

**ESTUDIO DE CHUBASCOS ATMOSFÉRICOS
HORIZONTALES E INDUCIDOS POR
NEUTRINOS EN EL OBSERVATORIO PIERRE
AUGER**

por
Cederik León De León Acuña

Para obtener el grado de Licenciado en Ciencias Físico Matemáticas

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
“Mat. Manuel Rivera Gutiérrez”
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Octubre de 2011

Asesor: Dr. Umberto Cotti Gollini.

Resumen

La presente tesis pretende dar un análisis en lo relacionado a la física y experimentos de los chubascos atmosféricos horizontales, con un trato especial a los inducidos por los neutrinos (ν_l) en el observatorio de Rayos C3smicos Pierre Auger.

Consideramos por Chubasco Atmosf3rico Horizontal a todo aquel inducido por un Rayo C3smico Primario con un 3ngulo cenital con incidencia mayor a 60° y hasta 90° , e inclusive 3ngulos cenitales hasta 95° . Es posible detectar neutrinos mediante el observatorio P. Auger ya que un chubasco producido por esta part3cula debe poseer ciertas caracter3sticas que le otorgan propiedades 3nicas mensurables mediante los detectores de superficie y/o los detectores de fluorescencia. Se muestra en este trabajo las propiedades de dichos chubascos (horizontales e inducidos por neutrinos ν_l) y la manera en que se trabaja con ellos, las simulaciones y los resultados actuales con los datos relacionados y obtenidos por el observatorio Pierre Auger.

Agradecimientos

Agradezco a toda la comunidad nicolaita

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------------|
| Resumen | II |
| Agradecimientos | III |
| Lista de tablas | VIII |
| Lista de Figuras | IX |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Física de Partículas y Astropartículas | 4 |
| 2.1. Modelo Estándar de las Partículas Fundamentales | 6 |
| 2.1.1. Constituyentes del Modelo Estándar | 6 |
| 2.1.2. Mas allá del Modelo Estándar | 8 |
| 2.2. Producción de partículas Fundamentales | 9 |
| 2.2.1. Producción y aceleración de Rayos Cósmicos | 9 |
| 2.2.1.1. Mecanismo de Cyclotron | 11 |
| 2.2.1.2. Aceleración mediante Pares de Manchas solares | 11 |
| 2.2.1.3. Núcleos Galácticos Activos (AGN) | 11 |
| 3. Rayos Cósmicos | 13 |
| 3.1. Rayos Cósmicos de Ultra Alta Energía | 13 |
| 3.1.1. Detección de neutrinos de ultra alta energía | 18 |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| 3.2. Experimentos para su detección | 20 |
| 3.2.1. KASCADE y KASCADE-Grande | 20 |
| 3.2.2. AGASA | 21 |
| 3.2.3. MILAGRO | 21 |
| 3.2.4. Tibet AS Gamma Ray Experiment | 21 |
| 3.2.5. GAMMA Experiment | 22 |
| 3.2.6. IceCUBE (Experimento) | 23 |
| 3.2.7. ANITA (Experimento) | 24 |
| 3.2.8. ANTARES (Experiment) | 24 |
| 3.2.9. Observatorio HAWC | 24 |
| 3.2.10. Observatorio Pierre Auger | 26 |
| 3.2.10.1. Observatorio Pierre Auger del Norte | 28 |
| 3.2.10.2. Detector de Superficie (<i>Surface Detector</i>) | 29 |
| 3.2.10.3. Detectores de Fluorescencia (<i>Florescense Detector</i>) | 30 |
| 3.2.10.4. Detectores Híbridos (<i>Hybrid Detector</i>) | 31 |
| 3.3. Adquisición de datos de Auger | 32 |
| 3.3.1. Sistema Central de Adquisición de Datos (<i>CDAS</i>) | 32 |
| 3.3.2. Disparo de señales: <i>Triggers</i> | 34 |
| 3.3.2.1. Definición del <i>Trigger</i> en Auger | 34 |
| 4. Simulaciones Monte Carlo | 37 |
| 4.1. Método Monte Carlo | 37 |
| 4.2. Programas y simuladores para <i>HEP</i> | 39 |
| 4.2.1. AIRES | 39 |
| 4.2.2. GEANT4 | 43 |
| 4.2.3. CORSIKA | 43 |
| 4.2.4. FLUKA | 44 |
| 4.2.5. ANIS | 46 |
| 4.2.6. HepMC | 47 |
| 4.2.7. MC++ | 47 |
| 5. Chubascos Atmosféricos | 49 |
| 5.1. Horizontales | 53 |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------------|
| 5.1.1. Generación de Simulaciones | 55 |
| 5.2. Características de los Chubascos de Neutrinos | 58 |
| 5.2.1. Interacción ν -Nucleón y sus chubascos inducidos | 59 |
| 5.2.2. Neutrinos Rozantes | 60 |
| 5.3. Selección de candidatos | 61 |
| 5.4. Metodología del estudio | 62 |
| 5.4.1. Reproducción de resultados | 63 |
| 5.4.1.1. Obtención de Histogramas | 64 |
| 5.4.2. Herramientas computacionales | 66 |
| 5.4.3. Análisis de datos ADST | 66 |
| 5.4.4. Matriz de Estado | 69 |
| 5.5. Resultados | 73 |
| 5.5.1. Huellas obtenidas en los detectores de superficie SD | 78 |
| 5.5.2. Simulación de eventos | 92 |
| 6. Conclusiones | 94 |
| A. Diseño de la plataforma de la interface Web para producción de archivos de control de simuladores | 96 |
| A.1. Interface para la generación de archivo de control para AIRES | 98 |
| A.1.1. Código de PHPSteer file generator | 98 |
| A.2. Archivo de control para AIRES | 109 |
| A.3. Archivo de control para CORSIKA | 113 |
| B. Algoritmo de la selección de eventos (programa) | 116 |
| C. Software de propósito general utilizado en el presente trabajo | 134 |
| C.1. Sistema Operativo | 135 |
| C.2. Lenguajes | 136 |
| C.2.1. C/C++ | 136 |
| C.2.2. Fortran | 137 |
| C.2.3. <u>Offline</u> | 138 |
| C.2.4. ROOT | 138 |
| C.3. Comparativos de modelos en simulacion | 140 |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---------------------|------------|
| Bibliografía | 141 |
| D. Glosario | 146 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|-----|
| 2.1. Fermiones, Constituyentes del Modelo Estándar | 7 |
| 2.2. Bosones, Mediadores en el Modelo Estándar | 7 |
| 5.1. Tiempo de respuesta de equipo portátil en el análisis de cortes | 68 |
| 5.2. Tiempo de respuesta de equipo de escritorio casero | 68 |
| 5.3. Tiempo de respuesta en un nodo de cluster | 68 |
| 5.4. Posibles candidatos a chubascos atmosfericos horizontales e inducidos por neutrino | 74 |
| 5.5. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 1 | 74 |
| 5.6. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 2 | 75 |
| 5.7. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 3 | 75 |
| 5.8. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 4 | 76 |
| 5.9. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 5 | 76 |
| 5.10. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 6 | 77 |
| 5.11. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 7 | 77 |
| 5.12. Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 8 | 78 |
| A.1. Archivo de control para AIRES | 109 |
| A.2. Archivo de control para CORSIKA | 113 |
| C.1. Comparativo de los modelos Sibyll y QGSJET de interaccion Hadron- ica y Thinning en Aires | 140 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 3.1. Espectro de energía de los Rayos Cósmicos | 16 |
| 3.2. Recreación del arreglo experimental HAWC | 25 |
| 3.3. Esquema de la distribución de tanques y telescopios en Observatorio P. Auger. | 26 |
| 3.4. Detector de Superficie (Estación) Observatorio P. Auger. | 29 |
| 3.5. Detector de Fluorescencia Observatorio P. Auger. | 30 |
| 3.6. Corona Hexagonal. | 36 |
| 4.1. Diagrama de flujo simplificado del simulador CORSIKA | 45 |
| 5.1. Diagrama del desarrollo de un chubasco atmosférico. | 50 |
| 5.2. Chubasco inducido por un protón de 10^{19} eV vertical. Proyecciones: Izq.X-Z, Der. X-Y | 51 |
| 5.3. Chubasco inducido por un núcleo de hierro de 10^{19} eV vertical. Proyec- ciones: Izq.X-Z, Der. X-Y | 52 |
| 5.4. Esquema de la clasificación de los rayos cósmicos según su dirección de arribo. | 53 |
| 5.5. Desarrollo longitudinal Protón de 10^{19} eV. Ángulo de incidencia cenital del primario: $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 89^\circ$ | 57 |
| 5.6. Desarrollo longitudinal Protón de 10^{19} por grupo de partículas eV. Ángulo de incidencia cenital del primario: $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 89^\circ$ | 58 |
| 5.7. Diagrama del proceso de extracción de datos de chubascos atmosféricos | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 5.8. Matriz de estado (ejemplo 1) | 72 |
| 5.9. Matriz de estado (ejemplo 2) | 72 |
| 5.10. Huella en Detector de Superficie del evento 1127391 | 79 |
| 5.11. Huella en Detector de Superficie del evento 1452015 | 79 |
| 5.12. Huella en Detector de Superficie del evento 1718520 | 80 |
| 5.13. Huella en Detector de Superficie del evento 1956182 | 80 |
| 5.14. Huella en Detector de Superficie del evento 2119146 | 81 |
| 5.15. Huella en Detector de Superficie del evento 2152516 | 81 |
| 5.16. Huella en Detector de Superficie del evento 2550163 | 82 |
| 5.17. Huella en Detector de Superficie del evento 3216042 | 82 |
| 5.18. Huella en Detector de Superficie del evento 3287548 | 83 |
| 5.19. Huella en Detector de Superficie del evento 4108920 | 83 |
| 5.20. Huella en Detector de Superficie del evento 4327041 | 84 |
| 5.21. Huella en Detector de Superficie del evento 5057493 | 84 |
| 5.22. Huella en Detector de Superficie del evento 6202084 | 85 |
| 5.23. Huella en Detector de Superficie del evento 6236036 | 85 |
| 5.24. Huella en Detector de Superficie del evento 6322833 | 86 |
| 5.25. Huella en Detector de Superficie del evento 6914028 | 86 |
| 5.26. Huella en Detector de Superficie del evento 6943389 | 87 |
| 5.27. Huella en Detector de Superficie del evento 7065500 | 87 |
| 5.28. Huella en Detector de Superficie del evento 7826900 | 88 |
| 5.29. Huella en Detector de Superficie del evento 7828667 | 88 |
| 5.30. Huella en Detector de Superficie del evento 7988432 | 89 |
| 5.31. Huella en Detector de Superficie del evento 8116690 | 89 |
| 5.32. Huella en Detector de Superficie del evento 8290878 | 90 |
| 5.33. Huella en Detector de Superficie del evento 8438397 | 90 |
| 5.34. Huella en Detector de Superficie del evento 8473731 | 91 |
| 5.35. Huella en Detector de Superficie del evento 8668880 | 91 |
| A.1. Captura de pantalla de la interface WWW para generar archivos de control para AIRES | 98 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

“Tres pasiones, simples pero abrumadoramente fuertes, han gobernado mi vida: el anhelo de amor, la búsqueda del conocimiento y una insoportable piedad por el sufrimiento de la humanidad.”

Sir. Bertrand Arthur William Russell.

El observatorio Pierre Auger es, actualmente, el observatorio de rayos cósmicos de mayor extensión superficial en el mundo, su finalidad es la de caracterizar las propiedades de los rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECR, *ultra high energy cosmic rays*) con energía del primario, superiores a 10^{18} eV., se diseñó y construyó para estudiar origen, composición de masa y espectro de energía de los UHECRs. El observatorio es un detector “híbrido”, combinado en un arreglo de detectores de partículas de superficie (**SD**, **S**uface **D**etector) y telescopios de fluorescencia (**FD** **F**luorescence **D**etector), que se emplean para medir los chubascos atmosféricos (**EAS**, por sus siglas en inglés **E**xtensive **A**ir **S**howers) iniciados por un UHECRs con energías mayores a 10^{18} eV.

Las partículas secundarias, detectadas como cascadas o chubascos, las cuales son iniciadas por la interacción de un rayo cósmico primario en la atmósfera, son detectados mediante los arreglos de detectores de superficie y de fluorescencia, estos últimos son sensibles a la radiación ultravioleta emitida por la excitación del nitrógeno

durante el paso de las partículas en la atmósfera. El observatorio Pierre Auger combina estos dos métodos en una técnica dividida, la cual permite una reconstrucción de eventos, reduciendo los errores sistemáticos.

La búsqueda de neutrinos de Ultra alta energía, es una de las tareas más retadoras en el campo de la física de astro-partículas.

Los neutrinos son partículas extremadamente ligeras (hasta hace poco se concebían como partículas sin masa), no poseen carga eléctrica y sus procesos de producción están asociados con fenómenos astrofísicos. Al tener carga eléctrica nula y una masa muy pequeña, se convierten en partículas candidatas, ideales, para viajar grandes distancias sin ser perturbadas ya que la probabilidad de que interactuen en su viaje es prácticamente nula. Esto las convierte en mensajeras del universo.

La motivación para la búsqueda de neutrinos astrofísicos de ultra alta energía puede ser resumida en tres puntos fundamentales:

- El acceso a un nuevo canal de observación y por lo tanto la detección de nuevos “mensajeros” del universo;
- La detección de partículas de regiones remotas del universo, las cuales no son deflectadas por campos magnéticos y no son absorbidas de manera significativa al momento de atravesar la materia o la radiación de fondo, en su camino hacia la tierra (a esto se le llama astronomía de neutrinos);
- El estudio de procesos de emisión en las fuentes de dichas partículas.

Existen modelos teóricos que predicen la formación y evolución de objetos astrofísicos que pueden considerarse emisores de un flujo de partículas, generalmente llamados Rayos Cósmicos, con energías de alrededor de 10^{18} eV. o mayores. Estos mismos modelos pueden también explicar la emisión de rayos cósmicos compuestos por fotones y neutrinos. De cualquier forma, las únicas observaciones directas de neutrinos cósmicos son a bajas energías (en el rango de MeV) directamente desde el sol y de la supernova SN1987[1].

El principal límite para la observación de señales de neutrinos astrofísicos de ultra alta energía con los detectores actuales, es debido al *Background* asociado (señales de interferencia que puede confundirse con las señales reales producidas por el fenómeno

que se está estudiando), el cual es extremadamente amplio, comparado con las tasas esperadas de neutrinos.

Una de las ventanas observacionales abiertas por el observatorio Pierre Auger, es la posibilidad de detectar neutrinos de ultra alta energía. Debido a la baja sección eficaz del neutrino y la gran cantidad de materia requerida para permitir su interacción, sólo los neutrinos inclinados parecen ser los que inducen chubascos cercanos a la superficie y pueden ser detectados por las características típicas de chubascos jóvenes, también identificados por las huellas asimétricas y elongadas dejadas en los detectores de superficie.

CAPÍTULO 2

FÍSICA DE PARTÍCULAS Y ASTROPARTÍCULAS

“Nadie debería creerse perfecto, ni preocuparse demasiado por el hecho de no serlo.”

Sir. Bertrand Arthur William Russell.

La idea de que la materia está constituida por bloques indivisibles muy pequeños de materia, invisibles al ojo humano, fue aceptada durante varios siglos, sin ser cuestionada. La mecánica clásica de Newton se concentró en la mecánica de los objetos macroscópicos y el tratamiento más cercano a la física de partículas fue, con toda seguridad, el llevado a cabo por los experimentos realizados con luz, donde para Newton la luz eran pequeños “corpúsculos” de materia, tratados enteramente de manera clásica, es decir, que se comportaban como diminutas “pelotitas” regidas por las leyes de la mecánica del siglo XVII. Al parecer, la física existente en ese entonces, no se preocupaba en demasía por el tratamiento de lo relacionado a la mecánica de objetos invisibles al ojo humano.

No fue sino a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, que comenzó a tomar importancia lo relacionado a la constitución básica de la materia, retomando la idea original de Demócrito, al afirmar que la materia estaba constituida de bloques pequeños e indivisibles. Diversos modelos del átomo se proponen, junto con herramientas y experimentos desarrollados por los físicos de ese momento; tales como

la “teoría electromagnética” y “Termodinámica”. Se van refinando dichos modelos atómicos como el modelo de Thompson, el de Rutherford ó el de Bohr. La experimentación de la época derivaba en importantes descubrimientos, como el del electrón por Thompson y posteriormente el neutrón por Chadwick, aunado al desarrollo de la mecánica cuántica y desarrollo de experimentos como el del “efecto fotoeléctrico”. La relatividad especial y general, dieron pie al desarrollo de un conjunto de herramientas que permitirían estudiar e intentar comprender a fondo la estructura de la materia.

Ya en etapas tempranas del siglo XX casi se daba por sentado la estructura del átomo, constituido esencialmente por protones y neutrones en el núcleo y electrones orbitándolo; se sabía que la masa del electrón era muy pequeña y que su carga era fundamental. Ciertamente los efectos eléctricos ya se conocían desde la época de los griegos, prueba de ello son los experimentos llevados a cabo por Thales de Mileto, sin embargo las medidas cuantitativas son llevadas por los experimentos de Thompson.

El desarrollo de la física de partículas no se quedaba ahí, a lo largo del siglo XX diversos experimentos se llevaron a cabo para seguir desmenuzando los constituyentes fundamentales de la materia. Experimentos con aceleradores de partículas han arrojado un verdadero “zoológico” de nuevas partículas, esto se logra haciendo chocar partículas a gran velocidad, ya sea una contra otra o al impactarlas directamente en un blanco fijo. El desarrollo de la tecnología y modelos que predicen el resultado de dichas colisiones ha sido de vital importancia. En esos experimentos se han corroborado diversos resultados predichos por modelos teóricos, de tal manera que hoy día sabemos que ciertamente el protón y el neutrón constituyen el núcleo del átomo y que los electrones lo orbitan, sin embargo sabemos que no son tan fundamentales como lo creía Demócrito; por ejemplo, el modelo de “quark” nos dice que las partículas que constituyen el núcleo de un átomo (protón y neutrón) están formadas por pequeñas entidades llamadas “quarks”, más aún, el modelo nos dice la cantidad de “quarks” que contiene cada uno de ellos, explorando más la fuerza nuclear fuerte, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, que es la que mantiene unidos a estos “quarks” mediante “gluones” que son los medidores de esta fuerza.

Realmente la física de partículas, en especial la de altas energías, toma un impulso en la primera mitad del siglo XX, donde se desarrolla gran parte de la herramienta y técnicas para la obtención de resultados relacionados a las partículas. Se comienza

el desarrollo de tecnología que permite la construcción de los mecanismos necesarios para la generación de colisiones entre partículas con gran energía, al mismo tiempo que se desarrollan, modifican o descartan modelos que predicen el comportamiento de las partículas sometidas a las condiciones que dichos aparatos o fenómenos naturales proporcionan.

2.1. Modelo Estándar de las Partículas Fundamentales

El Modelo Estándar incorpora todo lo conocido sobre el mundo subatómico, identifica los constituyentes elementales de la materia, incluyendo al neutrino, por lo tanto también describe la manera en como interactúan entre ellos y como se transforman. En pocas palabras, el “Modelo Estándar” provee una imagen consistente de cada reino del mundo físico.

Los primeros pasos en el desarrollo del Modelo Estándar fueron dados durante los años 1960, cuando Sheldon Glashow introduce una manera de unificar las interacciones electromagnética y débil; en 1967 Steven Weinberg y Abdus Salam incorporan el mecanismo de “Higgs” a esta teoría. Para 1973 los experimentos en aceleradores de partículas confirmaron que los elementos que conforman a los “Hadrones” son los “Quarks”. También el “Modelo Estándar” predijo (posteriormente confirmado) la existencia y masa de los Bosones Z y W [2].

El Modelo Estándar de las partículas fundamentales es una teoría ampliamente aceptada que ha predicho, con enorme precisión, las partículas existentes en el universo, describe cada tipo de partícula en términos de un campo matemático, valiéndose de la teoría cuántica del campo.

2.1.1. Constituyentes del Modelo Estándar

Los constituyentes fundamentales del modelo estándar o conjunto de materia elemental son los fermiones, lo cuales son seis quarks y seis leptones de spin $1/2$, adicionalmente cada partícula tiene asociada su correspondiente anti-partícula, la cual tiene las mismas propiedades pero con cargas opuestas. Los quarks a diferencia de los

2.1. MODELO ESTÁNDAR DE LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

leptones, tienen además de la carga eléctrica, la carga de “color”. Los neutrinos son leptones que tampoco poseen carga eléctrica.

| Quark | AntiQuark | Leptón | Anti Leptón |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|---|
| u , (up) | $\bar{\mathbf{u}}$, (antiUp) | ν_e , (neutrino electrón) | $\bar{\nu}_e$, (Antineutrino electrón) |
| d , (down) | $\bar{\mathbf{d}}$, (antiDown) | e^- , (electrón) | e^+ , (positrón) |
| c , (charm) | $\bar{\mathbf{c}}$, (antiCharm) | ν_μ , (Neutrino del muón) | $\bar{\nu}_\mu$, (AntiNeutrino muón) |
| s , (strange) | $\bar{\mathbf{s}}$, (antiStrange) | μ^- , (muón) | μ^+ , (Antimuón) |
| t , (top) | $\bar{\mathbf{t}}$, (antiTop) | ν_τ , (Neutrino tau) | $\bar{\nu}_\tau$, (AntiNeutrino tau) |
| b , (bottom) | $\bar{\mathbf{b}}$, (antiBottom) | τ , (tau) | τ^+ , (AntiTau) |

Cuadro 2.1: Fermiones, Constituyentes del Modelo Estándar

Según el “Modelo Estándar”, la manera en que interactúan estas partículas, entre sí, está mediada por los “Bosones” de norma, que son partículas que no obedecen el “principio de exclusión de Pauli” es decir, obedecen la estadística de Bose-Einstein, donde varias partículas pueden compartir un mismo estado cuántico. Estos Bosones de norma, llamadas también partículas “mediadoras” son los que permiten la interacción y generan los procesos que se dan lugar en el “Modelo Estándar”; según el tipo de fuerza fundamental que rige ciertos procesos se le asocia su correspondiente Bosón:

| Boson | Fuerza |
|-----------------------|-----------------------------|
| W^\pm, Z^0 | Débil |
| γ , (Fotón) | Electromagnética |
| g , (Gluón) | Fuerte |
| G , (Gravitón) | Gravitacional(no detectada) |

Cuadro 2.2: Bosones, Mediadores en el Modelo Estándar

[3]

2.1.2. Mas allá del Modelo Estándar

No obstante su extraordinario éxito para describir la Física de partículas en los grandes aceleradores, el Modelo Estándar es considerado aún un modelo incompleto (desde un punto de vista fundamental). No puede, por ejemplo, brindar información exhaustiva sobre algunos problemas fundamentales, de los que mencionamos, siete, a continuación:

1. **El problema de la norma:** El modelo contiene tres constantes de acoplamiento arbitrarias. En un modelo fundamental se esperaría tener una sola.
2. **El problema del sabor:** Las masas de los fermiones fundamentales se extienden a lo largo de doce órdenes de magnitud, sin regularidad alguna o estructura aparente.
3. **El problema del neutrino:** Los experimentos con neutrinos solares, atmosféricos y terrestres indican que los neutrinos tienen masas muy pequeñas, pero definitivamente no nulas. Estos datos son considerados como una primera evidencia clara en favor de la existencia de nueva Física.
4. **El problema del Higgs o de jerarquía:** La elección y el valor de expectación en el vacío del campo de Higgs son decididos *ad-hoc*. Tampoco hay razón física para el signo en el término de masa del Higgs, responsable del rompimiento espontáneo y por tanto de la masa de las demás partículas, también referido como el “problema del parámetro μ (mu)”.
5. **La cuantización de la carga:** Sin razón aparente, todas las cargas observadas en las partículas elementales son múltiplos enteros o fracciones de la carga del electrón.
6. **El problema de la gravedad:** En la Relatividad General la gravedad es tratada de un modo ciertamente fuera del esquema sobre el cual se construyó el Modelo Estándar y ambos esquemas son incompatibles, desde un punto de vista fundamental. Añadir la gravedad a la teoría destruye la renormalizabilidad.
7. **El problema del Universo temprano:** La cosmología requiere de la existencia de mecanismos en la Física de partículas capaces de explicar las condiciones

iniciales de la nucleosíntesis del “Big Bang”. No obstante, en el Modelo Estándar la violación CP (Carga-Paridad), del sector de “quarks”, es demasiado pequeña e incapáz de producir suficiente exceso de materia sobre antimateria durante la transición de fase electrodébil. En el modelo no existe, además, candidato alguno para explicar la componente de materia oscura del universo ni tampoco para la energía oscura, asociada al problema de ajuste fino de la constante cosmológica.

2.2. Producción de partículas Fundamentales

La producción de partículas elementales no es, en modo alguno, una tarea reciente. Desde hace ya algunos siglos hemos podido “producir” partículas elementales frotando un material contra otro y así “extraer” sus electrones. De manera un poco más sofisticada, podemos calentar un filamento de metal para extraer sus electrones y luego hacerlos pasar entre dos placas cargadas y de tal manera hacer un pequeño acelerador de partículas, en este caso de electrones. Sin embargo, estos mecanismos no son suficientes para experimentar y adentrarse en los rincones más profundos de lo que actualmente requiere la física de partículas. Existen otros mecanismos que son usados para los estudios de las partículas fundamentales.

2.2.1. Producción y aceleración de Rayos Cósmicos

La tierra es constantemente “bombardeada” por partículas altamente energéticas provenientes del espacio exterior, estas partículas son principalmente protones o núcleos de Fe (Fierro).

Los modelos teóricos que describen el origen de estas partículas, dependen de los rangos de energías de las partículas que se estén considerando; existen modelos de fuentes galácticas y extra-galácticas, y sigue habiendo incertidumbre para el origen de las partículas de ultra alta energía, aunque ya existen ciertos candidatos a ser las fuentes y sus inherente mecanismo de aceleración, actualmente los A. G. N. (*Active Galactic Nuclei*) son fuertes candidatos como fuentes productoras de Rayos Cósmicos[4].

Cuando estas partículas interactúan con la atmósfera terrestre, se producen partículas secundarias que son propagadas, siguiendo sus procesos de decaimiento y propa-

2.2. PRODUCCIÓN DE PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

gación, produciendo así los chubascos atmosféricos¹

Los Rayos Cósmicos de ultra alta energía poseen dos características primordiales:

- Son partículas libres;
- Poseen energías colosales.

Las energías tan grandes que los Rayos Cósmicos poseen, se alejan demasiado de las energías que, artificialmente, podemos generar aún en un laboratorio. Sin embargo también existen desventajas que, básicamente, tienen que ver con el tamaño de la instrumentación necesaria para detectarlos, es decir, la razón a la que las partículas que golpean un detector de tamaño considerable es muy baja y se tiene poco control al respecto; de tal manera que los experimentos con Rayos Cósmicos son del tipo “Paciencia y Suerte” [5].

Los rayos cósmicos pueden ser producidos por la interacción entre partículas en los lugares donde son aceleradas, como por ejemplo un pulsar. Los mecanismos de aceleración, pueden también fundamentarse en procesos de física fundamental, empleando potenciales electromagnéticos o gravitacionales, como es el caso de los remanentes de supernovas o núcleos activos de galaxias.

Los candidatos “fuertes” para la producción y aceleración de rayos cósmicos de ultra alta energía son:

- Explosiones de supernovas.
- Estrellas de neutrones giratorias altamente magnetizadas.
- Hoyos negros.
- Centros de los núcleos de galaxias activas.

A pesar de que existe una gran cantidad de modelos para explicar los mecanismos de aceleración de los rayos cósmicos, estos pueden ser usados para trabajar con diferentes rangos de energías[6]. Esto ha llevado a que la comunidad de físicos que trabajan en rayos cósmicos, desarrollen varios modelos que cubran el espectro de energía que se observan en los datos obtenidos por diversos experimentos y observatorios.

¹Más adelante dedicaremos una explicación más exhaustiva al respecto.

2.2. PRODUCCIÓN DE PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

2.2.1.1. Mecanismo de Cyclotron

Este tipo de aceleración puede generarse en presencia de campos magnéticos que dependen del tiempo. Un ejemplo típico de este mecanismo de aceleración son las manchas solares, las cuales tienen asociados campos magnéticos de intensidades de 1000 Gauss². La extensión en el espacio, de una mancha solar, puede ser tan grande como 10^9 cm. Los campos magnéticos en las manchas solares son generados por el movimiento turbulento del plasma; el plasma consiste esencialmente en protones y electrones. El movimiento de este plasma genera una corriente que a su vez produce un campo magnético. Cuando este campo magnético es generado y eventualmente decae, se producen campos eléctricos y es ahí donde los electrones y protones son acelerados.

Las partículas que son aceleradas mediante este mecanismo y provienen del sol, alcanzan energías de hasta 100 GeV. Sin embargo esta energía representa el límite que puede alcanzarse en las estrellas mediante este mecanismo[6].

2.2.1.2. Aceleración mediante Pares de Manchas solares

Las manchas solares frecuentemente aparecen en pares de polaridad magnética opuesta. Las manchas solares normalmente se aproximan unas con otras y eventualmente se mezclan. Supongamos que una de estas manchas solares se encuentre en reposo mientras que la otra se acerque a velocidad v . El dipolo magnético, en movimiento, produce un campo eléctrico perpendicular a la dirección del dipolo y perpendicular a su dirección de movimiento ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$). Las manchas solares de esta naturaleza, pueden generar campos eléctricos de $10 \frac{V}{m}$.

2.2.1.3. Núcleos Galácticos Activos (AGN)

Los núcleos Galácticos Activos (AGN) son agujeros negros supermasivos ($\sim 10^8$ veces la masa del Sol). Ahora bien, los *Blazares* son un subconjunto de las AGN, los cuales producen chorros (*jets*) de partículas que apuntan hacia la Tierra; estos objetos son muy variables y emiten gran parte de su energía en forma de rayos gamma. Los rayos gamma son producidos por las partículas aceleradas en los choques que se

²1 Tesla = 10^4 Gauss

2.2. PRODUCCIÓN DE PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

propagan a lo largo de estos chorros. Si las partículas aceleradas son protones, los rayos gamma son producidos de manera más eficiente. En las cascadas hadrónicas, por ejemplo, se origina la interacción $p + \gamma$. Los protones deben contar con energías superiores a los $10^{18}eV$ haciendo a los AGN posibles fuentes de rayos cósmicos UHE-CRs. Los electrones también pueden ser acelerados y radiarán rayos gamma mediante un mecanismo conocido como la dispersión inversa de Compton.

CAPÍTULO 3

RAYOS CÓSMICOS

“La Ciencia en ningún momento está totalmente en lo cierto, pero rara vez está completamente equivocada y tiene en general mayores posibilidades de estar en lo cierto que las teorías no científicas.”

Sir. Bertrand Arthur William Russell.

Los rayos cósmicos son un fenómeno común de la física de partículas, en especial de la física de altas energías; los más comunes son partículas, casi siempre eléctricamente cargadas, usualmente protones o núcleos pesados, que mediante mecanismos de aceleración se transportan distancias muy grandes. Cuando poseen energías muy grandes estos no son afectados, de manera notoria, por los campos eléctricos y/o magnéticos del medio por donde se desplazan; la génesis de los rayos cósmicos puede ser de diferente naturaleza, al ser partículas subatómicas, en este caso, de ultra alta energía, sus fuentes pueden ser núcleos de galaxias activas (AGN), estrellas, supernovas, resultado de defectos topológicos.

3.1. Rayos Cósmicos de Ultra Alta Energía

Los rayos cósmicos de ultra alta energía han incrementado la atención de los físicos teóricos, quienes tratan de explicar su producción a través distintos modelos.

3.1. RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA ALTA ENERGÍA

Su observación puede ser consistente con la existencia de un flujo de neutrinos de igual energía, que debería de ser detectado en la superficie de la tierra. En la figura 3.1 se muestra el espectro de energía de los rayos cósmicos, con el flujo en función de la energía. Conforme la energía incrementa el flujo disminuye. Alrededor de 10^9 eV el flujo esperado es de 10^4 Partículas $m^{-2}s^{-1}$. En el sector de los 10^{15} eV, también conocido como la rodilla, el flujo esperado es de alrededor de 1 partícula $m^{-2}año^{-1}$. Mientras que en sector de los 10^{18} eV, llamado el tobillo, es de 1 partícula $km^{-2}año^{-1}$.

3.1. RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA ALTA ENERGÍA

El mejoramiento en la detección de rayos cósmicos ultra energéticos implica un mayor refinamiento en las posibilidades de detección de neutrinos de ultra alta energía, cuya generación puede ser asociada, tanto a la emisión de los rayos cósmicos a sus fuentes como a su propagación.

Uno de los posibles mecanismos de observación de chubascos atmosféricos inducidos por neutrinos está dado por aquellos que tienen un ángulo de incidencia unos cuantos grados por debajo del horizonte, donde se produce el “rozamiento” de los neutrinos con la corteza terrestre, que poseen una trayectoria ascendente; estos neutrinos pueden producir un leptón tau, justo por encima del detector. El leptón tau, subsecuente, decaería en la atmósfera terrestre y produciría señales claras para ambos detectores, tanto el de superficie como el de fluorescencia.

Existe un límite de espectación para el número de eventos inducidos por neutrinos ascendentes en el rango de EeV y para el flujo inyectado de neutrinos tau

$$\frac{dN}{dE} = K \cdot E^{-2}$$

su límite superior es de $1,0_{-0,5}^{+0,3} 10^{-7} GeV cm^2 s^{-1} sr^{-1}$ con un nivel de confianza del 90 %, las incertidumbres son debidas a errores sistemáticos producidos por la sección eficaz, la deposición de energía, la polarización del tau, topografía y las simulaciones de chubascos atmosféricos[1].

Así pues, una supresión de los rayos cósmicos de ultra alta energía por encima de los 60 EeV puede ser inferida por la observación de la “Anisotropía” de la distribución de la dirección de arribo de los rayos cósmicos ultra energéticos, los procesos de aceleración astrofísicos para los rayos cósmicos, necesarios para adquirir un energía muy alta del orden de 10^{20} eV, los cuales puedan ser observados en la tierra, deberían tener sus orígenes fuera de la galaxia. La separación ideal entre rayos cósmicos galácticos y extra galácticos se puede ver en la indicación típica del espectro de rayos cósmicos también llamada el “tobillo”, en donde la transición entre el espectro galáctico se encuentra con el espectro extra galáctico, esto es alrededor de los 10^{18} eV[7].

Existen muchas especulaciones al respecto de las posibles fuentes que pueden producir los rayos cósmicos observados, pero sólo la acumulación de suficiente estadística podrá ayudar en el aprendizaje de cómo el proceso de aceleración trabaja en condiciones extremas y cuáles fuentes son las más importantes para ser consideradas como candidatos.

3.1. RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA ALTA ENERGÍA

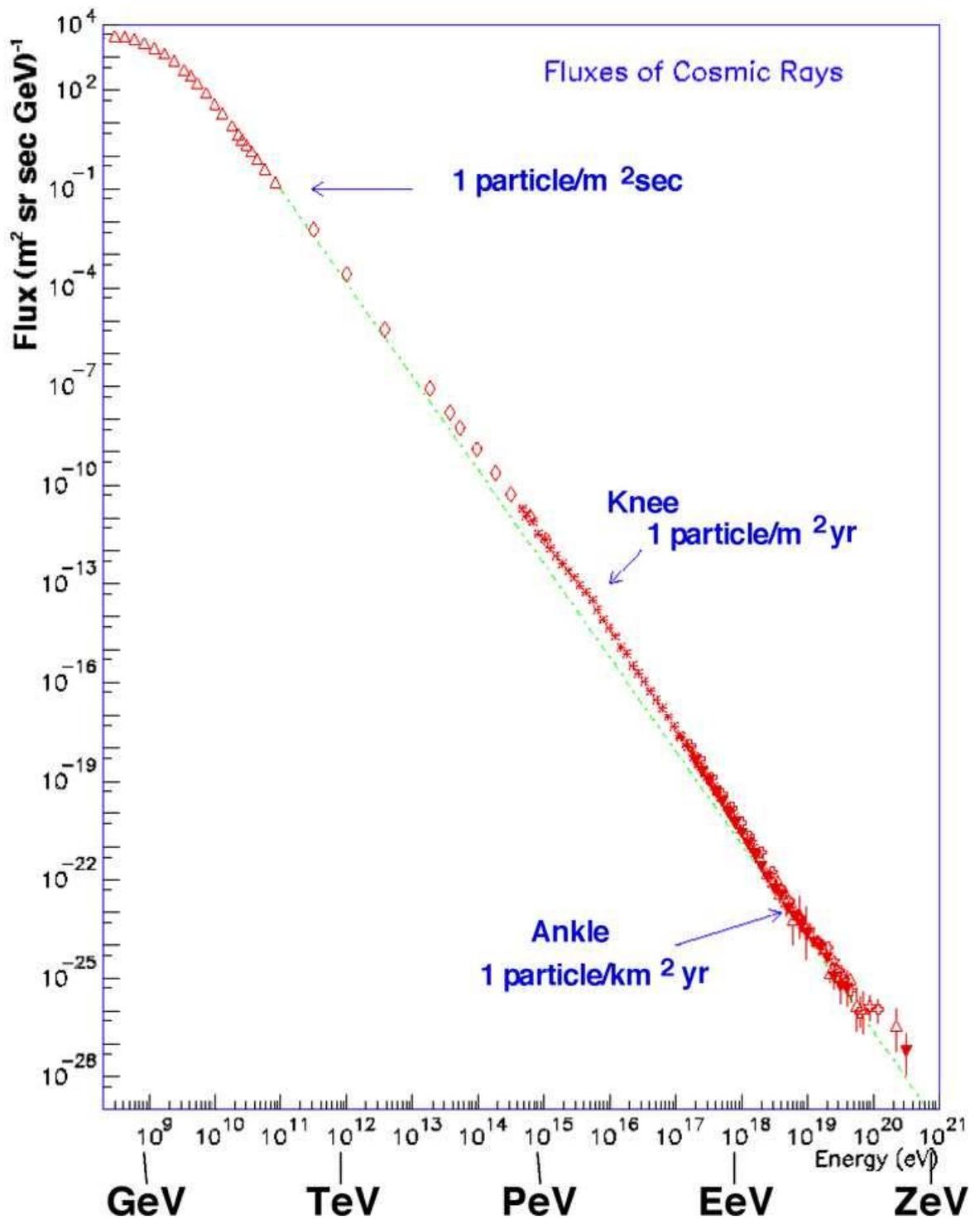


Figura 3.1: Espectro de energía de los Rayos Cósmicos

3.1. RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA ALTA ENERGÍA

Los **neutrinos** ofrecen una oportunidad única al abrir una nueva ventana de observación en la astronomía dado que ellos solamente *interactúan débilmente* y de forma neutra. La primera propiedad permite a los neutrinos recorrer distancias cosmológicas sin ser perturbados, mientras que la segunda propiedad evita que sean deflectados por el medio interestelar. Los neutrinos se comportan como mensajeros de las fuentes astrofísicas más lejanas, las cuales no pueden ser observadas por otros medios o en otras longitudes de onda. Sin embargo las únicas observaciones directas de neutrinos cósmicos son los neutrinos de baja energía (el rango de los MeV) provenientes del sol y de la supernova SN1987a[8].

En el rango de 10^{10} a 10^{15} eV los neutrinos astrofísicos de cualquier sabor ν_l se esperan observar mediante la detección de leptones (l), inducidos por procesos de *dispersión inelástica profunda* en el núcleo (N) de la materia atravesada, de acuerdo con la reacción:

$$\nu_l + N \rightarrow l + X$$

donde **X** representa los fragmentos salientes de los hadrones. La interacción de la ecuación anterior es conocida como la interacción de “corriente cargada”. El proceso favorecido es aquel que tiene como leptón saliente al muon, esto es debido a que los Muones acarrean, en promedio, el 70% de la energía del neutrino y el recorrido del muón es de decenas de kilómetros, por lo tanto puede alcanzar grandes volúmenes de interacción.

Actualmente existen telescopios por debajo del agua y hielo, diseñados para la detección de dichos neutrinos y al mismo tiempo los pueden mantener aislados de los comunes atmosféricos, debido a que son ubicados a varios kilómetros por debajo de la superficie terrestre y detectan neutrinos ascendentes.

La Tierra se torna opaca a los neutrinos por encima de energías de 10^{15} eV, los neutrinos descendentes, es decir con ángulos menores o iguales a 90° o también a los neutrinos tau que “*rozan la tierra*” con ángulos cenitales mayores a 90° ; ahora bien, el ruido de fondo se debe a la cantidad impresionante de rayos cósmicos descendentes y los comunes atmosféricos de alta energía.

3.1.1. Detección de neutrinos de ultra alta energía

La colisión de neutrinos astrofísicos descendentes, con la atmósfera, terrestre puede producir diferentes interacciones de corriente cargada (CC) con los núcleos atmosféricos, corrientes neutrales (CN) e interacciones resonantes del anti-neutrino del electrón con los electrones atmosféricos (también llamada resonancia de Glashow). Una interacción de CC de un neutrino de cualquier sabor (ν_l) con un núcleo (N), puede ser expresado con la siguiente reacción:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^-(l^+) + X$$

donde los productos salientes son un leptón o un anti leptón y fragmentos de hadrones.

Una interacción tipo NC puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + X$$

donde los productos son un neutrino del mismo sabor, el neutrino padre y fragmentos de hadrones.

La reacción asociada a la interacción resonante es:

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^-$$

donde W^- es el Boson-W en la interacción electrodébil.

Los neutrinos con energías E_ν tales que $10^{16} < E_\nu < 10^{21}$ eV, se predicen con una sección eficaz, σ , la cual se incrementa típicamente como $E_\nu^{1/3}$.

La sección eficaz para la interacción tipo corriente neutra (CN) neutrino-nucleón se espera menor a 1/3 de la sección eficaz asignada para las interacciones de corriente cargada.

El chubasco inducido por corrientes cargadas del neutrino del electrón (anti neutrino) $\nu_e, \bar{\nu}_e$ consiste de una “subcascada” electromagnética iniciada por el electrón saliente ó positrón, el cual acarrea el 80% de la energía inicial del neutrino y una sub-cascada hadrónica iniciada por los fragmentos X. Un chubasco inducido por corrientes cargadas del neutrino del muón o anti neutrino muón, consiste de un chubasco hadrónico exclusivamente, el cual acarrea 20% de la energía inicial del neutrino y un muón o anti muón, el cual, raramente, produce señales detectables. Un neutrino tau o su anti neutrino tau, induce chubascos detectables sólo si el leptón tau o el anti

3.1. RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA ALTA ENERGÍA

leptón tau, decae en partículas o antipartículas, las cuales pueden inducir chubascos detectables; dependiendo de la longitud de decaimiento, un tau o anti tau puede decaer, nuevamente, en un neutrino tau o anti neutrino tau o decaer en un neutrino muón o anti neutrino muón, a esto se le llama regeneración. Las interacciones del canal de corriente neutra sólo inducen cascadas puramente hadrónicas.

Una buena ventana de observación para los neutrinos tau, es dentro de un margen de unos cuantos grados por debajo del horizonte donde los neutrinos “rozan” la corteza terrestre.

Los leptones tau producidos por la interacción del neutrino tau con un medio pueden escapar de la tierra y emerger en la atmósfera como partículas ascendentes, las cuales producen señales claras y decaen por encima del detector. La mayoría de los chubascos inducidos por tau llevan consigo 2/3 del total de la energía y producen una cascada hadrónica. El rozamiento de neutrinos del electrón produce secundarios (e^- , e^+) los cuales son inmediatamente absorbidos dentro de la tierra y los neutrinos del muón produce secundarios (μ^+ , μ^-) los cuales pueden viajar más de 10 km dentro de la tierra sin sufrir interacción alguna.

Los neutrinos tau pueden inducir también clases particulares de eventos, conocidos como *Double Bang*, estos eventos puede ser descritos por la siguiente reacción:

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$$

$$\tau \rightarrow h + \nu_\tau$$

donde h representa uno de los canales permitidos del decaimiento del tau. De producirse dicho canal de decaimiento, se observarían dos chubascos inducidos, descendentes, separados por una cierta distancia D y se esperaría observar:

- Un chubasco puramente hadrónico, inducido por los fragmentos X salientes;
- Un chubasco inducido por los productos h del decaimiento de tau.

La distancia D es proporcional a la energía del leptón tau de acuerdo con:

$$D \propto 50km \frac{E_\tau}{EeV}$$

de tal forma que sólo a relativamente bajas energías el *Double Bang* puede ser observado en la atmósfera.

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

Los detectores de fluorescencia son capaces de seguir el desarrollo longitudinal del chubasco en la atmósfera y, en principio, se podría observar tal suceso.

3.2. Experimentos para su detección

3.2.1. KASCADE y KASCADE-Grande

El experimento cascade-grande se construyó para medir los chubascos atmosféricos a nivel del suelo. La configuración está localizada en el Forschungszentrum Karlsruhe, en Alemania, a una altura de 110 m sobre el nivel del mar ($49^\circ N$, $8^\circ E$); está dedicada a medir las componentes electrónica, muónica y electromagnética de los chubascos atmosféricos. El propósito principal del experimento es la exploración de la composición química y el espectro de energía de la radiación cósmica primaria.

Kascade por sí mismo está dividido en tres diferentes subdetectores, el detector central, el arreglo de detectores KASCADE y detector de seguimiento de muones. Esta configuración permite medir chubascos en el rango de energía desde $10^{14}eV$ hasta $10^{17}eV$. KASCADE ha estado obteniendo datos desde 1996 y el análisis de estos datos encontró una estructura de *rodilla* en el espectro de energía de los grupos de masa más ligeros.

Adicionalmente a este arreglo, se le suma el “arreglo de disparo” o *trigger* conocido como el arreglo *Piccolo*, el cual provee una señal de disparo en común y rápida para el experimento KASCADE-Grande por completo.

Consiste en 252 estaciones de detección, organizadas en una malla; el espacio entre cada detector es de 13 m y un tamaño total de $200 \times 200 m^2$. Las estaciones están organizadas en 16 clusters. Cada *cluster* contiene 16 estaciones de detección y una estación de electrónica.

Las estaciones de detección del cluster externo, están equipadas con dos detectores de electrones y gammas, montados sobre una capa “absorbente” de plomo de 10 cm de espesor y una de acero de 4 cm de espesor. Por debajo de estas capas está colocado un detector de muones[9].

3.2.2. AGASA

Akeno Giant Air Shower Array AGASA es un arreglo de detectores de superficie, ubicado en el Observatorio Akeno ($35^{\circ}47'N$, $138^{\circ}30'E$), desarrollado para estudiar el origen de los rayos cósmicos extremadamente energéticos; cubre un área de $100km^2$, consiste de 111 detectores de superficie a nivel del suelo y 27 detectores bajo capas de absorción (detectores de muones). Cada detector de superficie está ubicado a una distancia de 1 km de su vecino cercano y están conectados secuencialmente mediante fibra óptica. Los detectores están controlados y operados por un conjunto de comandos que son transmitidos desde una computadora central[10].

3.2.3. MILAGRO

Milagro es un telescopio, como los telescopios convencionales, Milagro es sensible a la luz, pero las similitudes terminan ahí; Milagro es capaz de observar el universo a muy altas energías. Milagro es una piscina de gran tamaño (del tamaño de un campo de fútbol americano), cubierto con una capa ligera y delgada, que funciona como barrera con el exterior; está instrumentado con 723 fotomultiplicadores, el observatorio está dedicado a la búsqueda de fuentes de fotones energéticos en el rango de los TeV (*Gamma Ray Burst*)[11].

3.2.4. Tibet AS Gamma Ray Experiment

El Experimento Tibet AS Gamma Ray, tiene como objetivos principales de investigación:

- búsqueda de rayos gama de altas energías (3 TeV) provenientes de fuentes celestes puntuales;
- mediciones del espectro de energía y composición química de los rayos cósmicos primarios de muy alta energía;
- estudio de la estructura global 3 dimensional en los campos magnéticos solares e interplanetarios, por medio de rayos cósmicos galácticos de muy alta energía;
- observación de los neutrones solares inducidos por llamaradas solares.

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

El observatorio consiste de 697 contadores por centelleo, ubicados según una configuración de malla con espaciado de 7.5 m, y 36 contadores por centelleo en una configuración de malla espaciado de 15 m. Cada contador posee una base de plástico centellador, cuyas dimensiones son: área de $0,5m^2$ y $3cm$ de espesor. Equipados con un fotomultiplicador de 2 pulgadas de diámetro.

La información relacionada a la carga y tiempo de cada PMT “golpeado” por un evento EAS es almacenada la información para determinar su dirección y energía. El umbral de detección para la energía es de 3 TeV aproximadamente, esta energía es la mínima alcanzada por un chubasco de rayos cósmicos detectada por un arreglo. La tasa de disparo es actualmente de 1.5 kHz y el tamaño de los datos es de 26 GB / Día[12].

3.2.5. GAMMA Experiment

El experimento gamma se encarga de estudiar:

- La intensidad de los rayos gamma galácticos difusos a energías de $10^{15} - 10^{18}$ eV;
- El espectro de energía y composición elemental a energías de $10^{15} - 10^{18}$ eV;
- EAS a nivel de montaña mediante arreglo de centelladores y detectores de muones de centelleo bajo tierra;
- Producción de jets de Hadrones a energías de 10^{16} eV, mediante eventos EAS multi-core-Muon.

El experimento está localizado en Armenia, en el Observatorio de Rayos Cósmicos en el Instituto de Física Yerevan en los montes Aragars a 3,200 m sobre el nivel del mar ($700 \frac{g}{cm^2}$). Consta de un arreglo de detección de EAS de 33 estaciones de registro, organizadas en 5 círculos concéntricos, cuyo radio máximo es de 100 m, cada estación contiene 3 placas de plástico centelleador ($1 \times 1 \times 0,05m^3$) que sirven para detectar la energía depositada por las partículas cargadas del EAS; así como también con un detector de rápida adquisición de datos (*Fast Timing detector*), el cual sirve para adquirir el tiempo de vuelo del frente de un chubasco. La precisión angular cenital

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

es menor a $1,50^\circ$. La precisión en la reconstrucción en las coordenadas del “core” del EAS es menor a 1m. El tamaño del error en las mediciones del EAS es de alrededor de 10%; el rango de energía de detección para el primario es de [0.5 100] PeV

El experimento GAMMA posee una cámara subterránea para la detección de muones, ($\sim 2500 \frac{g}{cm^2}$ de roca y concreto), incluyendo un centro de cómputo para la administración del experimento, adquisición de datos, preproceso de datos y una “carpeta” compacta compuesta por 150 placas de plástico centellador, la cual sirve para detectar la componente muónica con energías mayores a ~ 5 GeV[13].

3.2.6. IceCUBE (Experimento)

IceCube es un observatorio de neutrinos que se instaló en el Polo Sur durante el verano austral a partir de 2004 y concluirá en diciembre de 2011.

IceCube es un detector en el hielo, consta de 5160 módulos ópticos, desplegados en 86 cuerdas verticales enterrados entre los 1450 y hasta 2450 los metros bajo la superficie del hielo.

Una vez completado, permanecerá en operación, por lo menos, durante 20 años. El detector ha sido diseñado, construido, instalado y ahora se utiliza para la investigación en la colaboración internacional llamada IceCube.

IceCube trabaja en bandas de longitudes de onda no exploradas anteriormente en la astronomía, incluyendo la región de energía del orden de los PeV (1015 eV), que le permitirá responder preguntas fundamentales relacionadas con las condiciones físicas de los *GRB* (*Gamma Ray Bursts*) originados en la remanente de la Supernova del Cangrejo y en hoyos negros super-masivos de galaxias activas.

IceCube es sensible a las partículas de materia oscura cercanas a masas del orden de TeV, así mismo será sensible a supernovas en nuestra galaxia. Como detector de partículas será capaz de detectar neutrinos con energías superiores a aquellos producidos en los aceleradores, IceCube busca partículas supersimétricas y defectos topológicos. La detección de neutrinos cósmicos hará posible el estudio del fenómeno de la oscilación del neutrino por encima de distancias del orden de megaparsecs[14].

3.2.7. ANITA (Experimento)

El experimento ANITA (Antartic Impulsive Transient Antenna) establecerá el primer observatorio, de las misiones de la NASA, de neutrinos de ultra alta energía, utilizará la capa de hielo de la Antártida como colectora de las partículas originadas en las condiciones más extremas del universo: bordes interiores de los discos de acreción de los hoyos negros supermasivos, fuentes de *GRB*, colisiones de rayos cósmicos de ultra alta energía con la radiación cósmica de fondo. Un globo es desplegado a una altitud cercana a los 40km, desde donde observa 1.5 millones de kilómetros cúbicos de hielo, el cual es radio-transparente. Los neutrinos con energía del orden de los EeV. interactúan con el hielo y producen una compacta e intensa cascada de partículas, de unos cuantos metros de longitud y unos centímetros de diámetro. Los pulsos de radio, emitidos por este fenómeno es visible a grandes distancias y la quietud del entorno en la antártida facilita su detección[15].

3.2.8. ANTARES (Experiment)

La colaboración ANTARES construye un detector Cherenkov de gran escala en las profundidades del Mar Mediterraneo, está optimizado para la detección de muones de los neutrinos astrofísicos de ultra alta energía.

El rango de energía de interés de ANTARES es por encima de 10 GeV.

El detector usado por ANTARES consiste en un arreglo de aproximadamente 1000 PMT distribuidos en 12 cuerdas verticales dispersados dentro de un área de alrededor de 0.1km^2 y cuya altura es de aproximadamente 350 metros[16].

3.2.9. Observatorio HAWC

HAWC (*High Altitude Water Cherenkov*) está concebido como un detector Cherenkov de agua de 150 metros por lado, ubicado a más de 4,000 metros sobre el nivel del mar. El detector se divide en 900 celdas de 5 metros por lado que permiten *muestrear* con detalle la llegada de partículas al detector, permitiendo a su vez reconstruir la información del rayo gamma o rayo cósmico que originó la cascada de partículas.

Al penetrar en el tanque, un rayo γ de 100 MeV se divide en un electrón y un

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

positrón los cuales generan una pequeña cascada de partículas en el agua, las cuales emiten luz Cherenkov. El tanque tiene un fototubo en la parte inferior, el cual detecta la luz *Cherenkov*. Cada tanque actúa como un pixel del detector que permite muestrear dónde y cuándo arriba una partícula de alta energía. Existe la posibilidad de poner tres fototubos en el agua para mejorar la respuesta de cada tanque y hacer a HAWC capaz de detectar rayos de energía relativamente baja (unos 100 GeV). Los rayos de mayor energía que HAWC puede detectar pueden tener 100 TeV.

Los 900 tanques se distribuyen dentro del área de HAWC de forma compacta, pero permitiendo el acceso a cada tanque. Se planea tener por lo menos una base de datos en México (por ejemplo en Puebla - INAOE/BUAP - y el la UNAM) y otra en Estados Unidos (Universidad de Maryland). Al igual que MILAGRO, HAWC está diseñado para funcionar las 24 horas del día, por lo que se busca tener un sistema que funcione de manera estable y pueda ser monitoreado remotamente mediante una interfaz gráfica disponible en Internet[17]. En la figura 3.2 se muestra una representación de como estará distribuido el arreglo experimental de HAWC, donde los pequeños cilindros (parte inferior central) representan los tanques Cherenkov.



Figura 3.2: Recreación del arreglo experimental HAWC

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

3.2.10. Observatorio Pierre Auger

El observatorio Pierre Auger esta localizado en Malargue Argentina, a una altura de 1,400 m. sobre el nivel del mar, es usado para medir las propiedades de los chubascos atmosféricos, producidos por los rayos cósmicos de altas energías.

A nivel del suelo los electrones (e^-), fotones (γ) y muones (μ) pueden ser detectados usando instrumentos dispuestos en un gran arreglo de superficie. Así, mientras los EAS (Extensive Air Shower) se transportan en la atmósfera emiten luz en el ultravioleta, debido a la excitación causada por las partículas cargadas, al colisionar con los núcleos de nitrógeno. Esta emisión, de luz fluorescente, es proporcional a la energía depositada por la cascada en su trayectoria.

El observatorio usa 1,600 detectores de Agua-Cherenkov, cada uno contiene 12 toneladas de agua y está equipado con tres fotomultiplicadores de 9" (PMT), que sirven para detectar los fotones (γ) y partículas cargadas (e^+ , e^- , μ^+ , μ^-).

Los detectores de superficie (SD) están ubicados sobre una extensión de tierra de 3,000 km^2 , distribuidos según un arreglo triangular, con separación de 1.5 km; estos son supervisados por 4 detectores de fluorescencia (FD). Cada FD está ubicado en el perímetro del área donde se distribuye el arreglo de superficie (figura 3.3). El FD esta compuesto de 6 telescopios.



Figura 3.3: Esquema de la distribución de tanques y telescopios en Observatorio P. Auger.

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

A los EAS que se detectan usando estos dos tipos de detectores, simultáneamente, se les denominan “eventos híbridos” y juegan un papel clave en el análisis.

El campo de visión de cada telescopio es de 30° acimutal- y de 1.5 - 30 grados en elevación. La luz captada es enfocada a una camara que contiene 440 pixeles hexagonales de 18 cm^2 ubicada en el foco de un espejo con un área de 11 m^2

Entre el 1 de enero del 2004 al 21 de agosto del 2007 el número de telescopios se incremento de 6 a 24 y el Detector de Superficie de 154 a 1388.[18]

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

3.2.10.1. Observatorio Pierre Auger del Norte

Para mejorar la estadística y poder obtener conclusiones más sólidas sobre el origen de los rayos cósmicos de ultra alta energía se construirá el Observatorio Auger del Norte, en el sureste del estado norteamericano de Colorado. Este observatorio usará el mismo esquema de trabajo híbrido que el del Sur (Malargue, Argentina). El sitio seleccionado para el Observatorio Pierre Auger en Colorado, da lugar a la construcción de una red de detectores mucho más grande que la del sur, ya que puede abarcar hasta $10,370 \text{ km}^2$, permitiendo así una mayor sensibilidad a valores extremos de la energía del primario y a la presencia de nueva física. Las dos partes del observatorio se complementarán: el observatorio del Norte proporcionará una estadística más alta y la cobertura completa del cielo para los eventos de energías sobre el umbral *GZK* los cuales muestran una distribución espacial anisotrópica, mientras que el observatorio del Sur estudiará el espectro y la composición en un rango más amplio de energías, para las cuales la distribución de eventos en el cielo es casi isotrópica[19].

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

3.2.10.2. Detector de Superficie (*Surface Detector*)

El Detector de Superficie (SD), está constituido por tanques de de 3.6 m de diámetro y de 1.2 m de altura (figura 3.4), cada uno almacena $12m^3$ agua altamente purificada, en su interior están colocados 3 foto-multiplicadores (PMT) de 9", con lo que se puede detectar el efecto Cherenkov. La electrónica, el sistema de GPS y sistema de sincronización así como el sistema de red inalámbrica del tanque, es alimentada por la corriente eléctrica provista por paneles solares y una batería de respaldo. Las señales análogas son constantemente digitalizadas con un rango dinámico de 15 bits a un muestreo de 40 MHz, los datos son almacenados de manera temporal en una memoria local.

La señal de un Muón μ , que atraviesa a estos tanques, es proporcional a la longitud geométrica del camino que estos recorre. El “pico” de señal, producido por un muón μ que atraviesa un tanque, puede ser visto claramente en un histograma. La posición de este “pico” es un parámetro importante para la calibración[20].



Figura 3.4: Detector de Superficie (Estación) Observatorio P. Auger.

3.2. EXPERIMENTOS PARA SU DETECCIÓN

3.2.10.3. Detectores de Fluorescencia (*Florescence Detector*)

El Detector de Fluorescencia (FD) está constituido por 24 telescopios de ángulo amplio Schmidt, están agrupados en cuatro estaciones. Cada telescopio tiene un campo de visión de 30° , tanto en el ángulo acimutal como en el ángulo vertical. Las cuatro estaciones se encuentran localizadas en el perímetro del detector de superficie (SD); cada una de estas estaciones (figura 3.5) consta de 6 telescopios y tiene un campo de visión de 180° dentro del arreglo de superficie. Cada telescopio está segmentado de tal manera que su superficie total sea de $12m^2$ con un radio de curvatura de $3,40m$. La apertura del telescopio tiene un diámetro de $2,2m$ y está equipado con filtros ópticos y lentes de corrección. En la superficie focal está ubicado una “camara foto-multiplicador” que permite detectar la luz de un arreglo de 20×20 pixeles. Cada pixel cubre un área de $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ y el número total de fotomultiplicadores que constituyen el Detector de Fluorescencia es de 13,200. La información es constantemente digitalizada, con un rango dinámico de 15 bits a un muestreo de 10 MHz[20].



Figura 3.5: Detector de Fluorescencia Observatorio P. Auger.

3.2.10.4. Detectores Híbridos (*Hybrid Detector*)

Cuando ambos Detectores (FD y SD) detectan una señal y ésta dispara los *trigger* que permiten registrarla como un evento, se le llama evento Híbrido, esta clase de eventos es muy valiosa ya que al pasar por los distintos filtros y cumplir con los *trigger*, permite una reconstrucción angular y energética del chubasco permitiendo conocer, con menor incertidumbre, la posible procedencia de un rayo cósmico, ya que no solo se conoce la traza registrada en el arreglo de superficie, sino también la dejada en el cielo en su trayectoria a la superficie de la tierra. Esta clase de eventos no es muy común, ya que a pesar de que la sensibilidad del detector de superficie es muy alta, es necesario que las condiciones atmosféricas sean suficientemente aceptables para que el detector obtenga una señal “limpia” de un chubasco atmosférico. No obstante que se registran eventos Híbridos donde se disparan una ó dos estaciones de fluorescencia y una buena cantidad de estaciones de superficie, existen eventos que se les llama “Eventos Dorados” (*Golden Events*) los cuales son disparados cumpliendo con todas las condiciones de “Triggers” y son registrados en las cuatro estaciones de fluorescencia. Las condiciones climáticas y del chubasco tienen que ser óptimas para que esto suceda. Uno de estos eventos fue registrado en 9 noviembre de 2007 y publicado en la revista *Science*[4]. Donde se correlacionan las posiciones de algunos cuerpos celestes con las direcciones de arribo de los rayos cósmicos generadores de chubascos atmosféricos.

3.3. Adquisición de datos de Auger

Uno de los puntos más importantes de un experimento es la recopilación y organización de datos para su uso y análisis. Esta tarea no es sencilla, menos para un experimento de las dimensiones del Observatorio Auger, ya que se debe de contar con un diseño sólido que permita confiabilidad en la toma de los datos generados por los eventos; por otro lado las limitantes en el aspecto técnico, son temas que hay que tratar de manera especial, por un lado el almacenamiento de los datos es realizado en equipos de cómputo, tales como arreglos de discos duros que contienen los datos en distintos centros de cómputo. La cantidad de datos que se generan a cada instante en el observatorio es tal, que sería imposible almacenar toda esa información, al menos con el detalle necesario para extraer de ella resultados de alguna importancia. Es ahí donde el diseño del *Central Data Acquisition System* (CDAS) es importante, ya que impone las condiciones que permiten organizar la información que el Observatorio P. Auger genera.

3.3.1. Sistema Central de Adquisición de Datos (*CDAS*)

Auger Central Data Acquisition System (*CDAS*) es un conjunto de aplicaciones diseñadas “a medida” que corren bajo los sistemas operativos basados en Unix. Su propósito es el de operar los Detectores de Superficie (SD) con un mínimo de intervención humana, provee una interface entre el sistema de adquisición del detector de fluorescencia, para habilitar el disparo de eventos “híbridos” y recolectar, almacenar y preparar el conjunto de datos auger.

El sistema CDAS está basado en las siguientes aplicaciones:

- IK, Information Kernel, le permite a las aplicaciones CDAS la comunicación entre ellas;
- PM, Post Master, permite la interface entre CDAS y el sistema de comunicación inalámbrico de los detectores de superficie individuales;
- CT, Central Trigger, recibe la información de los *triggers* de segundo nivel en tiempo real desde los detectores y determina el *trigger* de tercer nivel;

3.3. ADQUISICIÓN DE DATOS DE AUGER

- EB, Event Builder, recibe los datos del evento cuando se ha activado el *trigger* de tercer nivel perteneciente al “CT”;
- FD, Interface con el detector de Fluorescencia, recibe el *trigger* de tercer nivel desde el detector de fluorescencia y lo redirige al arreglo;
- MR, Monitor Recorder, almacena la información generada por los detectores relacionada con su monitoreo y calibración;
- RC, Run Controller, configura nuevas estaciones desde su instalación.

El grupo de desarrollo de *CDAS*, ha escrito un conjunto de módulos para reconstruir y visualizar eventos; en un inicio el desarrollo era para supervisar el comportamiento del proceso de adquisición, actualmente es una herramienta muy completa y ampliamente usada por la colaboración para realizar análisis y reconstrucción del *SD*.

El Paquete de reconstrucción *CDAS* está compuesto por varios módulos[21]:

- *RootW*, permite la interface con ROOT;
- *STCoordinates*, Permite la conversión entre sistemas de coordenadas;
- *IoSd*, realiza la parte I/O (Input/Output, entrada / salida, por sus siglas en inglés) sobre los archivos de datos de SD;
- *IoFd*, está basado en *FdEventLib*, realiza la parte I/O de los archivos de datos de FD;
- *IoAuger*, provee acceso a ambos tipos de archivos de datos: SD y FD;
- *Ec*, permite la calibración de los detectores de superficie en eventos SD;
- *Es*, permite seleccionar eventos físicos (cuarto y quinto niveles de “Trigger”) y rechaza coincidencias casuales;
- *Er*, realiza reconstrucciones SD;
- *ED*, Event Display (Muestra de manera gráfica e interactiva los eventos en un archivo *CDAS*).

3.3.2. Disparo de señales: *Triggers*

Para que un evento pueda ser considerado como un chubasco atmosférico generado por un rayo cósmico primario, el observatorio Pierre Auger ha diseñado una serie de pruebas implementadas para discernir entre una señal producida por un chubasco atmosférico o la señal producida por ruido de fondo. De otra forma el observatorio estaría tomando datos innecesarios de manera constante, haciendo ineficiente la tarea del análisis, cuando un evento cumple con una serie de condiciones y pruebas, entonces el evento es procesado, de lo contrario se descarta. Las pruebas fundamentales que están implementadas son las llamadas pruebas de disparo o disparadores (*Triggers*).

Los *triggers* tienen nomenclatura propia, asignada para el nivel que el evento ha completado, es decir, ha cumplido con las condiciones mínimas necesarias para satisfacer un nivel de disparo.

3.3.2.1. Definición del *Trigger* en Auger

T1: Acepta toda señal que pueda ser parte de un chubasco, esta señal es evaluada por PLD; para determinar un T1 se ocupan los Triggers en *hardware*:

- T1.Thr (Simple Treshold Trigger): Señal por encima de $1.75 I_{VEM}^{peak}$ en al menos 2 fotomultiplicadores; del permite detectar señales muy rápidas (100 Hz), estas señales en su mayoría son producidas por muones atmosféricos;
- T1.ToT (*Time over Treshold*): Requiere una señal por encima de $0.2 I_{VEM}^{peak}$ en al menos 2 fotomultiplicadores, con un mínimo de respuesta de 13 BINS lo cual equivale a 325 ns. Pareciera ser el medio más poderoso para identificar estaciones pertenecientes a un chubasco de rayos cósmicos. Las estaciones locales marcadas como ToT son automáticamente promovidas al nivel de T2.ToT . La razón de ToT por estación es de 1.6 Hz;
- T2.ToT: Esta condición del disparo requiere la coincidencia de tres fotomultiplicadores con $3.2 I_{VEM}^{peak}$, con un muestreo de 20 Hz;
- T2.Thr: el propósito principal de este *trigger* es para seleccionar la componente muónica de los chubascos horizontales. Hay que hacer notar que los Muones

3.3. ADQUISICIÓN DE DATOS DE AUGER

atmosféricos muy energéticos, que forman parte de la señal de fondo en la detección de rayos cósmicos, pueden satisfacer la condición T2;

- *T2*: en el momento que se activa este disparador manda una señal al *CDAS* con su tiempo de disparado (*trigger time* t_0);
- *3ToT*: Esta condición indica que un múltiple de estaciones fueron seleccionadas como parte de un chubasco físico es decir que pasaron la condición 3-Fold.

Se ha establecido una nomenclatura para identificar el tipo de evento, en base a los *Triggers* que se han disparado, todo ello en base a la siguiente:

$$(n + 1)Cm$$

donde $(n + 1)$ es el número de *trigger* total

m : Número de coronas hexagonales

n : estaciones que rodean las coronas hexagonales.

Por ejemplo, para interpretar lo siguiente:

3ToT2C1&3C2: cumple con un múltiplete de estaciones, se disparan dos estaciones en la primera “corona hexagonal” y tres en dos “coronas hexagonales”.

El “disparador” anterior es eficiente para chubascos de hasta 60° Zenit, mencionando que el 90 % de los eventos seleccionados con este patrón son chubascos físicos y 2 % chubascos reales. Existen otros disparadores, que por comodidad son solo abreviaciones de un patrón muy parecido al anterior, por ejemplo tenemos:

T4: el cual es un *trigger* del tipo **3ToT3C1**, lo cual nos dice que un múltiplete de estaciones se han activado, en tres estaciones dentro de **una corona hexagonal** en coincidencia detectan el evento (Ver figura 3.6).

Otro ejemplo puede ser **3ToT4C1**, en el cual un múltiplete de estaciones se ha disparado y **cuatro** estaciones dentro de **una corona hexagonal** en coincidencia, detectan el evento.

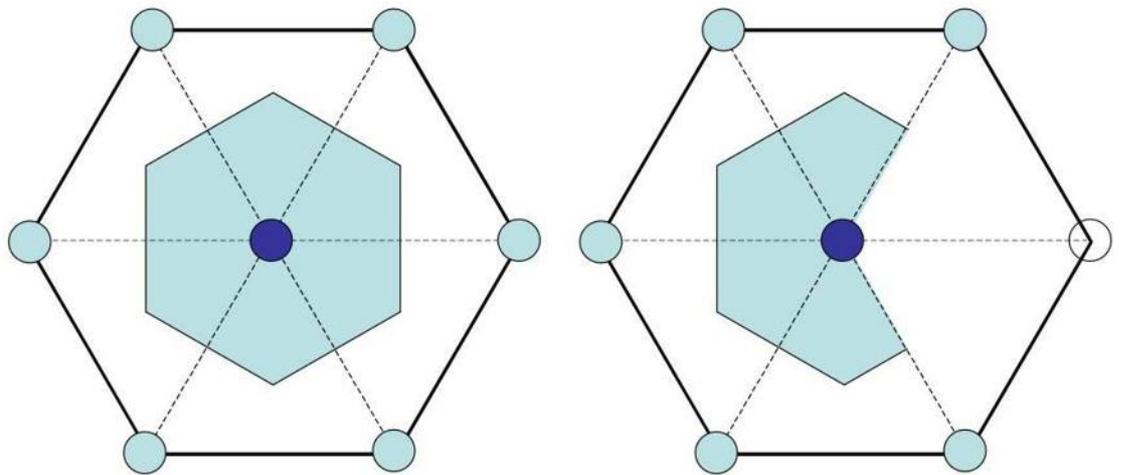


Figura 3.6: Corona Hexagonal.

CAPÍTULO 4

SIMULACIONES MONTE CARLO

“Muchas personas preferirían morir antes que pensar; en realidad eso es lo que hacen.”

Sir. Bertrand Arthur William Russell.

4.1. Método Monte Carlo

Las simulaciones Monte Carlo, en los experimentos de física de altas energías, son de gran importancia, su origen y aplicación inicial fue el proceso de dispersión de neutrones, sin embargo la gran mayoría de programas computacionales que se emplean en los experimentos de vanguardia, en lo relacionado a la física de altas energías, utilizan Monte Carlo para realizar las simulaciones de procesos que son propuestos en ciertos modelos. Unos de los ejemplos más claros son los simuladores que se usan en el observatorio de rayos cósmicos Auger, (más adelante se explican las características de cada uno de los programas computacionales para simulación empleados por el observatorio). Lo importante de mencionar aquí es que la idea fundamental del método de Monte Carlo simplifica, en gran medida los procesos de cálculo. Por ejemplo, GEANT4 es desarrollado y mantenido por el CERN, simula el paso de partículas a través de materia, aplicando diversos modelos para la propagación de dichas partículas, el transporte y la interacción con diversos materiales, uno de los

4.1. MÉTODO MONTE CARLO

principales componentes del simulador es el generador de números pseudo-aleatorios, el cual los “alimenta” al programa; este programa al igual que otros calcula y despliega las propiedades de ciertas partículas al interactuar con un medio, en nuestro caso nos interesa conocer las propiedades de los chubascos atmosféricos cuando un protón un electrón o un gamma o en nuestro caso un neutrino, interactúan con la atmósfera y/o la corteza terrestres. De tal manera que podamos conocer la genealogía del chubasco que genera esta partícula que llamamos primaria.

Los métodos computacionales y los modelos nos permiten seleccionar el grado de precisión con el cual queremos trabajar, es decir, al generar un proceso de interacción de una partícula con la atmósfera o con la corteza terrestre, dadas ciertas condiciones, se generarán partículas secundarias y así sucesivamente, hasta que la energía no sea suficiente para crear otras partículas. Los programas de simulación permiten recrear esto que llamamos chubasco atmosférico, sin embargo, el cómputo necesario para recrear un chubasco atmosférico de la manera más “real” posible, es demasiado costoso en términos del consumo de tiempo-procesador, lo cual en ocasiones resulta ser una razón de costo-beneficio poco atractiva, es ahí donde hay que decirle al simulador que atienda ciertos parámetros de interés descartando o priorizando otros.

En un chubasco atmosférico inducido por alguna partícula primaria se generan diversos procesos físicos, la generación de pares electrón positrón, rayos gamma, muones, piones, procesos de dispersión o absorción muy especializados, sin embargo, si nuestra región de interés es solamente la componente electromagnética, podemos decirle al simulador que no tome en cuenta todo lo demás, más aún, podemos programar el simulador de tal forma que sólo evalúe el modelo en ciertas regiones, ya sea del espacio, de energía, de momento, todas ellas de acuerdo a un propósito en especial[22],[23].

Los rayos cósmicos con energías mayores a los 100 TeV pueden ser estudiados usando dispositivos experimentales ubicados en la superficie de la tierra. Esto implica que esa clase de rayos cósmicos no pueden ser detectados directamente, son entonces necesarios estos dispositivos para medir los productos de los chubascos atmosféricos iniciados por astropartículas incidentes. El proceso de la producción de dichos chubascos atmosféricos, en general, es un proceso de colisión nuclear inelástica, que genera un cierto número de partículas secundarias. Esas partículas continúan interactuando y generando más partículas secundarias, las cuales vuelven a interactuar de manera

4.2. PROGRAMAS Y SIMULADORES PARA HEP

similar como sus predecesoras. El proceso continúa hasta que se alcanza un máximo de producción, entonces el chubasco se atenúa tanto como las partículas alcanzan un nivel por debajo del umbral de energía en el cual ya no es posible seguir produciendo partículas. Lo anterior es un problema interesante y muy complicado que involucra muchos aspectos, de los cuales reportamos los principales:

- Interacción de partículas de altas energías;
- Propiedades de la atmósfera;
- Campo geomagnético.

La simulación por computadora es una de las herramientas más conveniente para ser usada en el análisis cuantitativo de dichos chubascos atmosféricos. En el caso de los chubascos iniciados por astropartículas de “ultra alta energía” ($E > 10^{19}eV$), las partículas primarias tienen energías de algunos órdenes de magnitud superiores que las energías máximas obtenidas por los colisionadores experimentales existentes hoy en día. Esto significa que los modelos que rigen la descripción del comportamiento de dichas partículas energéticas, deben realizar extrapolaciones a partir de los datos disponibles a energías mucho más bajas y entonces podemos ver que aún así, no existe un acuerdo definitivo sobre la conveniencia en la aceptación del modelo preferente de entre muchos existentes[24].

4.2. Programas y simuladores para HEP

4.2.1. AIRES

AIRES (*AIR-shower Extended Simulations*) identifica a un conjunto de programas y subrutinas para simular y administrar la salida de datos generados por cascadas de partículas producidas después de que los rayos cósmicos de alta energía golpean la atmósfera terrestre.

AIRES provee una descripción completa de la propagación espacio-tiempo de las partículas de un chubasco en un ambiente relativista, donde se toman en cuenta las características de la atmósfera, el campo geomagnético y la curvatura de la tierra.

4.2. PROGRAMAS Y SIMULADORES PARA HEP

Se aplica un muestreo estadístico al proceso, cuando el número de partículas es extremadamente grande, a este proceso se le llama “thinning” (adelgazamiento). Los procesos de adelgazamiento usados en AIRES son no tendenciosos (*unbiased*), el muestreo estadístico nunca altera los valores promedio de los observables de salida.

Las partículas tomadas en cuenta por AIRES en las simulaciones son:

- Gammas γ ;
- Electrones e^- ;
- Positrones e^+ ;
- Muones $\mu^{+,-}$;
- Piones $pi^{+,-,0}$;
- Kaones $K^{+,-,0}$;
- Mesones eta $\eta^{+,-,0}$;
- Bariones lambda, $\Lambda^{+,0}$;
- Nucleones p,N;
- Anti-nucleones \bar{p}, \bar{N} ;
- Núcleos hasta $Z = 56$.

Los neutrinos del electrón del muon son generados en ciertos procesos (decaimiento) y tomados en cuenta en lo que respecta a su energía, pero no son propagados. La partícula primaria puede ser cualquiera de las anteriormente listadas, con energías de menos de 1 GeV hasta más de 1 ZeV ($10^{21}eV$).

También es posible simular chubascos iniciados por partículas primarias “especiales” mediante llamadas a módulos programados por el usuario, capaces de procesar la primera interacción del primario y regresar una lista de partículas “estándar” que puedan ser procesadas por AIRES.

Los procesos físicos más importantes tomados en cuenta en las simulaciones por AIRES, desde el punto de vista probabilístico son:

- Procesos electrodinámicos:
 - Producción de pares;
 - Aniquilación electrón-positrón;
 - Bremsstrahlung (electrones, positrones y muones);
 - Producción de pares muónicos;
 - Efecto dominó en electrones (y rayos gamma);
 - Efecto Compton;
 - Efecto Fotoeléctrico;
 - Efecto Landau-Pomeranchuk-Migdal (LPM);
 - Supresión Dieléctrica.
- Decaimiento de partículas inestables (muones μ y piones π , por ejemplo)
- Procesos Hadrónicos (simulados en ocasiones por paquetes externos encargados de implementar un modelo de interacción Hadrónica, como puede ser el modelo SYBILL ó QGSJET);
 - Colisiones inelásticas Hadrón-núcleo;
 - Colisiones inelásticas Fotón-núcleo.
- Reacciones Fotonucleares;
- Fragmentación Nuclear;
- Propagación de partículas cargadas:
 - Pérdida de energía en el medio (Ionización);
 - Dispersión Múltiple de Coulomb;
 - Deflección Geomagnética.

El sistema de simulación de AIRES provee un entorno “cómodo” donde realizar simulaciones, tomando en cuenta la ventaja que ofrece la tecnología en cómputo de la que actualmente se puede hacer uso.

4.2. PROGRAMAS Y SIMULADORES PARA HEP

AIRES cuenta con un “Lenguaje de Introducción de Instrucciones” (*IDL Input Directive Language*) que no es otra cosa que un conjunto de directivas que permiten controlar, de manera eficiente, la introducción de parámetros para el control de la simulación.

El sistema de ejecución de AIRES (*AIRES Runner System*) es una poderosa herramienta para manejar simulaciones extensas en ambientes UNIX, esta herramienta permite al usuario coordinar diversas tareas de ejecución concurrentes, controlando la evolución de un trabajo dado.

En AIRES existe un programa encargado de la generación de la información relacionada con la ejecución de la simulación, este arroja datos en un archivo, los datos están relacionados con los observables físicos durante y después del proceso simulado. Finalmente, AIRES provee al usuario de una biblioteca de objetos ó rutinas que ayudan a procesar los datos generados por la simulación, en particular los datos están contenidos en un archivo de salida comprimido, con la información detallada por partícula, partículas que alcanzan el suelo, partículas que atraviesan ciertos niveles de observación durante su evolución, entre otros datos relevantes para el usuario[24].

Como parte de este trabajo, se diseñó, configuró, optimizó, caracterizó, y utilizó el cluster del grupo de física computacional de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, ubicado en el Instituto de Física y Matemáticas de esta misma universidad. Donde mediante las capacidades del cluster, se lograron distribuir las tareas de cómputo relacionadas a la simulación de chubascos atmosféricos, reduciendo el tiempo de cómputo que en estaciones de trabajo individuales habrían consumido una mayor cantidad de tiempo[25].

Para la construcción de los archivos de control para los simuladores, en este caso para AIRES, se diseñó, programó, implementó y utilizó una interfaz gráfica para el usuario, desarrollada enteramente en el lenguaje PHP y scripts escritos en BASH con esta herramienta, se facilitó la construcción y elaboración de los archivos de control para AIRES, simplificando la tarea de instrucción y ejecución de la sintaxis IDL de Aires[26].

4.2.2. GEANT4

Geant4 es un conjunto de herramientas computacionales dedicadas a la simulación del paso de las partículas a través de la materia. Es usado por un gran número de experimentos y proyectos en una variedad de aplicaciones, donde se incluye a la física de altas energías, astrofísica y ciencias del espacio, física médica y protección contra la radiación. Su funcionalidad y capacidades de modelado es permanentemente extendido y su rendimiento mejorado[27].

El desarrollo del código en GEANT4 ha sido de gran importancia en el mundo de los simuladores HEP ya que sus códigos pueden ser re-utilizados en otras aplicaciones. Esto queda de manifiesto en la adopción que CLHEP hace de códigos, “HEP Random module”, que originalmente era parte de GEANT4, diseñado y que fue diseñado y desarrollado apartir de la “clase” Random de MC++.

4.2.3. CORSIKA

CORSIKA (*COsmic Ray Simulations for KASCADE*) es un programa para simulación detallada de EAS iniciadas por Partículas de alta energía de rayos cósmicos, Protones, núcleos ligeros (hasta el Fe $Z=56$), fotones y muchas otras partículas que pueden ser tratadas como primarias. Las partículas son “rastreadas” a través de la atmósfera hasta alcanzar la reacción con los núcleos de aire o, en el caso de las secundarias inestables, su decaimiento.

Las interacciones hadrónicas con altas energías pueden ser descritas por algunos modelos de reacción:

- VENUS;
- QGSJET;
- DPMJET.

Los anteriores están basados en la teoría Gribov-Regge, mientras que SIBYLL es un modelo de los llamados *minijet*. El modelo mas reciente EPOS, está basado en el marco de trabajo de neXus, pero incorpora mejoras importantes concernientes a las interacciones “duras”, nucleares y de efectos de “alta densidad”. Las interacciones

Hadrónicas, a bajas energías son descritas tanto por las rutinas de interacción de GHEISHA con un enlace a FLUKA o por un modelo microscópico llamado UrQMD.

Para los procesos electromagnéticos se emplea una adaptación del programa EGS4 ó las formas analíticas de las fórmulas NKG; las opciones para la generación de radiación Cherenkov y neutrinos, también están incorporadas en CORSIKA. Este simulador puede ser usado hasta energías de hasta 100 EeV[28].

El diagrama de flujo, simplificado, del comportamiento de Corsika puede ser consultado en la Figura 4.1

4.2.4. FLUKA

FLUKA es una herramienta de propósito general para el cálculo del transporte de partículas e interacciones con la materia, cubriendo un amplio rango de aplicaciones, como el diseño de blindaje para aceleradores de protones y electrones, calorimetría, dosimetría, diseño de detectores, sistemas de deriva de aceleradores, rayos cósmicos, física de neutrinos, radioterapia.

FLUKA puede simular, con alta precisión, la interacción y propagación en la materia de alrededor de 60 partículas diferentes, incluyendo fotones y electrones, desde 1 keV, hasta miles de TeV; neutrinos, muones de cualquier energía, hadrones de energías hasta 20 TeV (pudiendo lograr hasta 10 PeV, esto se realiza enlazando FLUKA con el código de DPMJET) y todas sus correspondientes antipartículas; neutrones por debajo de las energías térmicas y iones pesados.

El programa también puede transportar fotones polarizados (i.e. radiación de sincrotrón) y fotones ópticos. Calcula la evolución temporal y da seguimiento a la radiación emitida por los núcleos inestables residuales.

FLUKA puede reproducir, casi, cualquier geometría por complicada que parezca, esto se logra usando una versión mejorada del paquete computacional “Combinatorial Geometry” (CG). FLUKA CG ha sido diseñado para rastrear correctamente las partículas cargadas (incluso en la presencia de campo magnético o campo eléctrico). El programa cuenta con varias herramientas de visualización y depuración.

Para la mayoría de las aplicaciones no se requiere de que el usuario sea programador, sin embargo, algunas rutinas a interfaces (escritas en Fortran 77) están disponibles para usuarios experimentados.

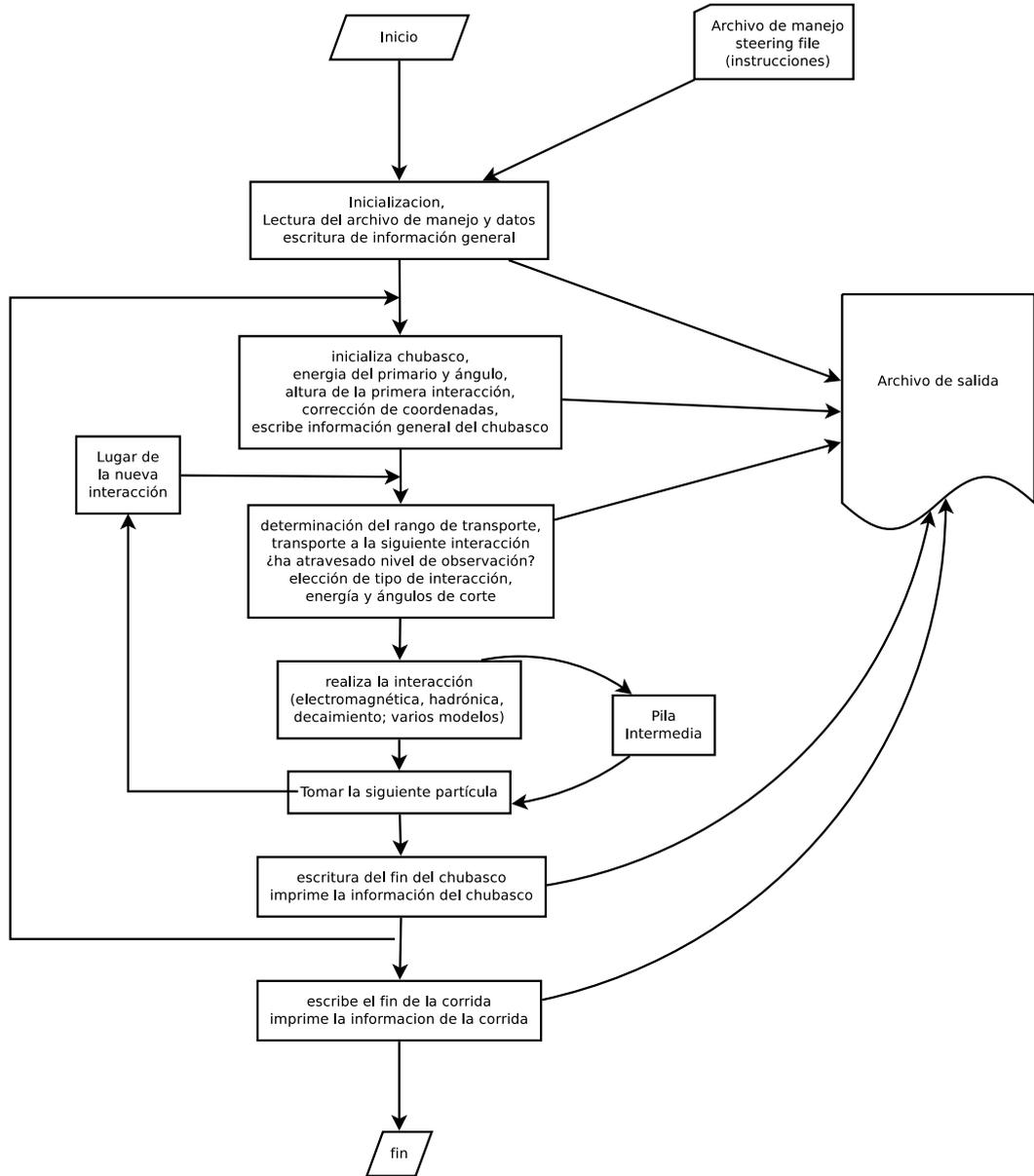


Figura 4.1: Diagrama de flujo simplificado del simulador CORSIKA

Otra ventaja de FLUKA, que probablemente no se encuentre en algún otro programa Monte Carlo, es su capacidad doble para ser usado en modo “preferente”, así como también en el modo “completamente análogo” es decir, que mientras puede ser usado en la predicción de fluctuaciones, coincidencias de señales y otros eventos correlacionados, también existe una amplia selección de técnicas estadísticas que están disponibles para la investigación de fenómenos un poco mas extraños, en conexión con las atenuaciones separadas entre ellas por muchos órdenes de magnitud[29].

4.2.5. ANIS

Anis provee un sistema de simulación detallado y flexible para los detectores de neutrinos de altas energías, tales como AMANDA, ANTARES o ICECUBE generando neutrinos de cualquier sabor, de acuerdo a un flujo específico y propagándolos a través de la tierra. En un paso final, las interacciones de los neutrinos son simulados dentro de un volumen específico. Todos los procesos relevantes del modelo estándar están implementados dentro de este simulador.

Este simulador fue diseñado principalmente para la plataforma Linux, escrito en C++ y requiere de aproximadamente 13 MB de espacio en disco para su ejecución, en su versión 1.8, consta de 3,300 líneas, utilizando como herramientas auxiliares obligatorias: HepMC y CLHEP.

Básicamente el problema para el cual fue diseñado es para generar eventos tipo Monte Carlo para telescopios de neutrinos de alta energía. Sus restricciones básicas son que los rangos de energía para los neutrinos están acotados entre 10 GeV y hasta 10^{12} GeV; el tiempo típico requerido para generar la simulación de 10^4 eventos, en una computadora con capacidad de proceso de 1 GHz, es de alrededor de 200 segundos.

Los neutrinos primarios son generados aleatoriamente en la superficie de la tierra, actualmente el espectro está generado en base a una ley de potencias $\phi_\nu(E) \propto E^{-\alpha}$.

Las interacciones con la materia en el caso de ser tipo CC (corriente cargada) son absorbidas; en el caso de ser tipo NC (corrientes neutrales) son regeneradas a energías más bajas. En el caso especial de una interacción CC para ν_τ el simulador produce un leptón τ con tiempo de vida corto[30].

4.2.6. HepMC

Al paquete HepMC es un “registrador” de eventos orientado a objetos, escrito en C++, para generadores Monte Carlo de Física de Altas Energías. Soporta muchas extensiones de HEPEVT y del estandar de Fortran HEP. Sus características principales son:

- Número de entradas ilimitadas;
- Matrices de la densidad de spin que almacenan cada vértice;
- Almacenamiento y rastreo de patrones de flujo;
- Estados del generador de números aleatorios;
- Número arbitrario de eventos “sopesados” por el usuario;
- Partículas y sus vértices almacenados, en estructuras diferentes, similares a las de un evento físico.

La información agregada soporta la modularización de generadores de eventos. El paquete se ha mantenido tan simple como ha sido posible, con un mínimo de dependencias, tanto internas como externas. La información de eventos es accesada mediante iteradores, estos están incluidos en el paquete[31].

4.2.7. MC++

El paquete MC++ es un ambiente de trabajo orientado a objetos para métodos Monte Carlo para Física de Altas Energías. Se divide en tres secciones principales:

- Clases Utilitarias
 - Trivectores;
 - Cuadrimomento;
 - Matrices de transformación;
 - Clases genéricas;
 - Clase de cadenas;

- Funciones de reporte básico de errores;
- Clase para el generador de números aleatorios:
 - Plano;
 - Exponencial;
 - Gaussiano;
 - BreitWigner.
- Kernel (núcleo), (con tres ramas principales):
 - **Partículas:** la clase *GenericParticle* sirve como una clase abstracta para varios tipos de partículas. Las partículas *reales* se derivan de la clase *Particle* la cual agrega “masswidth” y “widthcut” a la definición *GenericParticle*. También se cuenta con clases de partículas especializadas como por ejemplo la de los mesones, la cual mantiene información adicional de sus constiyentes;
 - Decayers: los cuales proveen la información necesaria para que una partícula decaiga en otra lo cual está dado en la “lista de decaimientos”;
 - Clases de Acceso de Datos: se proveen para acceder (y agregar) una partícula a la base de datos, dando un camino uniforme para acceder a los parametros de los “decayers” y partículas;
- Decayers: Proveen *Decayers* adicionales, fuera del kernel principal.

El conjunto de herramientas está disponible en [ftp://thep.lu.se/pub/LundPrograms/MCPP/\[32\]](ftp://thep.lu.se/pub/LundPrograms/MCPP/[32]).

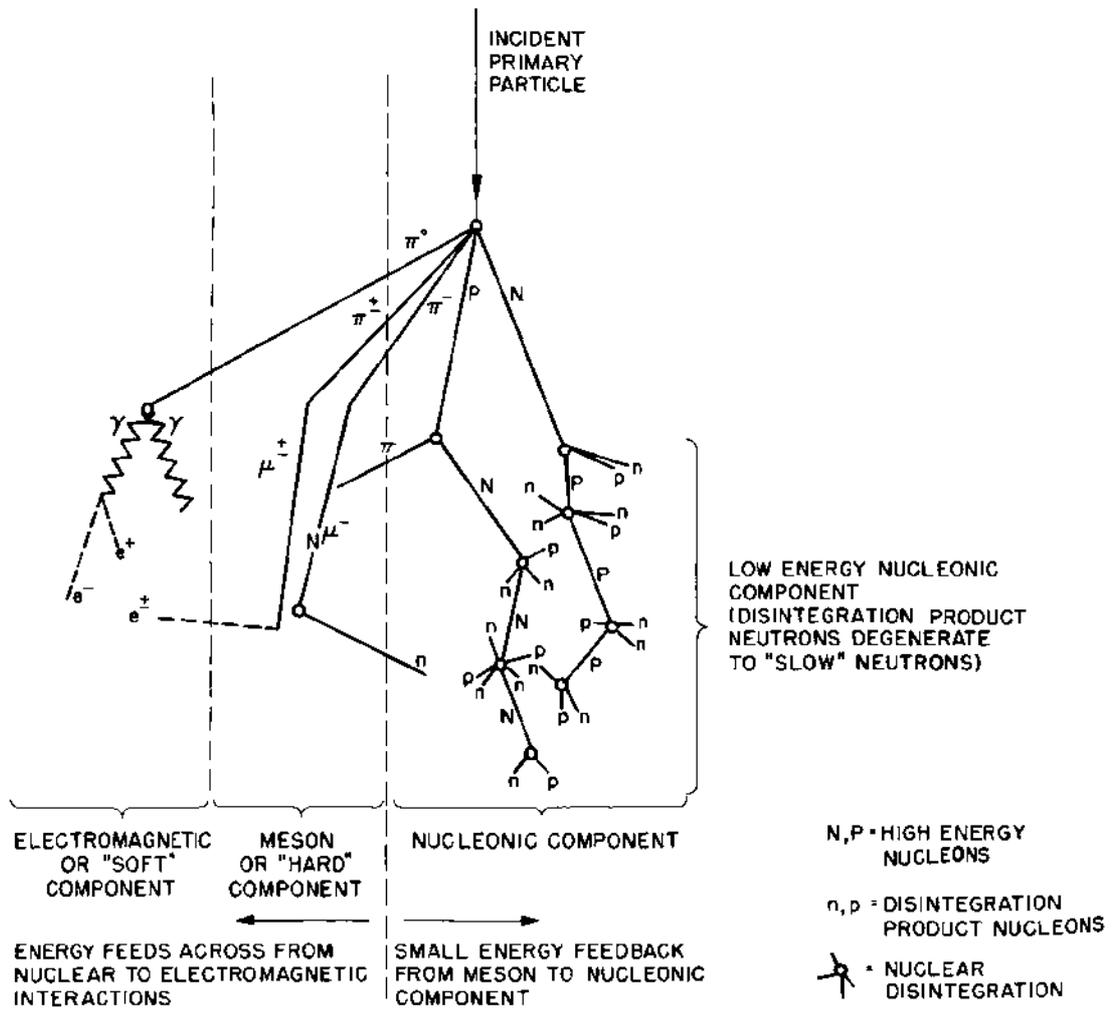
CAPÍTULO 5

CHUBASCOS ATMOSFÉRICOS

“Los científicos se esfuerzan por hacer posible lo imposible. Los políticos por hacer lo posible imposible”.

Sir. Bertrand Arthur William Russell.

Cuando una partícula proveniente, ya sea de fuentes galácticas o extragalácticas, interactúa con la atmósfera terrestre, dicha interacción desencadena un chubasco atmosférico de partículas con diferentes propiedades (ver figura 5.1), la dirección de arribo de la partícula primaria, ya sea un núcleo de Hierro (Fe $Z=56$) ó un Protón, no está definida a “priori”; la apertura de observación del observatorio Pierre Auger, se encuentra entre los 0° y 60° cenital y entre los 0° y 360° acimutales; sin embargo se han detectado direcciones de arribo dentro de una ventana angular cenital por encima de los 60° .



Schematic Diagram of Cosmic Ray Shower

Figura 5.1: Diagrama del desarrollo de un chubasco atmosférico.

Representación de la traza de partículas dejada por la evolución espacio-temporal de un chubasco atmosférico simulado mediante Corsika. Figura 5.2 , 5.3[28].

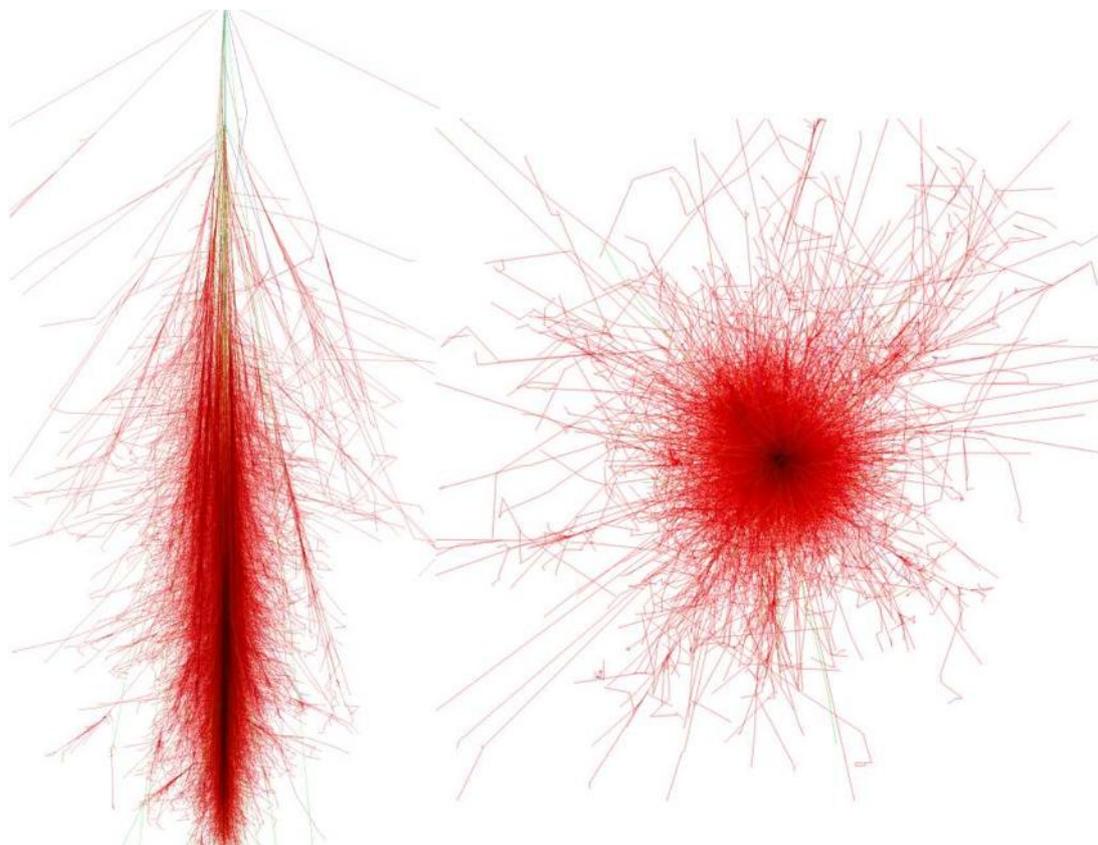


Figura 5.2: Chubasco inducido por un protón de 10^{19} eV vertical. Proyecciones: Izq.X-Z, Der. X-Y

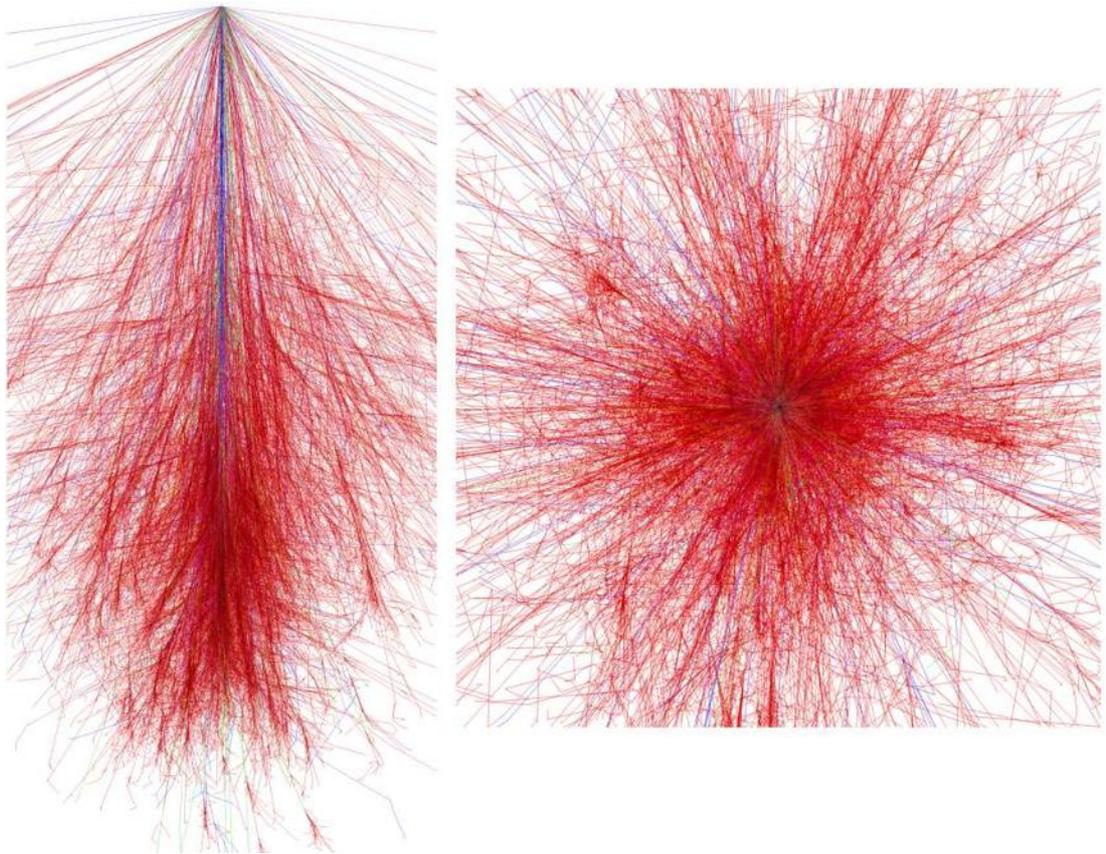


Figura 5.3: Chubasco inducido por un núcleo de hierro de 10^{19} eV vertical. Proyecciones: Izq.X-Z, Der. X-Y

5.1. Horizontales

A los chubascos atmosféricos inducidos por partículas primarias dentro del rango de 0° y 60° cenitales se les denomina Chubascos Verticales, mientras que los chubascos atmosféricos inducidos por partículas primarias cuya dirección de arribo que se encuentra por encima de los 60° cenitales se les denomina Chubascos Horizontales. Por lo general, la ventana angular de los Horizontales se encuentra entre los 60° y los 90° cenitales, sin embargo también se pueden detectar chubascos atmosféricos inducidos por primarios con direcciones de arribo por encima de los 90° cenitales. A las partículas primarias que generan chubascos atmosféricos con ángulos de arribo $> 90^\circ$ cenitales se les denomina como partículas que “rozan” la corteza terrestre (*Earth's Skimming*) (ver figura 5.4).

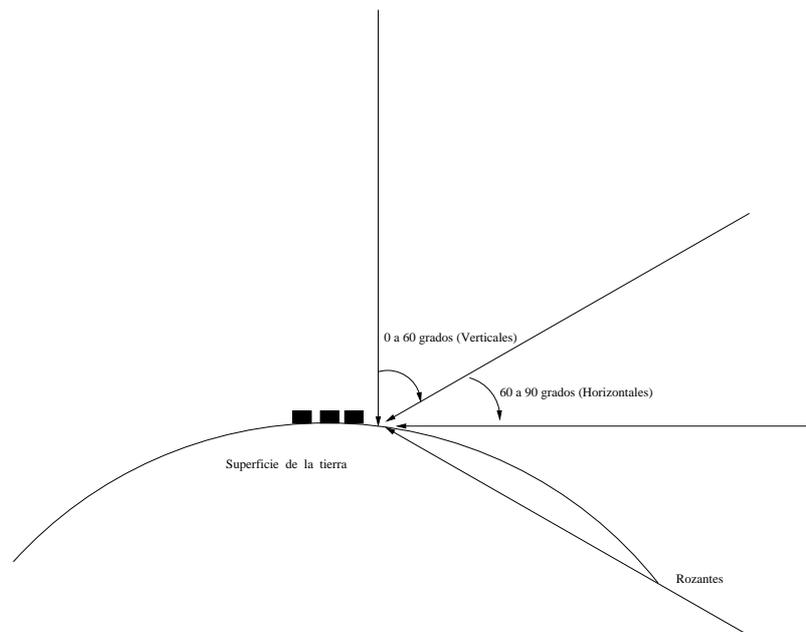


Figura 5.4: Esquema de la clasificación de los rayos cósmicos según su dirección de arribo.

Para propósitos de reconstrucción y simulación, el modelo atmosférico es de vital importancia. Los simuladores que inyectan una partícula primaria dentro de las ventanas angulares en la dirección de arribo, toman en cuenta diferentes modelos at-

5.1. HORIZONTALES

mosféricos. Cuando se trabaja con ventanas angulares por encima de los 60° cenitales, un parámetro adicional debe de ser tomado también en cuenta, este parámetro es el de la curvatura de la tierra, lo anterior es debido a que la cantidad de atmósfera que tiene que atravesar es mayor conforme se incrementa el ángulo cenital de incidencia, esto implica que el desarrollo del chubasco sea distinto al que puede ser observado en los “verticales”. Tanto la componente electromagnética, la hadrónica y muónica, muestran distintos perfiles.

En cuanto a los chubascos atmosféricos inducidos por partículas que “rozan” la corteza terrestre, es decir, con ángulos cenitales $> 90^\circ$ se espera un desarrollo distinto, ya que el chubasco es de tipo ascendente. En este caso, los fenómenos de transporte e interacción contemplan el paso de la partícula por un medio diferente al presentado en la atmósfera, la composición rocosa de la corteza de la tierra permite que el desarrollo de la componente electromagnética se vea atenuada por medio de la absorción del medio, mientras que la componente hadrónica permitirá que la producción de la componente muónica sea la predominante al “emerger” y ser muones, lo que los detectores de superficie registren; la sobrevivencia de la componente muónica no debe de sorprendernos, ya que al ser, el muón, una partícula cargada y altamente penetrante, fácilmente puede recorrer 10 km de corteza terrestre antes de decaer, dándose este último fenómeno por encima de los detectores de superficie del observatorio.

Se puede observar este fenómeno de “rozamiento” con el medio circundante también para ángulos cenitales entre 60° y 90° , debido a la ubicación geográfica del observatorio, ya que por el oeste se encuentra una barrera natural creada por la Cordillera de los Andes, la cual actúa de manera similar a la corteza cuando el chubasco atmosférico es creado por partículas que rozan la corteza terrestre.

En los simuladores empleados para generar los chubascos atmosféricos, existen ciertas limitaciones, como en el caso de Aires, el cual tiene una apertura angular cenital $\theta < 90^\circ$, lo cual impide de primera instancia, generar chubascos con inclinaciones superiores.

Tanto en CORSIKA como en AIRES, el modelo atmosférico puede ser ajustado de tal manera que sea un modelo de atmósfera curvo o uno plano.

5.1.1. Generación de Simulaciones

Para evaluar y comparar los resultados obtenidos por el análisis de los datos, se incorpora una simulación con los parámetros reconstruidos del chubasco “real” de tal manera que, mediante Offline, podamos reconstruir un chubasco con el análisis y estadística útil. Para ello se utilizaron dos de los simuladores que de manera frecuente se emplean para este fin: AIRES y CORSIKA. El proceso se hace mediante un archivo de control (*steer file*) para la generación del cual se diseñó una aplicación llamada *PHPSteer*, con la finalidad de facilitar y uniformar la definición de los parámetros necesarios para realizar una simulación y tener una visión más completa y amplia de los parámetros del chubasco a simular. De las decenas de parámetros que definen un chubasco, los principales se pueden considerar: la energía del primario, el ángulo de incidencia y la composición química (Ver apéndice A.1).

Una vez generado el archivo de control y producido el chubasco correspondiente, los resultados obtenidos de la simulación contenidos en un archivo binario, son incorporados a Offline y procesados mediante las directivas pertinentes, con lo que se genera la información de reconstrucción y los histogramas relativos. De esta manera se puede realizar el análisis comparativo entre un chubasco “real” reconstruido y uno simulado con parámetros idénticos.

La herramienta computacional de simulación permite analizar el desarrollo de un chubasco atmosférico, también para el caso de la distribución lateral de partículas, es decir, la generación de partículas conforme un chubasco se produce. De tal manera que mediante una gráfica, pueda verse tal desarrollo; la razón de las componentes electromagnéticas, fotónicas y muónicas, como función de la energía del primario y la profundidad de la interacción. Se muestran diversos desarrollos de tales componentes en varios ángulos de incidencia cenital. Estas simulaciones fueron generadas con AIRES.

En las figuras 5.5, 5.6 se muestra el desarrollo longitudinal de un chubasco atmosférico inducido por un protón con una energía de 10^{19} eV, en un rango que va desde los 15° a los 89° , en ella se muestra el número de partículas sobre la profundidad de interacción. En ellas puede notarse que, conforme se incrementa el ángulo de incidencia (acimutal), la cantidad de partículas que alcanzan el nivel de observación al piso ($\frac{900gr}{cm^2}$) la componente electromagnética es absorbida en regiones cercanas al

5.1. *HORIZONTALES*

primer punto de interacción del primario, sobreviviendo a esta absorción temprana en su mayoría los muones.

5.1. HORIZONTALES

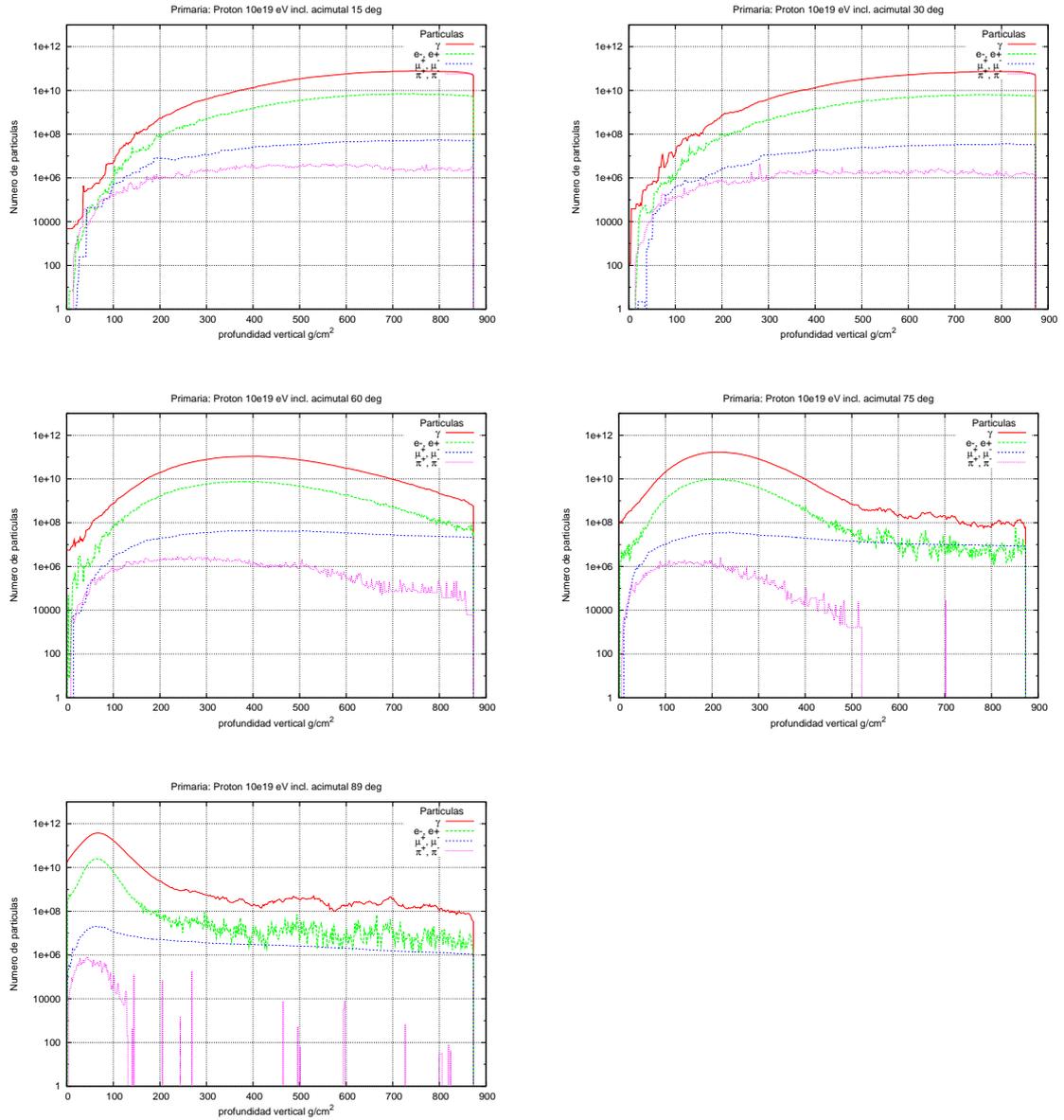


Figura 5.5: Desarrollo longitudinal Protón de 10^{19} eV. Ángulo de incidencia cenital del primario: $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 89^\circ$

5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CHUBASCOS DE NEUTRINOS

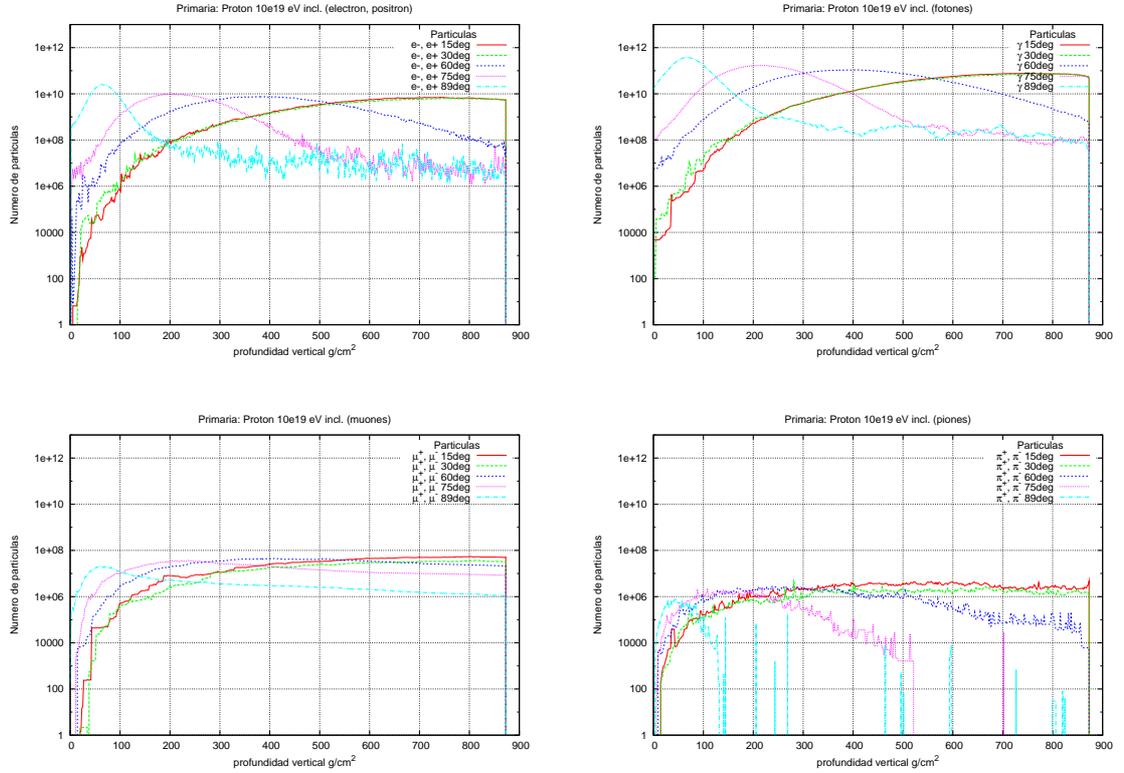


Figura 5.6: Desarrollo longitudinal Protón de 10^{19} eV por grupo de partículas eV. Ángulo de incidencia cenital del primario: 15° , 30° , 60° , 75° , 89°

5.2. Características de los Chubascos de Neutrinos

Por encima de energías de 1 PeV la tierra se torna opaca para los neutrinos y solo los neutrinos “descendentes” o los neutrinos que rozan la tierra pueden detectarse. El reto radica en la identificación de dichos chubascos dentro de un gran “ruido de fondo”, este ruido es producido por los rayos cósmicos descendentes y el de los muones atmosféricos. El ruido de fondo principal es debido, en su mayoría, por chubascos atmosféricos inclinados inducidos por protones y nucleos, es importante entonces la búsqueda de señales características que permitan discriminar los chubascos inducidos por neutrinos, de los chubascos muy inclinados ordinarios.

5.2.1. Interacción ν -Nucleón y sus chubascos inducidos

Los neutrinos pueden interactuar ya sea mediante la corrientes neutras (NC) o mediante las corrientes cargadas (CC).

En el caso de las reacciones de Corriente Neutra (NC):

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X_{NC}$$

un neutrino se va a dispersar (inelásticamente) con un nucleón N, (para todos los tipos de neutrinos), en este ejemplo X_{NC} son los fragmentos hadrónicos. Para el caso del estudio del comportamiento de estos procesos, es necesario recurrir a un generador de eventos que se adapta a este tipo de fenómeno, PYTHIA cumple con los requisitos, ya que es una herramienta estándar para la generación de colisiones de alta energía y comprende un conjunto de modelos físicos coherente para modelar la evolución, desde el manejo de algunos cuerpos en procesos “duros”, hasta la generación de “estados finales” de procesos multi-hadrónicos complejos[33].

Entre los retos del observatorio Pierre Auger, se encuentra el de discriminar los chubascos producidos por neutrinos, del “fondo” de los chubascos iniciados por otros rayos cósmicos.

Los hadrones y fotones interactúan en distancias “cortas”, después de haber penetrado la atmósfera terrestre. Los neutrinos pueden penetrar grandes cantidades de materia sin ser perturbados y generar un chubasco muy cerca del arreglo de detectores de superficie. La diferencia entre los chubascos que se desarrollan cerca de los detectores (llamados chubascos jóvenes) y los chubascos que se desarrollan por el efecto de una interacción temprana con la atmósfera (llamados chubascos viejos), se ve acentuada cuando vamos considerando ángulos cenitales grandes. En el caso de los chubascos iniciados por “primarios hadrónicos”, los cuales interactúan prontamente con la atmósfera ($\frac{100g}{cm^2}$), solamente las partículas altamente penetrantes, producto de esta interacción, sobreviven para llegar al nivel de los detectores y generar las señales del *trigger*, es decir, solo los muones muy energéticos sobreviven. El resultado de ello se manifiesta con un frente de chubasco delgado y plano, lo cual se refleja en que las señales detectadas sean cortas (con una duración de unos cuantos nanosegundos). En el caso de un chubasco joven (inducido por neutrinos), se presenta además una marcada componente electromagnética en la superficie; el frente del chubasco

5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CHUBASCOS DE NEUTRINOS

es curvo y denso, el cual deja señales amplias, con duración de hasta unos cuantos microsegundos.

5.2.2. Neutrinos Rozantes

Aunque la producción de los neutrinos Tau es limitada, la oscilación de sabor de los neutrinos origina una proporción de sabor $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 1 : 1$, que se consigue después de haberse propagado distancias cosmológicas. En consecuencia, es de esperarse que lleguen a la tierra un número igual de neutrinos de los diferentes sabores. Sin embargo una característica única para lograr la detección neutrinos del tau de ultra alta energía en la atmósfera, es la identificación de chubascos atmosféricos descendentes dobles, que se producen con la interacción del ν_τ con los núcleos del aire mediante una iteracción de corriente cargada. A este fenómeno se le llama *Fenómeno Double-Bang* (DB), el cual no ocurre con otros sabores del neutrino.

Los neutrinos ν_τ pueden ser también detectados mediante la observación de eventos en los cuales un neutrino “roza” la corteza terrestre. Algunos de ellos pueden experimentar interacciones de corriente cargada (CC) que se traducen en partículas τ . Los leptones τ , que son producidos en las montañas o dentro de la tierra, pueden escapar incluso de las profundidades de la roca, emergiendo a la atmósfera como una partícula ascendente, la cual puede producir señales claras, si esta decae sobre el detector del observatorio.

El chubasco inducido por el decaimiento τ puede ser considerado como hadrónico y puede cargar hasta con 2/3 del total de la energía del τ . Este mecanismo no trabaja de manera tan efectiva para ν_e ni para los ν_μ , es decir, si los leptones son electrones e^- estos no pueden escapar al manto rocoso y en el caso de los muones μ , estos podrían viajar hasta 10 km dentro de la tierra, con lo que se ve reducida la probabilidad de que puedan producir una señal visible en la atmósfera. El Observatorio Pierre Auger tiene el potencial de detectar los chubascos de los leptones τ inducidos por los neutrinos que “rozan” la corteza terrestre, mediante ambos tipos de detectores que lo componen, los detectores de fluorescencia y los detectores de superficie[34].

5.3. Selección de candidatos

Los chubascos atmosféricos tienen particularidades que permiten identificarlos, reconstruirlos, clasificarlos para estudios específicos. Se necesita de toda la base de datos de eventos y de un criterio de selección preciso para poder seleccionar aquellos deseados, en nuestro caso los candidatos a chubascos atmosféricos horizontales y a partir de ahí a los que posiblemente sean inducidos por neutrinos.

En el presente estudio buscamos en la biblioteca de datos del detector de superficie catalogada con la estructura ADST. Analizamos los datos tomados desde enero del año 2004 y hasta febrero del 2010 y seleccionamos aquellos que cumplieron los siguientes criterios de selección (“cortes”)[34],[1] :

- Ángulo cenital de incidencia:
 - $> 60^\circ$ (condición angular cenital débil);
 - $\geq 75^\circ$ (condición angular cenital fuerte).
- Cumplir con **T3**;
- Disparo de estaciones: ≥ 5 estaciones;
- VEM detectada de $\geq 3,4$ VEM;
- Tiempos de la señal;
 - Rise Time (RT) $> 60\text{ns}$;
 - Fall Time (FT) $> 150\text{ns}$;
 - (RT + FT) Condiciones sumadas de Tiempos.

El criterio de selección, para estos chubascos, se basa en la estructura temporal de las señales detectadas y registradas en las trazas de los *FADC*. La consideración en este sentido, puede verse reflejada directamente en el criterio RT y FT (*Rise Time* y *Fall Time*), que se definen como sigue:

- La señal *Rise Time* (RT) se define como el intervalo de tiempo en el cual entre el 10% y 50% del total de la señal integrada es registrada.

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

- La señal *Fall Time* (FT) se define como el intervalo de tiempo en el cual un tanque registra entre el 50% y el 90% de la señal total integrada.

Los valores *RT* y *FT* dependen del “espesor” del frente del chubasco; estos valores reflejan el retardo entre los diferentes tipo de partículas que arriban al detector.

Las trazas *FADC* con una contribución EM significativa se presentan llenando una ventana de tiempo más amplia que su contraparte muónica. Las trazas de componente EM usualmente cumplen por completo con las condiciones del trigger *ToT* (*Time Over Threshold*). Por su parte la trazas dominadas por la componente muónica son más rápidas y usualmente cumplen por completo con las condiciones del trigger *Thr* (*Threshold*).

La razón por la cual un frente de chubasco de componente muónica produce señales rápidas es debido a que los muones sufren algunas pocas interacciones y no presentan mucha dispersión múltiple, lo cual se ve caracterizado en los valores *RT* y *FT*.

Por su parte, los frentes de chubascos de componente predominantemente EM, presentan señales “lentas” debido a una significativa dispersión múltiple que sufren e^\pm , los cuales se ven caracterizados con valores grandes de *RT* y *FT*.

5.4. Metodología del estudio

La información sobre los chubascos atmosféricos fue obtenida y procesada en el CDAS (*Central Data Aquisition System*) del Observatorio Auger. Cuando un candidato a chubasco atmosférico cumple con todas las condiciones (*triggers*) éste es almacenado como un evento, se le asocia un identificador y se almacena en un archivo con formato de ROOT, el cual contiene toda la información necesaria para ser, eventualmente, analizado y reconstruido con ciertas herramientas computacionales, de las cuales se hablará mas adelante.

Básicamente hay dos tipos de eventos que se registran directamente en CDAS: los eventos obtenidos por los detectores de superficie y los eventos obtenidos por los detectores de fluorescencia. Si un evento cumple con las condiciones de detección y se registra simultáneamente en ambos tipos de detectores, entonces se genera un tercer tipo de evento, a este evento se le llama Híbrido.

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

No es posible analizar y reconstruir a todos los eventos en tiempo real, sin embargo, la técnica de análisis empleada es la llamada Offline, es decir, fuera de línea.

Actualmente solo un 1 % de los datos obtenidos por el observatorio están disponibles al público en general y se pueden acceder directamente del sitio oficial del observatorio P. Auger, empleando una herramienta *web* llamada *Event Display*, que hace la búsqueda y reconstrucción de los datos seleccionados para este propósito.

Existen diversos repositorios de datos del observatorio Pierre Auger en el mundo, el principal se encuentra en la ciudad de Lyon <http://auger.in2p3.fr/>, Institut National de physique nucléaire et de Physique des Particules sin embargo, FermiLab en Chicago o la UNAM en México, cuenta con una *copia espejo* de estas base de datos, las cuales son accesibles a los miembros de la colaboración y los archivos requeridos pueden ser obtenidos directamente tanto de los equipos de almacenamiento como del repositorio y ser transferirlos a una estación de trabajo local para su análisis.

Un archivo de eventos puede ser manipulado de muy diversas formas dependiendo del tipo de información que se requiera extraer de él. Para ello, el grupo de Software de Auger ha desarrollado, a lo largo de la vida del experimento, una serie de herramientas computacionales para diversos propósitos de análisis, reconstrucción y simulación que convergen en una herramienta llamada “Offline Framework”, la cual integra de manera eficiente las diversas capacidades de cómputo para trabajar con los archivos de los datos del experimento.

El uso de este conjunto de herramientas computacionales no resulta, en modo alguno, intuitivo a pesar de contener una serie de ejemplos y herramientas “pre-diseñadas” para diversas tareas comunes en el trabajo cotidiano del Observatorio, en resumen: la curva de aprendizaje y uso correcto (no digamos óptimo) de “Offline” resulta muy pronunciada. Es una herramienta altamente especializada y requiere de un basto conjunto de conocimientos y habilidades.

5.4.1. Reproducción de resultados

En el presente trabajo validamos la consistencia y confiabilidad de los datos analizados. Para ello tomamos un evento *real* de la base de datos y lo reconstruimos, posteriormente extraemos la información fundamental del evento (Energía, θ , ϕ , estaciones disparadas, etc), estos datos son incorporados en una simulación M. C. (AIRES

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

ó CORSIKA), los datos de estas simulaciones se reconstruyen mediante “Offline” incorporando la serie de parámetros que indican el tipo de información a extraer y ser mostrada; lo que se espera es encontrar que la simulación y los datos “reales” (ambos reconstruidos) coincidan en gran medida (en el mejor de los casos se espera una reconstrucción y simulación totalmente coincidente). Si el grado de “acuerdo” entre los datos reconstruidos y los simulados son satisfactorios entonces estamos en condiciones de afirmar que la puesta a punto del conjunto de herramientas computacionales está listo para realizar una tarea específica.

La selección de eventos está comprendida entre el 16 de enero del 2004 hasta el 9 de marzo del 2010; con datos que son obtenidos directamente del repositorio “OnLine” AugerObserver. Estos datos (aproximadamente 11 GB de información) son procesados por un script de ROOT, el cual fue diseñado en el presente trabajo, para buscar dentro de los archivos, de la colección del Observatorio, solo los eventos que satisfagan los criterios mencionados previamente.

5.4.1.1. Obtención de Histogramas

Los archivos ADST del Observatorio P. Auger, contienen la información depurada de los eventos detectados y reconstruidos desde el año 2004 hasta el primer tercio del 2010, son constantemente mantenidos y actualizados.

La manera en que se obtuvieron los histogramas con la información relevante, es decir, los eventos que satisfacen los cortes propuestos, se realizó con un script de ROOT, el cual obtiene la colección de datos a procesar para ser almacenados en un “buffer” de memoria controlado por ROOT. Cada archivo es leído para obtener la siguiente información básica:

- Identificador del Archivo;
- Identificador del Evento.

Posteriormente se agrega una condicional doble, la cual tiene que verificarse como verdadera:

1. Cantidad mínima y máxima de tanques satisfecha;
2. Ángulo Cenital mínimo y máximo satisfecho.

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Cuando estos dos primeros elementos del corte se cumplen, entonces se procede a la obtención del contenido de cada estación reportada como disparada.

1. ID y nombre de la estación de superficie disparada;
2. Iteramos sobre cada uno de los tres PMT para obtener los “peak” (picos VEM), de la señal total integrada;
3. Rise Time;
4. Fall Time.

Ya con estos datos es posible meter una condición que permite determinar la densidad del chubasco, mencionando que debe cumplir con los parametros siguientes[34]:

1. $RT > 60\text{ns}$ (precondición);
2. $FT > 150\text{ns}$ (precondición);
3. $RT > 60\text{ns}$ y $FT > 150\text{ns}$ (condición fuerte).

Sin embargo, el fijar estas condiciones (RT y FT), hace rígido el esquema de la selección de posibles candidatos, al exigir un $RT > 60\text{ns}$ y un $FT > 150\text{ns}$ tenemos en mente que el criterio obedece a una cierta densidad del frente del chubasco. Hemos considerado que este corte es aceptable para ángulos de incidencia cenital $> 75^\circ$, lo cual implica que el primario atraviesa mayor cantidad de atmósfera y eso se ve reflejado en una disminución de la densidad del frente del chubasco que dispara la detección en los Detectores de Superficie. Por otro lado, al variar el límite inferior del corte en el ángulo cenital a 60° , no podremos mantener estos mismos valores de cortes RT y FT . En este caso lo que es de esperarse es que exista una mayor cantidad de señales que pueden confundirse con chubascos atmosféricos inducidos por neutrinos ν_l . La razón es que a este ángulo, la cantidad de atmósfera con la que un primario interactúa es menor y el número de eventos que pueden cumplir con esta ventana RT y FT sería mayor. La densidad del frente de un chubasco con estas condiciones podría ser fácilmente cumplida, sin que necesariamente sea un chubasco inducido por neutrinos ν_l . Por esta razón los cortes RT y FT para primarios incidentes a 60° se modifican de la siguiente manera[1]:

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

1. $RT > 80\text{ns}$ (precondición);
2. $FT > 200\text{ns}$ (precondición);
3. $RT > 80\text{ns}$ y $FT > 200\text{ns}$ en las dos estaciones más tempranas (condición fuerte);
4. Que las estaciones sean ToT.

Cuando se han cumplido todos los cortes, es posible generar los histogramas por evento, por detector y por fotomultiplicador. Lo anterior sirve para evidenciar el tipo y posible forma del frente del chubasco.

5.4.2. Herramientas computacionales

Para la comparación entre los datos reconstruidos y los simulados se obtienen los datos del repositorio con los datos de los Detectores de Superficie [35]. Estos datos están organizados por el año y el mes de obtención, en algunos casos solamente se cuenta con el compendio de todo un año de eventos almacenados en un solo archivo (básicamente los años 2004, 2005, 2006 y 2007) y solamente se conservan datos que han pasado ciertos criterios de disparo (triggering), desechando datos con disparos considerados “fantasma” (estaciones que se disparan con ciertas señales, pero que no se encuentran lo suficientemente cercanas entre sí). Este es un punto referente para cotejar datos reales, suficientemente depurados y generar una simulación que concuerde para con ello dar certidumbre o validación de las simulaciones que se generan en este trabajo. Estos datos obtenidos directamente de *Fisik Zentrum Karlsruhe* se procesan con la herramienta ADST (*Advanced Data Summary Tree*)[36].

5.4.3. Análisis de datos ADST

En la elaboración de los cortes preliminares y diseño de los scripts se trabajó con una computadora portátil con las siguientes características:

La capacidad de proceso y memoria del equipo portátil hace poco práctico el análisis de la colección de eventos desde 2004 a 2010. Solo se utilizó una muestra significativa para evaluar el desempeño y depuración del código. Para el análisis de datos se utilizó la versión 5 de los datos de ADST desde los años 2004 al 2010.

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

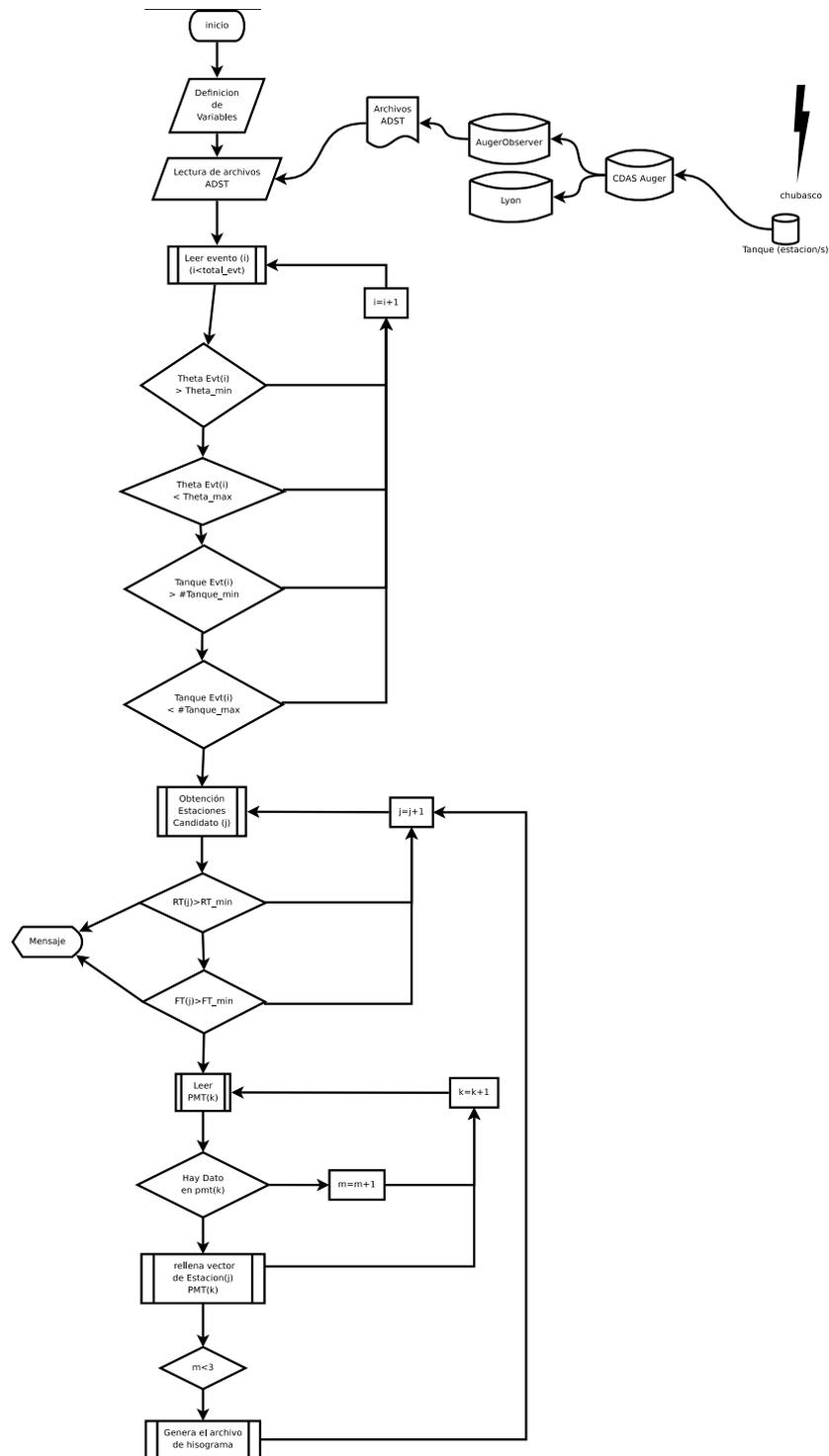


Figura 5.7: Diagrama del proceso de extracción de datos de chubascos atmosféricos

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

| | |
|---------------------|--|
| Marca | HP |
| Modelo | Pavilion dv2535la Notebook |
| Procesador | Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T5250 @ 1.50GHz |
| Memoria RAM | 2GB |
| Disco Duro | 160GB |
| Tiempo de ejecución | Real time 2:08:45, CP time 3802.830 |

Cuadro 5.1: Tiempo de respuesta de equipo portátil en el análisis de cortes

| | |
|------------------|-------------------------------------|
| Marca | Ensamblada |
| Plataforma | x86 32bits |
| Modelo | sin modelo |
| Procesador | Intel Core 2 Duo 2.8 Ghz |
| Memoria RAM | 4GB |
| Disco Duro | 350GB |
| Tiempo ejecución | Real time 1:01:50, CP time 1842.700 |

Cuadro 5.2: Tiempo de respuesta de equipo de escritorio casero

| | |
|------------------|--|
| Marca | HP |
| Plataforma | x86 64bits |
| Modelo | HP |
| Procesador | Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8300 @ 2.83GHz |
| Memoria RAM | 2GB |
| Disco Duro | 250GB |
| Tiempo ejecución | Real time 0:43:14, CP time 1424.800 |

Cuadro 5.3: Tiempo de respuesta en un nodo de cluster

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Al momento de tener depurado el programa de análisis, la versión de datos reconstruidos por ADST fue la V6R0 y la de Offline fue v2r6p1-AsterixObelix obtenida mediante el instalador ape 0.99.2p1. La actualización fue necesaria para poder trabajar con los archivos de datos reconstruidos más recientes, de manera confiable, ya que al emplear datos recientes con una biblioteca de análisis anterior, la confiabilidad de los resultados es cuestionable.

5.4.4. Matriz de Estado

El programa realizado extrae los datos de la versión actual de ADST del observatorio Pierre Auger, en primer lugar se encarga de seleccionar los eventos que cumplen con dos criterios fundamentales o cortes; el primero de ellos, que el ángulo cenital tenga un valor superior a 60° o superior a 75° (esto dependerá del tipo de análisis y fenómeno que se quiere estudiar).

El segundo corte es el relacionado a la cantidad estaciones de superficie que han sido disparadas por el evento, en nuestro caso, nuestro mínimo de estaciones requeridas es de cinco, sin tenerlo acotado superiormente. Después de que el evento ha cumplido con estos dos cortes principales el programa se encargará de verificar qué estaciones fueron disparadas y en qué orden; es importante conocer el orden en el que fueron disparadas las estaciones del detector de superficie, ya que en el momento de analizar que cumplan el tercer corte, el orden de disparo será fundamental. Antes de realizar la verificación de que se cumpla un tercer corte, se requiere saber si la estaciones que fueron disparadas, son realmente *candidatos* ó son *estaciones accidentales*. Las estaciones accidentales son aquellos tanques, del arreglo del detector de superficie, que se disparan, pero no pertenecen a ningún conjunto de tanques que cumpla con algún *trigger* en especial. Básicamente se considera una estación como accidental, a aquella que dentro de su hexágono no hay más estaciones con las cuales se pueda reconstruir un evento. En este paso se propone una *matriz de estado*.

La *matriz de estado*, es una matriz que identifica por filas cada una de las estaciones que han sido disparadas, independientemente de si son accidentales, solitarias, candidatos o cualquier otro tipo de estado que acepte ó rechace a la estación dentro del evento, las columnas representan el estado en el que se encuentra la estación en cuestión, donde la primera columna representa si es o no accidental, la segunda, ter-

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

cera y cuarta columna, representa si, respectivamente, cumplen o no con “Rise Time”, “Fall Time” y “VEM”; la *matriz de estado* se construye con los elementos (estaciones) ya ordenados, es decir la primera fila corresponde a la primera estación disparada, la segunda fila a la segunda estación y así hasta llegar a la n-ésima estación registrada en el evento. Las componentes de esta matriz son del tipo *bool*, representando 0 como falso ó condición incumplida ó 1 como verdadero ó condición satisfecha, la matriz es llenada por los eventos que satisfacen las condiciones básicas (ángulo cenital y cantidad de estaciones mínimos). La utilidad principal de la matriz es la de identificar, de primera instancia, los posibles candidatos y evaluar directamente las condiciones cumplidas o incumplidas, de ahí que el programa se encarga de seleccionar los eventos con las propiedades satisfechas. Esto se hace reorganizando la *matriz de estados* mediante una *matriz de transición*, la cual tendrá x cantidad de estaciones disparadas (donde x es la cantidad de estaciones candidatas que no son accidentales), contiene todas las estaciones, manteniendo el orden de disparo, de la más temprana a la más tardía y todos sus valores de verdad respectivamente; de ahí se puede re-evaluar la condición relacionada con la cantidad de estaciones disparadas que no son accidentales y verificar que efectivamente sigan siendo mayores o iguales al corte propuesto. Si este corte es incumplido, entonces se descarta este evento como posible candidato, (todo esto tomado de la *matriz de transición*), entonces ahora tenemos una colección de estaciones que pertenecen en su totalidad a un *trigger* bien definido y válido para seguir trabajando con los valores de verdad; la *matriz de transición* se convierte en una *matriz de estado* nueva, donde vemos si las dos primeras estaciones (dos primeras filas de la matriz) cumplen con “RT”, “FT” y “VEM”, de ser así entonces es catalogado como *evento candidato*.

Al ser cumplidas todas las condiciones; la matriz nueva contiene solo ceros en la primera columna y solo “unos” en las columnas restantes de al menos las dos primeras filas, de no ser así se descarta el evento como candidato.

Esta manipulación (eliminación de estaciones accidentales) puede ser poco rigurosa. Es decir, forzar la eliminación de estaciones accidentales puede orientar la selección de eventos, ya que las *estaciones accidentales* pueden ser disparadas por una parte del chubasco atmosférico en cuestión y caer dentro de un análisis en el cual, contar con estaciones accidentales sea condición para un evento disparado por

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

otro tipo de fenómeno en particular. Sin embargo, el programa, al incorporar dentro del sumario la información de cuántas estaciones accidentales fueron removidas (o no tomadas en cuenta para el análisis de los cortes), cuántas estaciones fueron disparadas en su totalidad y que preservan el orden de disparo, puede verse directamente, de los posibles candidatos, cuáles tienen estaciones disparadas en los primeros 2 lugares y que cumplen con vector $(0\ 1\ 1\ 1)$ permitiéndonos solo contabilizar esta clase de eventos, lo cual reduce el número de candidatos.

El programa genera, automáticamente, los histogramas de las “Trazas VEM” por fotomultiplicador de cada una de las estaciones (independientemente de si son ó no estaciones accidentales) de los denominados candidatos a chubascos atmosféricos horizontales posiblemente inducidos por neutrinos, de tal manera que si el análisis pretende ser más estricto, permitiendo solo estaciones no accidentales que realmente han sido disparadas tempranamente, estas ya se encuentran generadas y ubicadas, y solo hace falta relacionarlas con el sumario que arroja el programa.

La flexibilidad que actualmente se incorpora, es la facilidad de cambiar los valores en los límites en los cortes, pudiéndose ajustar a nuevos parámetros para la identificación de candidatos a chubascos atmosféricos horizontales e inducidos por neutrinos. Adicionalmente y como se ha probado en diferentes escenarios, al utilizar directamente las bibliotecas proporcionadas por el grupo de desarrollo de Offline, permite obtener los datos conforme a los criterios de reconstrucción que son propuestos y mantenidos por la colaboración, de tal manera que al existir una nueva versión en los algoritmos de reconstrucción de los datos del Observatorio y colecciones de datos reconstruidos actualizadas, solo basta con ejecutar el programa, ya sea sobre la nueva colección de datos reconstruidos y/o modificar los cortes para que estos se adapten a modelos teóricos propuestos por la colaboración.

Con el diseño e implementación de esta matriz, el proceso de análisis y selección de los eventos no habría sido posible, dada la cantidad de cortes de calidad que se emplean y la variación sensible de los mismos. La matriz muestra resultados de selección diferentes que resultan difíciles de comparar e interpretar si no se emplea la *matriz de estados*. Es por esto que el empleo de este objeto resulta de gran importancia en el estudio que aquí se presenta (ver figuras 5.8, 5.9).

5.4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

```

Selección de eventos con los siguientes criterios
Rise Time : 80      Fall Time : 200
VEM       : 3.4     Estaciones min : 5
Theta min : 70     Theta max   : 90
All ToT   : 0      Desc. Accidental : 1
-----Encontramos_Candidato-----
Evento #           = 1127391
Energia           = 1.16454e+06 [TeV]
Angulo de incidencia Theta = 71.2593
Angulo de incidencia Phi  = 266.337
Archivo de datos    = ../ROOT-DATA-TREE-V6A0-201004/SDRec_v6r0_2004_generated_2010-3-22.root
# de candidatos     = 15
# de accidentales   = 2
# Estaciones disparadas = 17
-----MATRIZ DE ESTADO-----
SD_ID  Time  Acci  RT  FT  VEM  IsToT
193    0    0    1  1  1    0
192    1    0    1  1  1    0
191    2    0    1  0  1    0
146    3    0    0  0  1    0
143    4    0    1  0  1    0
135    5    0    0  0  1    0
144    6    0    1  0  1    0
142    7    0    0  0  1    0
102    8    0    0  0  1    0
105    9    0    0  0  1    0
134   10    0    0  0  1    0
138   11    0    0  0  1    0
140   12    0    0  0  1    0
139   15    0    0  0  1    0
117   16    0    0  0  1    0
candidato invalidado por falta de histogramas

```

Figura 5.8: Matriz de estado (ejemplo 1)

```

-----Encontramos_Candidato-----
Evento #           = 1041165
Energia           = 0 [TeV]
Angulo de incidencia Theta = 89.9981
Angulo de incidencia Phi  = 293.762
Archivo de datos    = ../ROOT-DATA-TREE-V6RB-201004/SDRec_v6r0_2004_generated_2010-3-22.root
# de candidatos     = 9
# de accidentales   = 0
# Estaciones disparadas = 9
-----MATRIZ DE ESTADO-----
SD_ID  Time  Acci  RT  FT  VEM  IsToT
309    0    0    1  1  1    0
353    1    0    1  1  1    0
327    2    0    1  1  1    0
345    3    0    1  1  1    0
355    4    0    1  1  1    0
350    5    0    1  1  1    0
351    6    0    1  1  1    0
349    7    0    1  1  1    0
336    8    0    0  0  1    0
candidato invalidado por falta de histogramas

```

Figura 5.9: Matriz de estado (ejemplo 2)

5.5. Resultados

El análisis de los eventos del observatorio Pierre Auger, comprendidos dentro de los años 2004 y primer tercio del 2010, obtenidos del repositorio “*The Auger Observer - ADST*” con la colección V6R0, generada mediante “Offline reconstruction v2r6p1”, que cumplen con los cortes propuestos y se perfilan como *posibles candidatos* a chubascos atmosféricos horizontales e inducidos por neutrinos. Sin embargo, de esta selección no es posible hacer ningún tipo de afirmación, salvo que los eventos son los pre-seleccionados para buscar que en cada uno existan 2 estaciones (al menos) que cumplan con *RT* y *FT* propuestos para asegurar que el frente del chubasco sea el requerido.¹ Esto no basta, ya que de la selección solo resta evaluar si las estaciones marcadas como RT y FT fueron las primeras 2 disparadas en el evento. En la siguiente tabla se muestran los cortes organizados con un identificador único en la primera columna, en la segunda columna el rango angular (acimutal) donde se buscan los eventos, en la tercera columna la condición de Rise Time a cumplirse, al igual que en la cuarta columna relacionada al Fall Time, en la quinta columna se especifica si los eventos seleccionados se les han removido las estaciones accidentales y finalmente, en la última columna, el total de eventos que han pasado los cortes anteriores:

¹en este caso, generamos los histogramas de todos los eventos que cumplen con *RT* y *FT*, para cumplir deben de haber 2 archivos con el mismo número de evento y además estar marcado como CANDIDATO

5.5. RESULTADOS

| Id. | Ángulo incidencia | RT | FT | R.TOT | R.Accidentales | # Eventos |
|-----|--------------------------------|--------|---------|-------|----------------|-----------|
| 1 | $70^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 80ns | > 200ns | No | Si | 9 |
| 2 | $70^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 80ns | > 200ns | No | No | 12 |
| 3 | $70^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 80ns | > 200ns | Si | No | 7 |
| 4 | $70^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 80ns | > 200ns | Si | Si | 10 |
| 5 | $75^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 60ns | > 150ns | No | Si | 8 |
| 6 | $75^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 60ns | > 150ns | No | No | 9 |
| 7 | $75^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 60ns | > 150ns | Si | No | 7 |
| 8 | $75^\circ < \theta < 90^\circ$ | > 60ns | > 150ns | Si | Si | 8 |

Cuadro 5.4: Posibles candidatas a chubascos atmosféricos horizontales e inducidos por neutrino

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1127391 | 2004 | 17 | 1.16454e+06 [TeV] | 71,2593° |
| 2119146 | 2006 | 10 | 489182 [TeV] | 70,3737° |
| 3216042 | 2007 | 15 | 1.35051e+06 [TeV] | 71,68° |
| 4327041 | 2007 | 32 | 4.26767e+06 [TeV] | 70,95° |
| 6236036 | 2008 | 19 | 3.0384e+06 [TeV] | 71,35° |
| 7826900 | 2009 | 8 | 592987 [TeV] | 70,83° |
| 7828667 | 2009 | 31 | 1.35092e+07 [TeV] | 74,79° |
| 8116690 | 2009 | 14 | 1.52973e+06 [TeV] | 71,36° |
| 8438397 | 2009 | 31 | 4.752e+06 [TeV] | 72,12° |

Cuadro 5.5: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 1

5.5. RESULTADOS

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1127391 | 2004 | 17 | 1.16454e+06 [TeV] | 71,26° |
| 1718520 | 2005 | 17 | 1.63636e+06 [TeV] | 70,91° |
| 2119146 | 2006 | 10 | 489182 [TeV] | 70,37° |
| 2550163 | 2006 | 32 | 6.25919e+06 [TeV] | 71,06° |
| 4327041 | 2007 | 32 | 4.26767e+06 [TeV] | 70,95° |
| 5057493 | 2008 | 24 | 4.18303e+06 [TeV] | 72,64° |
| 6236036 | 2008 | 19 | 3.0384e+06 [TeV] | 71,35° |
| 7826900 | 2009 | 8 | 592987 [TeV] | 70,83° |
| 7828667 | 2009 | 31 | 1.35092e+07 [TeV] | 74,79° |
| 8116690 | 2009 | 14 | 1.52973e+06 [TeV] | 71,36° |
| 8290878 | 2009 | 37 | 7.32838e+06 [TeV] | 70,96° |
| 8438397 | 2009 | 31 | 4.752e+06 [TeV] | 72,12° |

Cuadro 5.6: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 2

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 3216042 | 2007 | 15 | 1.35051e+06 [TeV] | 71,68° |
| 4327041 | 2007 | 31 | 4.26767e+06 [TeV] | 70,95° |
| 6236036 | 2008 | 19 | 3.0384e+06 [TeV] | 71,35° |
| 7826900 | 2009 | 8 | 592987 [TeV] | 70,83° |
| 7828667 | 2009 | 31 | 1.35092e+07 [TeV] | 74,79° |
| 8116690 | 2009 | 14 | 1.52973e+06 [TeV] | 71,36° |
| 8438397 | 2009 | 31 | 4.752e+06 [TeV] | 72,12° |

Cuadro 5.7: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 3

5.5. RESULTADOS

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1718520 | 2005 | 17 | 1.63636e+06 [TeV] | 70,91° |
| 2550163 | 2006 | 32 | 6.25919e+06 [TeV] | 71,06° |
| 4327041 | 2007 | 32 | 4.26767e+06 [TeV] | 70,95° |
| 5057493 | 2008 | 24 | 4.18303e+06 [TeV] | 72,64° |
| 6236036 | 2008 | 19 | 3.0384e+06 [TeV] | 71,35° |
| 7826900 | 2009 | 8 | 592987 [TeV] | 70,83° |
| 7828667 | 2009 | 31 | 1.35092e+07 [TeV] | 74,79° |
| 8116690 | 2009 | 14 | 1.52973e+06 [TeV] | 71,36° |
| 8290878 | 2009 | 37 | 7.32838e+06 [TeV] | 70,96° |
| 8438397 | 2009 | 31 | 4.752e+06 [TeV] | 72,12° |

Cuadro 5.8: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 4

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1452015 | 2005 | 25 | 3.23783e+06 [TeV] | 78,80° |
| 1956182 | 2006 | 31 | 4.12438e+06 [TeV] | 76,72° |
| 3287548 | 2007 | 10 | 1.08821e+06 [TeV] | 75,91° |
| 4108920 | 2007 | 26 | 2.50835e+06 [TeV] | 75,70° |
| 6322833 | 2008 | 11 | 648108 [TeV] | 75,33° |
| 6914028 | 2008 | 13 | 657427 [TeV] | 78,59° |
| 6943389 | 2008 | 24 | 4.29416e+06 [TeV] | 77,07° |
| 7988432 | 2009 | 26 | 2.37855e+06 [TeV] | 75,77° |

Cuadro 5.9: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 5

5.5. RESULTADOS

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1452015 | 2005 | 25 | 3.23783e+06 [TeV] | 78,80° |
| 2152516 | 2006 | 23 | 2.43915e+06 [TeV] | 76,19° |
| 4108920 | 2007 | 26 | 2.50835e+06 [TeV] | 75,70° |
| 6202084 | 2008 | 34 | 4.03615e+06 [TeV] | 76,39° |
| 6322833 | 2008 | 11 | 648108 [TeV] | 75,33° |
| 7065500 | 2009 | 8 | 751701 [TeV] | 75,79° |
| 7988432 | 2009 | 26 | 2.37855e+06 [TeV] | 75,77° |
| 8473731 | 2009 | 40 | 1.10264e+07 [TeV] | 75,17° |
| 8668880 | 2009 | 8 | 645352 [TeV] | 75,84° |

Cuadro 5.10: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 6

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1452015 | 2005 | 25 | 3.23783e+06 [TeV] | 78,8° |
| 1956182 | 2006 | 31 | 4.12438e+06 [TeV] | 76,72° |
| 3287548 | 2007 | 10 | 1.08821e+06 [TeV] | 75,91° |
| 4108920 | 2007 | 26 | 2.50835e+06 [TeV] | 75,7° |
| 6914028 | 2008 | 13 | 657427 [TeV] | 78,59° |
| 6943389 | 2008 | 24 | 4.29416e+06 [TeV] | 77,07° |
| 7988432 | 2009 | 26 | 2.37855e+06 [TeV] | 75,77° |

Cuadro 5.11: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 7

| Evento | Fecha | Est.Activadas | E. Rec. | θ Rec. |
|---------|-------|---------------|-------------------|---------------|
| 1452015 | 2005 | 25 | 3.23783e+06 [TeV] | 78,80° |
| 2152516 | 2006 | 23 | 2.43915e+06 [TeV] | 76,19° |
| 4108920 | 2007 | 26 | 2.50835e+06 [TeV] | 75,7° |
| 6202084 | 2008 | 34 | 4.03615e+06 [TeV] | 76,39° |
| 7065500 | 2009 | 8 | 751701 [TeV] | 75,79° |
| 7988432 | 2009 | 26 | 2.37855e+06 [TeV] | 75,77° |
| 8473731 | 2009 | 40 | 1.10264e+07 [TeV] | 75,17° |
| 8668880 | 2009 | 8 | 645352 [TeV] | 75,84° |

Cuadro 5.12: Candidatos cumpliendo Cortes de Id. 8

5.5.1. Huellas obtenidas en los detectores de superficie SD

De los eventos seleccionados, mediante el programa de análisis, en base a los cortes determinados, las huellas dejadas en los Detectores de Superficie del Observatorio Pierre Auger, por estos chubascos, se muestran a continuación; esto sirve para ayudar en la determinación de la posible composición química del chubasco atmosférico, donde, con círculos rojos se marca la estación de superficie disparada, el diámetro de cada círculo está directamente relacionado con la intensidad de la señal (VEM). Es de hacer notar que en los chubascos atmosféricos horizontales se muestra un patron notablemente elíptico en las huellas dejadas en los detectores de superficie, mismas que se muestran en las figuras 5.9 a la 5.34, relacionadas a los eventos seleccionados como candidatos, mismas que aportan ayuda en la inspección visual de los eventos relacionados. De esta inspección visual, puede hacerse la selección de un evento en particular que tenga una huella notable (relación entre los ejes de simetría, intensidades de señal y ubicación del eje del chubasco) que permitan prestar especial atención para un estudio mas a detalle.

5.5. RESULTADOS

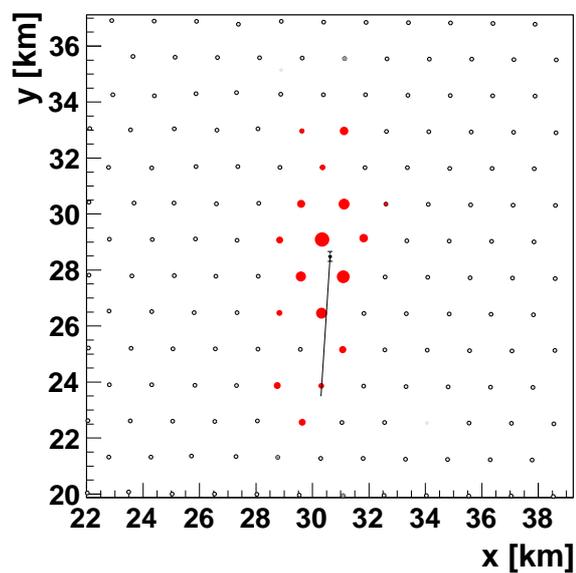


Figura 5.10: Huella en Detector de Superficie del evento 1127391

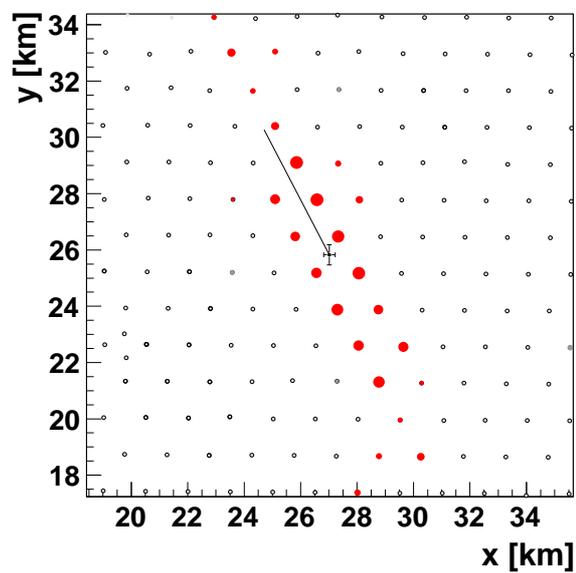


Figura 5.11: Huella en Detector de Superficie del evento 1452015

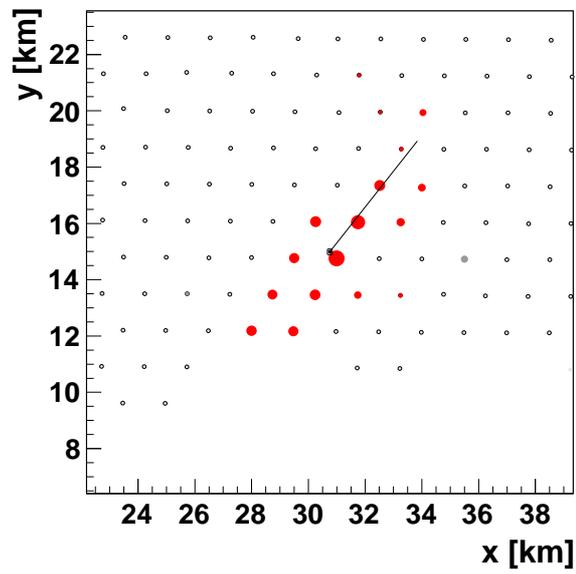


Figura 5.12: Huella en Detector de Superficie del evento 1718520

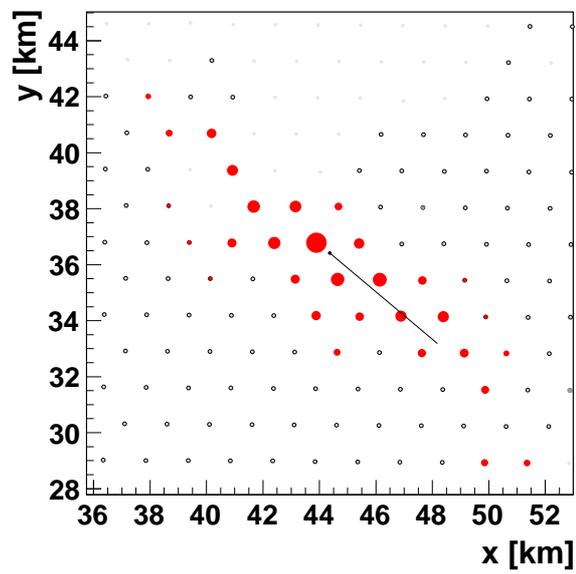


Figura 5.13: Huella en Detector de Superficie del evento 1956182

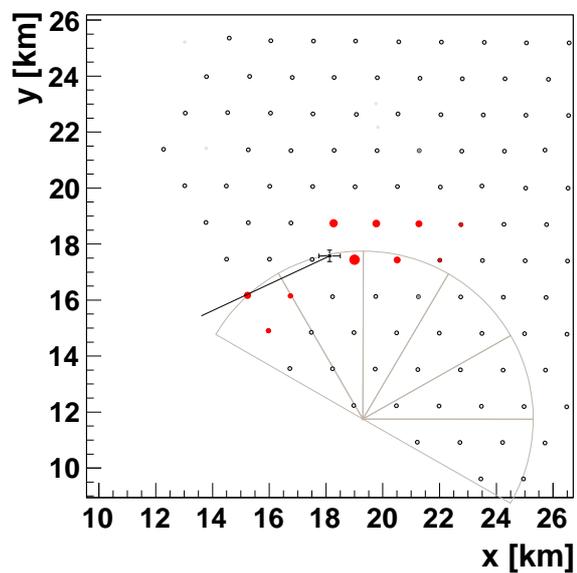


Figura 5.14: Huella en Detector de Superficie del evento 2119146

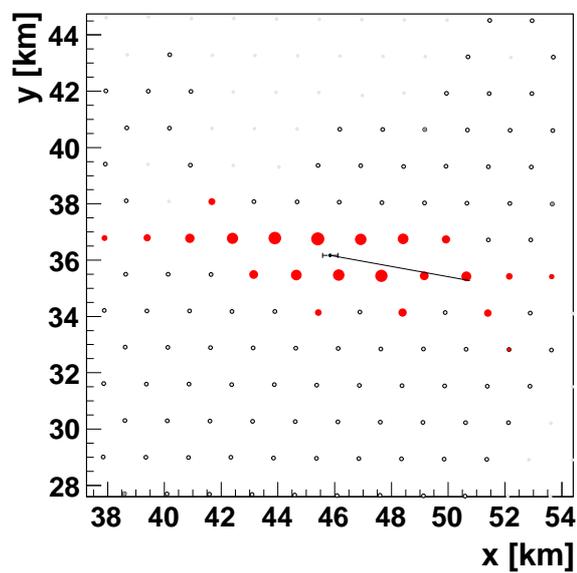


Figura 5.15: Huella en Detector de Superficie del evento 2152516

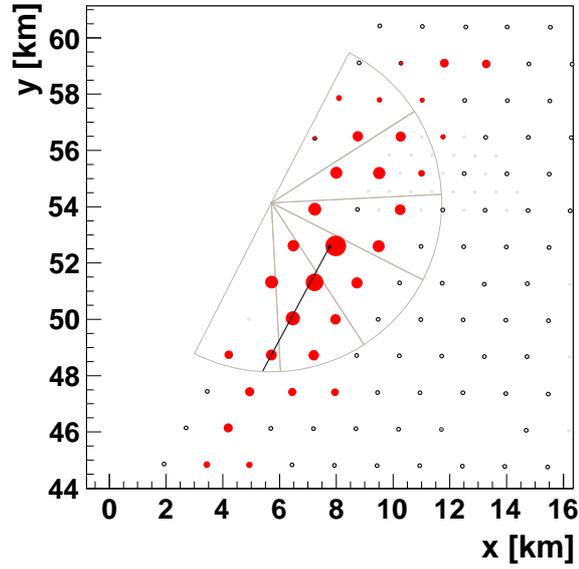


Figura 5.16: Huella en Detector de Superficie del evento 2550163

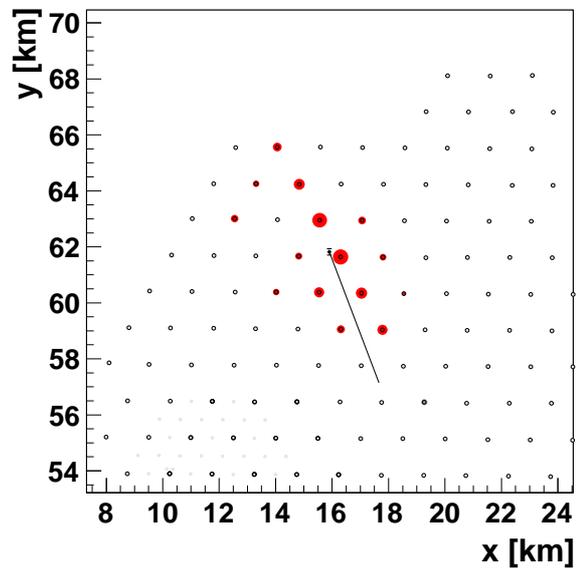


Figura 5.17: Huella en Detector de Superficie del evento 3216042

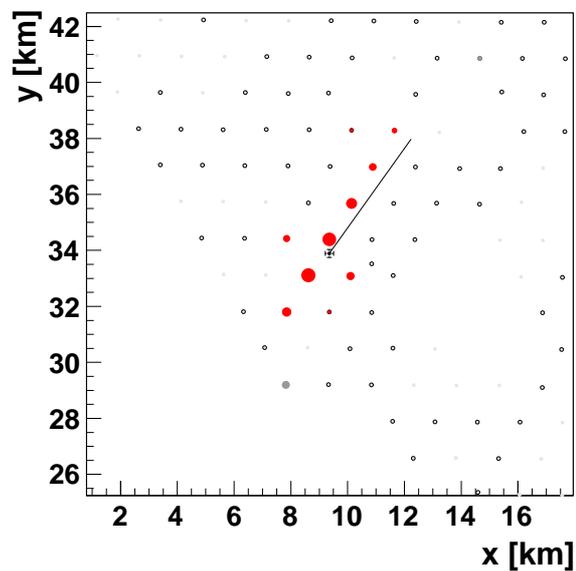


Figura 5.18: Huella en Detector de Superficie del evento 3287548

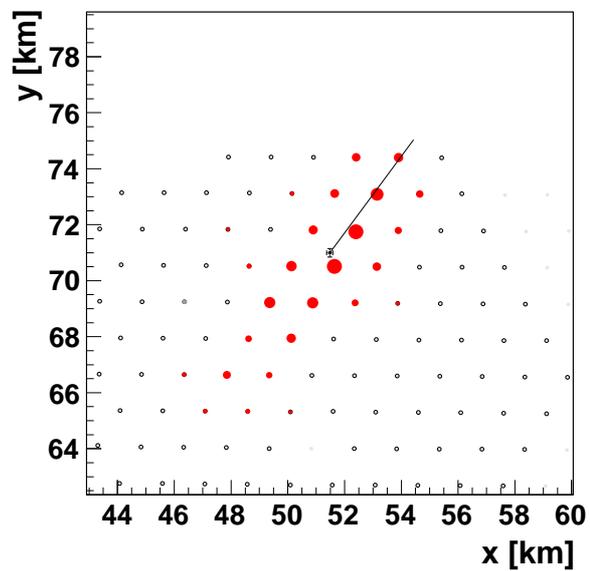


Figura 5.19: Huella en Detector de Superficie del evento 4108920

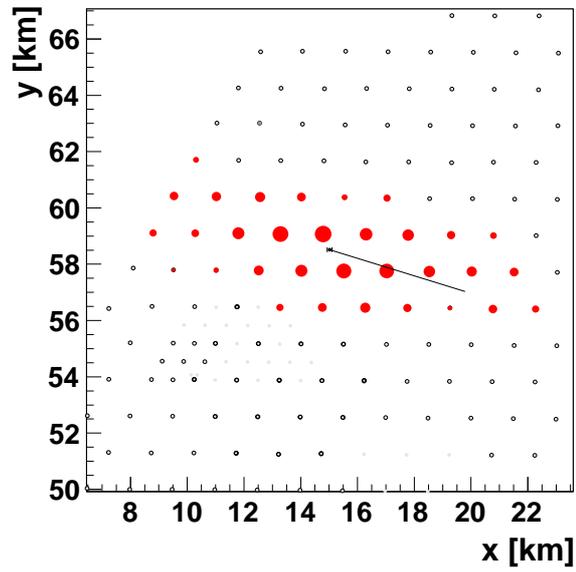


Figura 5.20: Huella en Detector de Superficie del evento 4327041

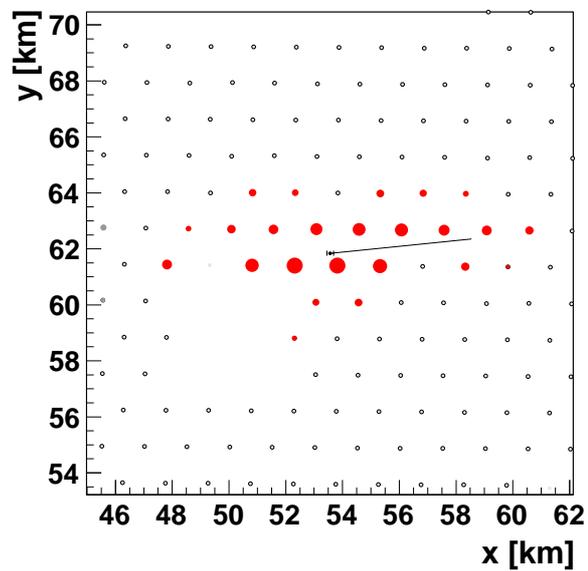


Figura 5.21: Huella en Detector de Superficie del evento 5057493

5.5. RESULTADOS

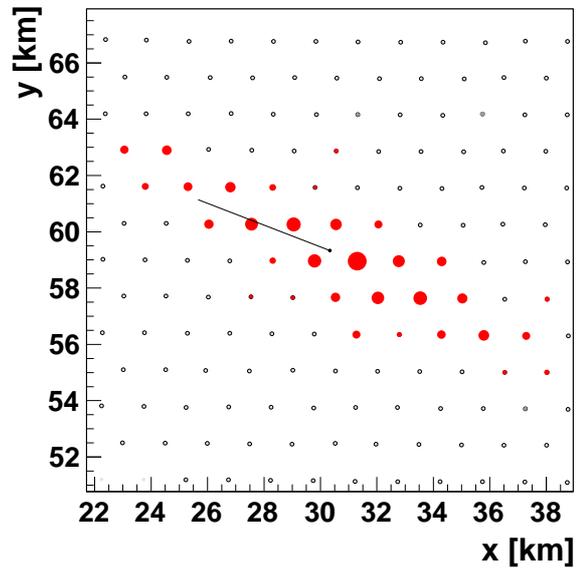


Figura 5.22: Huella en Detector de Superficie del evento 6202084

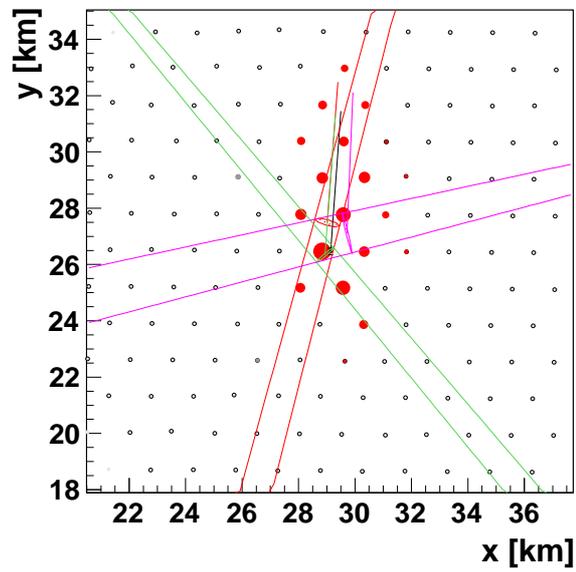


Figura 5.23: Huella en Detector de Superficie del evento 6236036

5.5. RESULTADOS

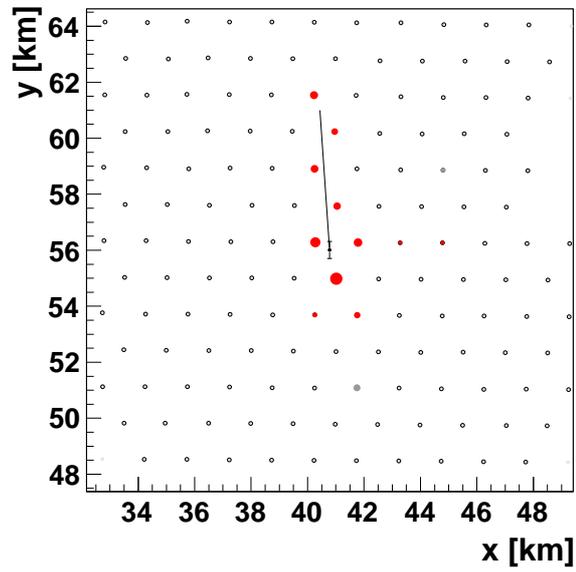


Figura 5.24: Huella en Detector de Superficie del evento 6322833

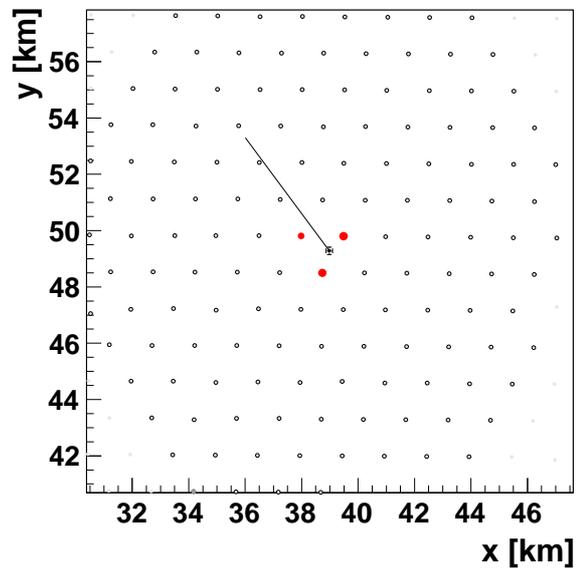


Figura 5.25: Huella en Detector de Superficie del evento 6914028

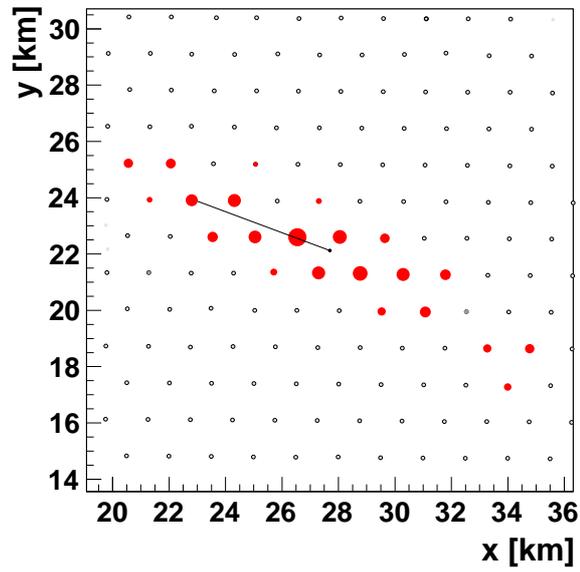


Figura 5.26: Huella en Detector de Superficie del evento 6943389

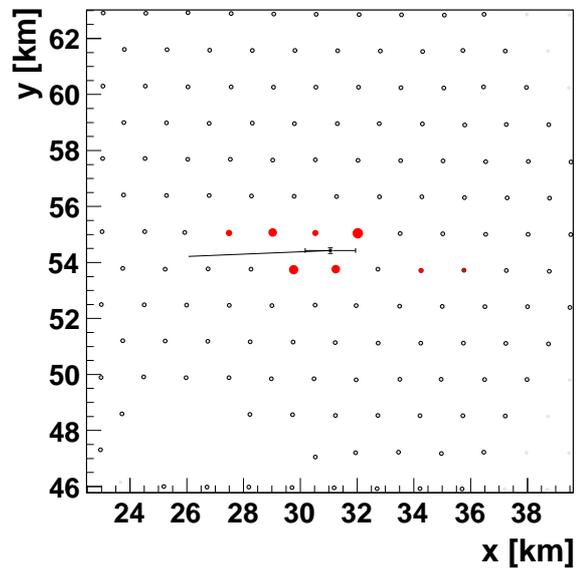


Figura 5.27: Huella en Detector de Superficie del evento 7065500

5.5. RESULTADOS

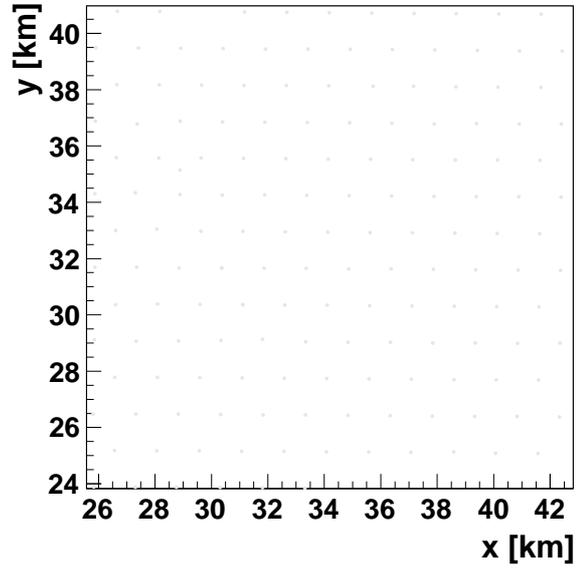


Figura 5.28: Huella en Detector de Superficie del evento 7826900

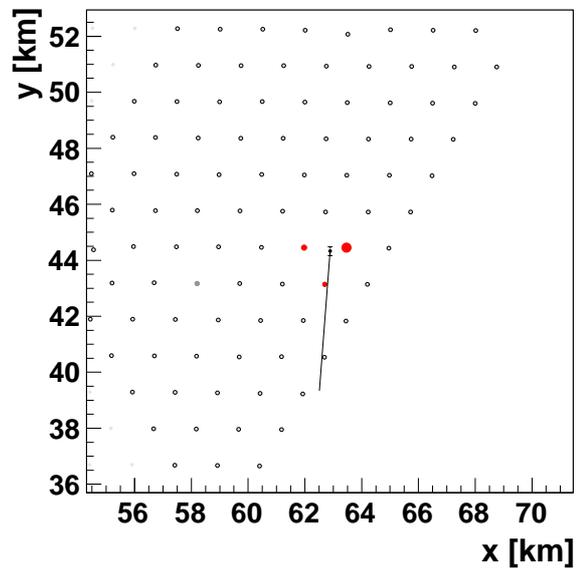


Figura 5.29: Huella en Detector de Superficie del evento 7828667

5.5. RESULTADOS

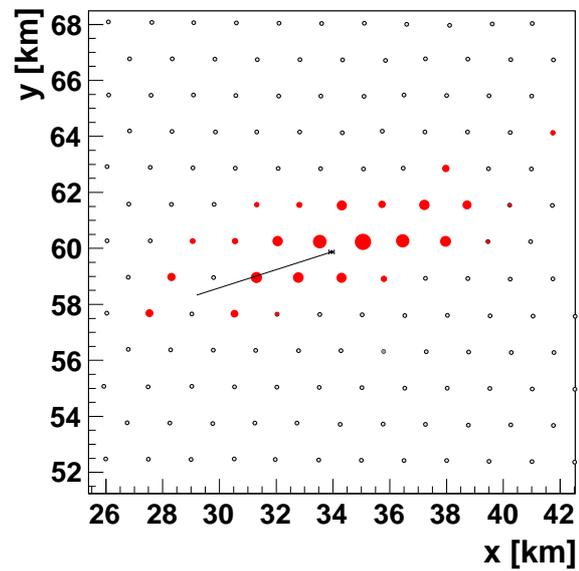


Figura 5.30: Huella en Detector de Superficie del evento 7988432

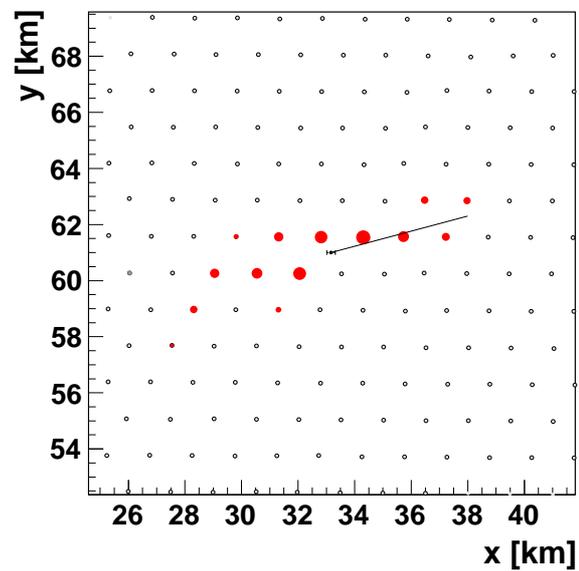


Figura 5.31: Huella en Detector de Superficie del evento 8116690

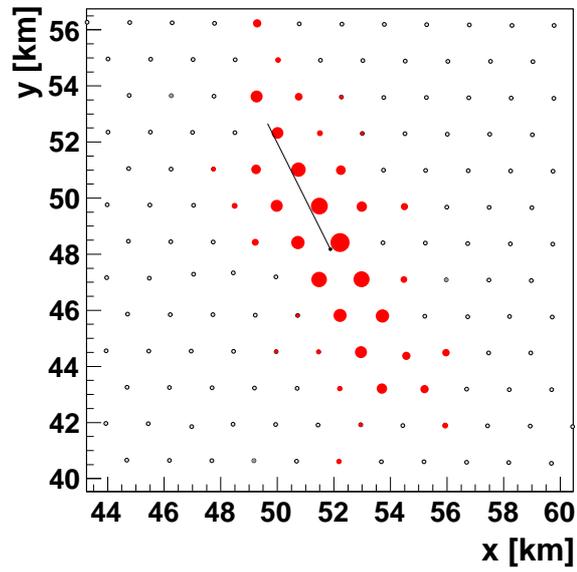


Figura 5.32: Huella en Detector de Superficie del evento 8290878

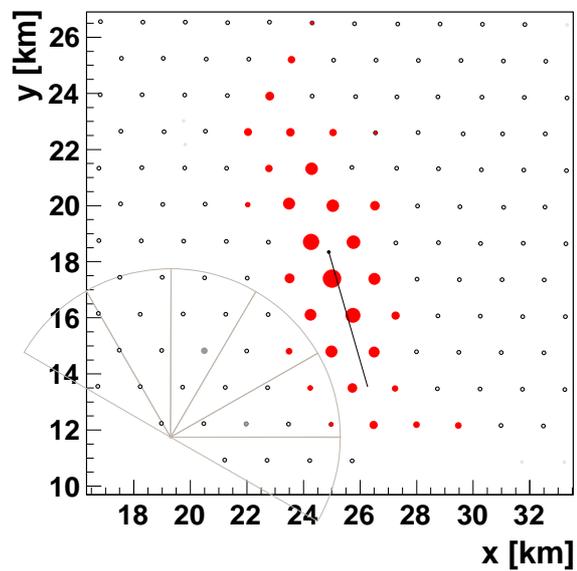


Figura 5.33: Huella en Detector de Superficie del evento 8438397

5.5. RESULTADOS

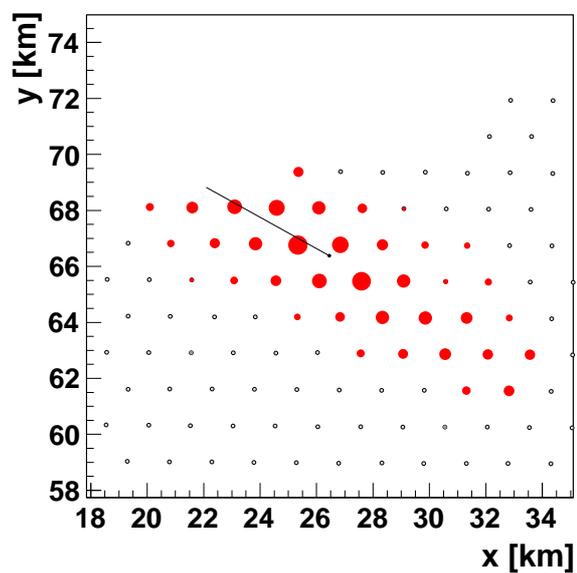


Figura 5.34: Huella en Detector de Superficie del evento 8473731

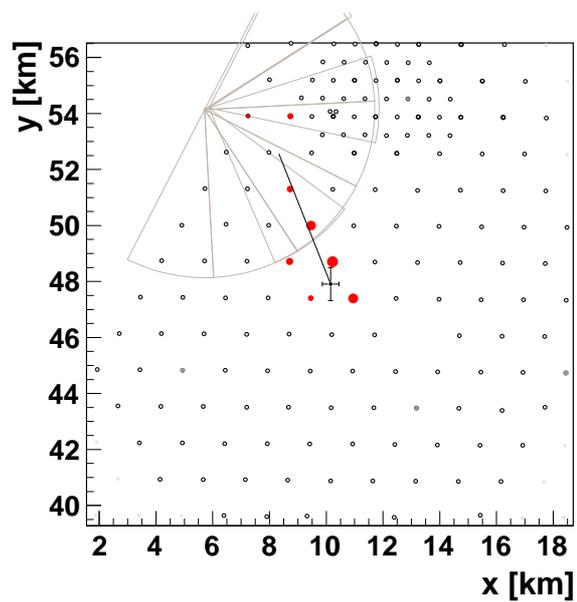


Figura 5.35: Huella en Detector de Superficie del evento 8668880

5.5.2. Simulación de eventos

De los eventos que pueden considerarse como candidatos a ser chubascos atmosféricos inducidos por neutrinos, se incorporan los parámetros arrojados por Offline en la reconstrucción, en el simulador AIRES, posteriormente, el *thinning* usado fue de 10^{-6} relativo, usando como partícula primaria, (en primera instancia), protón P , y posteriormente en un proceso idéntico, empleando el núcleo de hierro (Fe).

La motivación principal, de este ejercicio, es el de identificar la posible “huella” dejada por los chubascos atmosféricos inducidos por estas partículas, en el detector de superficie (SD) del Observatorio P. Auger. Sin embargo, usando el módulo de reconstrucción de eventos simulados de Offline, las reproducciones no pudieron pasar de manera satisfactoria los cortes de calidad estándar que por defecto emplea Offline, los eventos simulados que pudieron ser aceptados por los cortes de calidad de Offline presentaron huellas en el detector de superficie pobres que no pueden ser asociadas con el chubasco “real” de donde se extrajeron los parámetros para realizar la simulación. El ángulo de incidencia de todos los eventos seleccionados es superior a 75° y la energía de la mayoría es inferior a 10^{18} eV, esto implica que de ser un protón o núcleo de hierro, la partícula incidente debería de atravesar el equivalente a 13 atmósferas lo que equivale a 1300 km ($3,994 \frac{g}{cm^2}$). Esto favorece que la componente electromagnética sea absorbida en los primeros instantes de la interacción de la partícula incidente. Tanto el núcleo de Hierro como el Protón, poseen una sección eficaz relativamente grande, si la comparamos con la de un neutrino. Esto favorece su interacción tan pronto interactúa con la atmósfera, generando un desarrollo temprano del chubasco, haciendo que la cantidad máxima de partículas generadas por dicha interacción se de arriba (en los primeros metros de la atmósfera), hasta que la energía de la partícula sea convertida en partículas secundarias (pi, gamma, e, positrones, hadrones, muones); la componente muónica seguramente sobrevivirá, sin embargo, incluso la señal muónica, es insuficiente para disparar los “triggers” del SD.

En resumen, las simulaciones de los chubascos, usando protones p y núcleos de Hierro (Fe), requieren ser generados con mayor estadística para ser considerados como herramienta corriente para un análisis profundo; en el presente trabajo se usaron 100 chubascos-estadística por evento; la simulación de cada evento ocupó aproximadamente 72 horas usando Aires con el modelo Sibyll 2. Se requiere de un *cluster*

5.5. RESULTADOS

de cómputo mayor para por lo menos, generar una simulación de 1000 chubascos-estadística por evento.

A pesar de no ser concluyentes estas simulaciones y reconstrucciones, la información arrojada motiva un análisis más profundo. Dado que la composición química de los rayos cósmicos es aún un tema de discusión abierto y parte importante del observatorio P. Auger, las simulaciones en este sentido deberán incorporar diferentes composiciones para el primario, de tal manera que tanto los neutrinos, como protones, núcleos de hierro, helio y otras posibles composiciones sean integradas en una biblioteca de simulaciones y ser comparadas con eventos detectados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

“Las matemáticas poseen no sólo la verdad, sino la suprema belleza, una belleza fría y austera, como la de una escultura.”

Sir. Bertrand Arthur William Russell.

Se ha logrado una selección de eventos dentro de la colección de datos del Observatorio Pierre Auger, empleando cortes de calidad que permiten discernir de entre los chubascos atmosféricos verticales de los horizontales, desarrollando una herramienta computacional que permite variar estos criterios a voluntad, entregando al usuario una matriz de estado con la información de los eventos que cumplen con los criterios antes mencionados y los rangos asociados propuestos.

Mediante la herramienta computacional desarrollada (script selector e implementación de la matriz de estado en root (ver apéndice B) y el método de análisis (matriz de estado 5.4.4), se encontraron eventos candidatos a chubascos atmosféricos horizontales inducidos por neutrinos, en coincidencia con los eventos seleccionados y reportados bajo los mismos criterios, en los trabajos de Alessio Tamburro [1] e Inés Valiño [34] (tesis doctorales), encontrando los eventos reportados en sus trabajos, los cuales se reportan en este trabajo. Existen eventos que no son reportados en los trabajos anteriormente citados, esto es debido que las bases de datos con las que se elaboró el presente análisis comprende datos desde 2004 hasta 2010; los trabajos citados reportan el uso de datos hasta el 2008.

De lo anterior se desprende que la implementación de la matriz de estado, si bien representa un objeto que permite el estudio de eventos detectados por el Observatorio Pierre Auger (en lo relacionado a los detectados por los Detectores de Superficie), en un trabajo futuro, habrá que aprender y desarrollar nuevos tipos de análisis, en los cuales la implementación de los criterios de selección y cortes de calidad se realice de manera más consistente y menos subjetiva, empleando para ello las herramientas ya desarrolladas (script en root para generar la matriz de estado y selección) y las ya existentes (Offline, CDAS, Auger EventDisplay).

Como trabajo futuro se busca explorar las propiedades de la matriz de estado, implementar modificaciones que permitan utilizar la información, en ella contenida, como una herramienta que facilite la identificación de las características de los eventos detectados por el Observatorio P. Auger.

APÉNDICE A

DISEÑO DE LA PLATAFORMA DE LA INTERFACE WEB PARA PRODUCCIÓN DE ARCHIVOS DE CONTROL DE SIMULADORES

Los archivos para el control de una simulación, también llamados “Steering Files” (Archivos de manejo) ó Simplemente “Cards” (Tarjetas) son usados para indicar el comportamiento a seguir en el proceso de simulación, en este caso, el de un chubasco atmosférico. Estos archivos fijan los parámetros, unidades y/o formatos a usar y varían dependiendo del simulador que se usa; actualmente no existe un protocolo establecido que defina la organización o palabras clave (tokens) a seguir, es decir, cada simulador, de acuerdo con el programador y sus habilidades con cierto lenguaje de programación computacional, habilita y define la forma en que el usuario interactuará con el simulador mediante estos archivos de control.

La interacción usuario-simulador, no se realiza en “tiempo real”, lo cual significa que una vez ejecutada la instrucción de “corrida” al simulador, este actuará sin la intervención del usuario hasta el final de los procesos de simulación programados o hasta que se interrumpa la ejecución del programa por parte del usuario.

Dentro de los simuladores de chubascos atmosféricos, usados en la física de astropartículas, existen unos cuantos parámetros básicos, con los cuales sería suficiente obtener un resultado en una “Simulación de juguete” (una simulación elemental que no podría ser llamada una simulación exhaustiva):

-
- Tipo de partícula(s) que participan;
 - Energía, rango de energías;
 - Modelo de transporte;
 - Modelo de interacción;
 - Materiales;
 - Altitud de inyección;
 - Ángulo Acimutal de inyección;
 - Ángulo Cenital de inyección.

Sin embargo, en algunos casos, el ser exhaustivo en la cantidad y afinamiento de parámetros, no es garantía de que la simulación se apegue a lo que estamos buscando o queremos observar. La gran mayoría de los simuladores de chubascos atmosféricos anexan opciones de comportamiento más finas: Energías de corte para diversas partículas (individuales o por familias enteras), funciones para el comportamiento en la distribución angular, energética, etc. nivel en el “adelgazamiento”, fenómenos de interacción, dispersión. Además de estos parámetros físicos intervienen aspectos computacionales: es posible indicar la cantidad de tiempo máxima requerida para la simulación, el tiempo de procesador, porcentaje del mismo o la cantidad de memoria, recursos múltiples como *clustering* o *Grid*.

Con la finalidad de facilitar la generación del archivo de control y la debida asignación de los parámetros necesarios, se diseñó una interface que permite el control de manera exhaustiva de la totalidad de las variables que intervienen referirse a A.1.

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES



Figura A.1: Captura de pantalla de la interface WWW para generar archivos de control para AIRES

A.1. Interface para la generación de archivo de control para AIRES

La generación de archivos de control es una de las actividades mas importantes en el proceso de simulación, dado que estos archivos se encargan de suministrar y administrar las variables involucradas y el comportamiento del simulador. PHPSteer es una herramienta que se encarga de generar estos archivos de control, por el momento solamente tiene implementadas las instrucciones para generar un archivo de control para el simulador AIRES (ver apéndice A.2) (ver figura A.1 que muestra la pantalla que el usuario ve al ejecutar el programa desarrollado)

A.1.1. Código de PHPSteer file generator

ARCHIVO: AiresSteerGen.php

```
<?php
include "general.inc";
include "funciones.inc";
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
echo "<TITLE>Generating Aires Steer File</TITLE><BR>\n";
$campos=read_csv($TOKEN_FILE);

/*
manejar el asunto de las trampas para verificar si ya existe el directorio
--aunque no
debería de existir-- será un directorio por simulacion
*/

$FNAME=SteerFileName($_POST[$campos[0][1]].".steer");
$COMPLETE_PATH=$PRODUCTION.$FNAME;
mkdir($COMPLETE_PATH);

$fh=fopen($COMPLETE_PATH."/".$FNAME,'w');

foreach($campos as $i=>$llave)
{
    //leemos la variable establecida en la posición
    //i,2 del arreglo, que es con la que la nombramos
    //en el formulario y su resultado
    //el que escribiremos en archivo.
        fwrite($fh,"{$campos[$i][1]} ".$_POST[$campos[$i][1]]."\n");
}

//Generamos las tablas para las estadísticas
fwrite($fh,"
ExportTable 1291
");

//Finalizamos la escritura del archivo con la sentencia de control End
fwrite($fh, "End");
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
fclose($fh);

/*Mandamos el archivo al usuario: pero puede ser mas fácil meter la liga*/
// file_send("archivo.airestxt");

echo "<a href=\"archivo.airestxt\">archivo.aires(OBSOLETO: NO FUNCIONA CAMBIAR)</a><br>";
echo "<a href=\"AiresSteerSim.php?GenSimID=$FNAME\">Mandar la simulacion al cluster</a><I>POR DESARROLLAR</I><br>";

//generamos otro formulario para poner diferentes opciones? o simplemente una //liga para mandar la simulacion. al cluster
?>

ARCHIVO: AiresSteerSim.php

<?
include "general.inc";
include "funciones.inc";

$GenSimID=$_GET['GenSimID'];
$DirName=$PRODUCTION."/".$GenSimID;
chdir($DirName);
exec($AIRES_BIN." < ".$GenSimID." > log".$GenSimID." 2>&1 &");

//Por el momento redireccionamos al directorio que contiene la información
header("Location:$URL_DATA".$DirName);

/*Aquí debe de contener un ciclo que informa cuando la simulación ha terminado. Me gusta mas la opcion de generar una página que se esté refrescando con
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
las opciones
posteriores a la generación del chubasco*/

$fh=fopen("Aires.status",'r');
$datos=fgets($fh);
close($fh);

/*Página de datos y graficación, de nuevo, todo esto hasta que se dispare
el aviso
de finalización de la corrida de Aires*/

?>

ARCHIVO: index.php

<?php
include "general.inc";
include "funciones.inc";

printf("<HTML>
<meta http-equiv=\"Content-Type\" content=\"text/html; charset=utf-8\">
<link rel=\"stylesheet\" type=\"text/css\" href=\"estilo.css\"/>

<script type=\"text/javascript\">

/*****
* Show Hint script- © Dynamic Drive (www.dynamicdrive.com)
* This notice MUST stay intact for legal use
* Visit http://www.dynamicdrive.com/ for this script and 100s more.
*****/

var horizontal_offset=\"9px\" //horizontal offset of hint box from anchor
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

link

```
/////No further editing needed
```

```
var vertical_offset="\0\" //horizontal offset of hint box from anchor link.  
  //No need to change.
```

```
var ie=document.all
```

```
var ns6=document.getElementById&&!document.all
```

```
function getposOffset(what, offsettype){
```

```
var totaloffset=(offsettype=="left\")==> what.offsetLeft : what.offsetTop;
```

```
var parentEl=what.offsetParent;
```

```
while (parentEl!=null){
```

```
totaloffset=(offsettype=="left\")==> totaloffset+parentEl.offsetLeft : totaloffs
```

```
parentEl=parentEl.offsetParent;
```

```
}
```

```
return totaloffset;
```

```
}
```

```
function iecompattest(){
```

```
return (document.compatMode && document.compatMode!="BackCompat\")==> document.d
```

```
: document.body
```

```
}
```

```
function clearbrowseredge(obj, whichedge){
```

```
var edgeoffset=(whichedge=="rightedge\")==> parseInt(horizontal_offset)*-1
```

```
: parseInt(vertical_offset)*-1
```

```
if (whichedge=="rightedge\"){
```

```
var windowedge=ie && !window.opera? iecompattest().scrollLeft+iecompattest().cl
```

```
: window.pageXOffset+window.innerWidth-40
```

```
dropmenuobj.contentmeasure=dropmenuobj.offsetWidth
```

```
if (windowedge-dropmenuobj.x < dropmenuobj.contentmeasure)
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
edgeoffset=dropmenuobj.contentmeasure+obj.offsetWidth+parseInt(horizontal_offset)
}
else{
var windowedge=ie && !window.opera? iecompattest().scrollTop+iecompattest().cli
: window.pageYOffset+window.innerHeight-18
dropmenuobj.contentmeasure=dropmenuobj.offsetHeight
if (windowedge-dropmenuobj.y < dropmenuobj.contentmeasure)
edgeoffset=dropmenuobj.contentmeasure-obj.offsetHeight
}
return edgeoffset
}

function showhint(menucontents, obj, e, tipwidth){
if ((ie||ns6) && document.getElementById("hintbox")){
dropmenuobj=document.getElementById("hintbox")
dropmenuobj.innerHTML=menucontents
dropmenuobj.style.left=dropmenuobj.style.top=-500
if (tipwidth!=""){
dropmenuobj.widthobj=dropmenuobj.style
dropmenuobj.widthobj.width=tipwidth
}
dropmenuobj.x=getposOffset(obj, "left")
dropmenuobj.y=getposOffset(obj, "top")
dropmenuobj.style.left=dropmenuobj.x-clearbrowseredge(obj, "rightedge")+obj.o
dropmenuobj.style.top=dropmenuobj.y-clearbrowseredge(obj, "bottomedge")+px\
dropmenuobj.style.visibility="visible"
obj.onmouseout=hidetip
}
}

function hidetip(e){
dropmenuobj.style.visibility="hidden"
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
dropmenuobj.style.left="-500px"
}

function createhintbox(){
var divblock=document.createElement("div")
divblock.setAttribute("id", "hintbox")
document.body.appendChild(divblock)
}

if (window.addEventListener)
window.addEventListener("load", createhintbox, false)
else if (window.attachEvent)
window.attachEvent("onload", createhintbox)
else if (document.getElementById)
window.onload=createhintbox

</script>

");

printf("
<TITLE>Steer File Generator</TITLE>
<center>
<div class="ex">
  <div class="Bold">
Aires Web Steer File Generator
  </div>
</div>
</center>
<P>
");
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
/*Generamos el formulario*/
formulario(read_csv($TOKEN_FILE));
?>

ARCHIVO: funciones.inc

<?
//Variables globales
$HOST_NAME=gethostname();

/*esta funcion lee un archivo y debería generar
un arreglo de datos para pasar al programa principal*/

function read_f($of)
{

$token=array();
$i=0;
$j=0;

$fh=fopen("$of",'r');

while (!feof($fh)) {
    fscanf($fh,"%s\t%s\t%s\n", $token[$i][0], $token[$i][1], $token[$i][2]);
    $i++;
}
fclose($fh);
return $token;

}
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
/*Leemos el archivo con delimitadores*/
function read_csv($of)
{

$token=array();
$i=0;
$j=0;
$separador=",";

$fh=fopen("$of",'r');

while (($data = fgetcsv($fh, 1000, $separador)) !== FALSE) {
    $num = count($data);
    for ($j=0; $j < $num; $j++)
    {
        $token[$i][$j]=$data[$j];
    }
    $i++;
}
fclose($fh);
return $token;

}

/*Genera el formulario*/
function formulario($campos)
{

printf("<FORM NAME=\"nombre_tentativo\" ACTION=\"AiresSteerGen.php\" METHOD=\"P
<TABLE ID=\"FormAires\" BORDER=0 ALIGN=CENTER>\n");
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
echo "<TR> <TH>Name</TH> <TH>Value</TH> <TH>Description</TH> </TR>";
    foreach($campos as $i=>$llave)
    {
        if ($i%2){
$rowcolor="alt";
        } else {
            $rowcolor="none";
        }

        echo "<TR CLASS=\"{\$rowcolor}\"><TD ALIGN=RIGHT>{\$campos[\$i][0]}</TD>"
            echo "<TD><INPUT TYPE=\"TEXT\" NAME=\"{\$campos[\$i][1]}\"
VALUE=\"{\$campos[\$i][2]}\" SIZE=\"20\"></TD>";
            echo "<TD ALIGN=\"LEFT\"><a href=\"#\"class=\"hintanchor\"
onmouseover=\"showhint('{\$campos[\$i][3]}', this, event, '150px')\">[?]</A></TD>"
        }

printf("<TR><TD></TD><TD><INPUT TYPE=\"SUBMIT\" VALUE=\"SUBMIT\"></TD></TR>\n
</TABLE></FORM>\n");

}

function file_send($fname)
{
header('Content-Description: File Transfer');
    header('Content-Type: application/octet-stream');
    header('Content-Disposition: attachment; filename='.basename($fname));
    header('Content-Transfer-Encoding: binary');
    header('Expires: 0');
    header('Cache-Control: must-revalidate, post-check=0, pre-check=0');
    header('Pragma: public');
    header('Content-Length: ' . filesize($fname));
    ob_clean();
```

A.1. INTERFACE PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

```
flush();
readfile($fname);

}
//Dada una entrada regresa una fecha bajo la convencion AdmHifunction SteerFile
{
    $datedFN=date('YmdHi').$iname;
return $datedFN;
}

?>
```

ARCHIVO : general.inc

```
<?
//Aquí se definen las variables globales y generales;
//todo archivo deberá contener esta inclusión

$TOKEN_FILE="tokenAires.data";
$AIRES_ACT_NAME="AiresSteerGen.php";
$CORSIKA_ACT_NAME="CorsikaSteerGen.php";

//$AIRES_BIN="/home/cederik/aires/bin/Aires";
$AIRES_BIN="/usr/local/aires/bin/Aires";
$HOSTNAME=gethostname();
$PRODUCTION="PRODUCTION/";
$URL_DATA="http://".$HOSTNAME."/~cederik/PHPSteer/";

?>
```

A.2. Archivo de control para AIRES

A continuación se muestra un ejemplo de los archivos de control usados en la simulación de un chubasco atmosférico en el simulador Aires[24]. Este mismo ejemplo se repetirá en la siguiente sección (referirse a A.3) con el simulador Corsika[28], por consistencia se manejarán los mismos parámetros básicos: partícula primaria, número de chubascos, energía, ángulos cenitales y acimutales, cortes en las energías de ciertas partículas y adelgazamiento.

| Concepto | Propiedad |
|-------------------|--|
| Simulador | AIRES (AIR Extensive Showers) |
| Versión | 8.4.2a |
| Propósito | Simulación de EAS (Extensive Air Showers) |
| Rango de energía | $500MeV < E < 10^{23}eV$ |
| Author | S. Sciutto |
| Tipo de archivo | ASCII |
| Tipo de extensión | no tiene predilección, generalmente son llamados ".inp" |
| Formato | Texto tabulado, tipo PARAMETRO VALOR |
| Sensible a TAB | no; TAB (tabulador) y SPC (Espacio) son indiferentes |
| Ejemplo de | 3 Chubascos distribuidos en rango de energía [$10^{19}eV, 10^{20}eV$] Protones, distribuidos cenitalmente entre [0,45] grados Acimutalmente entre [0, 360] grados. |

Cuadro A.1: Archivo de control para AIRES

```
Task PROTON
```

```
#Nombre de la tarea
```

```
SetGlobal mienergia 150 MeV
```

```
#Opcionalmente se pueden hacer definiciones de variables de alcance global,
```

```
#en este caso definimos una variable llamada 'mienergia' con un valor dado
```

```
#y tendrá alcance global, al final es llamada
```

A.2. ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

#Las siguientes lineas son obligatorias

TotalShowers 3
#número de chubascos a generar

PrimaryParticle proton
#partícula primaria que genera el chubasco

PrimaryEnergy 1e19 eV 1e20 eV
#Energía de la partícula primaria y las unidades eV,keV,MeV,GeV, TeV, EeV,
#en este caso se especifica un rango de energía con diferencia de un orden
de
#magnitud entre la energía mínima y máxima, se distribuye de manera normal

MaxCpuTimePerRun 1 hr 30 min
#Tiempo máximo de CPU a emplear por cada corrida, opcional.

PrimaryZenAngle 0 deg 45 deg
#Distribución Angular Cenital: MinAng MaxAng.

PrimaryAzimAngle 0 deg 360 deg
#Distribución Angular Acimutal: MinAng MaxAng.

Thinning 1.0e-5 Relative
#Algoritmo de "adelgazamiento", si el valor relativo es menor, la resolución
de
#la simulación es mayor, debe ser cuidadoso ya que esto se ve reflejado
en
#tiempos de cómputo proporcionales al orden de magnitud de esta cantidad,
entre

A.2. ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

#más pequeño el adelgazamiento mayor tiempo de cálculo.

Ground 900 g/cm2

#Altitud del suelo.

AddSite Malargue -35.47 deg -69.58 deg 1416 m

#Datos del sitio geográfico donde se producirá el chubasco

#y datos adicionales, relacionadas con el chubasco.

#Información de el sitio: NONBRE LATITUD LONGITUD ALTURA

#LAT [-90, 90], LONG [-180, 180],

GeomagneticField On

#Activa o desactiva el campo magnético de la tierra

Date 2009 11 10

#Fecha con formato AÑO MES DIA

#definición de los niveles de observación (primer parámetro)

#que sirve para darle seguimiento al desarrollo longitudinal

#se pueden definir hasta 510 niveles de observacion, opcionalmente

#la altitud del nivel superior y la altitud del nivel inferior

ObservingLevels 41 100 g/cm2 900 g/cm2

#41 niveles de observacion, generados entre altitudes

#de 100 g/cm2 y 900 g/cm2

#Umbral de energías. Las partículas listadas no

#son seguidas por debajo de las energías indicadas

GammaCutEnergy 200 keV

A.2. ARCHIVO DE CONTROL PARA AIRES

ElectronCutEnergy 200 keV

MuonCutEnergy 1 MeV

MesonCutEnergy 1.5 MeV

NuclCutEnergy {mienergia}

en lugar de poner el valor numérico.

#opciones de la impresion de tablas, en este tiene un

#valor numérico correspondiente a una clase en

#especial, dentro de las 180 tablas

#disponibles por

#AIRES, puede ser un rango del tipo Min Max, si no

#se especifica un Max esto se interpreta como la petición

#de solo una tabla de datos.

PrintTable 1291

#Tabla 1291= Desarrollo longitudinal de TODAS las partículas CARGADAS

PrintTable 1707

#Tabla 1707= Desarrollo longitudinal Energético de Mu+, Mu-

PrintTable 2207 Opt d

#Tabla 2207= Distribución Lateral de Mu+, Mu-

PrintTable 3001 Opt M

#Tabla 3001= Distribucion del Tiempo "medio" de llegada para Rayos gamma

End

#Final del archivo de control

Las líneas que inician o frases que son anteceditos con el carácter # son tomadas como comentarios.

A.3. Archivo de control para CORSIKA

| Concepto | Propiedad |
|-------------------|---|
| Simulador | CORSIKA (COsmic Ray SIMultions for KAScade) |
| Versión | 6.9.0 |
| Propósito | Simulación de EAS (Extensive Air Showers) para KASCADE |
| Rango de energía | $10^{11}eV < E < 10^{20}eV$ |
| Author | D. Heck et al Report FZKA 6019 (11998), Forschungszentrum Karlsruhe http://ik.fzk.de/corsika |
| Tipo de archivo | ASCII |
| Tipo de extensión | no tiene predilección, generalmente son llamados ".inp" |
| Formato | Texto tabulado, tipo PARAMETRO VALOR |
| Sensible a TAB | no; TAB (tabulador) y SPC (Espacio) son indiferentes |
| Ejemplo de | 3 Chubascos distribuidos en rango de energía [$10^{19}eV, 10^{20}eV$] Protón, distribuido cenitalmente entre [0,45] grados Acimutalmente entre [0, 360] grados. |

Cuadro A.2: Archivo de control para CORSIKA

```

RUNNR 1    número de la corrida
EVTNR 1    número del primer chubasco de la corrida
NSHOW 3    número de chubascos a generar
PRMPAR 14  tipo de la partícula primaria
ESLOPE -2.7 pendiente del espectro de energía del primario
ERANGE 1.E10 1.E11 rango de energía del primario Emin Emax
THETAP 0. 45. Rango de distribución cenital del primario AngMin AngMax
en grados
PHIP -180. 180. Rango de distribución acimutal del primario AngMin AngMax
en grados
SEED 1 0 0 Semilla para el generador de numeros aleatorios
    
```

A.3. ARCHIVO DE CONTROL PARA CORSIKA

OBSLEV 410.E2 Nivel de la observacion en cm
FIXCHI 0. Altitud donde se inicia la generaci3n de eventos (g/cm**2)
MAGNET 20.0 42.8 Campo magn3tico terrestre (centro de europa)
HADFLG 0 0 0 0 0 2 Banderas para la interaccion y fragmentacion de los Hadrones
ECUTS 0.3 0.3 0.003 0.003 Cortes de energías para las partículas, las particulas por debajo de esta energía (GeV) son descartadas
MUADDI T Incluir Informacion adicional para muones
MUMULT T Incluir la informaci3n del angulo de dispersi3n multiple del muon
ELMFLG T T Banderas de interacci3n em. (NKG,EGS)
STEPFC 1.0 Factor en la longitud del paso en el la dispersi3n multiple
RADNKG 200.E2 Radio externo para NKG -desidad de la distribuci3n lateral
ARRANG 0. Define la rotaci3n en grados del arreglo hacia el norte (-180 < Deg < 180)
LONGI T 20. T T Generaci3n de la distribucion lateral, el tamaño del "paso", ajuste y generaci3n de la salida
ECTMAP 1.E3 Factores de cortes para los gamma en la impresi3n
MAXPRT 100 Define el n3mero maximo de eventos a imprimir
DIRECT ./ Definici3n del directorio de salida de datos
DATBAS F Define si se escribe o no un archivo de base de datos tipo .dbase
USER Cederik Define el nombre del usuario que genera la simulaci3n
DEBUG F 6 F 1000000 Define el nivel de depuraci3n para la salida estandar

A.3. ARCHIVO DE CONTROL PARA CORSIKA

En este ejemplo existen opciones de caracter booleano, es decir CIERTO o FALSO (T, F: TRUE, FALSE) las cuales habilitan (T) o deshabilitan (F) las capacidades de ciertos parámetros. Para la *TARJETA* (Steer File) de CORSIKA, el parámetro de interés se localiza en la primera columna del archivo. Resulta un tanto confuso darle seguimiento a la estructura de la *TARJETA* ya que existen parámetros cuyos modificadores pueden ser mas de uno, siendo suficiente en algunos casos especificar solamente uno de ellos. En el ejemplo realizado las opciones utilizadas contienen desde uno hasta (RUNR), hasta seis parámetros (HADFLG). Si se desea comentar alguno de ellos podría el simulador, mal interpretar una secuencia de caracteres.

Otra característica importante de este simulador es la siguiente: antes de realizar una simulación es necesario definir variables de entorno globales (ejemplo. modelos de interacción modelos de transporte, generación de histogramas, formatos de salida, versiones) que a su vez definen la cantidad y tipo de parámetros que deberán de asociarse a las variables involucradas. Como consecuencia de lo anterior el grado de detalle debiera ser fino para hacer consistente las variables de entorno global con las opciones y sus parámetros.

APÉNDICE B

ALGORITMO DE LA SELECCIÓN DE EVENTOS (PROGRAMA)

El siguiente *script*, escrito para root, se desarrolla para automatizar y con ello facilitar la búsqueda de eventos dentro de los archivos que conforman la biblioteca de eventos del Observatorio P. Auger. Fue diseñado para encontrar eventos que cumplen con los parámetros establecidos en este trabajo y cortes de calidad asociados a los chubascos atmosféricos, los cuales son nuestro objeto de estudio y faciliten su preselección. El *script* integra, aparte de la selección de los eventos, una manera de representar gráficamente los cortes de calidad que satisfacen y como los cumplen, generando y presentando una matriz de estado (ver 5.4.4), esto permite realizar una inspección más clara de la selección arrojada.

Además de la selección de eventos y la presentación de una matriz de estado asociada, el *script* permite obtener los histogramas de cada evento y de cada fotomultiplicador de cada estación “disparada” facilitando la presentación de los datos para su análisis, de otra forma el trabajo de selección y análisis resulta engorroso y tardado.

La implementación de este *script* facilita la obtención automática de los eventos, su matriz de estado y sus histogramas asociados dada una configuración de cortes de calidad que es fácilmente modificable.

A continuación se muestra el código fuente del *script* desarrollado:

```

//Script para ROOT para extracción de eventos de superficie que cumplen
//con los cortes para la identificación de chuibascos atmosféricos
//inducidos por neutrinos
//Cederik L. De León Acuña.
//Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
//Para el trabajo de Tesis de Licenciatura En Cs. Físico Matemáticas
//Marzo del 2010

{
//Para evaluar el desempeño del equipo usado. Medimos el tiempo que
//se toma en hacer la evaluación de los datos y la geeración de los
//histogramas

TStopwatch reloj;
reloj.Start();

//Variables para cortes
Int_t Theta_min = 70; //Ángulo de incidencia mínimo
Int_t Theta_max = 90; //Ángulo de incidencia mínimo

Int_t min_NumStation = 5; //# mínimo de estaciones involucradas
Int_t max_NumStation = 100; //# mínimo de estaciones involucradas

//Variables de ajuste al mostrar gráficas: Posiblemente obsoletas
Int_t angular_xmin = 0; //Minimo eje x angular
Int_t angular_xmax = 90; //Maximo eje x angular

//Los cortes RT y FT (RT && FT solo aplican a las 2 primeras estaciones)
Float_t RT_min = 80; //Rise Time por estación mínima (ns)

```

```
Float_t FT_min = 200; //Fall Time por estación mínima (ns)
Float_t VEM_CUT = 3.40; //Corte mínimo para pasar la señal

//Requiero que sean TOT? (0=no requiero corte, 1=requiero este corte)
bool RIsTOT = 0;

//deseamos descartar accidentales 1=Si 0=No
bool DescartaAccidentales = 1;

//Contador de estaciones en evento con RTFT
Int_t RTFTNumberOfStations = 0;

//Variables para contadores
Int_t i = 0;

//nos sirve para contabilizar cuantos histogramas guardar
//si esta variable vale 3 NO SE GUARDA EL HISTOGRAMA DE LA ESTACION
Int_t m = 0;

//cuenta cuantas estaciones solitarias se presentan en el evento
Int_t Solitarias = 0;

string MapaCortes[]={"111","110","100","101","011","001","010","000"};

//Definimos nuestros archivos de entrada
RecEventFile inputFile("../ROOT-DATA-TREE-V6R0-201004/SDR*.root");

RecEvent * theRecEvent = new RecEvent ();
EventInfo theEventInfo;
```

```

RecStation * theRecStation = new RecStation();
DetectorGeometry Geometria;

inputFile.SetBuffers(&theRecEvent);

inputFile.ReadDetectorGeometry(Geometria);

//Creamos el canvas para contener los histogramas de los 3 pmt
TCanvas * c2 = NULL;
c2 = new TCanvas("c2","VEM Por estacion",0,0,1200,600);

//Dentro del canvas creamos tres pads
TPad *pad1 = new TPad("pad1","PMT 1", 0.01,0.05,0.32,0.95);
TPad *pad2 = new TPad("pad2","PMT 2", 0.33,0.05,0.65,0.95);
TPad *pad3 = new TPad("pad3","PMT 3", 0.66,0.05,0.99,0.95);

    pad1->SetFillColor(0);
    pad2->SetFillColor(0);
    pad3->SetFillColor(0);

//Dibuja los pads ---
    pad1->Draw();
    pad2->Draw();
    pad3->Draw();

//Mensaje de configuración de selección de eventos

cout << "Selección de eventos con los siguientes criterios\n"
    << "Rise Time : " << RT_min    << " \t \t Fall Time          : " \\
    << FT_min << "\nVEM          : " << VEM_CUT << " \t Estaciones  \\
    min    : " << min_NumStation << "\nTheta min : " << Theta_min << "\\
    \t \t Theta max          : " << Theta_max

```

```

<< "\nAll ToT : " << RIsTOT << " \t \t Desc. Accidental : "\
<< DescartaAccidentales<<endl;

while (inputFile.ReadNextEvent()==RecEventFile::eSuccess )
{

//Condicional de los cortes iniciales
if (
    (theRecEvent.GetSDEvent().GetSdRecShower().GetZenith() > \
    (Theta_min*TMath::Pi()/180))
    &&
    (theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates() >= \
    min_NumStation)
    &&
    (theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates() <= \
    max_NumStation )
){

//obtenemos la informacion del evento
inputFile->GetEventInfo(i,&theEventInfo);
    Int_t EvtID = theRecEvent.GetSDEvent().GetEventId();

    Solitarias = 0; //Reiniciamos el contador

    //Resetea contador RTFT
    RTFTNumberOfStations = 0; //Reseteamos Contador

const Int_t \
StationCandidates=(theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates());

Long64_t StationOrder[100];
Int_t idx[100];

```

```

float startGen = 800;
float endGen = 0;

//definimos si pasó o no el depurado de estaciones
//(quitar las accidentales)
bool StationDepurado=0;

Int_t Candidatos=0;

//Ha pasado completamente
bool IsRecordable=0;

//fase de desarrollo
TMatrixD MatrizEstado(StationCandidates, 7);

Int_t DataMatriz[7];

//Ordenamiento de las estaciones
for (Int_t j=0; j < \\
      (theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates());j++)
{
    double timeSec = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetTimeSecond();

    double timeNSec = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetTimeNSec();

    Long64_t stationTime =\\
Long64_t(timeSec)*Long64_t(1e9) + Long64_t(timeNSec);

    StationOrder[j]=stationTime;
}

```

```

//Ordenamos el array
    TMath::Sort(theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates()\\
        ,StationOrder,idx,0);

//Sacamos la información por estación de todas las estaciones
//que detectaron evento
    for (Int_t j=0; j < \\
        (theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates());j++)
    {

        const double timeSec      =\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetTimeSecond();

        const double timeNSec     =\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetTimeNSec();

        const Long64_t stationTime =\\
Long64_t(timeSec)*Long64_t(1e9) + Long64_t(timeNSec);

        bool IsRT=0;
        bool IsFT=0;
        bool IsCandidate=0;

        Int_t Est_ID = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetId();

        Float_t RT = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetRiseTime();

        Float_t FT = \\

```

```

theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetFallTime();

    Float_t VEM_TS = \
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetTotalSignal();

    bool IsTOT = \
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).IsTOT();

    //Estadio de la condición RT && FT
    bool RT_FT = 0;

    //Estadio de lo solitario de la estacion
    bool estacionSolitaria = 0;

    Int_t StationStatus = \
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(idx[j]).GetStatus();

    //tal vez me este pasando de lanza pero puede servir
    bool IsAccidental = 0;

    //Consideramos que es TOT
    bool ConsiderIsTOT = 0;

if ( StationStatus == 0)
{
    cout << "Evt: " << EvtID << endl;
    cout << "Estacion: " << Est_ID << endl;
    cout << "¡¡¡ESTACION ESTADO DESCONOCIDO !!!! " << endl;
}

if ( StationStatus == 1 )
{

```

```

        cout << "Evt: " << EvtID << endl;
        cout << "Estacion: " << Est_ID << endl;
        cout << "¡¡¡ESTACION SILENCIOSA!!!! " << endl;
    }

    if ( StationStatus == 2 )
    {
        IsAccidental=1;
        Solitarias++;
    }

    if ( StationStatus == 3)
    {
        IsCandidate=1;
        Candidatos++;
    }

    //Metemos ahora el corte de RT (con fines de eventualmente llenar
    //un histograma de estaciones con RT)
    if (RT > RT_min)
    {
        IsRT=1;
    }

    //Metemos ahora el segundo corte de FT
    //(con fines de eventualmente llenar un histograma de
    //estaciones con RT)
    if (FT > FT_min)
    {
        IsFT = 1;
    }

```

```

if (RIsTOT==1 && IsTOT==1) //si quiero filtrar solo TOT
{
    ConsiderIsTOT=1;
}else{
    //este else puede servirnos para descartar eventos
    cout << "No se consiedera "<<endl;

}

//Aqui guardamos los elementos del evento
DataMatriz[0]=Est_ID;
DataMatriz[1]=j;
DataMatriz[2]=IsAccidental;
DataMatriz[3]=IsRT;
DataMatriz[4]=IsFT;
DataMatriz[5]=(VEM_TS>=VEM_CUT);
DataMatriz[6]=ConsiderIsTOT;

for(Int_t l=0;l<7;l++)
{
    MatrizEstado[j][l]=DataMatriz[l];
}

}

//chechar aqui falta ver que onda
if (Candidatos >= min_NumStation )
{
    StationDepurado=1;
}

```

```

//aquí tenemos que copiar solo los valores que sobreviven

//deseamos o no deseamos descartar accidentales?
if (DescartaAccidentales==1) {
    TMatrixD MatrizTrans(Candidatos, 7);
    Int_t o=0;

    for (Int_t i=0;i<StationCandidates;i++)
    {
        if (MatrizEstado[i][2]==0)
        {
            for(Int_t j=0;j<7;j++)
            {
                MatrizTrans[o][j]=MatrizEstado[i][j];
            }
            o++;
        }
    }
}else{
    //trabajamos sin quitar las accidentales
    TMatrixD MatrizTrans(StationCandidates, 7);
    MatrizTrans=MatrizEstado;

    //al no necesitar el redimensionamiento de la matriz
    Candidatos=StationCandidates;
}

Int_t PasaCorte = 0;

```

```

//Ahora evaluamos si hay 2 estaciones contiguas con RT FT
for (Int_t i=0;i<Candidatos;i++)
{

    //Esta parte nos asegura que vamos a trabajar con solo estaciones
    //vivas!
    //Aqui hay un problema, solicitamos que sea TOT valga 1 pero se
    //puede contradecir con la el parámetro definido al inicio

    if (RIsTOT==1){
        if ((MatrizTrans[i][3]==1) && (MatrizTrans[i][4]==1) && \
            (MatrizTrans[i][5]==1) && \
            (MatrizTrans[i][6]==1) && (i==0||i==1) ){
            PasaCorte++;
        }
        }else{
        if ( (MatrizTrans[i][3]==1) && (MatrizTrans[i][4]==1) && \
            (MatrizTrans[i][5]==1) && (i==0||i==1) ){
            PasaCorte++;
        }
        }
    }

    if ((PasaCorte==2) && (StationDepurado ==1) )
    {

        //Primer bloque de impresión genérica (no depende de la estación)
        cout << "_____Encontramos_Candidato_____" << endl;
        cout << "Evento #      = " << EvtID << endl;

        cout << "Energía      = " << \
        (theRecEvent.GetSDEvent().GetSdRecShower().GetEnergy()/10e12)<< \

```

```

" [TeV]"<<endl;

    cout << "Angulo de incidencia Theta = " << \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetSdRecShower().GetZenith()\\
*(180/TMath::Pi()) << endl;

    cout << "Angulo de incidencia Phi   = " <<\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetSdRecShower().GetAzimuth()*\\
(180/TMath::Pi()) <<  endl;

    cout << "Archivo de datos           = "<<\\
inputFile.GetActiveFileName () <<endl;

    cout << "# de candidatos           = "<< Candidatos<<endl;
    cout << "# de accidentales         = "<< Solitarias<<endl;

    cout << "# Estaciones disparadas   = " << \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetNumberOfCandidates() << endl;

    cout << "-----MATRIZ DE ESTADO-----"<<endl;

//esta la podemos sacar de la matrizEstado o de la matrizTrans
    cout << "SD_ID\tTime\tAcci\tRT\tFT\tVEM\tIsToT"<<endl;
    for (Int_t x=0;x<Candidatos;x++)
    {
        for (Int_t y=0;y<7;y++)
        {
            cout << MatrizTrans[x][y]<<"\t";
        }
        cout <<endl;
    }

```

```

    IsRecordable=1;
}

//Acá ya el número de candidatos está depurado para ser el total
//de las estaciones que no son accidentales, se extrae el valor
//de la matriz de estado aca metemos la generación de los
//histogramas todas las estaciones
//Hay que tener cuidado ya que ahora los índices se han corrido
//ya j muestra el primer elemento

if (IsRecordable==1)
{

//Cuantas estaciones no tienen histograma por alguna razon
Int_t NoHisto = 0;
    for (Int_t j=0; j < StationCandidates;j++)
        {
m=0;

//Seguimos adelante con la generación de los hitogramas
//de los pmt si se cumple RT && FT

    TH1F *first_vem = NULL;
    TH1F *trace_vem = NULL;

        // Buscamos en cada uno de los Fotomultiplicadores
        // (son tres por estacion)
        // Rellena histogramas de fotomultiplicadores

        const int startSlot =\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetSignalStartSlot();

```

```

    const int endSlot = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetSignalEndSlot();

    Int_t Est_ID = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetId();

    string Est_Name = Geometria.GetStationName(Est_ID);
    const int start = 1;

    const int end = \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetVEMTrace(1).size();

    for (Int_t k=1 ; k < 4; k++)
    {
        double signal= 0;

        //Nombre del histograma
        ostringstream histName; histName << "Ev: "<<\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetEventId() <<" St:"<<\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetId() <<\\
(" << Est_Name <<") "<<"PMT:"<<k;

        TH1F *trace_vem = new TH1F(histName.str().c_str(),\\
            histName.str().c_str(), end-start, start, end);

        vector <float> vem=\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetVEMTrace(k);

        Float_t vem_peak=\\
theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetPeak(k);

        Float_t vem_charge=\\

```

```

theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetCharge(k);

const bool goodvem= bool(vem.size());

    trace_vem->GetYaxis()->SetTitle("Senal [VEM peak]");
    trace_vem->GetXaxis()->SetTitle("t [25 ns]");
    trace_vem->SetLineWidth(2);

    if (goodvem)
for (int j_s=start;j_s < end; ++j_s){
    trace_vem->Fill(j_s, vem[j_s]);
    if (j_s>startSlot && j_s<endSlot)
signal+= vem[j_s];
}

    //evitamos division por cero
if(vem_charge!=0){
    signal*=vem_peak/vem_charge;
}

    trace_vem->SetLineColor(k);
    trace_vem->SetFillColor(k);
    trace_vem->SetLineColor(1);
    trace_vem->GetXaxis()->SetRangeUser(startSlot-10, endSlot+20 );
    trace_vem->GetYaxis()->SetTitleOffset(1.18);
    trace_vem->GetYaxis()->CenterTitle(true);

if (goodvem && k==1){
    pad1->cd();
    trace_vem->Draw();
}
elseif(!goodvem && k==1){

```

```

        pad1->cd();
        trace_vem->Draw();
        m++;
    }

    if (goodvem && k==2){
        pad2->cd();
        trace_vem->Draw();
    }
    elseif(!goodvem && k==2){
        pad2->cd();
        trace_vem->Draw();
        m++;
    }

    if (goodvem && k==3){
        pad3->cd();
        trace_vem->Draw();
    }elseif(!goodvem && k==3){
        pad3->cd();
        trace_vem->Draw();
        m++;
    }

}

//nos aseguramos que existan datos en pmt
if(m<2)
{
    ostringstream fname; fname << "Evento_"<< \\
theRecEvent.GetSDEvent().GetEventId() <<"_Estacion_"<<\\

```

```

theRecEvent.GetSDEvent().GetStation(j).GetId() <<".eps";

    // Es aquí donde guardamos el archivo generado
    c2->SaveAs(fname.str().c_str());
    }else{
        NoHisto++;

        //si no tiene histogramas lo invalidamos y avisamos
        if(Candidatos == NoHisto)
            {
                cout << "candidato invalidado por falta de\\
                        histogramas"<<endl;
                cout << "-----"<<endl;
            }
        }//cierra la condicion de los histogramas

    }

} //cierra el -IsRecordable
} //Cierra el primer corte -angular y de estaciones

} //cierra el ciclo principal corre sobre evento

reloj.Stop();
reloj.Print();
} //cierra todo el código

```

APÉNDICE C

SOFTWARE DE PROPÓSITO GENERAL UTILIZADO EN EL PRESENTE TRABAJO

En el caso de la elaboración de simulaciones y análisis de datos, la herramienta computacional es de gran importancia, sin ella este trabajo resultaría una tarea titánica, por no decir imposible. La correcta elección de software y hardware es crucial para que el trabajo realizado resulte eficiente y exitoso.

Siempre es deseable contar con equipo de cómputo (hardware) moderno y de gran capacidad (en especial de proceso y almacenamiento). Los programas encargados de las simulaciones y análisis consumen una gran cantidad de recursos, tanto de procesamiento como de almacenamiento. Por ejemplo, para realizar el análisis de los detectores de superficie, de tipo ADST solamente del mes de marzo del 2009, el archivo *root* correspondiente, tiene un tamaño de 108 MB. Esto no es un tamaño impresionante, tomando en cuenta que este formato contiene datos pre-procesados y ha eliminado una gran cantidad de información de poca relevancia. El mismo tipo de información para el correspondiente al periodo completo del análisis realizado, es del orden de varias decenas de TB, diseminados en varios archivos. El software necesario para la manipulación de grandes volúmenes de información requiere de ser sólido y confiable, esto implica una especialización en su manejo; a continuación se comentan, brevemente, los requisitos mínimos, tanto de software, como de habilidades para trabajar con las herramientas computacionales necesarias para la simulación y

el análisis de chubascos atmosféricos.

C.1. Sistema Operativo

En este trabajo se empleó el sistema operativo basado en Unix, Linux, en su Distribución GNU Linux/DEBIAN, version 5.0.0 [37].

Linux es un sistema operativo para computadoras, de alto rendimiento y confiabilidad, basado en Unix. Fue programado, inicialmente por el computólogo finlandés Linus Benedict Torvalds y su primera versión fue publicada en internet, de manera gratuita, casi a finales de 1991. Tiene sus orígenes en el sistema operativo Minix del Dr. Andrew S. Tanenbaum (minix es un MiniUnix que programó el Dr. Tanenbaum desde primeros principios, como una herramienta de apoyo, didáctica, útil en su curso de sistemas operativos en la Universidad de Amsterdam en Holanda).

Linux provee al usuario de capacidades de cómputo multitarea y multiusuario, además de que en su desarrollo han intervenido cientos de especialistas desarrolladores de todo el mundo, por añadidura se ha convertido, casi de manera natural, en un sistema multiplataforma, lo que permite tener disponible todas sus características en diferentes arquitecturas de cómputo. La filosofía inicial del sistema operativo en cuestión, es la de facilitar al usuario doméstico un sistema operativo, robusto, confiable y de fácil acceso.

Este sistema se puede instalar en una gran variedad de equipo de cómputo y permite compartir aplicaciones y/o distribuirlas. Esto facilita la productividad, que en nuestro caso fue la de simulación y análisis de datos.

El sistema operativo es además Software Libre de código abierto bajo la licencia GNU en su versión GPL [38], lo que reduce los costos, casi únicamente al hardware de los equipos. El sistema operativo facilita además la interconexión de diversos equipos entre si de manera transparente, lo que permite configurar topologías que dan soporte al cálculo distribuido necesario para la obtención de resultados en una menor cantidad de tiempo. Linux es además un sistema prácticamente invulnerable a los ataques de los virus informáticos, lo que garantiza estabilidad y seguridad a los datos de los usuarios.

C.2. Lenguajes

Muchas de las herramientas existentes para el estudio de la física de altas energías están desarrolladas a partir de modelos físicos y matemáticos que son traducidos directamente a un lenguaje de programación, para que en el proceso del cálculo y almacenamiento de los datos, ello resulte una tarea simplificada. En este aspecto se involucra directamente el uso de los métodos numéricos, las rutinas que resuelven sistemas de ecuaciones complicados, generación de números aleatorios, análisis estadístico, minería de datos, etc. Pero todo ello requiere de ser reproducido y organizado de tal manera que una computadora realice todo este trabajo, para ello se recurre a los lenguajes de programación, los cuales nos permiten traducir las instrucciones deseadas a una computadora, para que estas sean ejecutadas. Sin embargo hay una gran cantidad de lenguajes computacionales que ofertan diversas capacidades. Hoy en día las herramientas existentes están, en su mayoría, escritas en lenguaje C y C++, muchas otras en Fortran (la tendencia ha sido reprogramarlas en C o C++), además se utiliza JAVA, para construir visualizadores de la información generada, o como mera interfaz de construcción de código para un simulador o sistema de análisis más complicado.

C.2.1. C/C++

El C es un lenguaje de programación necesaria e indispensable para todo aquel que desea programar de manera estructurada. Es de gran portabilidad y fácil acceso. El lenguaje C tiene sus orígenes en los lenguajes BCLP y B de finales de la década de los años 60. La derivación del lenguaje B hacia C fue desarrollada por Dennis Ritchie en los Laboratorios Bell. En sus inicios, C fue popular dentro del círculo de diseñadores y programadores de sistemas operativos, quienes lo utilizaron para sus productos, siendo un ejemplo el sistema operativo UNIX, el cual fue programado en el lenguaje C. Dado que C es un lenguaje independiente del hardware y ampliamente disponible, las aplicaciones que están escritas en C pueden ejecutarse con poca o ninguna modificación en una amplia gama de sistemas distintos de cómputo[39].

Ahora bien, conforme se va desarrollando una herramienta computacional o entorno de desarrollo, los lenguajes de programación pueden verse rebasados, en cuanto

a la flexibilidad y/o la adecuación a un problema dado. En el caso de la física de altas energías y en especial a los programas y paquetes de cómputo, el lenguaje C (refiriéndose al “ANSI C”) puede quedarse rezagado como el lenguaje a elegir, si no fuera por el “super-conjunto” de C, (a llamarse C++ desarrollado por Stroustrup). Este lenguaje permite a los programadores desarrollar programas de cómputo bajo el paradigma de la “Programación Orientada a Objetos”, generando con ello piezas de software que pueden ser reutilizadas y aplicadas de diversas maneras en un proyecto[40]. Un caso claro de una herramienta desarrollada en base a C++ usando la característica de la Programación Orientada a Objetos en la física de altas energías son CLHEP y GEANT4.

C++ es un lenguaje de propósito general, orientado a la programación de sistemas, con las siguientes características globales:

- es mejor que C;
- soporta la abstracción de datos;
- soporta la programación orientada a objetos;
- soporta la programación genérica.

C.2.2. Fortran

FORTRAN fue el primer lenguaje de programación de alto nivel, desarrollado y comercializado. Su nombre (FORmula TRANslating system) indica claramente que su filosofía es proveer a la computadora de un traductor para realizar cálculos matemáticos.

El uso del FORTRAN se ha extendido ampliamente en la comunidad científica, y a pesar de la aparición de otros lenguajes, más versátiles y que permiten una mayor facilidad en la programación, FORTRAN, a través de sus sucesivas versiones, continúa siendo hoy en día ampliamente utilizado. Una de las características del FORTRAN es la compatibilidad de las distintas versiones con las anteriores [41].

FORTRAN ha sido, desde hace más de 50 años, muy usado en las áreas de cómputo intensivo, tales como la predicción numérica del tiempo, análisis de elementos finitos, dinámica de fluidos computacional (CFD), química y física computacionales. Es uno

de los lenguajes más populares en el área de la computación de alto rendimiento y es el lenguaje usado para programas que evalúan el desempeño (benchmark) y el ranking de los supercomputadores más rápidos del mundo.

C.2.3. Offline

El *entorno de trabajo* Offline del observatorio Pierre Auger ha sido diseñado para proveer una infraestructura flexible y robusta de clases y utilerías que ayudan en el análisis de datos. Es un conjunto de herramientas generadas por una gran cantidad de físicos de todo el mundo que han venido desarrollando aplicaciones desde hace 20 años. En particular, el *entorno de trabajo* Offline, incluye la posibilidad de simular y reconstruir eventos, usando los detectores de superficie, de fluorescencia y el método híbrido. Los algoritmos que implementan el código para la física pueden ser fácilmente cambiados o modificados para que se ajusten a los requerimientos de análisis específicos [42]. El software Offline consiste de tres partes principales:

- Una colección de módulos de proceso, los cuales pueden ser insertados de manera secuencial mediante instrucciones contenidas en un archivo con formato XML;
- Una estructura de eventos que permite almacenar la información de toda la simulación y de la reconstrucción;
- Una descripción del detector, incluyendo la configuración y rendimiento del Observatorio, así como también las condiciones atmosféricas como función del tiempo.

C.2.4. ROOT

ROOT es un entorno de trabajo para procesar datos, nacido en el CERN, en el corazón de los grupos de investigación de física de altas energías. Diariamente, miles de físicos utilizan aplicaciones ROOT para el análisis de sus datos o para realizar simulaciones.

La estructura de ROOT permite guardar los datos en un formato binario comprimido llamado *Archivo ROOT*. La estructura de este formato de archivo permite

que los datos almacenados en el sean fácil y rápidamente accesibles, casi sin importar la cantidad de datos almacenados.

Este formato permite que los datos guardados se puedan acceder, ya sea en una computadora de escritorio, desde la web y mediante un sistema de distribución de archivos masivo como por ejemplo GRID. Esto se logra mediante la distribución en forma de “árbol” que hace ROOT en sus archivos, permitiendo encadenarlos y acceder a ellos como si fueran un solo objeto.

En lo relacionado al proceso de los datos, ROOT cuenta con herramientas matemáticas y de estadística en extremo poderosas que pueden ser usadas para operar en los datos del usuario. ROOT dispone además de toda la capacidad de una aplicación tipo C++ y de proceso en paralelo para cualquier tipo de manipulación de datos, lo que permite simular sistemas muy complicados.

Uno de los atractivos y características más poderosas de ROOT es la generación de histogramas, gráficos de dispersión, funciones de ajuste, etc. Los gráficos generados por ROOT pueden ser ajustados en tiempo real mediante algunos cuantos *click* del “ratón”. Pueden ser guardados en formato PDF o cualquier otro formato.

Se puede hacer uso de la *CINT C++* (intérprete de C++) o de Python para crear sesiones interactivas y para escribir *macros*, o también para compilar un programa para que pueda hacer uso de todas las capacidades de cómputo, sin interpretación previa, lo que se refleja en que dicha aplicación se ejecute a mayor velocidad. En ambos casos, ROOT permite construir interface gráfica con el usuario [43].

C.3. Comparativos de modelos en simulacion

| Modelo | Partícula | Energía | A. Incidencia(θ, ϕ) | Thinning | CPU Time |
|------------|-----------|---------|---------------------------------|----------|-----------------------|
| Sibyll 2.1 | Protón | 1e19 eV | (75°, 80°) | 1e-5 | 1 min 07.97 sec |
| Sibyll 2.1 | Protón | 1e19 eV | (75°, 80°) | 1e-6 | 10 min 50.75 sec |
| QGSJET | Protón | 1e19 eV | (75°, 80°) | 1e-5 | 1 hr 42 min 22.09 sec |
| QGSJET | Protón | 1e19 eV | (75°, 80°) | 1e-6 | 1 hr 50 min 28.82 sec |

Cuadro C.1: Comparativo de los modelos Sibyll y QGSJET de interaccion Hadronica y Thinning en Aires

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alessio Tamburro. *Neutrino Detection with the Surface Array of the Pierre Auger Observatory*. PhD thesis, Fakultät für Physik de Universität Karlsruhe, 2008.
- [2] CERN, S. Southworth, and Gordon. Fraser. Achievements with antimatter. <http://cern-discoveries.web.cern.ch/CERN-Discoveries/Courier/Intro.htm>.
- [3] W.-M. Yao, C. Amsler, D. Asner, R.M. Barnett, J. Beringer, P.R. Burchat, C.D. Carone, C. Caso, O. Dahl, G. D'Ambrosio, A. DeGouvea, M. Doser, S. Eidelman, J.L. Feng, T. Gherghetta, M. Goodman, C. Grab, D.E. Groom, A. Gurtu, K. Hagiwara, K.G. Hayes, J.J. Hernández-Rey, K. Hikasa, H. Jawahery, C. Kolda, Kwon Y., M.L. Mangano, A.V. Manohar, A. Masoni, R. Miquel, K. Mönig, H. Murayama, K. Nakamura, S. Navas, K.A. Olive, L. Pape, C. Patrignani, A. Piepke, G. Punzi, G. Raffelt, J.G. Smith, M. Tanabashi, J. Terning, N.A. Törnqvist, T.G. Trippe, P. Vogel, T. Watari, C.G. Wohl, R.L. Workman, P.A. Zyla, B. Armstrong, G. Harper, V.S. Lugovsky, P. Schaffner, M. Artuso, K.S. Babu, H.R. Band, E. Barberio, M. Battaglia, H. Bichsel, O. Biebel, P. Bloch, E. Blucher, R.N. Cahn, D. Casper, A. Cattai, A. Ceccucci, D. Chakraborty, R.S. Chivukula, G. Cowan, T. Damour, T. DeGrand, K. Desler, M.A. Dobbs, M. Drees, A. Edwards, D.A. Edwards, V.D. Elvira, J. Erler, V.V. Ezhela, W. Fetscher, B.D. Fields, B. Foster, D. Froidevaux, T.K. Gaisser, L. Garren, H.-J. Gerber, G. Gerbier, L. Gibbons, F.J. Gilman, G.F. Giudice, A.V. Gritsan, M. Grünewald, H.E.

- Haber, C. Hagmann, I. Hinchliffe, A. Höcker, P. Igo-Kemenes, J.D. Jackson, K.F. Johnson, D. Karlen, B. Kayser, D. Kirkby, S.R. Klein, K. Kleinknecht, I.G. Knowles, R.V. Kowalewski, P. Kreitz, B. Krusche, Yu.V. Kuyanov, O. Lahav, P. Langacker, A. Liddle, Z. Ligeti, T.M. Liss, L. Littenberg, L. Liu, K.S. Lugovsky, S.B. Lugovsky, T. Mannel, D.M. Manley, W.J. Marciano, A.D. Martin, D. Milstead, M. Narain, P. Nason, Y. Nir, J.A. Peacock, S.A. Prell, A. Quadt, S. Raby, B.N. Ratcliff, E.A. Razuvaev, B. Renk, P. Richardson, S. Roesler, G. Rolandi, M.T. Ronan, L.J. Rosenberg, C.T. Sachrajda, S. Sarkar, M. Schmitt, O. Schneider, D. Scott, T. Sjöstrand, G.F. Smoot, P. Sokolsky, S. Spanier, H. Spieler, A. Stahl, T. Stanev, R.E. Streitmatter, T. Sumiyoshi, N.P. Tkachenko, G.H. Trilling, G. Valencia, K. van Bibber, M.G. Vincter, D.R. Ward, B.R. Weber, J.D. Wells, M. Whalley, L. Wolfenstein, J. Womersley, C.L. Woody, A. Yamamoto, O.V. Zenin, J. Zhang, and R.-Y. Zhu. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G*, 33:1+, 2006.
- [4] The Pierre Auger Collaboration. Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects. *Science*, 318(5852):938–943, 2007.
- [5] David J. Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley & Sons, Inc., first edition, 1987.
- [6] Claus Grupen. *Astroparticle Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, first edition, 2005.
- [7] A. M. Hillas. *Ann. Rev. Astron. and Astrophys...*, (22):425, 1984.
- [8] K. S. Hirata et al. Observation of a neutrino burst from the supernova sn 1987a. *Phys. Rev Lett* 58, pages 11490–1493, 1987.
- [9] Dirk Kickelbick. *The energy spectrum of primary cosmic rays measured with the KASCADE-Grande experiment*. PhD thesis, Fachbereich Physik der Universität Siegen, 2008.
- [10] The AGASA Collaboration. Agasa (akeno giant air shower array). <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>.

BIBLIOGRAFÍA

- [11] The Milagro Collaboration. The milagro gamma-ray observatory. <http://www.lanl.gov/milagro/index.shtml>.
- [12] The TIBET Collaboration. Tibet as-gamma experiment. <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index.html>.
- [13] The GAMMA Collaboration. Gamma experiment. <http://www.gamma-armenia.org/>.
- [14] IceCube Collaboration. Icecube south pole neutrino detector. <http://icecube.wisc.edu/about/explained>.
- [15] ANITA Collaboration. Antartic impulsive transient antenna. <http://www.phys.hawaii.edu/~anita/web/science.html>.
- [16] ANTARES Collaboration. Astronomy with a neutrino telescope and abyss environmental research. <http://antares.in2p3.fr/Overview/index.html>.
- [17] The HAWC Collaboration. Hawc: The high altitude water cherenkov experiment. <http://hawc.umd.edu/>.
- [18] The Pierre Auger Collaboration. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV. *Physical Review Letters*, 101:061101, 2008.
- [19] The Pierre Auger Collaboration. Pierre auger observatory northern auger site. <http://www.augernorth.org/>.
- [20] Johannes Bluemer. Status and perspectives of the pierre auger observatory. *Acta Physica Polonica B*, 35(6-7), 2004.
- [21] The Pierre Auger Colaboration. CDAS. <http://www.auger.org.ar/CDAS-Public/>.
- [22] N. Metropolis. The begining of the monte carlo method. *Los Alamos Science Special Issue*, pages 125–130, 1987.
- [23] N. Metropolis and S. Ulam. The monte carlo method. *Journal of the America Statistical Association*, 44(247), 1947.

BIBLIOGRAFÍA

- [24] Sergio Sciutto. *AIRES: A system for air shower simulations. User's guide and reference manual*. Departamento de Física Universidad Nacional de La Plata, 2002.
- [25] Cotti, U. De-León, C. and Soffer, J. Cluster de cómputo para cálculo científico. *4o. Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología*, 2008.
- [26] Cederik De León A. Aires Web Steer File Generator. <http://sirin.ifm.umich.mx/~cederik/PHPSteer/>.
- [27] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P.A. Dubois, M. Asai, G. Barraud, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytracek, G.A.P. Cirrone, G. Cooperman, G. Cosmo, G. Cuttone, G.G. Daquino, M. Donszelmann, M. Dressel, G. Folger, F. Foppiano, J. Generowicz, V. Grichine, S. Guatelli, P. Gumplinger, A. Heikkinen, I. Hrivnacova, A. Howard, S. Incerti, V. Ivanchenko, T. Johnson, F. Jones, T. Koi, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, V. Lara, S. Larsson, F. Lei, O. Link, F. Longo, M. Maire, A. Mantero, B. Mascialino, I. McLaren, P.M. Lorenzo, K. Minamimoto, K. Murakami, P. Nieminen, L. Pandola, S. Parlati, L. Peralta, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, A. Ribon, P. Rodrigues, G. Russo, S. Sadilov, G. Santin, T. Sasaki, D. Smith, N. Starkov, S. Tanaka, E. Tcherniaev, B. Tome, A. Trindade, P. Truscott, L. Urban, M. Verderi, A. Walkden, J.P. Wellisch, D.C. Williams, D. Wright, and H. Yoshida. Geant4 developments and applications. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 53:270–278, 2006.
- [28] D. Hech, J. Knapp, J.N. Capdeville, G. Schatz, and Thouw. CORSIKA. <http://www-ik.fzk.de/corsika/>.
- [29] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft, and P.R. Sala. FLUKA Manual de usuario. <http://www.fluka.org>, 1989-2008.
- [30] A. Gazizov and M Kowalski. ANIS: High Energy Neutrino Generator for Neutrino Telescopes, 2005.
- [31] Matt Dobbs and Jorgen Beck Hansen. The hepmpc c++ monte carlo event record for high energy physics. *Computer Physics Communications*, 134(1):41 – 46, 2001.

BIBLIOGRAFÍA

- [32] Leif Lonnblad and Anders Nilsson. The mc++ event generator toolkit – version 0. *Computer Physics Communications*, 71(1-2):1 – 14, 1992.
- [33] Torbjorn Sjostrand, Stephen Mrenna, and Peter Skands. A brief introduction to pythia 8.1, 2007.
- [34] Inés Valiño-Rielo. *Detection of Horizontal Air Showers and Neutrino Induced Showers with the Pierre Auger Observatory*. PhD thesis, Universidad de Santiago de Compostela, 2007.
- [35] Pierre Auger Collaboration. Pierre auger collaboration: Auger observer repository. http://augerobserver.fzk.de/doku.php?id=datatree:root#sd_adst_files.
- [36] Ioana C Maris, Fabian Schussler., Ralf Ulrich., and Michael Unger. Data summary trees and shower visualization for reconstructed and simulated auger events. *GAP*, 2009.
- [37] Software in the Public Interest, Inc. GNU LINUX DEBIAN. <http://www.debian.org/intro/about>.
- [38] Free Software Foundation, Inc. GNU GENERAL PUBLIC LICENSE. <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>.
- [39] H. M. Deitel and P. J. Deitel. *Como programar en C / C++*. Prentice Hall, segunda edition, 1994.
- [40] Bjarne Stroustrup. *El lenguaje de programación C++*. Addison Wesley, especial edition, 2001.
- [41] Justo R. Pérez Cruz. Notas elementales sobre programación en fortran. *Departamento de Física Fundamental y Experimental Electrónica y Sistemas*, 2008.
- [42] Tom Paul. Prototype framework for Auger Offline Software. GAP-2002-066.
- [43] The ROOT Team. Introducción a ROOT. <http://root.cern.ch/drdupal/content/gentle-introduction>, 1995-2010.

APÉNDICE D

GLOSARIO

AGN Active Galactic Nuclei, (núcleo galáctico activo)

ALLM Abramowicz-Levy

AMANDA Antarctic Muon and Neutrino Detector Array

ANTARES Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RE-Search

AIRES AIRshower Extended Simulations

AGASA Akeno Giant Air-Shower Array

ASW Armesto-Salgado-Wiedemann

ANIS All Neutrino Interaction Simulation

BBBS Bugaev-Shlepin

BH Black Hole, (Hoyo negro)

CC Charged Current (Corriente Cargada)

CDAS Central Data Aquisition System

CKMT Cappella-Kaidalov-Merino-Tran

CL Confidence Level (Nivel de confianza)

CMB Cosmic Microwave Background (Radiación C3smica de Microondas de Fondo)

CORSIKA COsmic Ray SIMulations for KAscade

CT Central Trigger

CTEQ Coordinated Theoretical-Experimental project on QCD

DB Double Bang

DEM Digital Elevation Map (Mapa de elevaci3n Digital)

DIS Deep Inelastic Scattering (Dispersi3n Inel3stica Profunda)

EAS Extensive Air Shower

FADC Flash Analog Digital Converter

FD Fluorescence Detector (Detector de Fluorescencia)

GARCON Genetic Algorithm for Rectangular Cuts OptimizatiON

GVD Generalized Vector Dominance

GPS Global Positioning System

GR Glashow Resonance

GRB Gamma Ray Burst

GRV Gluck-Reya-Vogt

GZK Greisen-Zatsepin-Kuzmin

HERA Hadron Elektron Ring Anlage

HiRes High Resolution

HP Hard Pomeron

LPM Landau-Pomeranchuk-Migdal

LIDAR Light Detection And Ranging

MC Monte Carlo

NC Neutral Current (Corriente Neutra)

NEMO NEutrino Mediterranean Observatory

PDF Parton Distribution Function

PMT Photo Multiplier Tube

p.e. photoelectron

QCD Quantum Chromo Dynamics

QGSJET Quark Gluon String JET

SD Surface Detector (Detector de Superficie)

SUGAR Sidney University Giant Air-Shower Recorder

ToT Time over Threshold

TOTF Time Over Threshold trigger Fraction

TD Topological Defect

UHE Ultra High Energy

UHECR Ultra High Energy Cosmic Ray

VCT Vertical and Central Throughgoing (muon)

VEM Vertical Equivalent Muon

WB Waxman-Bahcall

WIMP Weakly Interacting Massive Particle