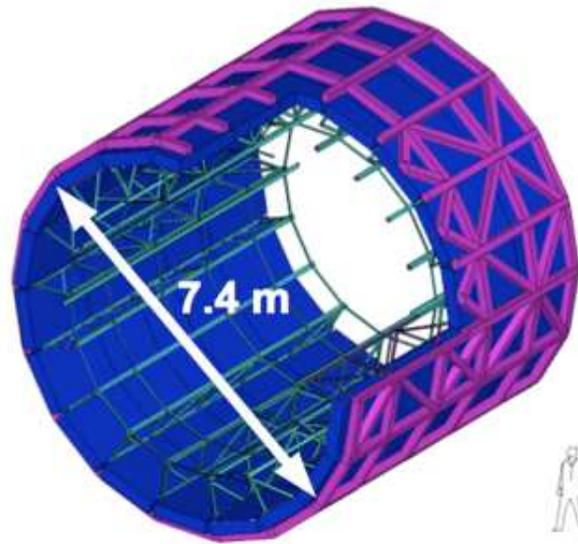


Figura 2.4: Esquema del detector TOF.

2.3. Detección de Fotones

Espectrómetro de fotones(PHOS)

PHOS es un calorímetro electromagnético con una muy alta resolución, está construido de cristales de tungstano de plomo (PbO_4). Está ubicado a una distancia de 4.6 m del vértice de interacción. Fue diseñado para medir la energía que tienen los electrones y fotones que pasan a través de éste [47].

Calorímetro ElectroMagnético (EMCAL)

El EMCAL mejora la capacidad que tiene ALICE para reconstruir jets de fotones, y haciendo uso de los detectores de trayectorias se pueden reconstruir jets con un alto momento transversal. Fue diseñado para mejorar la resolución de energía, medir la porción

neutral de ésta, discriminar arriba de los 30GeV , y separar electrones y hadrones para momentos mayores a los $10\text{ GeV}/c$ [48].

2.4. Detectores delanteros y de disparo

- V0: El detector V0 (VZERO-A, VZERO-C)[Fig:2.5] se forma a partir de dos arreglos colocados de manera asimétrica, se usa para obtener información sobre la luminosidad y multiplicidad de partículas [49]. Además se usa como sistema mínimo de disparo para los detectores centrales. Cuenta con 32 contadores elementales distribuidos a lo largo de cuatro anillos, cada contador consta de plástico centellador con fibras incrustadas, de tal forma que la longitud de onda se desplaza hasta llegar a fibras limpias, hasta llegar a un fotomultiplicador. La resolución temporal de cada contador es del orden de 1ns

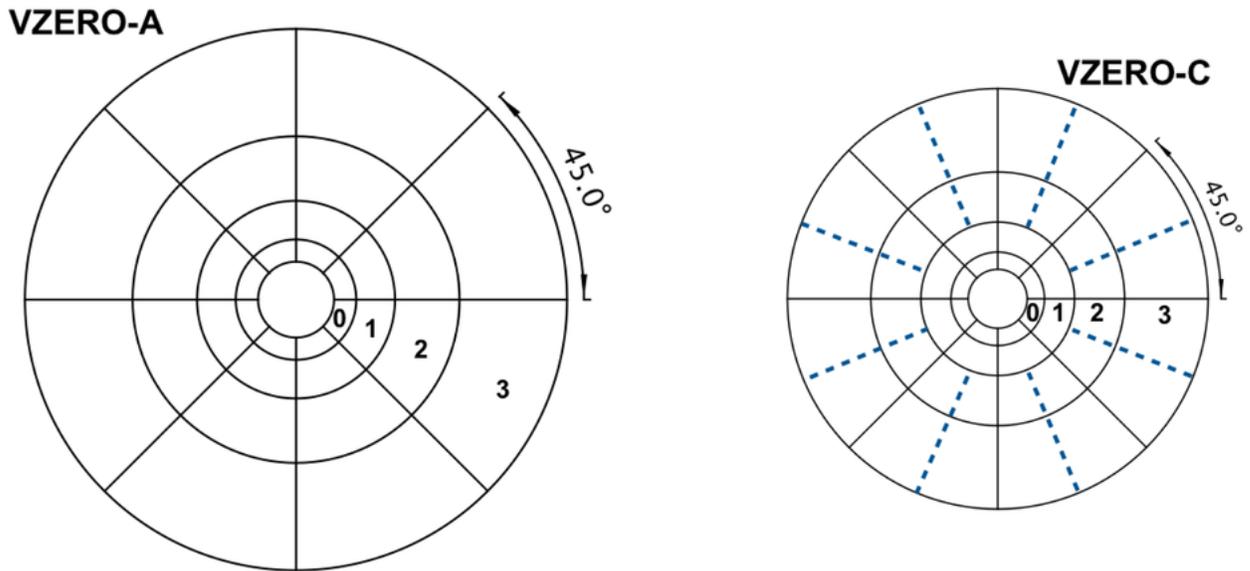


Figura 2.5: Esquema de la segmentación de VZERO-A y VZERO-C [49].

- T0: El detector T0 determina el tiempo de la colisión con una resolución menor a los 25 pico segundos, generando una señal de referencia para el detector TOF. [2.2.3] Está conformado por dos conjuntos de 12 contadores del tipo Cherenkov colocados alrededor del tubo del haz [50].
- FMD(Detector de multiplicidad delantera): registra la información respecto a la multiplicidad sobre una fracción del espacio fase [51].
- PMD(Detector de Multiplicidad de Fotones): mide la multiplicidad y distribución espacial de los fotones, evento por evento en la región de $2.3 < \eta < 3.7$ [52].

2.4.1. ACORDE

El detector ACORDE (ALICE COsmic Ray DEtector, [Fig:2.6]) es el detector esencial en este trabajo de tesis, es usado para generar una señal de disparo en el momento que muones atmosféricos lo atraviesan. Esta información es guardada y reutilizada para la calibración y alineación de los detectores centrales en ALICE [53]. Está ubicado sobre

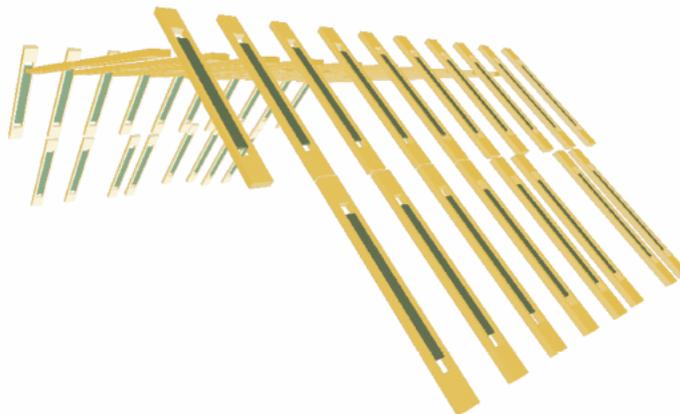


Figura 2.6: Esquema de ACORDE en la run 2 [54].

el magneto de ALICE, lo que le permite identificar la componente muónica producida por los rayos cósmicos en la región de la rodilla, que logran pasar por los metros de roca sólida que separa a ACORDE con la superficie, generando un ruido de fondo para los datos colectados durante las colisiones [55]. De la información obtenida del estudio de rayos cósmicos, puede estudiarse su origen, forma de llegada a la Tierra, la energía y su multiplicidad; también puede obtenerse información sobre cuales son las partículas que se originan durante la colisión y cuáles llegan desde el exterior. ACORDE cuenta con 60 módulos centelladores colocados sobre la superficie del magneto de ALICE, cubriendo un área de $190 \times 20 \text{ cm}^2$, cada módulo cuenta con dos plásticos centelladores [Fig: 2.7] cada uno con un área efectiva de 0.376 m^2 , cada módulo tiene acoplado un tubo fotomultiplicador para incrementar y transformar la señal de la partícula en un pulso eléctrico donde la electrónica de ACORDE la procesa.

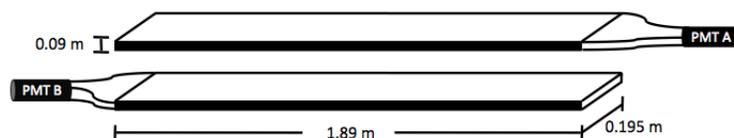


Figura 2.7: Módulo de ACORDE, [56].

La electrónica de ACORDE cumple con las siguientes tareas:

- Estudia eventos de multimuón, ACORDE proporciona una señal de múltiples coincidencias.
- Vigila el funcionamiento de los plásticos centelladores que componen a ACORDE.
- Genera una señal producida por el paso de muones atmosféricos. Esta información se utiliza para calibrar a la TPC y los demás detectores de trazas [57].

2.5. Simulaciones y reconstrucción de datos

2.5.1. Simulación de datos

Sabemos que las interacciones en la física de altas energías son en muchas ocasiones muy complicadas, esto a causa de los muchos procesos involucrados, y el sin fin de partículas creadas, ya sean hadrones, leptones, neutrinos o fotones. Al momento de hacer la detección, los detectores encargados de esta función reciben una información mezclada a causa de los procesos involucrados, es por eso que la función principal del análisis de datos es separar mediante las consideraciones físicas la información que sea relevante para estudios en específico.

En ALICE existe AliRoot [58], software desarrollado a finales de los 90's , con el objetivo de que en un solo entorno de trabajo pueden realizarse distintas tareas, como por ejemplo: simulaciones, reconstrucción, calibración, alineación, visualización y análisis. Aliroot está basado principalmente en C++, y la base del software son ROOT [59] y GEANT (GEometry ANd Tracking) [?] que es un programa que simula el paso de partículas en los distintos tipos de detectores. Para poder hacer uso de AliRoot en los servicios de cómputo del CERN y de otros países, lo que se le llama GRID, el usuario necesita de la interfaz de AliEn (ALICE Environment). En los trabajos de física de altas energías existen dos formas de trabajo, los que están hechos a partir de simulaciones y los que usan los datos reales de los experimentos. Para realizar las simulaciones existen generadores de eventos, como por ejemplo: PYTHIA6 [61] o HIJING [62]. Con estos generadores puede obtenerse la cinemática de las partículas, y una vez que se conoce esto, se simula su paso a través de los detectores simulados en GEANT, obteniéndose los llamados *hits* o mediciones registradas. Estos hits son transformados en señales como las que los detectores producen (*summable digits*), para finalizar con la creación de un archivo ROOT en el cual estará toda la información, como si de datos reales se tratara, a éstos se les llama *raw digits*. Llegados a este punto, los datos reales y los datos Monte Carlo (MC) se tratan de la misma manera, los datos MC cuentan con información extra, tal como el número de identificación de partícula, descrito por el código PDG (Particle Data Group). Ver figura 2.8 para apreciar lo anterior descrito [56].

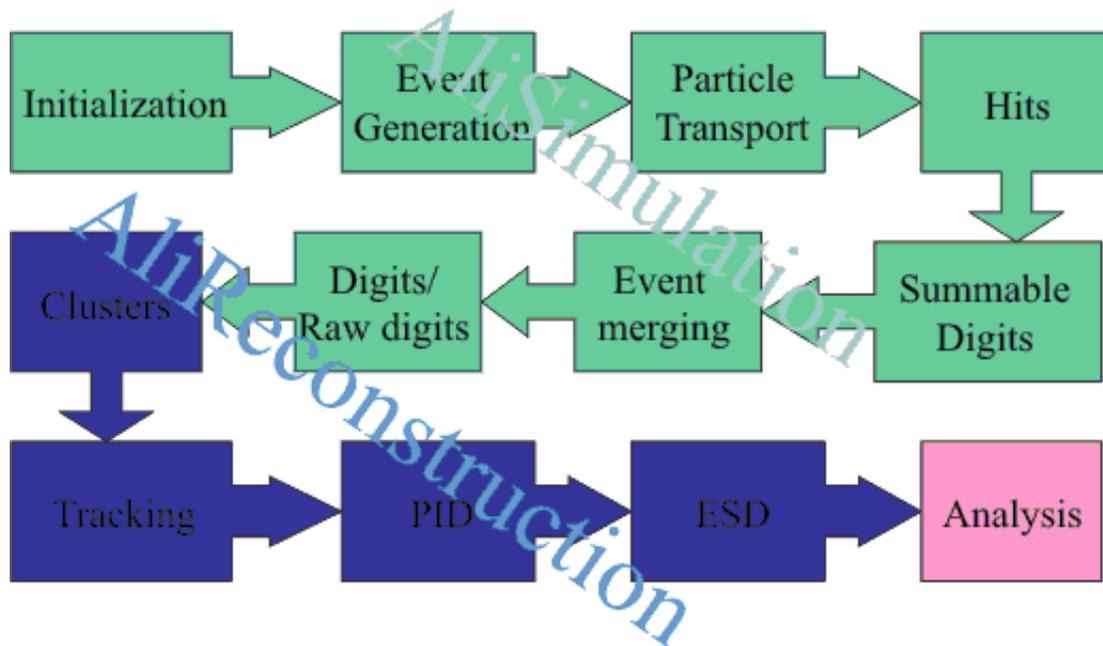


Figura 2.8: Esquema de simulación en AliRoot (Verde) y reconstrucción (Azul), [56].

2.5.2. Reconstrucción de datos

La reconstrucción de trazas se realiza en cada detector por separado, cada uno con su propia información. Se calcula el vértice primario empezando con las dos primeras capas del ITS, esto dependerá en gran manera de la multiplicidad, una vez teniendo este dato, se usa la información de cada detector para mejorar la reconstrucción de trazas, usando una serie de tres pasos:

- 1 Se reconstruyen las trazas empezando desde la TPC hacia el punto de interacción con ayuda del ITS, haciendo que estas trazas pasen lo más cercano del punto de interacción.
- 2 Se realiza la reconstrucción de trazas hacia el exterior, comenzando con el ITS pasando por la TPC, TRD, TOF, HMPID y PHOS. Una vez teniendo esto, se realiza la identificación de las partículas.
- 3 Con las trazas ya reconstruidas se realiza un ajuste para aquellas trazas cercanas al vértice primario y la reconstrucción del vértice secundario.

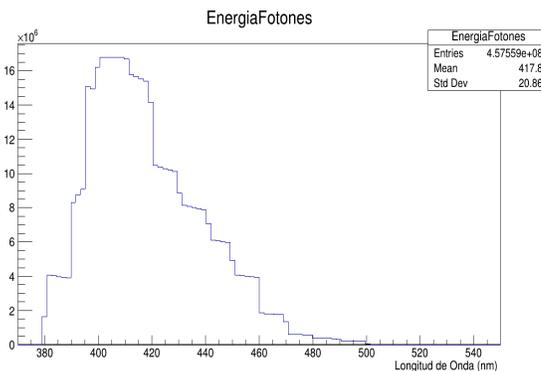
Teniendo finalizada esta serie de pasos, se almacena la información en archivos llamados Event Summary Data (ESD), para realizar el análisis final [56].

Capítulo 3

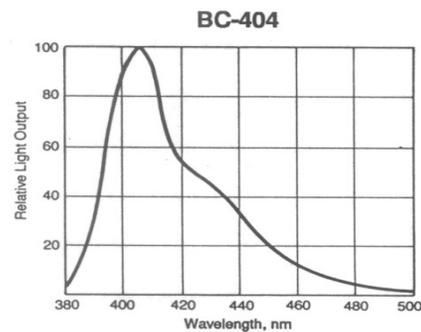
Simulaciones para la actualización y comparaciones

3.1. Aprendiendo a usar el Software

Como se mencionó con anterioridad, en Geant4 [60] se puede simular el detector que se mejorará para medir rayos cósmicos en ALICE. A la geometría de la run2, se le llamaremos vieja, mientras que a la geometría propuesta la llamaremos nueva. En primer lugar se simuló el plástico centellador que lleva como identificador Bc404. Dado que este es un plástico comercial, ya se conoce el rango de longitud de onda en el que es más sensible, por lo tanto se puede corroborar si nuestras simulaciones funcionan correctamente, comparando con datos conocidos. La simulación consistió en: un volumen de 40 m x 40 m x 4 m, con material Bc404, al cual se le hizo interaccionar con 1000 eventos con un muon en cada evento, cada uno de estos muones tuvo una energía de 20 MeV y se lanzaron a una distancia de 10 m, con respecto a la posición del volumen simulado.



(a) Simulación del Plástico Bc404 (Resultado de este trabajo de tesis)



(b) Plástico Bc404 [63]

Figura 3.1: Sensibilidad del plástico centellador para fotones que están en el rango del azul.

Como puede apreciarse en la gráfica 3.1(a), la simulación es muy cercana a las propiedades del plástico centellador Bc404 que se muestra en la gráfica 3.1 (b) [63], dado que el máximo de los fotones que se producen en el plástico centellador está entre los 400 y 420 nm en ambas gráficas.

3.2. Simulación de ambos detectores

Una vez entendido el funcionamiento de Geant4, se construyó la geometría original (vieja) del detector ACORDE, el resultado se muestra en la figura 3.2.

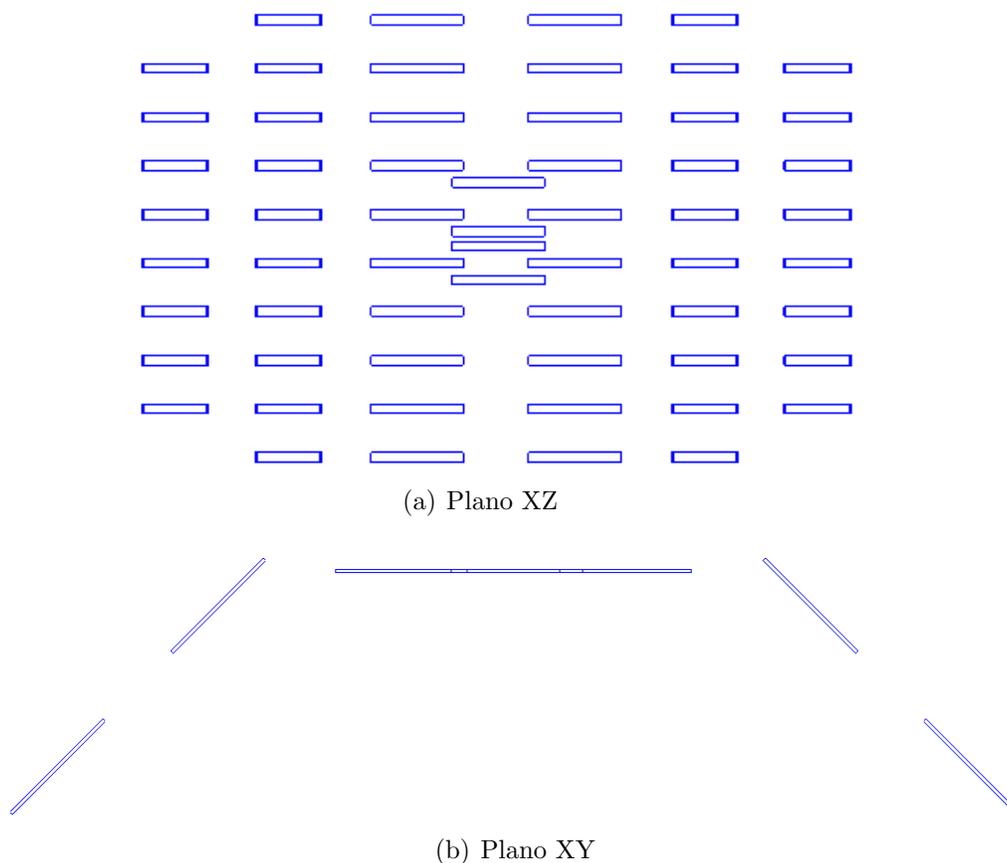


Figura 3.2: Dos puntos de vista de la geometría actual.

Para la actualización se consideró un diseño en el cual se tuviera la mayor cantidad de área efectiva de detección posible (Fig:3.3), conservándose el mismo tipo de detector con plástico centellador y de forma rectangular con las siguientes dimensiones: 1.3 m x 0.03 m x 0.025 m, obteniendo lo siguiente:

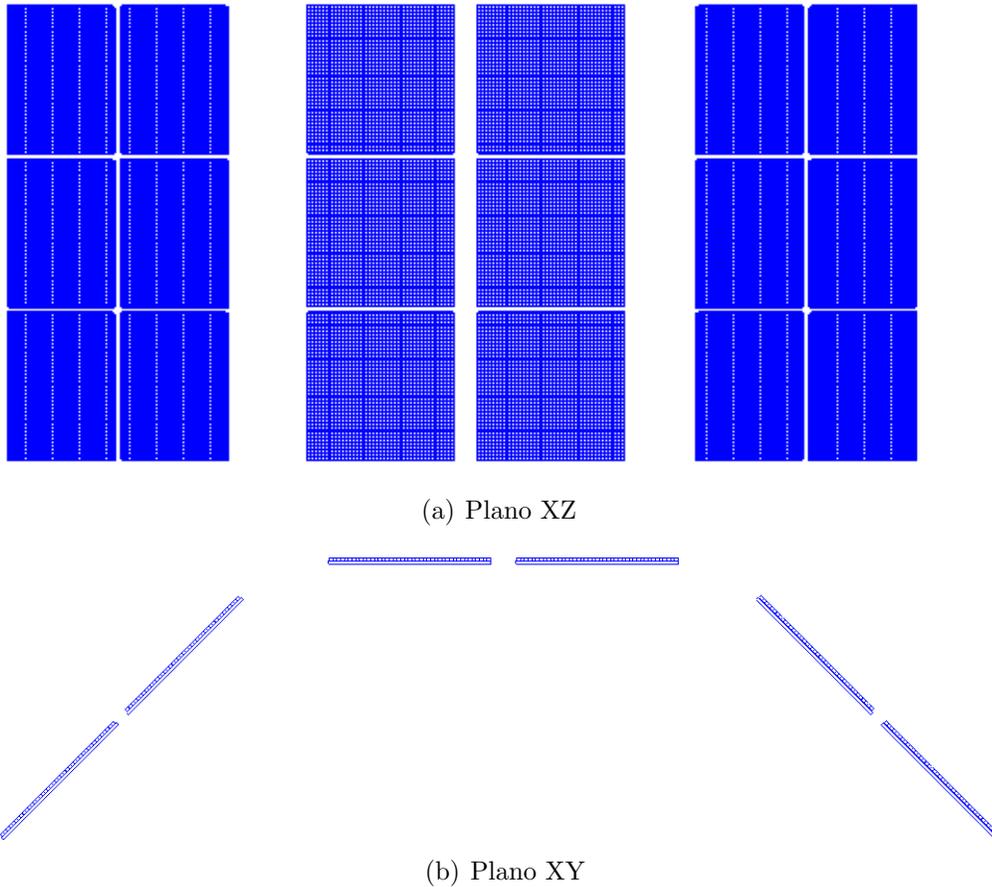
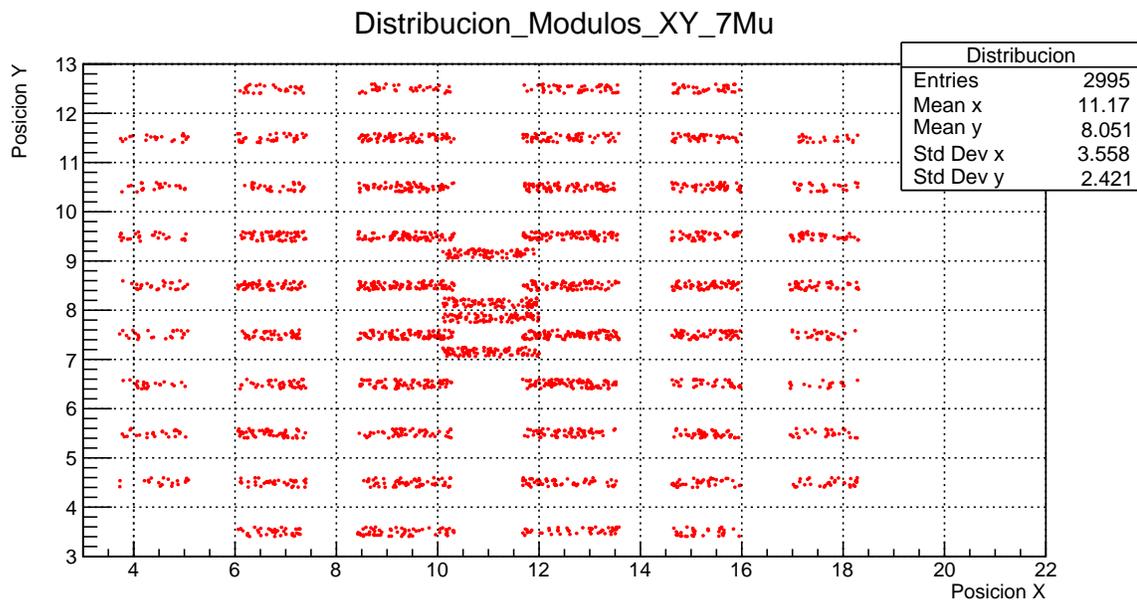


Figura 3.3: Dos puntos de vista de la geometría propuesta.

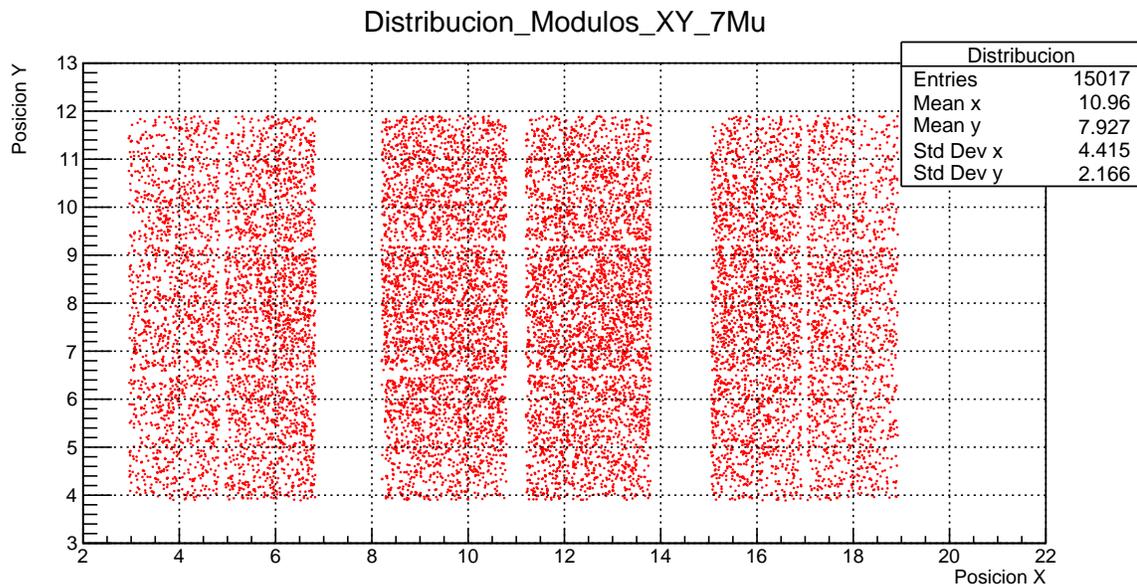
Puede apreciarse en la figura 3.3 que se forma una cuadrícula, dado que se tienen dos niveles con 60 tiras de plástico centellador por cada nivel, permitiendo formar un eje coordenado.

3.3. Comparaciones

Para conocer la respuesta de ambos detectores se simularon 5000 eventos, en los que el número de muones varía por cada simulación, desde 1 muon hasta 75 muones para la geometría vieja y de 1 muon hasta 35 muones para la geometría nueva, esto porque en este casi se tiene un área efectiva mayor y por lo tanto se presentará señal con más frecuencia que para la geometría vieja. Cada muon tiene una energía de 40 MeV y se lanzaron desde una distancia de 50 mts.



(a) Muones impactados en la geometría vieja.



(b) Muones impactados en la geometría nueva.

Figura 3.4: Distribución de los muones impactados en el eje XY, para 7 muones en cada evento.

Se puede ver en la figuras 3.4 (a) y 3.4 (b), la geometría nueva tiene una mayor área de cobertura.

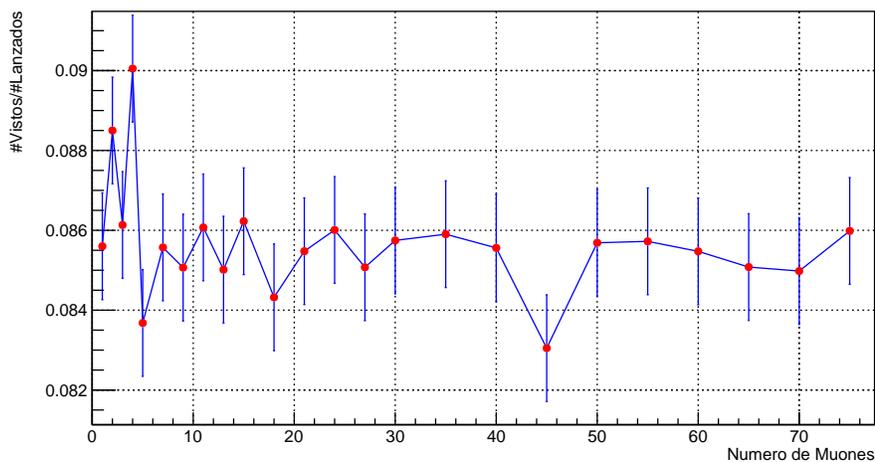
Capítulo 4

Resultados

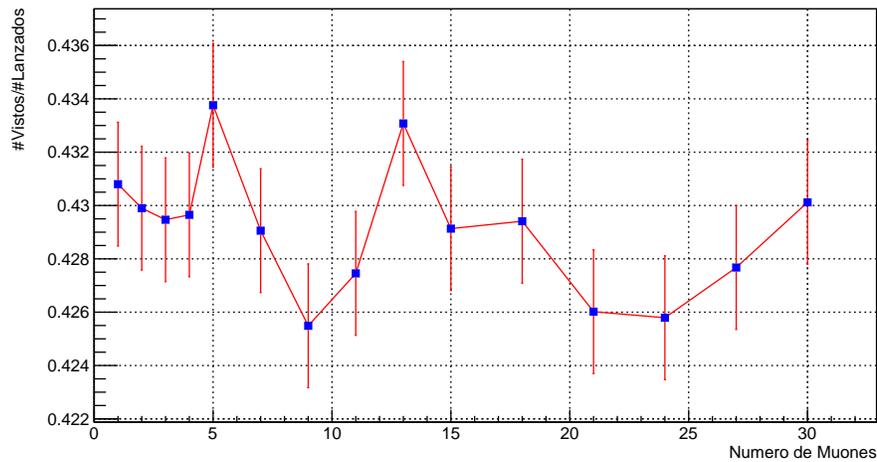
Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo de tesis, dentro de las razones principales para realizar la actualización del detector ACORDE, se encuentra poder incrementar la eficiencia y la aceptación con respecto a la geometría vieja, esto con la finalidad de tener un incremento en la estadística de muones atmosféricos y conocer más a fondo sus respectivas propiedades físicas. Recordemos que, estas simulaciones corresponden a muones con una energía de 40 MeV, lanzados a una distancia de 50 m, dentro del área efectiva del detector.

Aceptancia

La aceptación se calcula con respecto a la geometría del detector, considerando solo los muones que atraviesan el área efectiva del mismo. Cada punto en las graficas 4.1 y 4.2, corresponde al número de muones que impactaron al detector entre el número total de muones lanzados. Los resultados se muestran en las gráficas 4.1 y 4.2.



Gráfica 4.1: Aceptancia geometría vieja.

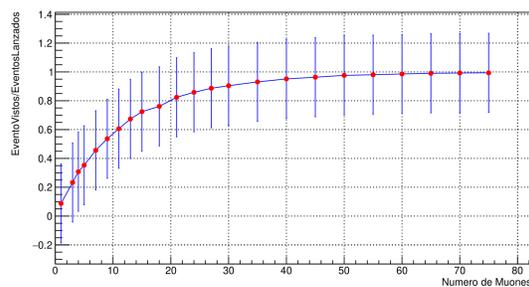


Gráfica 4.2: Aceptancia geometría nueva.

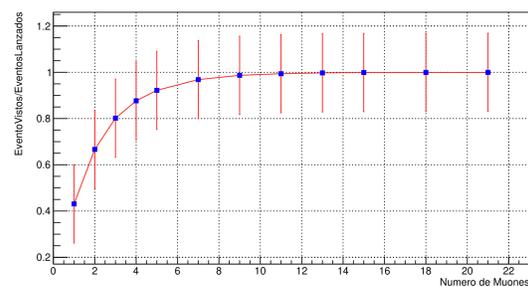
Es fácil ver que la gráfica 4.2 tiene una mayor aceptación en comparación con la gráfica 4.1. En la geometría vieja impacta un promedio de 8 % del número total de muones lanzados, mientras que para la geometría nueva se tiene un aumento de alrededor del 35 %, lo que nos dice que la nueva geometría funciona incrementando la estadística de muones atmosféricos.

Eficiencia

La eficiencia se define como el valor que se obtiene de dividir el número de eventos vistos en el detector entre el número de eventos totales lanzados. En las gráficas 4.3 (a) y 4.3 (b), se muestra la eficiencia de ambas geometrías:

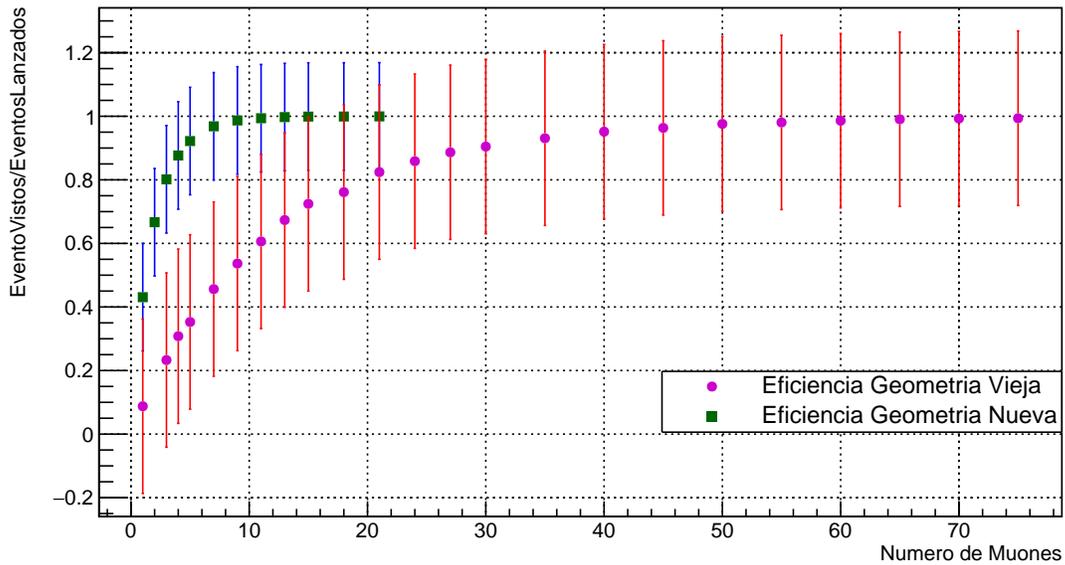


(a) Eficiencia Geometría Vieja



(b) Eficiencia Geometría Nueva

Gráfica 4.3: Gráficas de eficiencia de ambas geometrías



Gráfica 4.4: Comparación de la eficiencia de ambas geometrías.

La gráfica 4.3 (b) nos muestra que se tiene un cambio significativo en cuanto a la eficiencia en comparación con la gráfica 4.3 (a); en la gráfica 4.4 puede apreciarse mas claramente que, para cuando el número de muones es 10, la geometría nueva se acerca muy rápidamente al 100 % de eficiencia, mientras que para la geometría vieja esta eficiencia la alcanza para cuando el número de muones es mayor a 70.

Conclusiones

- Se simuló una nueva geometría propuesta para mejorar el área efectiva del detector ACORDE de ALICE.
- La simulación del material usado para el detector se comportó de la manera esperada comparada con el comportamiento conocido del material.
- La geometría nueva detecta alrededor de 5 veces más partículas en comparación con la geometría vieja.
- Aun cuando el número de muones arrojados al detector simulado es bajo, la geometría nueva se acerca rápidamente al 100 % de eficiencia.
- La aceptación en la nueva geometría mejora un 35 % con respecto a la vieja.
- Con base en los resultados obtenidos, la nueva geometría mejoraría significativamente el funcionamiento del detector ACORDE para el estudio de los rayos cósmicos, además se puede proponer para ser aplicada en otros detectores.

Bibliografía

- [1] CABALLERO-MORA K.S, COMPOSITION STUDIES OF ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS USING DATA OF THE PIERRE AUGER OBSERVATORY. TESIS DOCTORADO. 2010.
- [2] G.F. KNOLL, RADIATION DETECTION MEASUREMENT, JOHN WILEY AND SONS, NY (1979)
- [3] T. SOULFANDIS, MEASUREMENTS AND DETECTION OF RADIATION, MCGRAW-HILL, NY (1983)
- [4] W.R LEO, TECHNIQUES FOR NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS EXPERIMENTS, SPRINGER-VERLAG (1987)
- [5] YASSID AYYAD, CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA. DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS, UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA, 2011.
- [6] MARIA JOSÉ GONZÁLES TORRES, CÁLCULOS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA EMISORES DE PARTÍCULAS BETA-GAMMA UTILIZANDO EL MÉTODO DEL KERNEL PUNTUAL Y TÉCNICAS DE IMAGEN MOLECULAR. TESIS LICENCIATURA. 2011.
- [7] RPP2019-REV-COSMIC-RAYS.
- [8] M.S LONGAIR, HIGH ENERGY ASTROPHYSICS. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.(1981).
- [9] K. GREISEN, END TO THE COSMIC-RAY SPECTRUM?. PHYSICAL REVIEW LETTERS 16 (17), 748-750, (1966).
- [10] A.V. OLINTO. THE MISTERY OF ULTRA-HIGH ENERGY COSMIC RAYS. ASTRO-PH/0003013 (2000).
- [11] A. AAB *et al.* [PIERRE AUGER], DOI:10.3847/1538-4357/AAE689 [ARXIV:1808.03579 [ASTRO-PH.HE]].
- [12] A. DI MATTEO *et al.* [PIERRE AUGER AND TELESCOPE ARRAY], PoS ICRC2019 (2020), 439 DOI:10.22323/1.358.0439 [ARXIV:2001.01864 [ASTRO-PH.HE]].

- [13] L. CACCIANIGA [PIERRE AUGER], PoS ICRC2019 (2020), 206
DOI:10.22323/1.358.0206
- [14] G. T. ZATSEPIN, Y V. A. KUZ'MIN, UPPER LIMIT OF THE SPECTRUM OF COSMIC RAYS, JOURNAL OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL PHYSICS LETTERS, 4, 78-80, (1966).
- [15] F. A. AHARONIAN Y J. W. CRONIN, INFLUENCE OF THE UNIVERSAL MICROWAVE BACKGROUND RADIATION ON THE EXTRAGALACTIC COSMIC-RAY SPECTRUM, PHYS. REV. D, 50, 1892(1994).
- [16] VALENCIA-ESQUIPULA P.A, EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO DEL DETECTOR DE SUPERFICIE (SD), DEL OBSERVATORIO PIERRE AUGER. TESIS LICENCIATURA. 2017.
- [17] J.G. HIRSCH Y D.PAGE. NUCLEAR AND PARTICLE ASTROPHYSICS. CAMBRIDGE CONTEMPORARY ASTROPHYSICS.245-275. (1998).
- [18] CABALLERO-MORA K.S, EFECTOS DE LA LUZ DIRECTA EN LOS DETECTORES DE SUPERFICIE DEL OBSERVATORIO PIERRE AUGER. TESIS LICENCIATURA. 2003.
- [19] DEL PALACIO, SANTIAGO, INTERACCIONES DE PARTÍCULAS RELATIVISTAS EN VIENTOS ESTELARES. TESIS LICENCIATURA. 2014.
- [20] OTAOLA, JAVIER A, VALDÉS-GALICIA, JOSÉ F. LOS RAYOS CÓSMICOS : MENSAJEROS DE LAS ESTRELLAS, MÉXICO, D.F., MÉXICO : FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, 1992.
- [21] A. HAUNGS, EXPERIMENTAL HIGH-ENERGY ASTROPARTICLE PHYSICS, MORELIA, MÉXICO, NOVIEMBRE (2009). 33,60
- [22] [HTTPS://WWW.AUGER.ORG/](https://www.auger.org/)
- [23] [HTTPS://WWW.HAWC-OBSERVATORY.ORG/](https://www.hawc-observatory.org/)
- [24] [HTTPS://WWW.SNOLAB.CA/](https://www.snolab.ca/)
- [25] [HTTPS://ICECUBE.WISC.EDU/](https://icecube.wisc.edu/)
- [26] HERNÁNDEZ SALAIS, JUAN. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTADOR GAMMA PARA RADIOINMUNOANÁLISIS. TESIS UNAM. 2005
- [27] GRIFFITHS, DAVID J. INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS; 3RD ED. PRENTICE HALL. 1999.
- [28] C.PAGLIARONE AND A.FERNANDEZ-TELLEZ, J.PHYS.CONF.SER.1 10, 062021 (2008) DOI:10.1088/1742-6596/110/6/062021 [ARXIV:0709.3066 [HEP-EX]].
- [29] L.R. FERNÁNDEZ, ACELERADORES DE PARTÍCULAS: IRRADIACIÓN CON IONES Y ELECTRONES, 6ª ESCUELA MEXICANA DE FÍSICA NUCLEAR, 2009.

- [30] [HTTPS://WWW.ENERGY.GOV/EA/SLAC-NATIONAL-ACCELERATOR-LABORATORY](https://www.energy.gov/ea/slac-national-accelerator-laboratory)
- [31] [HTTPS://WWW6.SLAC.STANFORD.EDU/](https://www6.slac.stanford.edu/)
- [32] [HTTPS://WWW-SSRL.SLAC.STANFORD.EDU/CONTENT/](https://www-ssrl.slac.stanford.edu/content/)
- [33] ERNEST LAWRENCE Y M. STANLEY LIVINGSTON, THE PRODUCTION OF HIGH SPEED LIGHT IONS WITHOUT THE USE OF HIGH VOLTAGES, *PHYS. REV. D*, 40, 1932
- [34] GÓMEZ MORENO, B. ACELERADORES DE PARTÍCULAS PARA COLOMBIA. *REV. ACAD. COLOMB. CIENC.* 38 (SUPL.): 71-88, 2014. ISSN 0370-3908.
- [35] [HTTPS://HOME.CERN/SCIENCE/ACCELERATORS/LARGE-HADRON-COLLIDER](https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider)
- [36] [HTTPS://HOME.CERN/SCIENCE/EXPERIMENTS/ATLAS](https://home.cern/science/experiments/atlas)
- [37] [HTTPS://HOME.CERN/SCIENCE/EXPERIMENTS/CMS](https://home.cern/science/experiments/cms)
- [38] [HTTPS://HOME.CERN/SCIENCE/EXPERIMENTS/LHCB](https://home.cern/science/experiments/lhcb)
- [39] [HTTPS://HOME.CERN/SCIENCE/EXPERIMENTS/ALICE](https://home.cern/science/experiments/alice)
- [40] [HTTPS://HOME.CERN/SCIENCE/ACCELERATORS/LARGE-ELECTRON-POSITRON-COLLIDER](https://home.cern/science/accelerators/large-electron-positron-collider)
- [41] [HTTP://ALICE.WEB.CERN.CH/DETECTORS/MORE-DETAILS-ALICE-ITS](http://alice.web.cern.ch/detectors/more-details-alice-its)
- [42] J. ALME, Y. ANDRES, H. APPELSHÄUSER, S. BABLOK, N. BIALAS, R. BOLGEN, U. BONNES, R. BRAMM, P. BRAUN-MUNZINGER, R. CAMPAGNOLO, P. CHRISTIANSEN, A. DOBRIN, C. ENGSTER, D. FEHLKER, Y. FOKA, U. FRANKENFELD, J.J. GAARDHØJE, C. GARABATOS, P. GLÄSSEL, C. GONZALEZ GUTIERREZ, P. GROS, H.-A. GUSTAFSSON, H. HELSTRUP, M. HOCH, M. IVANOV, R. JANIK, A. JUNIQUE, A. KALWEIT, R. KEIDEL, S. KNIEGE, M. KOWALSKI, D.T. LARSEN, Y. LESENECHAL, P. LENOIR, N. LINDEGAARD, C. LIPPMANN, M. MAGER, M. MAST, A. MATYJA, M. MUNKEJORD, L. MUSA, B.S. NIELSEN, V. NIKOLIC, H. OESCHLER, E.K. OLSEN, A. OSKARSSON, L. OSTERMAN, M. PIKNA, A. REHMAN, G. RENAULT, R. RENFORDT, S. ROSSEGGER, D. RÖHRICH, K. RØED, M. RICHTER, G. RUESHMANN, A. RYBICKI, H. SANN, H.-R. SCHMIDT, M. SISKI, B. SITÁR, C. SOEGAARD, H.-K. SOLTVEIT, D. SOYK, J. STACHEL, H. STELZER, E. STENLUND, R. STOCK, P. STRMEŇ, I. SZARKA, K. ULLALAND, D. VRANIC, R. VEENHOF, J. WESTERGAARD, J. WIECHULA, B. WINDELBAND, THE ALICE TPC, A LARGE 3-DIMENSIONAL TRACKING DEVICE WITH FAST READOUT FOR ULTRA-HIGH MULTIPLICITY EVENTS, *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A: ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT*, VOLUME 622, ISSUE 1, 2010, PAGES 316-367, ISSN 0168-9002, [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.NIMA.2010.04.042](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.04.042). ([HTTP://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0168900210008910](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210008910))

- [43] BELLO MARTÍNEZ, HECTOR, PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS CREADOS EN COLISIONES P-P Y P-Pb EN ALICE DEL LHC. TESIS DOCTORADO. 2017.
- [44] THE ALICE TRANSITION RADIATION DETECTOR: CONSTRUCTION, OPERATION, AND PERFORMANCE, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A: ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, VOLUME 881, 2018, PAGES 88-127, ISSN 0168-9002, [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.NIMA.2017.09.028](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.028). ([HTTP://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0168900217309981](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900217309981))
- [45] KALWEIT ALEXANDER.PARTICLE IDENTIFICATION IN THE ALICE EXPERIMENT.ARXIV:1107.1514v1 [HEP-EX], JULIO 2011.
- [46] F. CARNESECCHI [ALICE COLLABORATION], JINST 14 (2019) no.06, C06023 DOI:10.1088/1748-0221/14/06/C06023 [ARXIV:1806.03825 [PHYSICS.INS-DET]].
- [47] [HTTP://ALICE.WEB.CERN.CH/DETECTORS/MORE-DETAILS-ALICE-PHOTON-SPECTROMETER](http://alice.web.cern.ch/detectors/more-details-alice-photon-spectrometer)
- [48] FANTONI A.THE ALICE ELECTROMAGNETIC CALORIMETER:EMCAL. J. PHYS,2011, 293 012043
- [49] E. ABBAS *et al.* [ALICE], JINST 8, P10016 (2013) DOI:10.1088/1748-0221/8/10/P10016 [ARXIV:1306.3130 [NUCL-EX]].
- [50] GRIGORIEV, V AND KAPLIN, V. AND KARAKASH, A.I. AND KARAVICHEVA, TATIANA AND KUREPIN, A AND LOGINOV, VITALY AND LYAPIN, V.V. AND MALKIEWICZ, T. AND RESHETIN, A. AND TRZASKA, WLADYSLAW AND YAMALETDINOV, S. ALICE T0 DETECTOR, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE - IEEE TRANS NUCL SCI, 2004. Doi:10.1109/NSSMIC.2004.1462267.
- [51] ALICE FORWARD DETECTORS: FMD, TO AND VO: TECHNICAL DESIGN REPORT, ALICE COLLABORATION, CERN-LHCC-2004-025.
- [52] ALICE PHOTON MULTIPLICITY DETECTOR (PMD): TECHNICAL DESIGN REPORT, CERN, ALICE COLLABORATION GENEVA, TECHNICAL DESIGN REPORT ALICE, 1999, CERN-LHCC-99-032. CERN-LHCC-99-032.
- [53] C.PAGLIARONE AND A.FERNANDEZ-TELLEZ, J.PHYS.CONF.SER.1 10, 062021 (2008) DOI:10.1088/1742-6596/110/6/062021 [ARXIV:0709.3066 [HEP-EX]].
- [54] <https://alice.web.cern.ch/detectors/more-details-alice-cosmic-ray-detector>
- [55] GRADOS LUYANDO, JUAN MANUEL. CONSERVACIÓN LOCAL DE LA EXTRAÑEZA EN EL EXPERIMENTO ALICE-LHC DEL CERN, TESIS LICENCIATURA. 2014.
- [56] RODRÍGUEZ CAHUANTZI, MARIO. DETECCIÓN DE MUONES ATMÓSFERICOS EN EL EXPERIMENTO ALICE-LHC. CERN-THESIS-2012-266. 2012.

- [57] CUAUTLE E., FERNÁNDEZ A. [ET AL]. ACORDE, THE ALICE COSMIC RAY DETECTOR. PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE
- [58] ALICE OFFLINE TEAM. ALIROOT, [HTTP://ALICEINFO.CERN.CH/OFFLINE](http://aliceinfo.cern.ch/offline).
- [59] [HTTPS://ROOT.CERN/](https://root.cern/)
- [60] [HTTPS://GEANT4.WEB.CERN.CH/](https://geant4.web.cern.ch/)
- [61] TORBJRN SJSTRAND, ET AL, PYTHIA 6.4 PHYSICS AND MANUAL, JHEP 05(2006) 026.
- [62] [HTTP://WWW-NSDTH.LBL.GOV/ XNWANG/HIJING/INDEX.HTML](http://www-nsdth.lbl.gov/xnwang/hijing/index.html)
- [63] [HTTPS://WWW.CRYSTALS.SAINT-GOBAIN.COM/PRODUCTS/BC400-BC404](https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc400-bc404)
- [64] THE ALICE COLABORATION, STUDY OF COSMIC RAY EVENTS WITH HIGH MUON MULTIPLICITY USING THE ALICE DETECTOR AT THE CERN LARGE HADRON COLLIDER. [HTTPS://IOPSCIENCE.IOP.ORG/ARTICLE/10.1088/1475-7516/2016/01/032](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2016/01/032)