



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

INSTITUTO DE FÍSICA

Estudio de las anisotropías instrumentales
del detector CREAM

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA)

PRESENTA

JORGE LUIS BAYLÓN CARDIEL

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARTURO MENCHACA ROCHA

MIEMBROS DE COMITÉ TUTOR:

DR. VARLEN GRABSKI

DRA. MYRIAM MONDRAGÓN CEBALLOS



2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Introducción	1
1. Rayos Cósmicos	3
1.1 Antecedentes históricos, descubrimiento y primeras investigaciones	3
1.2 Naturaleza de los Rayos Cósmicos	4
1.3 Anisotropías en Rayos Cósmicos	7
1.4 Preguntas abiertas en Rayos Cósmicos	8
1.5 Experimentos recientes	10
1.5.1 Observatorio Pierre Auger	10
1.5.2 AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)	10
2. El experimento CREAM-III	12
2.1 Detectores	12
2.1.1 Calorímetro	13
2.1.2 SCD (Silicon Charge Detector)	14
2.1.3 CherCam (Cámara Cherenkov)	14
2.1.4 TCD (Timing Charge Detector) y CD (Cherenkov Detector)	15
3. GEANT4	16
3.1 Estructura global	16
4. Análisis de datos de CREAM-III	18
4.1 Programa cream3	18
4.2 Análisis de carga	19
4.3 Análisis de energía	24
4.4 Análisis de distribuciones angulares	26
5. Simulación en GEANT4 de CREAM-III	28
5.1 Simulación de GEANT4	28
5.2 Datos simulación GEANT4	29
6. Simulación geométrica de CREAM-III	31

6.1 Programa de simulación geométrica31
6.2 Datos simulación geométrica32
7. Conclusiones36
Bibliografía38

Resumen

El experimento CREAM (Cosmic Ray Energetics and Mass) está diseñado para medir la composición de rayos cósmicos en la escala energética de 10^{15} eV en una serie de vuelos utilizando un globo de ultra larga duración (ULDB). El instrumento está equipado con sistemas para la medición del espectro de carga y energía para núcleos con $Z=1-26$ y rangos energéticos $10^{11}-10^{15}$ eV.

El propósito del trabajo presentado aquí ha sido estudiar las distribuciones angulares de protones de los datos de CREAM- III y entender las asimetrías que estas presentaron. Debido a los pocos días de exposición del instrumento y, consecuentemente, a la poca estadística recopilada, se asumió que estos comportamientos anómalos se debieron predominantemente a factores propios del instrumento y no a anisotropías de interés cósmico. Con este trabajo se pretende mejorar el conocimiento sobre la forma en que trabajan los detectores de CREAM, así como sobre los métodos de reconstrucción de trayectorias.

En el primer capítulo de esta tesis se hace un breve repaso de la historia y actualidad de los rayos cósmicos. En el siguiente capítulo se describe el experimento CREAM-III y los detectores que lo conformaron. En el tercer capítulo se explica la forma en que funciona el paquete computacional de simulación GEANT4. El cuarto capítulo presenta los resultados del análisis hecho a los datos de CREAM-III. En el quinto capítulo se muestra lo obtenido al utilizar la simulación de GEANT4 de CREAM-III. En el sexto capítulo se presenta los resultados de una simulación geométrica (es decir, sin transporte) de CREAM-III, que permitió reproducir cualitativamente los mismos resultados que el capítulo quinto, pero reduciendo considerablemente los tiempos de cómputo. Finalmente, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo.

The CREAM experiment (Cosmic Ray Energetics and Mass) was designed to measure the composition of cosmic rays in the energy scale of 10^{15} eV in a series of flights using an ultra long duration balloon (ULDB). The instrument is equipped with systems for measuring the charge and energy spectrum of nuclei with $Z = 1-26$ and energy ranges $10^{11}-10^{15}$ eV.

The purpose of the work presented here was to study the angular distributions of protons from the CREAM-III data and to understand the asymmetries presented. Because of the few days of exposure of the instrument and, consequently, of the few statistics collected, it was assumed that these anomalous behaviors were due predominantly to factors of the instrument and not cosmic anisotropies of interest. This work aims to improve knowledge about the way the CREAM detectors work, as well as the methods of reconstruction for trajectories.

In the first chapter of this thesis there is a brief overview of the history and present of the cosmic rays research. The following chapter describes the experiment CREAM-III and the detectors that formed the instrument. The third chapter explains how the simulation package GEANT4 works. The fourth chapter

presents the results of the analysis of the data from the CREAM-III flight. The fifth chapter shows the results of the GEANT4 simulation of CREAM-III. The sixth chapter presents the results of a geometric simulation (without transport) of CREAM-III, which served to reproduce qualitatively the same results as the fifth chapter, but reducing greatly the computational time. Finally, the seventh chapter presents the conclusions of this work.

Introducción

Como se verá con más detalle después, medir con precisión la naturaleza y la distribución de los rayos cósmicos sigue siendo un tema de gran interés. Hoy sabemos que las partículas cargadas que constituyen este flujo son principalmente núcleos de hidrógeno y de helio, aunque algunos experimentos han podido observar núcleos aún más pesados que el hierro. Medir el espectro de energía de estas partículas, como función de su número atómico, en un intervalo de energías vecinas a 1 TeV, es la misión de un instrumento denominado CREAM (Cosmic Ray Energetics and Mass), desarrollado por la Universidad de Maryland, en Estados Unidos, en colaboración con otras instituciones, que incluyen al Instituto de Física de la UNAM. Esta institución mexicana fue invitada a participar en el año 2005, colaborando en la construcción de uno de los detectores que constituyen al CREAM, denominado CherCam (Cámara Cherenkov). CREAM es un instrumento que opera desde un globo aerostático, que vuela a una altura de 40 km y que es lanzado en la Antártida durante unas semanas cada año desde el año 2004.

La contribución del IFUNAM a este proyecto le dio derecho al grupo mexicano a analizar los datos que se tomaron en algunos de los vuelos anuales. Un aspecto poco estudiado por la colaboración CREAM ha sido la distribución angular de los rayos cósmicos. Por ser partículas cargadas, los mecanismos de transporte de estos rayos deberían producir distribuciones isotrópicas, salvo por efectos magnéticos locales que se deben apreciar en diversos intervalos de energía, dependiendo de la localización e intensidad de esos campos. Las anisotropías producidas por el campo magnético terrestre fueron las primeras en estudiarse, entre otros por Don Manuel Sandoval Vallarta. Posteriormente, se han podido detectar anisotropías de origen solar y hasta galáctico. Ya que CREAM permite reconstruir las direcciones de incidencia de los rayos cósmicos que lo cruzan, en principio es posible buscar evidencia de estos efectos en los datos que colecta. Sin embargo, para tal propósito, es requisito indispensable establecer las anisotropías intrínsecas del detector, que pueden ser debidas a múltiples factores, como asimetrías en el montaje y/o resultado de no-uniformidades en la eficiencia de detección. Ese es el tema de esta tesis.

El trabajo presentado aquí fue producto de la participación que tuvo el autor en la colaboración CREAM analizando los datos del tercer vuelo (CREAM-III) ocurrido durante el verano (antártico) 2007-2008. Nuestro propósito ha sido estudiar las distribuciones angulares de protones de los datos de CREAM-III y entender las asimetrías que estas presentaron. Debido a los pocos días de exposición del instrumento y, consecuentemente, a la poca estadística recopilada, se asumió que estos comportamientos anómalos se debieron predominantemente a factores propios del instrumento y no a anisotropías de interés cósmico. Con este trabajo se pretende mejorar el conocimiento sobre la forma en que trabajan los detectores de CREAM, así como sobre los métodos de reconstrucción de trayectorias. Naturalmente, la intención futura es hacer un estudio formal de anisotropías terrestres o solares utilizando los datos acumulados durante los distintos vuelos de CREAM.

En el primer capítulo de esta tesis se hace un breve repaso de la historia y actualidad de los rayos cósmicos. En el siguiente capítulo se describe el experimento CREAM-III y los detectores que lo conformaron. En el tercer capítulo se explica la forma en que funciona el paquete computacional de simulación GEANT4. El cuarto capítulo presenta los resultados del análisis hecho a los datos de CREAM-III. En el quinto capítulo se muestra lo obtenido al utilizar la simulación de GEANT4 de CREAM-III. En el sexto capítulo se presenta los resultados de una simulación geométrica (es decir, sin consideración de los procesos físicos involucrados) de CREAM-III, que permitió reproducir cualitativamente los mismos resultados que el capítulo quinto, pero reduciendo considerablemente los tiempos de cómputo. Finalmente, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 1

Rayos cósmicos

1.1 Antecedentes históricos, descubrimiento y primeras investigaciones

La historia de los rayos cósmicos se remonta al principios del siglo XVIII con los estudios de S. Gray en Inglaterra y C. F. DuFay en Francia acerca de la electrificación directa e inducida en varias sustancias. DuFay fue el primero en darse cuenta que el aire es capaz de conducir electricidad lo que supone la presencia de partículas cargadas capaces de desplazarse de un punto a otro.

Los siguientes estudios acerca de la conducción en el aire estuvieron a cargo de Coulomb, que estableció en 1785 una ley en la que corriente eléctrica del aire era proporcional al campo eléctrico usado. En 1850, Matteucci encontró que si el campo eléctrico era lo suficientemente grande, la corriente no podía aumentar mas allá de cierto valor, lo que significaba un valor de saturación en la corriente. Estos hallazgos fueron útiles para que en 1896, J. J. Thompson y E. Rutherford encontraran que iones gaseosos eran los responsables de la conducción eléctrica en el gas.

Para 1887 W. Linss observó que un cuerpo cargado perdía su electricidad al exponerse al aire. Para corroborar esta observación se construyo un instrumento llamado electroscopio cuya versión mas simple consiste en dos hojas delgadas de oro que cuelgan de una barra metálica en el interior de un recipiente de vidrio. Al tocar con una pieza de vidrio cargada la barra metálica del electroscopio, las láminas de oro se separan debido a que las partículas cargadas positivamente presentes en el vidrio pasan a la barra metálica y hacia las laminas de oro por lo que estas adquieren la misma carga, que aunque pequeña es suficiente para originar una separación visible. Ya que se quita el vidrio el electroscopio pierde gradualmente la carga y las laminillas de oro vuelven a su posición original.

Una propiedad de un electroscopio ordinario es que no puede permanecer cargado indefinidamente, este fenómeno fue estudiado entre 1898 y 1900 por C. T. R. Wilson, el cual lo atribuyó a *radiación extraña*. Estos estudios se realizaron en una época en la que se acababan de descubrir tanto los rayos X como la radiactividad y se sabía que ambos podían descargar electroscopios por lo que la *radiación extraña* de Wilson se atribuyo a la presencia de materiales radiactivos en la vecindad del electroscopio o en los mismos materiales con los que fue construido. Para probar esta hipótesis se construyeron electroscopios con diferentes materiales y se observó que la *ionización* variaba de acuerdo al material empleado.

Para tratar de separar la influencia de materiales radioactivos en la descarga de los electroscopios había que alejarse de la principal fuente de materiales radioactivos: la superficie terrestre. Con esta motivación T. Wulf realizó en 1910 experimentos en la parte más alta de la torre Eiffel donde observó una disminución en la ionización pero que resultó mucho menor a la que se esperaba. En 1911, V. F. Hess leyó los resultados de Wulf y decidió corroborarlos con una serie de diez ascensos en globo. A los 500 metros observó

que la ionización era, en promedio, aproximadamente dos veces menor que en la superficie, a los 1500 era igual, y a partir de los 1800 el aumento era evidente. A los 3500 el incremento era de cuatro veces y a los 5000 llegaba a 16 veces. Estos resultados no presentaban diferencias entre el día y la noche.

Para Hess la explicación del incremento de ionización al aumentar la altitud no se podía basar en sustancias radiactivas por lo que propuso la hipótesis de la existencia de una radiación que llegaba a la atmósfera desde afuera y que no podía tener origen solar ya que no había diferencia entre los resultados diurnos y nocturnos.

Muchos físicos no quedaron convencidos de la explicación de Hess sobre el origen extraterrestre la radiación ya que pensaban que la fuente podría ser la misma atmósfera, argumentando que esta podía contener pequeñas cantidades de elementos radioactivos en estado gaseoso. Para que esto fuera válido la intensidad de la radiación desconocida debía de presentar variaciones temporales y espaciales, pero las investigaciones de Hess y otros científicos mas demostraron que la radiación no presentaba variaciones en el tiempo y cambiaba muy poco en distintas latitudes.

Los últimos grandes experimentos para comprobar el origen de esta radiación los hizo Millikan de 1923 a 1926 midiendo la intensidad de la radiación tanto a grandes alturas como debajo del agua. De estas observaciones concluyó que la radiación tenía un origen extraterrestre y la bautizó como "rayos cósmicos".

1.2 Naturaleza de los Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos consisten en electrones, neutrones y núcleos atómicos, los cuales han sido acelerados a muy altas velocidades. Su composición proporciona información sobre la naturaleza de las regiones en las que se originan y de la forma en que se propagan a través del espacio interestelar. La variación de su composición de carga y masa con la energía –su espectro de energía- puede relacionarse con los procesos de aceleración y transporte de partículas en la galaxia.

Alrededor de 98% de las partículas que componen a los rayos cósmicos son núcleos y solo 2% son electrones. De los núcleos, la mayoría es Hidrógeno (87%) algunos otros son Helio (12%) y hay una cantidad muy pequeñas de Carbón, Oxígeno y otros núcleos pesados. Con algunas excepciones, su composición química de los rayos cósmicos corresponde a la abundancia en el sistema solar. Como se muestra en la figura 1.1, el Hidrógeno y el Helio son más abundantes en el sistema solar, mientras que el presencia de Litio, Berilio y Boro es mayor en los rayos cósmicos que en el sistema solar.

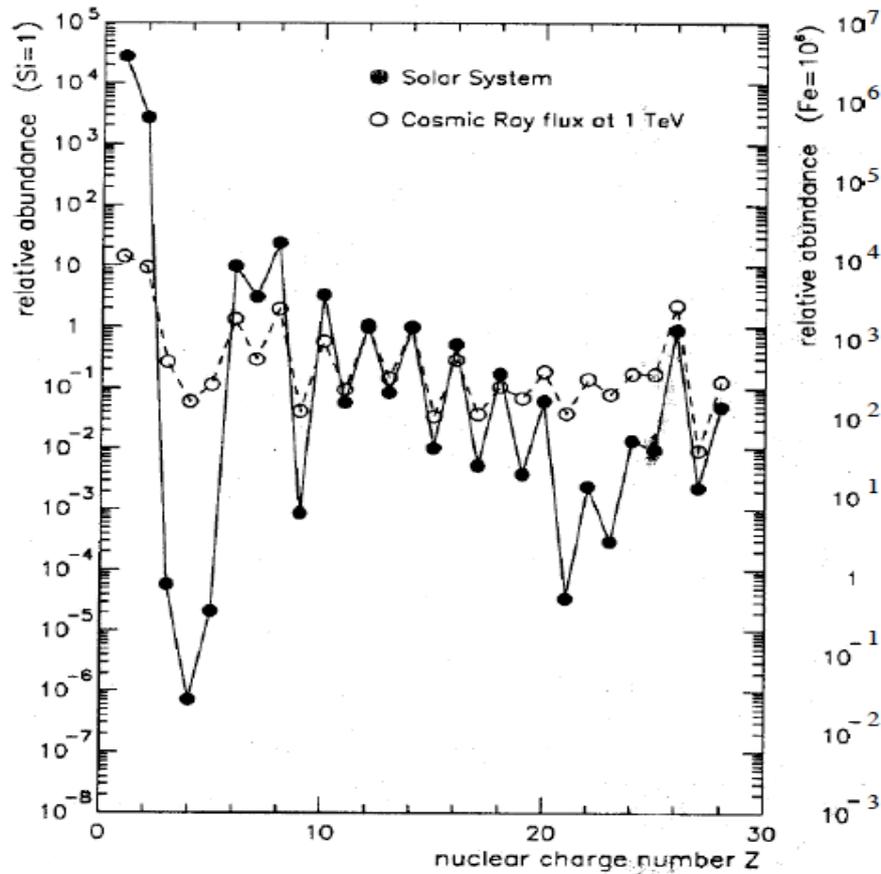


Figura 1.1: Composición química de los rayos cósmicos relativa al Silicón y al Hierro a 1 TeV, y en el Sistema Solar, como función de su carga Z [3]

El espectro de energía de los rayos cósmicos se ha construido por medio de la recolección de datos por observatorios de rayos cósmicos operando en todo el mundo. El objetivo primario de todos los observatorios es reconstruir el espectro de energías ya que esto puede mejorar el entendimiento del origen y la propagación de los rayos cósmicos a través del universo. El espectro de energía, mostrado en la figura 1.2, puede ser descrito por medio de una ley de potencias que presenta solo dos cambios observables en su pendiente conocidos como la "rodilla" y el "tobillo". Se puede dividir el espectro en tres secciones en base a estas dos características, las cuales parecen indicar un cambio en el origen o composición de los rayos cósmicos a determinadas energías.

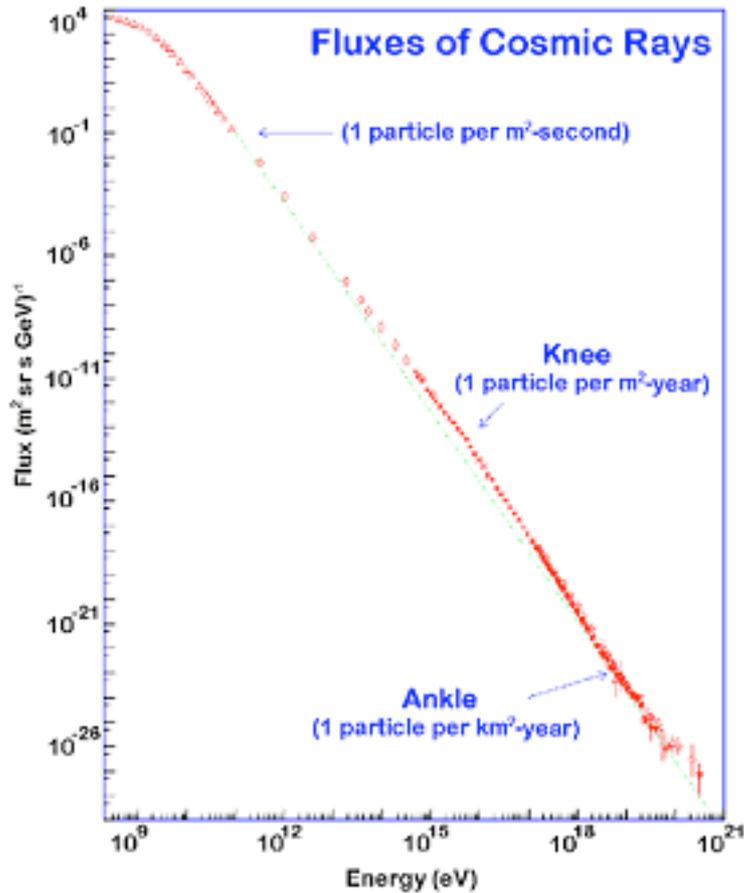


Figura 1.2: Flujo diferencial de rayos cósmicos, se muestra la “rodilla” (knee) y el “tobillo” (ankle)

La región debajo de la rodilla es la región que se entiende más claramente. El flujo de rayos cósmicos hasta energías de 3×10^{15} eV, justo debajo de la rodilla, es suficientemente grande como para ser detectado directamente por medio de globos volando a grandes alturas o experimentos en satélites. En estos experimentos los rayos cósmicos primarios son directamente interceptados y medidos. De estas mediciones se ha descubierto que la composición de estos rayos es en su mayoría núcleos de Hidrógeno y Helio. En esta región, el espectro de energía sigue la ley de potencias,

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

con una pendiente de $(\gamma) \cong 2.7$ como fue encontrado por Aglietta et. al. (2000). La teoría que contempla una aceleración de ondas de choque de las remanentes de supernovas predice un pendiente de $\gamma=2$. Si se toman en cuenta los efectos de los campos galácticos en la propagación de los rayos se obtiene una pendiente muy cercana a lo medido. Una de las teorías mas aceptadas pero aún sin confirmar considera que las fuentes de rayos cósmicos en esta región son supernovas galácticas.

La “rodilla” en el espectro energético de los rayos cósmicos fue medida por primera vez por Kulikov y Khristiansen en 1958. Esta región del espectro

aun no ha sido entendida por completo. Se cree que se presenta por un cambio en la proporción de núcleos de Hidrógeno y núcleos de Hierro, pero aún no ha sido del todo demostrado. Arriba de 10^{14} eV los rayos cósmicos no pueden ser observados directamente por experimentos de globos debido al bajo flujo que llega a la Tierra pero pueden ser medidos en tierra gracias al proceso que sufren los rayos en la atmósfera. Este proceso se conoce como cascada atmosférica extensa y fue descubierta por Pierre Auger en 1939. Ocurre cuando los rayos cósmicos primarios colisionan con núcleos en la atmósfera, lo cual produce una cascada de partículas secundarias en la atmósfera. Las partículas resultantes de estas colisiones pueden ser medidas por un arreglo de detectores esparcidos por la superficie de la Tierra.

La otra característica observable del espectro de energía de los rayos cósmicos es el “tobillo”, un aplanamiento del espectro que ocurre cerca 10^{18} eV. Esta región presenta muchos menos eventos que la “rodilla” y las técnicas de detección siguen siendo las mismas que dicha región. Se cree que los rayos cósmicos en el “tobillo” son de origen extragaláctico pero debido a la poca estadística con que se cuenta no es posible tener resultados de anisotropías, composición o estructura que puedan comprobar o refutar esto.

A energías arriba de 5×10^{19} eV se espera que todas las partículas experimenten una desaceleración debido al límite GZK, calculado en 1966 por Kenneth Greisen, Vadim Kuzmin y Georgiy Zatsepin. Este límite se presenta por la interacción de los rayos cósmicos con los fotones de la radiación de fondo dando como resultado la producción de piones. Este proceso continua hasta que la energía de los rayos cósmicos esta por debajo del umbral de producción de piones de 5×10^{19} eV. Con esto se tiene que los rayos con energías mayores a este umbral nunca deberían ser observados en la Tierra.

1.3 Anisotropías en Rayos Cósmicos

Una observación clave en la astrofísica de rayos cósmicos es la distribución direccional de las partículas. Estas distribuciones dependen de cualquier campo magnético en la galaxia y por lo tanto son dependientes de la energía. A pesar de esto, debajo de 10^{18} eV la dirección de los rayos cósmicos es casi isotrópica. Para energías mayores, las anisotropías comienzan a aparecer y podrían mostrar si los rayos cósmicos se originan dentro de la Vía Láctea o si viajan desde una galaxia cercana.

La mayoría de los rayos cósmicos son partículas cargadas. El radio de curvatura (radio de Larmor) de una partícula cargada relativista en una campo magnético uniforme esta dado por

$$R_L = \frac{E}{ceZB}$$

donde E es la energía de la partícula, eZ es la carga de la partícula y B es el campo magnético. Dado que el espesor del disco galáctico es ~ 1 kpc, se supone que los rayos cósmicos con un radio de Larmor menor a 1 kpc esta confinados a la

galaxia. El campo magnético promedio en el disco galáctico es de $10 \mu\text{G}$, por lo que usando la ecuación para el radio de Larmor tenemos que la energía para estar confinado es de $Zx10^{19}$ eV. Esto significa que todos los rayos cósmicos con energías debajo de 10^{19} eV siguen trayectorias complicadas alrededor de la galaxia debido a los campos magnéticos presentes y su dirección de llegada no aporta información sobre las fuentes que los originan. Alrededor de 10^{19} eV los protones comienzan a propagarse en dirección recta. Es debido a esto que se espera que las anisotropías de gran escala comiencen a ser visibles a estas energías. A energías mayores de 10^{19} eV los estudios de anisotropías han sido limitados debido a que el flujo de partículas es muy bajo y la estadística disponible es muy pobre. Si los rayos cósmicos están dominados por núcleos pesados como el Hierro, las anisotropías estarán arriba de 10^{20} eV. No hay experimentos actuales con áreas de colección capaces de ver anisotropías en esta región al menos que se trate de algo muy fuerte como una fuente compacta.

En los últimos años se han reportado varias anisotropías. De particular interés es la reportada por la colaboración AGASA (Akeno Giant Air Shower Array), la cual contaba con la mayor cantidad de eventos de alta energía antes de la construcción del Observatorio Pierre Auger. AGASA reportó una anisotropía cerca de 10^{18} eV en la dirección del centro galáctico. Arriba de 10^{19} eV Takeda et al. (1999) [11] reportó una anisotropía no significativa con dirección de llegada en el plano galáctico. El número de eventos involucrados en esta anisotropía eran 3 de los 40 usados en el análisis y la probabilidad de que ocurriera este exceso era de menos del 1%. El detector fluorescente HiRes, el cual opera en la misma región energética que AGASA, no reportó ninguna anisotropía en un estudio con 271 eventos de energías mayores a 10^{19} eV [12]. Un estudio hecho por Letessier-Selvon et al. (2007) [13] con datos colectados por el Observatorio Pierre Auger en la dirección del centro galáctico y con energías alrededor de 10^{18} eV no mostró ninguna anisotropía lo que contradice lo reportado por AGASA.

La búsqueda por anisotropías puede aportar mucho. En el caso de ser confirmada, significaría el descubrimiento de fuentes de rayos cósmicos. Anisotropías debajo de 10^{20} eV mostrarían que los rayos cósmicos están compuestos mayoritariamente por protones o núcleos de helio.

1.4 Preguntas abiertas en Rayos Cósmicos

Aún cuando la investigación en rayos cósmicos comenzó hace un siglo con los trabajos de Hess, este campo sigue siendo uno de los más activos por la variedad de preguntas que siguen sin resolver. De las preguntas más importantes están la de su composición y espectro energético además de las interrogantes que surgen del hecho de que puedan alcanzar energías de hasta 10^{20} eV. En esta sección se presentan algunas cuestiones que siguen abiertas en la física de rayos cósmicos.

El origen, los mecanismos de aceleración y de propagación a través del medio interestelar de los rayos cósmicos son de los problemas más fundamentales de la cosmología hoy en día. Gran parte de los estudios experimentales en rayos cósmicos están enfocados en entender los mecanismos

de aceleración para rayos cósmicos de alta energía, identificando sus fuentes y tratando de clarificar las interacciones que tienen con el medio interestelar. Un entendimiento detallado de la forma en que se propagan y de como interactúan en el medio interestelar es necesario para inferir el espectro elemental inyectado por las fuentes a partir de lo observado en la Tierra. Los rayos cósmicos pueden ser divididos en primarios (H, He, C, O, Fe, etc.) que son los que provienen de las fuentes, y secundarios (Li, Be, B, Sc, Ti, V, etc.), que se producen de las interacciones de núcleos primarios con el medio interestelar. La cantidad de material atravesado por los rayos cósmicos desde que son generados hasta que son observados puede ser derivado si se miden los cocientes de núcleos secundarios a núcleos primarios tal como el cociente B/C. De igual forma, una buena precisión en las mediciones directas del espectro de energía de cada elemento en la región de la rodilla es necesaria para discriminar entre diferentes modelos astrofísicos propuestos para explicar los mecanismos de aceleración y propagación de los rayos cósmicos.

La presencia de antimateria en los rayos cósmicos es un fenómeno bien conocido desde el descubrimiento del positrón por Carl Anderson en 1932, que confirmó las predicciones de Paul Dirac de poco años antes. Debido a que el descubrimiento original de la antimateria se hizo en el ámbito de los rayos cósmicos era natural preguntarse si podían encontrarse otras antipartículas en los mismos. Desde los años 70, experimentos en rayos cósmicos han medido espectros de positrones y antiprotones, además de multitud de otras partículas. Sin embargo, ningún antinúcleo ha sido registrado hasta el momento. La aparente ausencia de antinúcleos como el antihelio o el anticarbono en el universo es uno de los más grandes acertijos de la física de partículas. Existen teorías que predicen tanto su existencia en dominios segregados como su total ausencia pero que carecen de información experimental para ser fundamentadas. En este contexto, las próximas mediciones experimentales son de vital importancia para resolver esta cuestión, bien a través del estudio de nuevos mecanismos de violación de CP en experimentos en aceleradores y con neutrinos que permitan fundamentar la desaparición de los antinúcleos en algún momento de la historia del Universo, o bien, a través de medidas aún más precisas de rayos gamma y cósmicos para confirmar su existencia.

Otra cuestión que aparece en todas las relaciones de problemas vigentes de la física actual y que está en conexión con los rayos cósmicos es la naturaleza de la materia oscura. Las observaciones cosmológicas muestran que un gran porcentaje de la materia del universo es materia oscura. Si la materia oscura, o una fracción de esta, es no bariónica y consiste en su mayoría de partículas no interactuantes como los neutralinos, esta puede ser detectada en rayos cósmicos por medio de su aniquilación a positrones o antiprotones, resultando en desviaciones (en el caso de antiprotones) o estructuras (en el caso de positrones) que pueden ser vistas en el espectro de rayos cósmicos si se cuenta con la suficiente precisión.

1.5 Experimentos recientes

En la actualidad existen una gran cantidad de experimentos orientados al estudio de los rayos cósmicos. Estos se pueden dividir en tres categorías: experimentos en tierra, experimentos en satélites y experimentos en globos. En la primera categoría se encuentra el Observatorio Pierre Auger, en la segunda categoría está el AMS y en la tercera está el experimento CREAM. Estos tres experimentos se discuten en las siguientes secciones.

1.5.1 Observatorio Pierre Auger

El Observatorio Pierre Auger es un observatorio internacional de rayos cósmicos localizado en la provincia de Mendoza en Argentina. El observatorio Pierre Auger fue diseñado para medir rayos cósmicos de energías mayores a 10^{20} eV utilizando una área de detección de más de 3000 km^2 . Con esto se busca entender el origen y la naturaleza de los rayos cósmico de ultra alta energía, así como la física detrás de sus mecanismos de aceleración y propagación. En este proyecto colaboran más de 500 físicos de 90 instituciones alrededor del mundo. Para medir los rayos cósmicos de tan alta energía, el observatorio detecta las cascadas atmosféricas extensas iniciadas por estos rayos por medio de dos técnicas: un SD (surface detector array, arreglo de detectores en la superficie) y un FD (fluorescence detector, detector de fluorescencia). El SD consiste en una arreglo de 1600 detectores Cherenkov de agua cubriendo más de 3000 km^2 . El FD detecta el desarrollo de una cascada atmosférica gracias a la luz ultravioleta emitida por las partículas cargadas cuando interactúan con el nitrógeno presente en la atmósfera.

Por su extensión, el Observatorio Pierre Auger puede registrar cerca de 30 eventos de ultra alta energía por año. La colaboración está desarrollando planes para construir un observatorio más grande en Colorado, USA lo que ampliará la cobertura del cielo e incrementará sustancialmente el número de rayos cósmicos detectados de gran energía.

1.5.2 AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

El AMS es un detector de rayos cósmicos montado en la Estación Espacial Internacional que fue diseñado para medir rayos cósmicos en la región de TeV. Entre los objetivos principales del AMS esta la búsqueda de antinúcleos y materia oscura, y el estudio sistemático y de alta precisión de los espectros de rayos cósmicos para entender su propagación. El detector esta planeado para operar por al menos 10 años. Consiste en un espectrómetro magnético capaz de detectar partículas cargadas en un rango que va de unos cuantos cientos de MeV hasta la región de TeV, núcleos cargados hasta el Hierro y rayos gamma. El tiempo de exposición que tendrá el detector permitirá una gran cantidad de estadística en las mediciones de rayos cósmicos además de que aumentará de manera sustancial la sensibilidad en las búsquedas de antimateria y materia oscura.

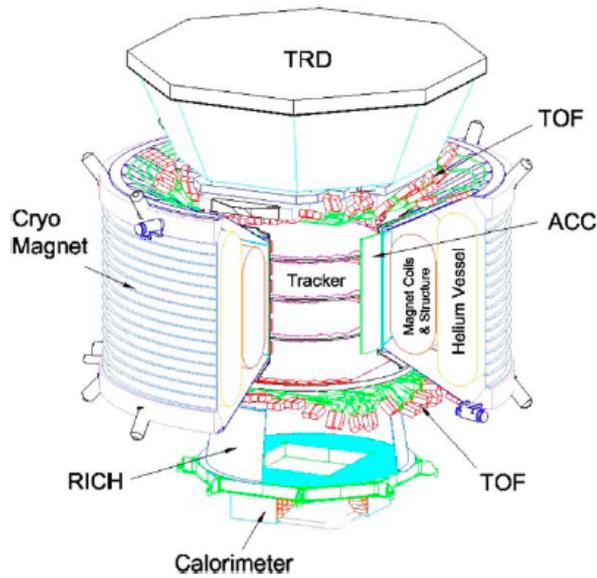


Figura 1.3: Vista completa de AMS.

El detector utiliza el espectrómetro para producir un campo magnético fuerte y uniforme que dobla la trayectoria de las partículas cargadas. Como se muestra en la figura 1.3, el AMS también cuenta con un TRD (Transition Radiation Detector) que mide las velocidades de las partículas de mayor energía, un TOF (Time of Flight) para determinar la carga y velocidad, un Silicon Tracker para reconstruir trayectorias, un RICH (Ring Image Cerenkov Counter) que mide carga y velocidad, y un ECAL (Electromagnetic Calorimeter) para medir energía y posición de electrones, positrones y rayos gamma. El AMS también utiliza un sistema GPS y dos sistemas para la orientación del módulo en el espacio. Toda la información procesada por el detector se manda a la Tierra utilizando la infraestructura de la Estación Espacial Internacional.

Capítulo 2

El experimento CREAM-III

El experimento CREAM-III (Cosmic Ray Energetics and Mass, tercera misión) fue diseñado para medir el espectro de elementos químicos de los rayos cósmicos utilizando un globo de ultra larga duración. El instrumento cuenta con sistemas de identificación de carga y energía redundantes y complementarios que permiten mediciones precisas del espectro de elementos para núcleos con $Z = 1 - 26$ en rangos de energía de $10^{11} - 10^{15}$ eV. El objetivo principal del experimento CREAM es el estudio de las características espectrales de los rayos cósmicos y la abundancia de los diferentes elementos. El instrumento CREAM ha volado 6 veces desde 2004. El instrumento CREAM-III (figura 2.1) voló desde el 19 de Diciembre de 2007 hasta el 17 de Enero de 2008 y tuvo aproximadamente 29 días de vuelo.

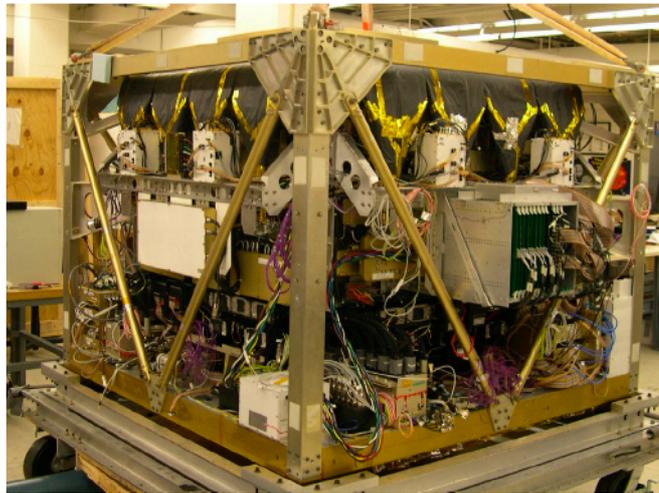


Figura 2.1: Foto del instrumento CREAM durante su integración

2.1 Detectores

El instrumento CREAM-III consiste en una serie de detectores de partículas que pueden determinar la carga y la energía de las partículas incidentes. Los detectores que conforman el instrumento se muestran en la figura 2.2 y son un calorímetro de placas de tungsteno y fibras centelladoras, un SCD (Silicon Charge Detector), un CherCam (cámara Cherenkov), un CD (Cherenkov Detector) y un TCD (Timing Charge Detector). El calorímetro se encarga de medir la energía incidente de los núcleos que interactúan en unos blancos de grafito localizados directamente arriba de este, mientras que para la identificación de la carga de las partículas incidentes se utilizan SCD, CherCam, TCD y CD.

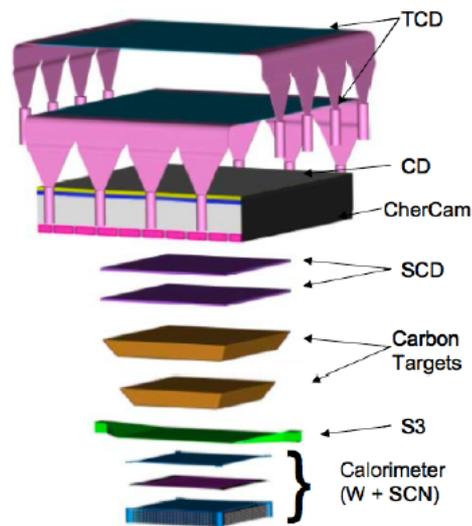


Figura 2.2: Configuración del instrumento CREAM-III

2.1.1 Calorímetro

El instrumento CREAM utiliza un calorímetro de muestreo (sampling calorimeter). En este tipo de calorímetro las funciones de absorción de partículas y de generación de señales son realizadas por dos materiales diferentes conocidos como medio pasivo y medio activo. El medio pasivo suele ser un material de alta densidad como plomo, hierro o cobre mientras que el medio activo puede ser un centellador, un líquido ionizante o una cámara de gas. El medio pasivo del calorímetro de CREAM es tungsteno mientras que el medio activo son fibras centelladoras de plástico.



Figura 2.3: Foto del calorímetro debajo de los blancos de grafito.

El calorímetro consiste en una pila de 20 placas de tungsteno de 50 x 50 x 0.35 cm³ con una profundidad total de 20 longitudes de radiación (X_0). Después de cada placa hay un arreglo de 50 lazos centelladores de 1 cm de ancho y 50.3 cm de largo. Cada lazo tiene 19 fibras centelladoras de 0.5 mm de diámetro y está orientado de forma perpendicular al vecino lo que permite hacer reconstrucciones de trayectorias en los planos X-Y y Y-Z.

2.1.2 SCD (Silicon Charge Detector)

El SCD está diseñado para identificar la carga de partículas incidentes por medio de la energía perdida en el silicón. Este detector utiliza segmentación fina para minimizar el ruido de partículas retrodispersadas generadas por la interacción de partículas incidentes con los blancos de carbono justo debajo de este.

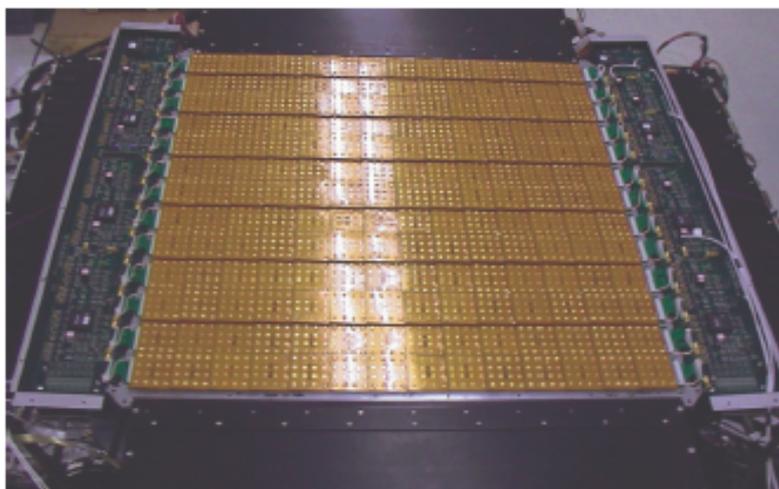


Figura 2.4: Foto del SCD

El SCD es un arreglo doble de sensores de Silicio diseñados para identificar la carga de los núcleos incidentes por medio de la dependencia en Z^2 de una ionización específica en los sensores. Estos sensores son arreglos de 4x4 pixeles con una área activa de 2.1 cm² y consisten en dos capas separadas por una distancia vertical de 4 cm. Cada capa tiene una área activa de 0.52 m². El SCD tiene un rango que permite medir cargas de $Z=1$ (Hidrógeno) a 26 (Hierro).

2.1.3 CherCam (Cámara Cherenkov)

El detector CherCam utiliza el principio de radiación Cherenkov para medir la carga de las partículas incidentes. Esta radiación Cherenkov es emitida por partículas cargadas que pasan a través de un medio dieléctrico con una velocidad mayor a la velocidad con la que viaja la luz en dicho medio. El número de fotones emitidos por la partícula es proporcional al cuadrado de su carga, lo que permite su identificación.

El material dieléctrico o radiador utilizado en CherCam es un gel de sílica conocido como aerogel. El aerogel tiene un índice de refracción $n=1.05$ y está colocado a lo largo de un plano de 20.8 mm de espesor. Este plano radiador está separado 12 cm del plano de detección de fotones. El plano de detección consiste en un arreglo cuadrangular de 1600 tubos fotomultiplicadores (PMT's). Los PMT's están distribuidos en 25 módulos de 4 bloques con 16 PMT's cada bloque.

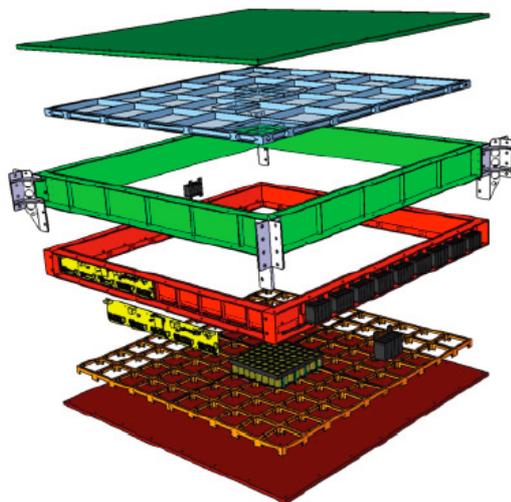


Figura 2.4: Vista en CAD de la estructura del CherCam

2.1.4 TCD (Timing Charge Detector) y CD (Cherenkov Detector)

El TCD mide la luz producida por la pérdida de energía de las partículas incidentes en el centellador. El TCD utiliza mediciones en el tiempo de llegada de las partículas incidentes para determinar su carga y discriminar partículas retrodispersadas. Está diseñado para medir la carga de las partículas desde el Helio hasta el Hierro. Al TCD llegan señales de luz de las partículas primarias con 3ns de antelación con respecto a la luz de las partículas retrodispersadas. Esto es utilizado por una electrónica súper rápida para separar las dos señales.

El TCD consiste en dos capas, cada una con cuatro paletas centelladoras de $120 \times 30 \times 0.5 \text{ cm}^3$. Estas paletas están orientadas con sus ejes mayores perpendiculares entre sí. Cada paleta tiene guías de onda pegadas a cada uno de sus dos extremos conectadas a tubos multiplicadores. Las señales que llegan a cada tubo se registran y se hace pasar por un TDC (Time to Digital Converter) que digitaliza el tiempo que dura el pulso de luz y por un ADC (Analog-to Digital Converter) que digitaliza el nivel del pico. Ambas mediciones son proporcionales al cuadrado de la carga de la partícula incidente.

El CD es una capa de plástico acrílico con índice de refracción $n=1.5$ que está localizado entre el TCD y el CherCam. Se utiliza para discriminar las partículas no relativistas. El CD también permite determinar la carga de las partículas incidentes por medio de su radiación Cherenkov tal como lo hace el CherCam.

Capítulo 3

GEANT4

GEANT4 (acrónimo de GEometry ANd Tracking) es un paquete computacional gratuito desarrollado en el CERN, compuesto de herramientas que pueden ser utilizadas para simular de forma acertada el paso de partículas a través de materia. Se utiliza en una gran cantidad de experimentos y proyectos de distintas áreas como lo son la física de altas energías, astrofísica y física médica. Los aspectos del proceso de simulación que se han incluido en el paquete de herramientas incluye:

- La geometría del sistema,
- Los materiales involucrados,
- Las partículas fundamentales de interés,
- La generación de eventos primarios,
- El seguimiento de partículas a través de materiales y campos electromagnéticos,
- Los procesos físicos que gobiernan las interacciones entre partículas,
- La respuesta de los componentes sensibles de un detector,
- La generación de datos de eventos,
- El almacenamiento de eventos y trayectorias,
- La visualización de el detector y las trayectorias de las partículas, y
- La captura y análisis de datos de la simulación en diferentes niveles de detalle y refinamiento.

GEANT4 esta escrito en C++ y explota técnicas de ingeniería de software y tecnología orientada a objetos para alcanzar transparencia. Un problema que presentaban otros códigos de simulación era la dificultad de añadir o hacer variaciones de modelos físicos, su desarrollo era intrincado dado el tamaño, complejidad e interdependencia de los códigos basados en procesos. Los métodos orientados a objetos disminuyen la complejidad y limitan la dependencia por medio de la definición de una interfaz uniforme y principios de organización comunes para todos los modelos físicos. Con este marco de trabajo la funcionalidad de los modelos puede ser reconocida y entendida con mayor facilidad, y la creación y adición de nuevos modelos es un proceso bien definido que requiere poca o nula modificación de los códigos existentes.

3.1 Estructura global

El diseño de GEANT4 incluye 17 categorías mayores. La figura 3.1 muestra las categorías del nivel superior e ilustra como cada categoría depende de otras.

Las categorías en la parte inferior del diagrama son usadas por casi todas las categorías superiores y son la base de GEANT4. En estas se incluye la categoría *global* que contempla los sistemas de unidades, constantes, caracteres

numéricos y el manejo de números aleatorios; *materials*; *particles*; *graphical representations*; *geometry* que incluye los volúmenes para la descripción de detectores y la navegación para el modelo geométrico; e *intercoms* que proporciona maneras de interactuar con GEANT4 a través de un interfaz de usuario y formas de comunicación entre módulos independientes.

Arriba de estas se encuentran las categorías que describen las trazas de las partículas y los procesos que experimentan. La categoría *track* contiene clases para seguimientos y pasos utilizados por *processes*, la cual contiene implementaciones de modelos de interacciones físicas tales como interacciones electromagnéticas o hadrónicas. La categoría *tracking* puede invocar todos estos procesos y manejar su contribución en la evolución del estado de una traza además de proporcionar información de volúmenes sensibles a *digits+hits*.

La categoría *event* maneja los eventos en términos de sus trazas y *run* maneja colecciones de eventos que comparten un haz e implementación de detectores comunes. La categoría *readout* permite el manejo de colecciones de información.

Finalmente, todas las opciones que permiten utilizar las categorías ya mencionadas y conectarse a recursos fuera de GEANT4 vienen de parte de las categorías *visualisation*, *persistence* y *interface*.

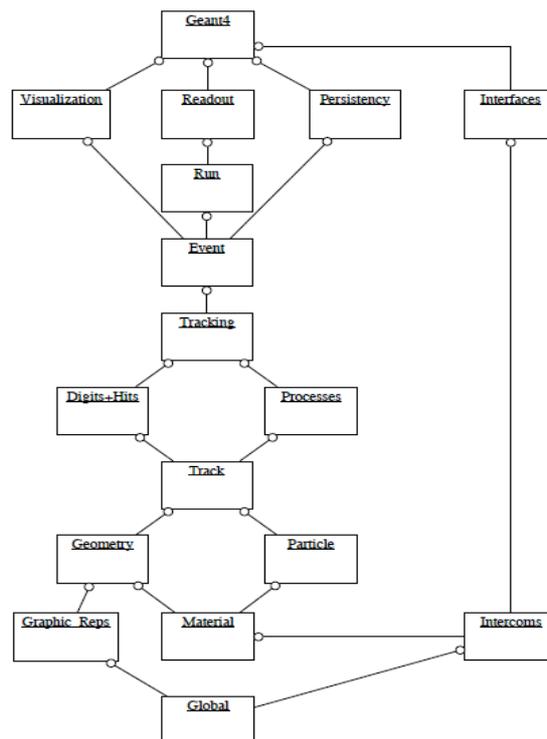


Figura 3.1: Categorías de GEANT4

Capítulo 4

Análisis de datos CREAM-III

Los datos proporcionados de CREAM-III consistieron en 31 carpetas, correspondientes a los días que duró el vuelo. Cada carpeta contenía un conjunto de archivos con las señales que dejaba cada evento en los detectores del instrumento. El programa `cream3`, basado en C++, tomaba estos archivos y reconstruía la información de los eventos tal como su carga, energía depositada o dirección. Todo esto se guardaba en un archivo ROOT que facilitaba su manipulación. Entre las variables contenidas en el archivo ROOT están la carga reconstruida por el SCD, la energía depositada en el calorímetro, los ángulos azimutal y de inclinación reconstruidos por el calorímetro, entre otras.

Para el análisis de los datos, se usó la regla de selección de eventos utilizada en el análisis de espectros de protones y helio de CREAM-III [9] la cual consistió en seleccionar aquellos eventos que tuvieran una energía depositada mayor a 15 MeV en 6 placas consecutivas del calorímetro. Solo un 6% de los eventos disponibles cumplieron con esta condición. A partir de estos datos se hicieron 3 análisis: de la carga reconstruida en el SCD, de la energía depositada en el calorímetro y de los ángulos azimutal y de inclinación. Para el análisis de la energía se utilizó además la simulación de GEANT4 de CREAM-III que se discute a mayor detalle en el capítulo 5.

4.1 Programa `cream3`

El programa `cream3` fue hecho en conjunto por el grupo de rayos cósmicos de la Universidad de Maryland y por Laurent Derome del LPSC de Grenoble con la finalidad de facilitar el manejo de los eventos registrados por el detector CREAM. Este programa utilizaba los archivos generados durante el vuelo CREAM-III para obtener las variables correspondientes a cada evento como su carga o energía depositada. El programa estaba hecho en C++ y consistió en una serie de clases que leían los archivos del vuelo y analizaban los datos contenidos en dichos archivos de acuerdo al detector correspondiente. Para cada detector existían una serie de tareas (tasks) que procesaban los datos y generaban las variables propias del detector. La clase que administraba estas tareas era `CreamTVirtual`. Las clases `CreamTCALdata`, `CreamTCALana`, `CreamTSCDdata` y `CreamTSCDana` eran subclases de `CreamTVirtual`. y se encargaban de hacer los análisis para obtener la carga, energía y ángulos de incidencia de cada evento.

En la clase `CreamTCALdata` se procesaba la información de los pixeles impactados por las partículas que pasaban por el calorímetro. A partir de esta información se generaban arreglos con las posiciones en X y Y de los pixeles impactados, la placa y el lazo en el que se encontraban y la energía depositada en cada píxel. Estos arreglos los utilizaba la clase `CreamTCALana` para reconstruir la energía depositada y la trayectoria de las partículas detectadas. La energía

depositada se obtenía de sumar la energía de cada píxel impactado. La trayectoria de las partículas se reconstruía por medio de un ajuste lineal de los pixeles con mayor energía depositada en cada placa.

La forma en que se reconstruía la carga de las partículas en el SCD seguía un proceso parecido al que se daba en el calorímetro. La clase CreamTSCDdata obtenía la posición y energía depositada de los pixeles impactados en las dos capas del SCD: top SCD y bottom SCD mientras que CreamTSCDana se encargaba de reconstruir la carga en el top y el bottom SCD de forma independiente calculando la longitud del camino recorrido por la partícula a partir de los pixeles impactados en cada capa. La carga de la partícula se estimaba con un promedio de estas dos mediciones.

4.2 Análisis de carga

El primer análisis que se hizo con los datos de CREAM-III fue el de la carga reconstruida en el SCD. Los sistemas de identificación de carga de CREAM permiten medir cargas de hasta $Z=26$ (figura 4.1) pero este trabajo solo se enfocó en protones.

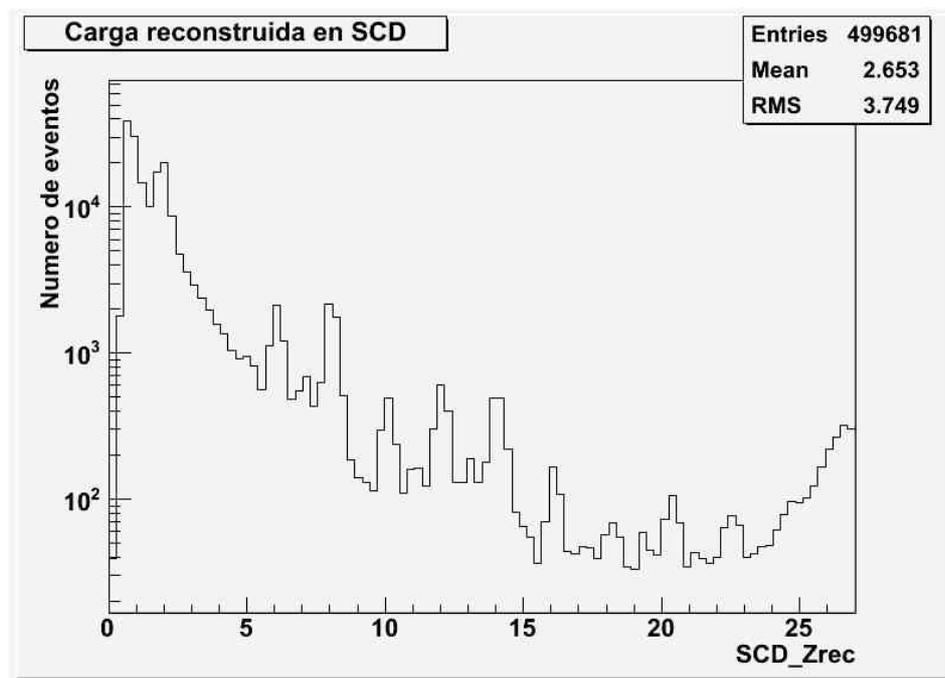


Figura 4.1: Carga reconstruida en el SCD.

Se utilizó como referencia la tesis doctoral de Young Soo Yoon sobre los espectros de protones y helio de CREAM-I [15] para definir como protones a todos aquellos eventos que tuvieran una carga en el SCD menor a 1.7. A partir de esta condición y seleccionando los eventos que depositaran al menos 15 MeV en 6 o más capas consecutivas del calorímetro, se graficaron la energía reconstruida y los ángulos azimutal y de inclinación.

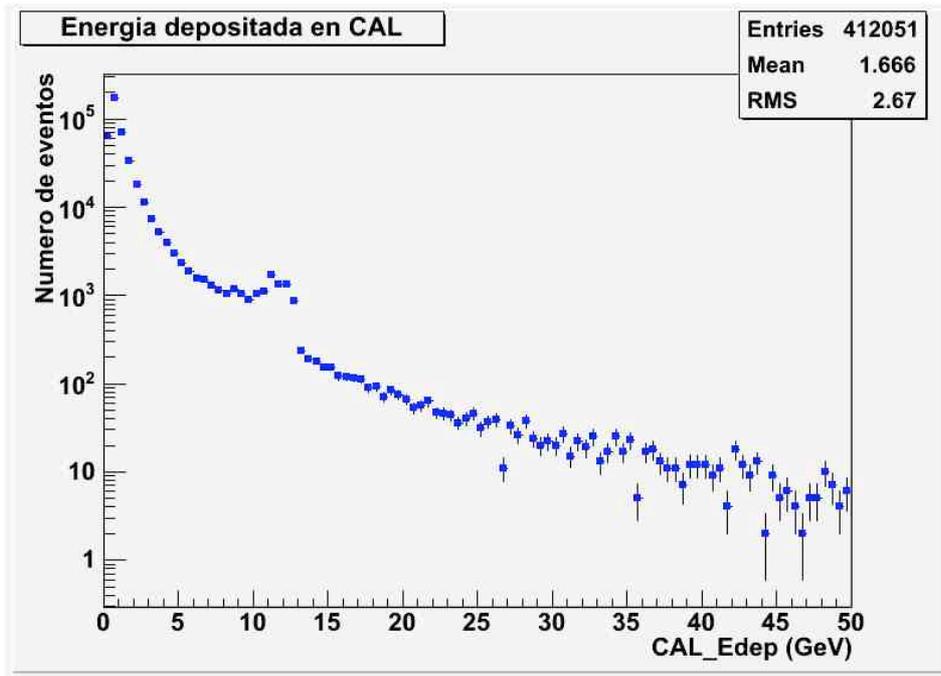


Figura 4.2: Energía depositada en calorímetro para eventos con $Z < 1.7$.

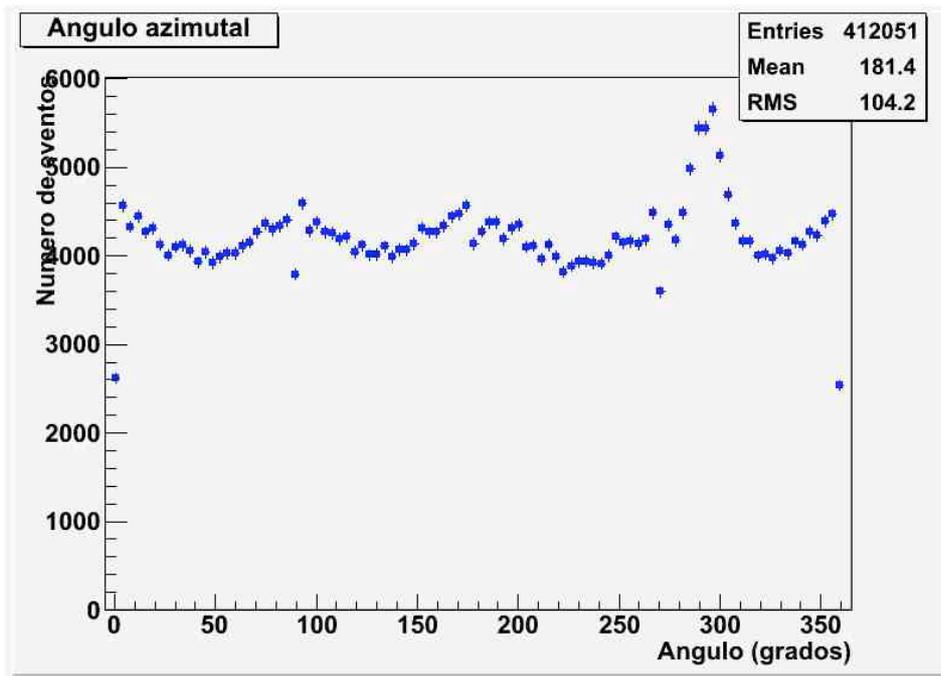


Figura 4.3: Ángulo azimutal para eventos con $Z < 1.7$.

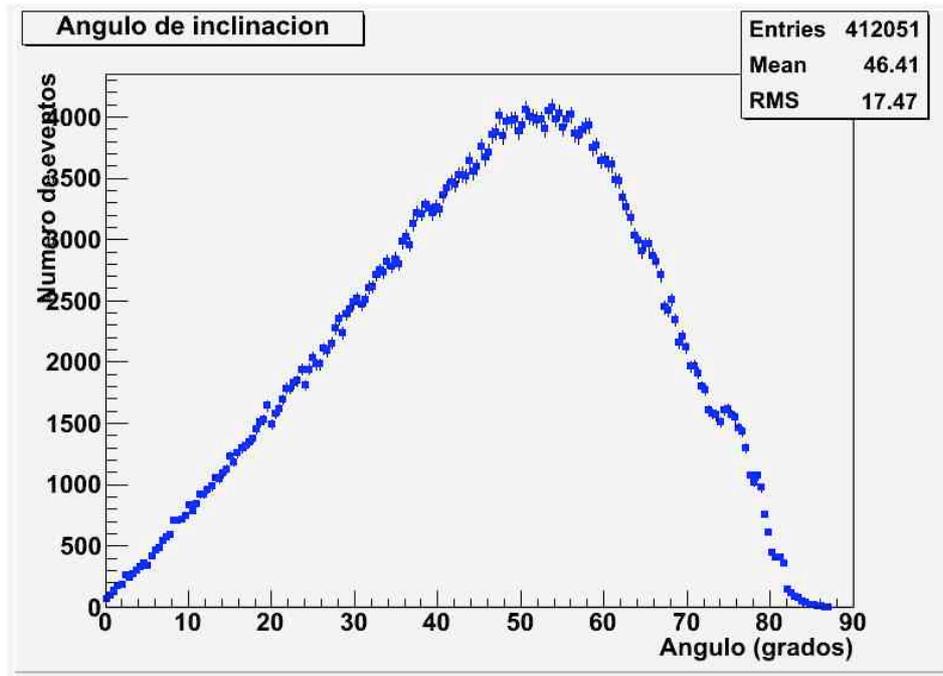


Figura 4.4: Ángulo de inclinación para eventos con $Z < 1.7$.

Como muestran las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 las distribuciones angulares y el espectro de energía presentaron un comportamiento normal pero ciertas características llamaron la atención. La energía tuvo un pequeño salto entre los 10 y 15 GeV, mientras que el ángulo azimutal presentó un pico muy pronunciado alrededor de 300° . El comportamiento más inusual lo presentó el ángulo de inclinación que se extendió hasta casi 90° lo cual se interpretó como que se estaban reconstruyendo trayectorias casi perpendiculares al eje del instrumento. Al hacer un análisis exhaustivo de los datos, se descubrió que la causa de las tres anteriores características eran los cerca de 314,000 eventos con carga asignada $Z = -1$ en el SCD (figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8). Que un evento tuviera este valor en la carga se debía a que había una diferencia mayor a 1.3 entre la carga reconstruida en el top SCD y el bottom SCD o que alguna de las dos tenía el valor de inicialización -1. Esta condición marcaba a los eventos mal reconstruidos para que fueran descartados con mayor facilidad, además de que garantizaba que los eventos con una carga asignada pasaban por todo el SCD.

Es importante mencionar que de los casi 500,000 eventos que pasaron la condición en la energía depositada, solo un 18% fueron útiles, el resto no pudieron ser considerados por falta de un carga asignada. Los posteriores análisis solo se referirán a esta porción de los datos.

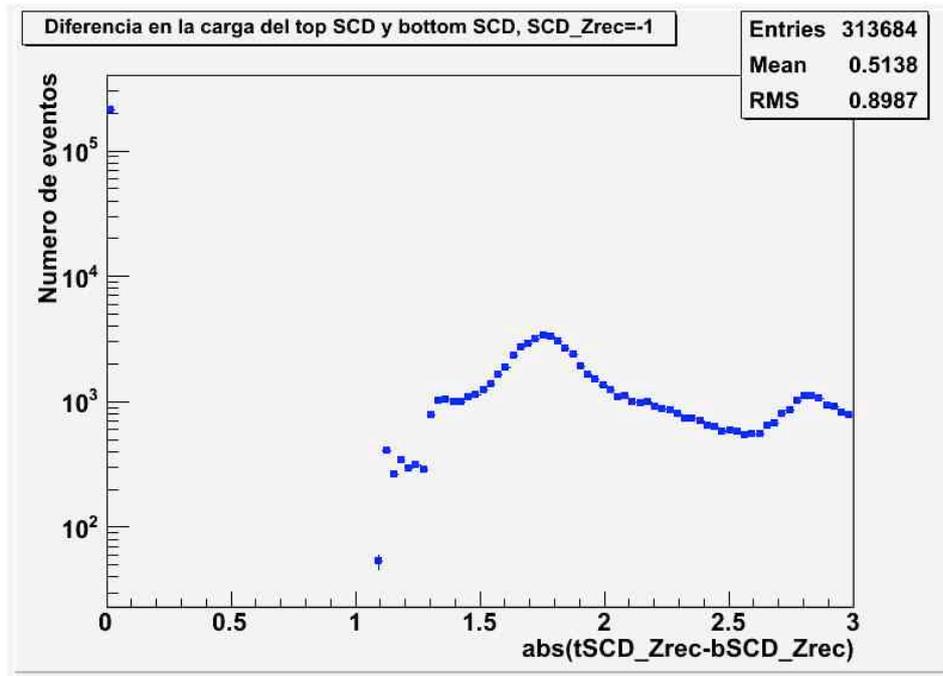


Figura 4.5: Diferencia en la carga reconstruida en el top SCD y el bottom SCD para eventos con $Z=-1$.

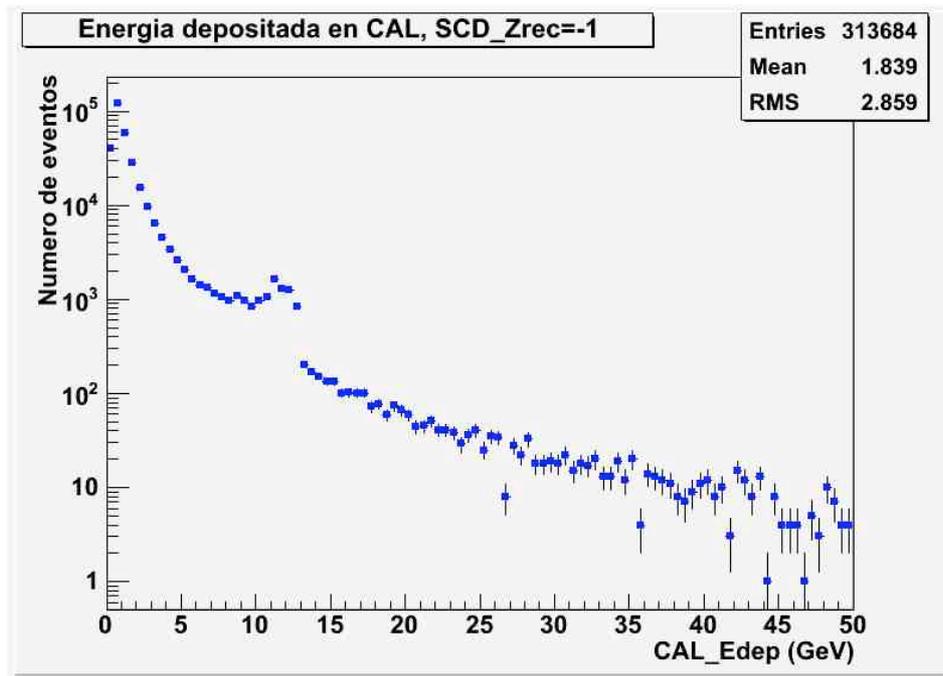


Figura 4.6: Energía depositada en calorímetro para eventos con $Z=-1$.

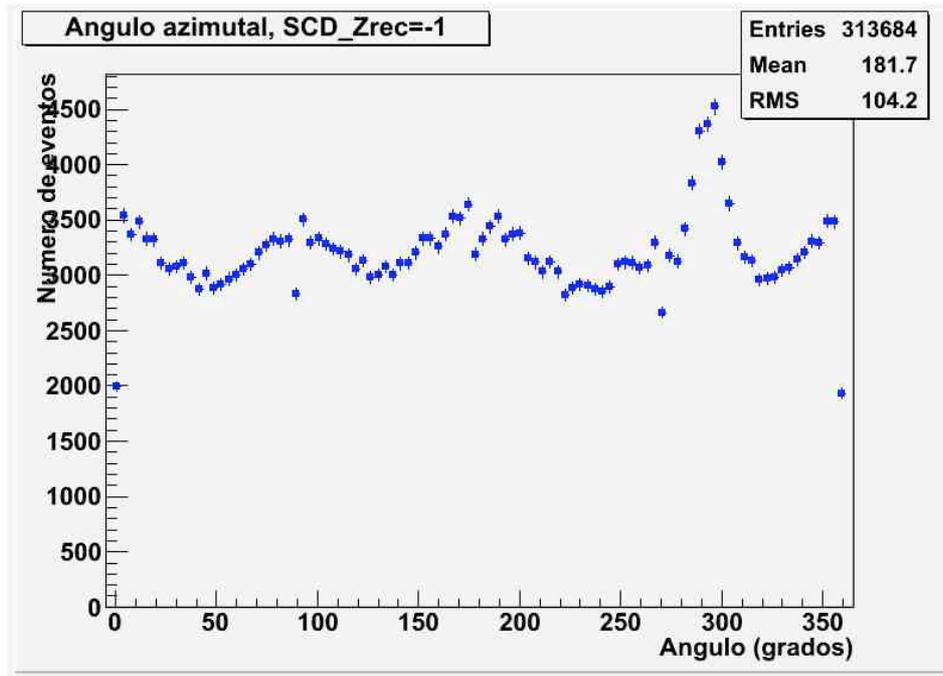


Figura 4.7: Ángulo azimutal para eventos con Z=-1.

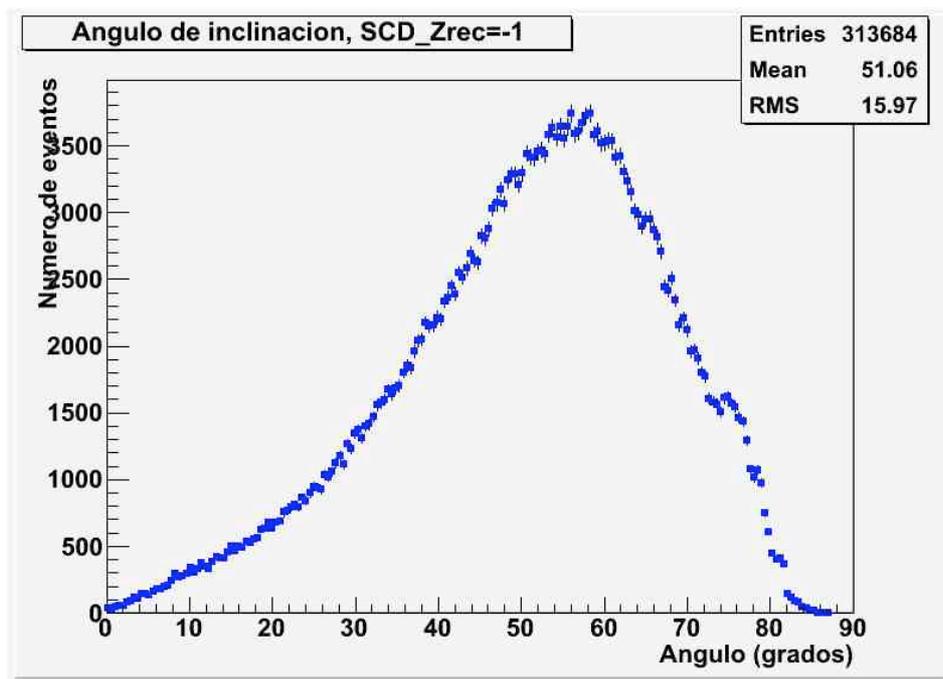


Figura 4.8: Ángulo de inclinación para eventos con Z=-1.

4.3 Análisis de energía

El siguiente análisis fue el hecho a la energía depositada. Este análisis era muy importante ya que la intención original de este trabajo era hacer un estudio de las distribuciones angulares de las partículas incidentes en función de su energía. La motivación de esto era ver si existía una dependencia de los ángulos con la energía del evento dado que el tamaño de la cascada producida por una partícula aumenta con respecto a su energía y esto podría afectar la forma en que se reconstruye su trayectoria. Debido a que el programa de análisis cream3 no incluía una rutina para estimar la energía incidente de cada evento, se trató de reconstruir la energía incidente a partir de la energía depositada (figura 4.9) en el calorímetro.

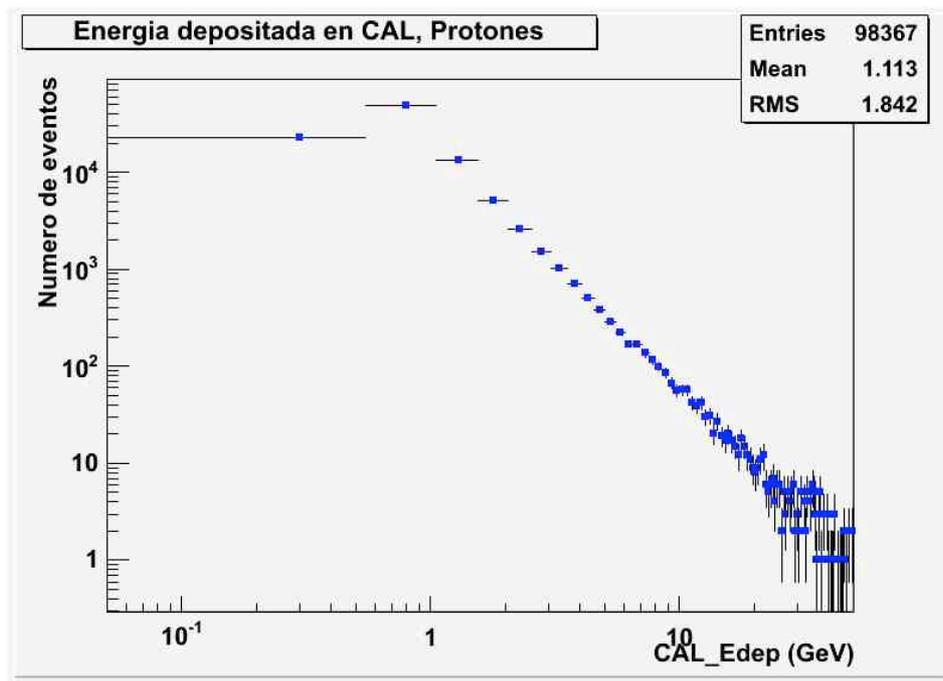


Figura 4.9: Energía depositada en el calorímetro para protones a partir de los datos de CREAM-III

De nuevo, la referencia utilizada fue lo hecho por Young Soo Yoon sobre los datos de CREAM-I [15]. En este trabajo, la reconstrucción de la energía incidente se realizó utilizando una simulación de Monte Carlo para generar una matriz que deconvolucionaba la energía depositada en el calorímetro de cada evento en su energía incidente correspondiente. Las entradas de esta matriz dependían de la probabilidad P_{ij} de que un evento con una energía depositada i tuviera una cierta energía incidente j . Desafortunadamente no se pudo tener acceso a dicha simulación por lo que se buscó una alternativa para obtener una estimación de la energía incidente utilizando la simulación de GEANT4 que se tenía a disposición. De esta simulación se aprovecharon las opciones de dirección de incidencia y de selección de espectro de energía para incidir haces monoenergéticos con dirección vertical sobre el instrumento y ver el comportamiento de la energía depositada en el calorímetro para una determinada energía de incidente.

El rango escogido para la energía incidente fue de 200 GeV hasta 6 TeV. El rango de la energía depositada fue siempre creciendo de acuerdo a la energía incidente utilizada (figura 4.10), para 200 GeV fue de 200 MeV hasta 1.7 GeV mientras que para 6 TeV, llegó hasta 50 GeV. A partir de lo obtenido para diferentes energías incidentes, se hizo un ajuste lineal de los datos para obtener una ecuación que permitiera pasar de la energía depositada a la energía incidente. Con esta ecuación y energía depositada total se estimaría la energía incidente de cada evento. La ecuación obtenida fue

$$E_{inc} = 312.5E_{dep} - 95.41$$

con E_{inc} como la energía incidente de la partícula y E_{dep} la energía depositada en el calorímetro, ambas en GeV. Esta ecuación se utilizó en la energía depositada de los datos y se graficó la energía incidente

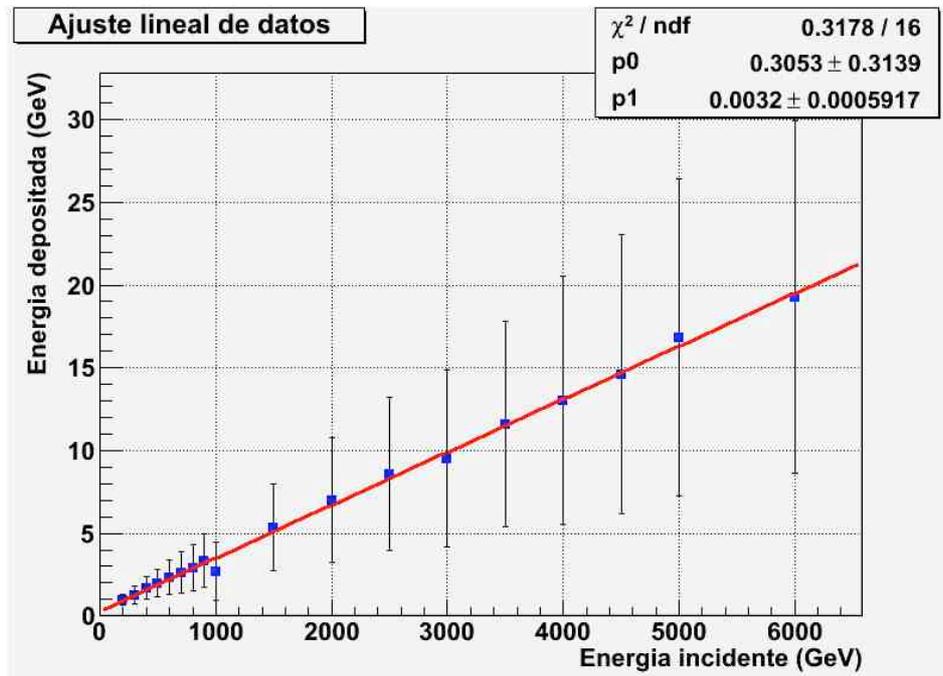


Figura 4.10: Ajuste lineal a los datos de energías depositada e incidente.

La incertidumbre tan grande que presentó la energía depositada de la simulación para el rango de energía que tenían los datos fue la razón principal por la que se decidió prescindir de este método para estimar la energía incidente.

4.4 Análisis de distribuciones angulares

Una vez entendidas las formas en que funcionan la carga y la energía, se procedió a analizar las distribuciones angulares de los datos. Se buscaron aquellos eventos que depositaran más de 15 MeV en 6 placas consecutivas del calorímetro y cuya carga en el SCD estuviera entre 0 y 1.7.

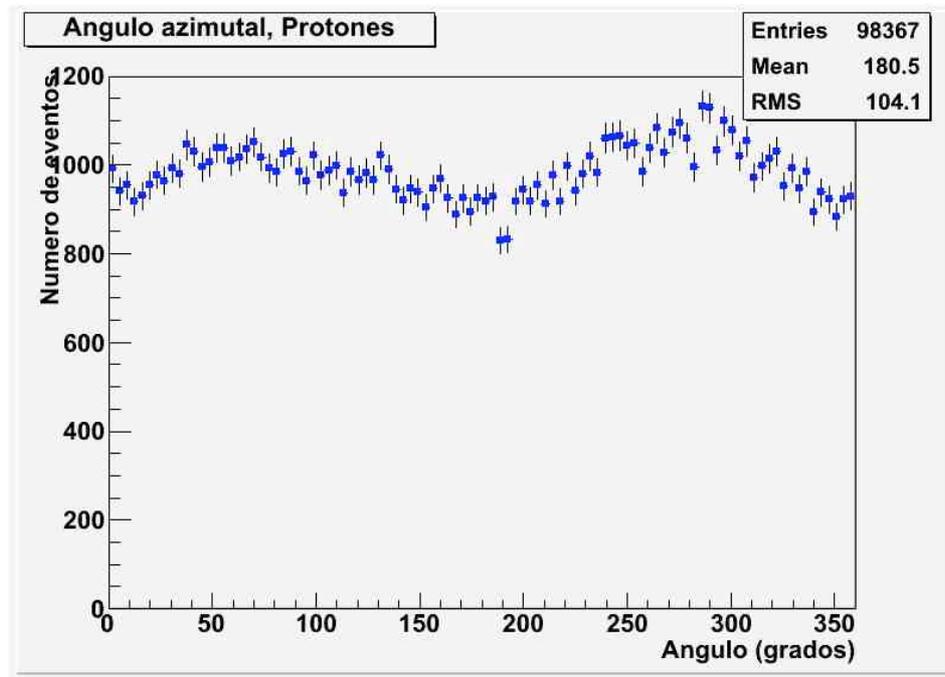


Figura 4.12: Ángulo azimutal del calorímetro para protones.

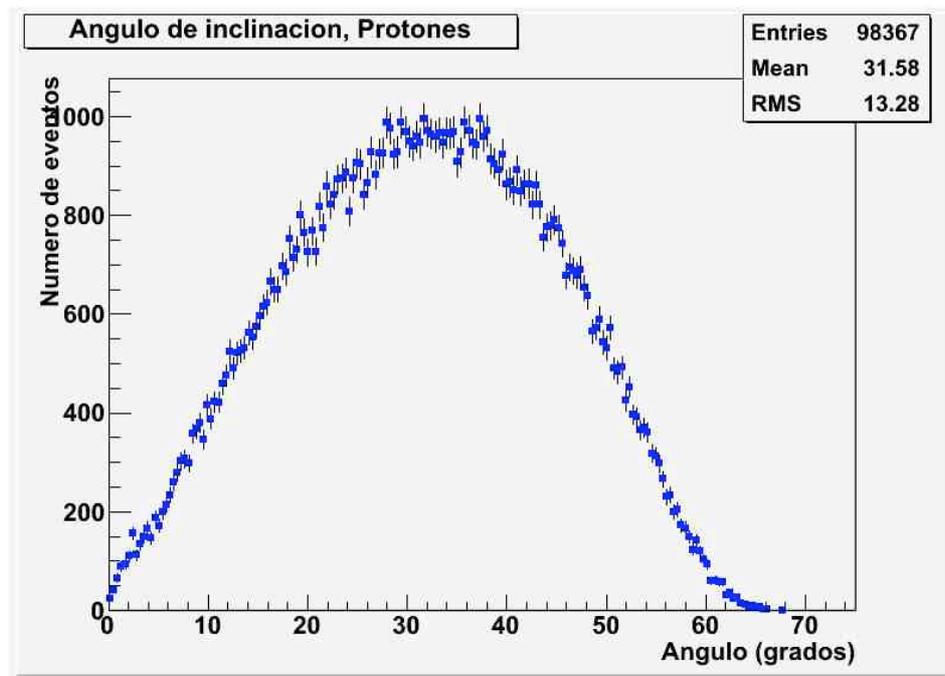


Figura 4.13: Ángulo de inclinación del calorímetro para protones.

El ángulo azimutal (figura 4.12) presentó dos máximos y tres mínimos. Uno de los máximos estuvo alrededor de 70° y el otro cerca de 290° . Los mínimos estuvieron en 180° , en 0 y en 360° . Estos últimos mínimos se pueden considerar el mismo ya que se espera que el ángulo azimutal sea una función periódica. Tomando como referencia un cuadrado y colocando 0 en el punto medio de uno de los lados, los mínimos se localizan en los puntos medios de un par de lados opuestos mientras que los máximos, al ser mas amplios, se presentan a lo largo de los lados restantes. Una posible razón de que solo aparecieran dos máximos y dos mínimos es que el calorímetro no detectó correctamente en zonas cercanas a los bordes, lo que hizo que se contarán más eventos para ciertos ángulos pero no necesariamente que llegarán más eventos con estos valores.

El ángulo de inclinación (figura 4.13) solo presentó un máximo cerca de 32° y dos ceros: uno en 0 y otro en 68° . El primer cero aparece por que en el ángulo sólido no hay apertura en 0 y por lo tanto no hay captación de partículas. El segundo cero se debe a que la geometría del instrumento solo permite que partículas con valores menores a un ángulo de corte lleguen hasta el fondo. En este caso el ángulo de corte fue 68° .

Capítulo 5

Simulación en GEANT4 de CREAM-III

Después de estudiar las distribuciones angulares de los datos de CREAM-III se utilizó una simulación de GEANT4 para tratar de entender el comportamiento de dichas distribuciones. Esta simulación incluía una recreación detallada de la geometría del instrumento y de cada uno de los componentes que lo conformaban además de que era posible hacer incidir partículas cargadas como protones o núcleos pesados. Entre las condiciones que era posible modificar en la simulación estaban el tipo de partícula incidente, la dirección con la que incidían en la parte de arriba del instrumento y el tipo de espectro energético. Se escogieron protones con dirección incidente isotrópica y con espectro de energía plano en el logaritmo de la energía para asemejar las condiciones de CREAM-III. A los datos obtenidos de la simulación se les aplicó la selección de eventos utilizada para los datos de CREAM-III, esto es, se escogieron aquellos que depositaran más de 15 MeV en seis placas consecutivas del calorímetro.

5.1 Simulación de GEANT4

La simulación de GEANT4 consistió en una serie de clases escritas en C++. Cada clase tenía una determinada función en la simulación pero era posible dividir las en dos categorías, las que contenían información del instrumento, de las partículas y de los procesos a incluir en la simulación y las propias de la simulación, que eran aquellas que aprovechaban las características de GEANT4 para dar seguimiento a las trayectorias de cada partícula. A la primera categoría pertenecieron `CreamDetectorConstruction`, `CreamExtraPhysicsList` y `CreamPrimaryGeneratorAction` mientras que la segunda categoría la conformaron `CreamRunAction`, `CreamEventAction`, `CreamTrackingAction` y `CreamStackingAction`. La geometría y materiales de cada detector estaban definidos en `CreamDetectorConstruction`. En `CreamExtraPhysicsList` se definieron las partículas y procesos que se utilizaron en la simulación. La clase `CreamPrimaryGeneratorAction` incluía el tipo de partículas, de espectro de energía y de dirección de incidencia que se podía utilizar para los eventos primarios. La clase `CreamRunAction` contenía las acciones para antes y después de cada corrida mientras que `CreamEventAction` tenía lo que se hacía antes y después de un evento. Las clases `CreamTrackingAction` y `CreamStackingAction` sirvieron para definir los atributos de cada trayectoria además de que contenían los métodos con los que se les podía manipular y dar seguimiento.

Además de estas clases, estaba la clase `CreamAnalysis` cuya función era generar un archivo ROOT que contenía la información de cada corrida. Entre las variables que tenía este archivo estaban la posición, dirección y energía asignada a los eventos primarios además de la energía que depositaban en el calorímetro.

5.2 Datos simulación GEANT4

Se hizo una corrida con protones lanzados con dirección isotrópica en la parte superior del instrumento y con un espectro de energía plano en \log_{10} y se graficó el ángulo azimutal y de inclinación de aquellos que llegaban hasta el fondo del calorímetro. Para saber que eventos llegaban hasta el fondo se aplicó la misma selección que se utilizó en los datos y que consistió en escoger los eventos que dejaban más de 15 MeV en 6 capas consecutivas del calorímetro.

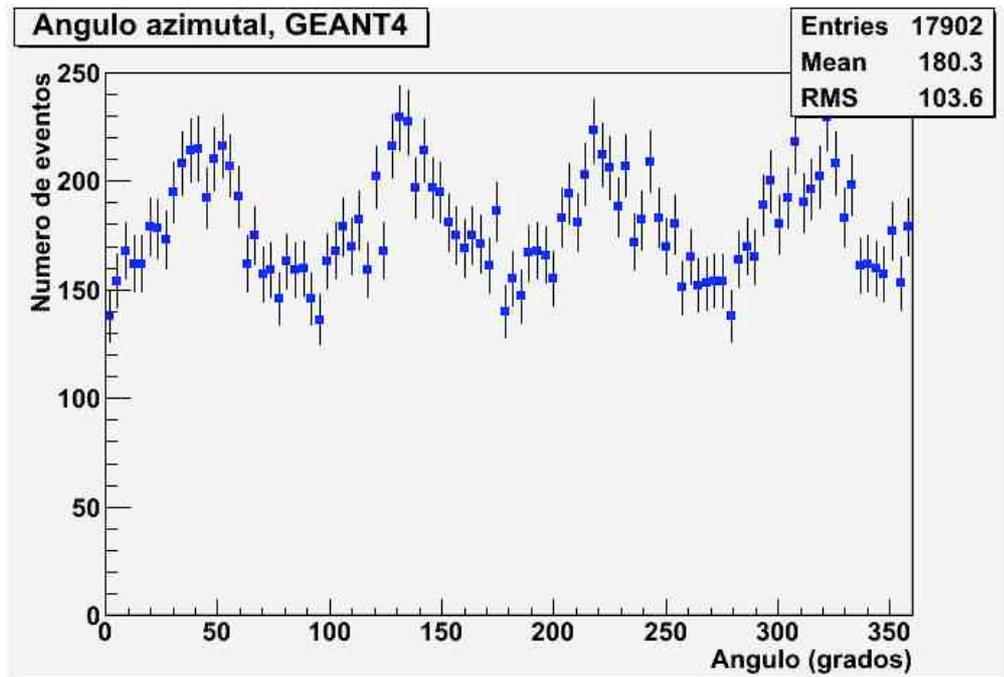


Figura 5.1: Angulo azimutal a partir de simulación de GEANT4.

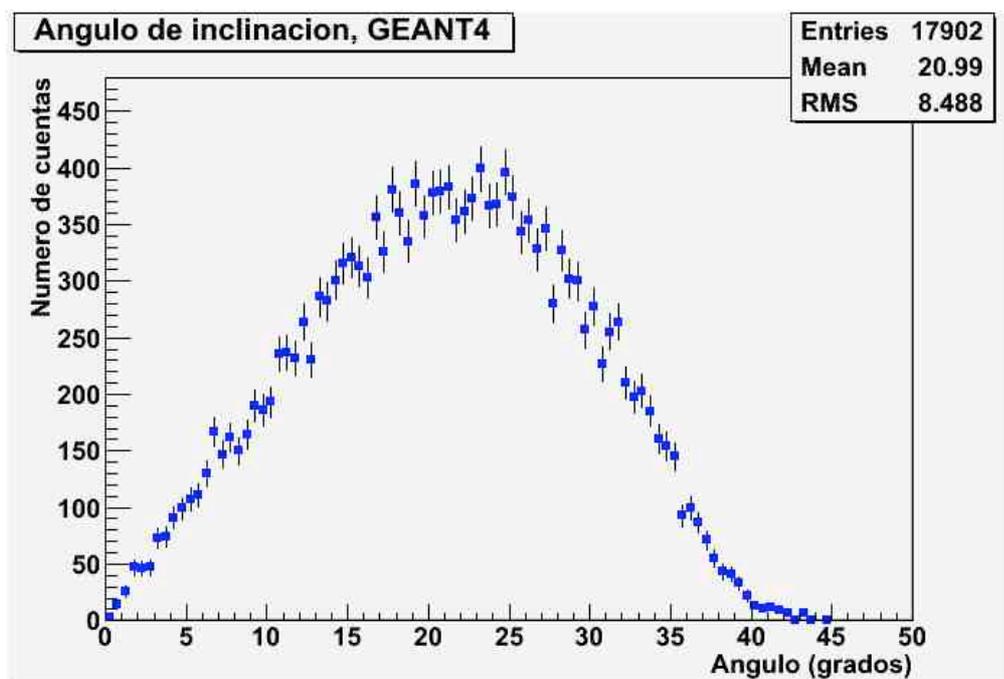


Figura 5.2: Angulo de inclinación a partir de simulación de GEANT4.

El ángulo azimutal (figura 5.1) no tuvo la forma observada en los datos de CREAM-III ya que presentó 4 máximos y 4 mínimos. Que hubiera este número de puntos extremos se debe a que el plano de referencia para este ángulo es un cuadrado perfecto y lo que representan estos puntos en la gráfica son las esquinas (en los máximos) y puntos medios (en los mínimos) de dicho cuadrado. Este comportamiento no es el visto en los datos por lo que es posible concluir que ciertas anomalías en el calorímetro modificaron la geometría del plano de referencia y por lo tanto la forma de la distribución del ángulo azimutal.

El ángulo de inclinación (figura 5.2) tuvo la forma observada en los datos y pero el máximo y el ángulo de corte se presentaron en valores menores. La forma en que se reconstruyeron los ángulos en la simulación fue copiando la información de la dirección asignada a cada evento primario por lo que el ángulo de inclinación estuvo limitado por la altura de todo el detector (116 cm). Dado que a medida que se aumenta la altura por la que tiene que pasar las partículas los ángulos de inclinación máximo y de corte decrecen, que la distribución de este ángulo presentara valores menores a los vistos en los datos cuando se pasaba por todos los detectores se puede interpretar como que la altura que recorrieron las partículas en los datos fue menor ya que permitió ángulos de inclinación mayores.

Capítulo 6

Simulación geométrica de CREAM-III

Después de estudiar las distribuciones angulares de los datos de CREAM-III y de la simulación de GEANT4 se pretendió hacer modificaciones en esta última para entender la influencia de la altura y de la forma del detector en los ángulos. Modificar los códigos existentes de GEANT4 resultó muy complicado y los tiempos de computo necesarios para tener una buena estadística eran considerablemente altos por lo que se decidió hacer una simulación en C++ y ROOT que solo contemplara los aspectos geométricos del detector. Inicialmente se pensó en incluir características de detección y reconstrucción de trayectorias que se asemejaran a las usadas en CREAM-III pero como se muestra en la sección 6.2, bastó con utilizar una geometría similar a la de la simulación de GEANT4 para obtener distribuciones angulares casi iguales a las del capítulo anterior en un tiempo significativamente menor.

La simulación consistió en hacer incidir rayos con posición y dirección aleatoria en la parte de arriba de un arreglo de cajas que reproducía la geometría del instrumento y ver como se comportaban los ángulos de los rayos que llegaban al fondo del arreglo. A cada rayo se le asignaba una posición en el plano XY y ángulos azimutal y de inclinación aleatorios generados a través de distribuciones uniformes y era posible modificar de manera rápida y sencilla la geometría y altura del arreglo. Los rayos que llegaban hasta el fondo del arreglo eran guardados en un archivo ROOT para después graficar sus ángulos de incidencia.

6.1 Programa de simulación geométrica

El programa utilizado para la simulación geométrica del detector fue hecho en C++ y se corrió en ROOT. Consistió en la clase Detect que se encargaba de generar "rayos" que no eran más que vectores de cuatro entradas con cada entrada representando posiciones X-Y y ángulos azimutal y de inclinación. Los rayos se hacían pasar por un arreglo de cajas con una altura determinada que representaba, de forma rudimentaria, el instrumento CREAM-III. Para esto, se verificaba por medio de trigonometría, utilizando posición y ángulos de los rayos, que su posición en la cara inferior del arreglo estuviera dentro del rango de la misma. Aquellos rayos que cumplían dicha condición se guardaban en un archivo ROOT para su posterior análisis. Las posiciones de los rayos se generaron dentro del rango del largo y ancho de la cara superior del arreglo por medio de una distribución uniforme. El ángulo azimutal también se generó con una distribución uniforme que fue de 0 a 360° mientras que para el ángulo de inclinación se utilizó una distribución uniforme de ángulo sólido, esto fue que se generaron números aleatorios entre 0 y 1 y se les calculó el coseno inverso

Se utilizaron tres configuraciones para la geometría, en la primera las posiciones de los rayos se generaban dentro de un cuadrado de 120x120 cm², la altura que tenían que recorrer los rayos para llegar al fondo era de 119 cm y la cara inferior era de 50x50 cm²; estas medidas fueron las utilizadas en la

simulación de GEANT4. Para la segunda configuración se usó una caja con altura de 28 cm y caras cuadradas de 50x50 cm² en la parte superior e inferior; esta configuración representaba solo la parte de SCD y calorímetro. En la tercera configuración se utilizó la misma altura de 26 cm pero las caras superior e inferior eran rectángulos de 45x50 cm². La primera configuración tuvo la finalidad de reproducir lo obtenido con GEANT4 y con esto asegurar que la simulación trabajaba correctamente. Con la segunda configuración se buscaba entender la influencia que tiene el hecho de que la reconstrucción de la trayectoria de las partículas sea hecha por el calorímetro y el SCD en la parte baja del instrumento. La tercera configuración se hizo para ver si la asimetría vista en los datos se debía a una mala detección en las orillas.

6.2 Datos simulación geométrica

Se graficaron los ángulos azimutal y de inclinación obtenidos a partir de la simulación geométrica y utilizando las tres configuraciones antes mencionadas. La simulación se corrió hasta que 100000 rayos llegaran hasta la parte baja del arreglo.

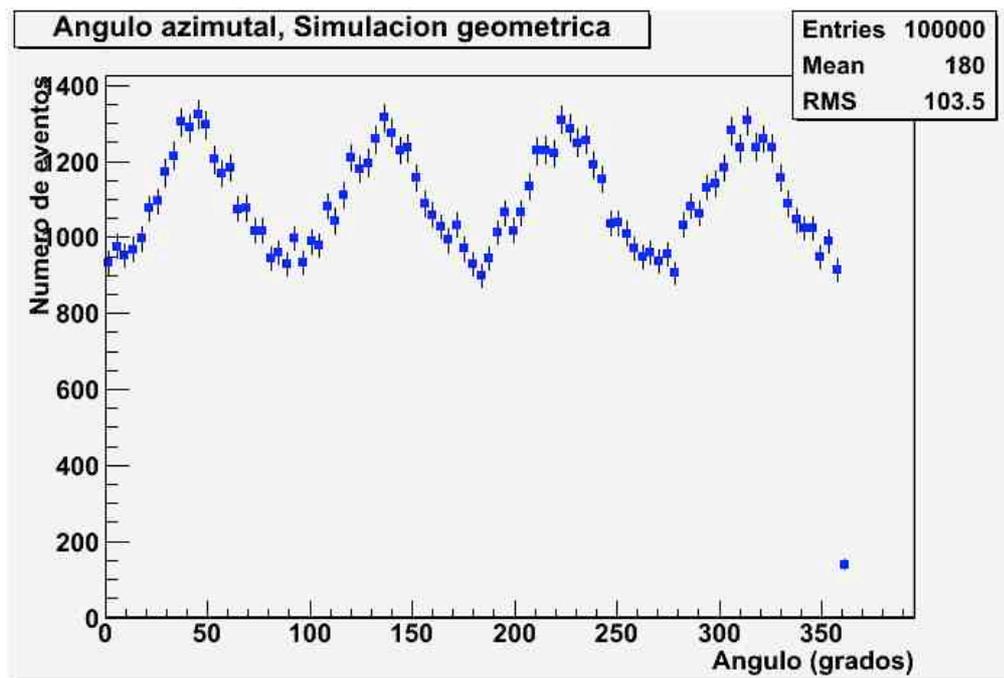


Figura 6.1: Ángulo azimutal a partir de simulación geométrica, configuración con 119 cm de altura.

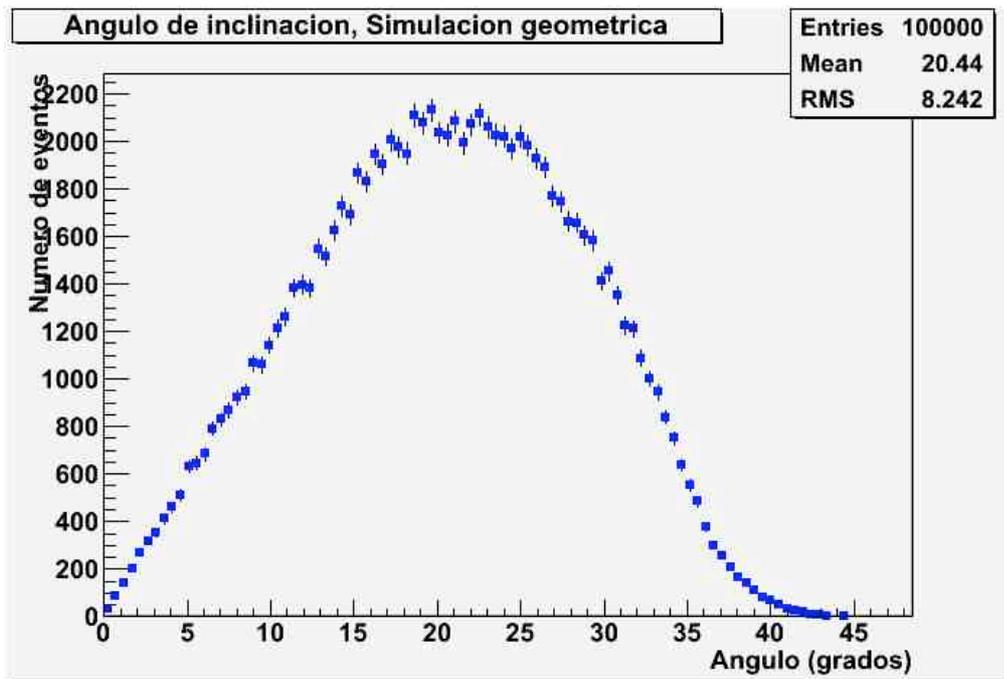


Figura 6.2: Angulo de inclinación a partir de simulación geométrica, configuración con 119 cm de altura.

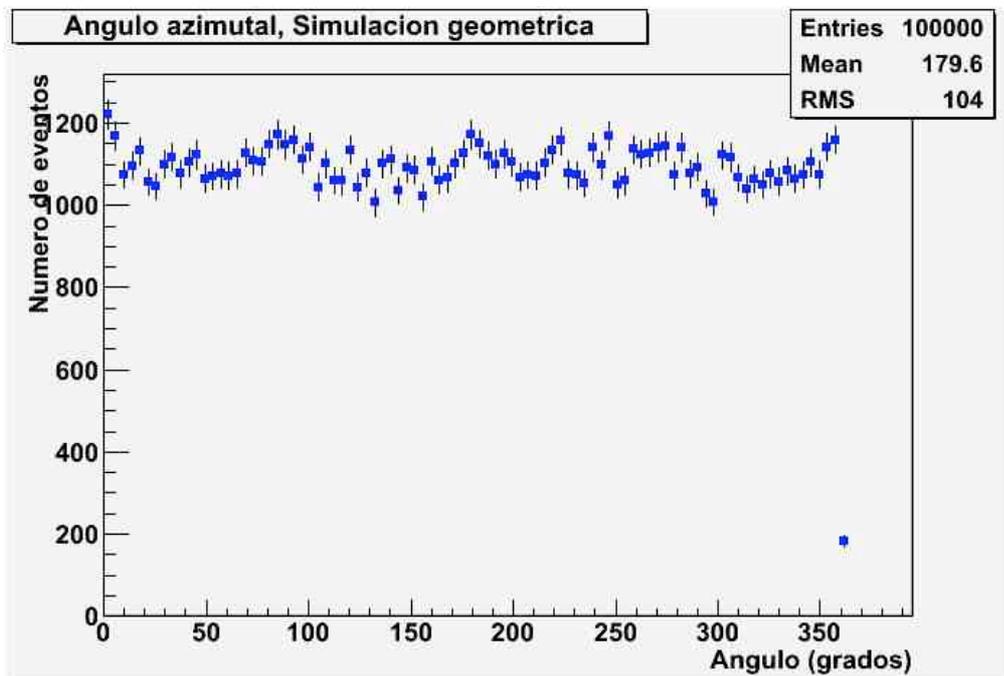


Figura 6.3: Angulo azimutal a partir de simulación geométrica, configuración con 28 cm de altura y caras cuadradas.

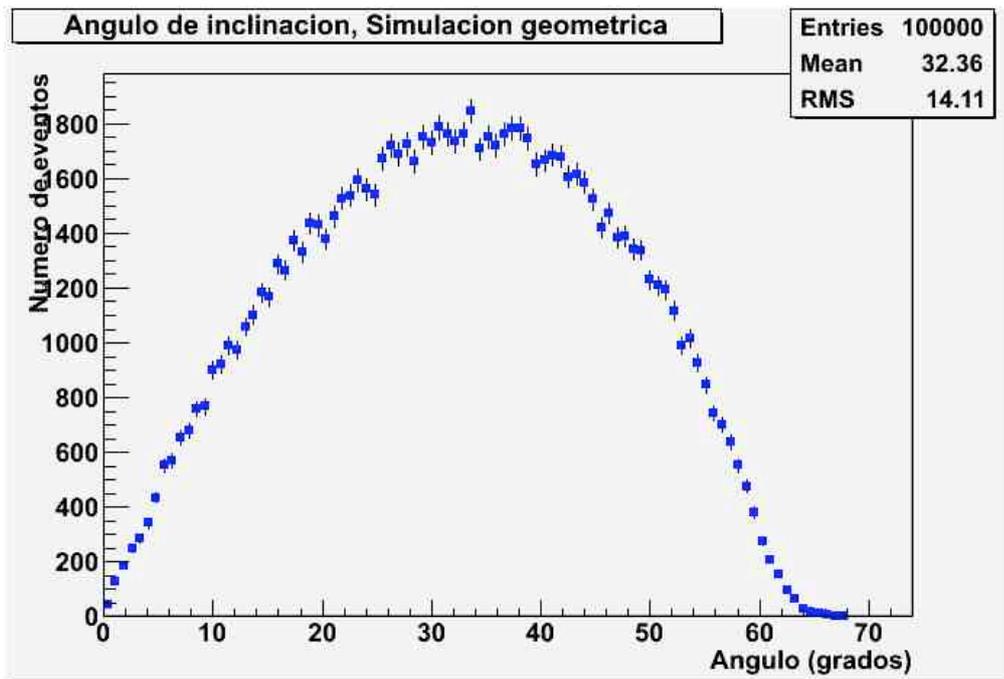


Figura 6.4: Angulo de inclinación a partir de simulación geométrica, configuración con 28 cm de altura y cara cuadradas.

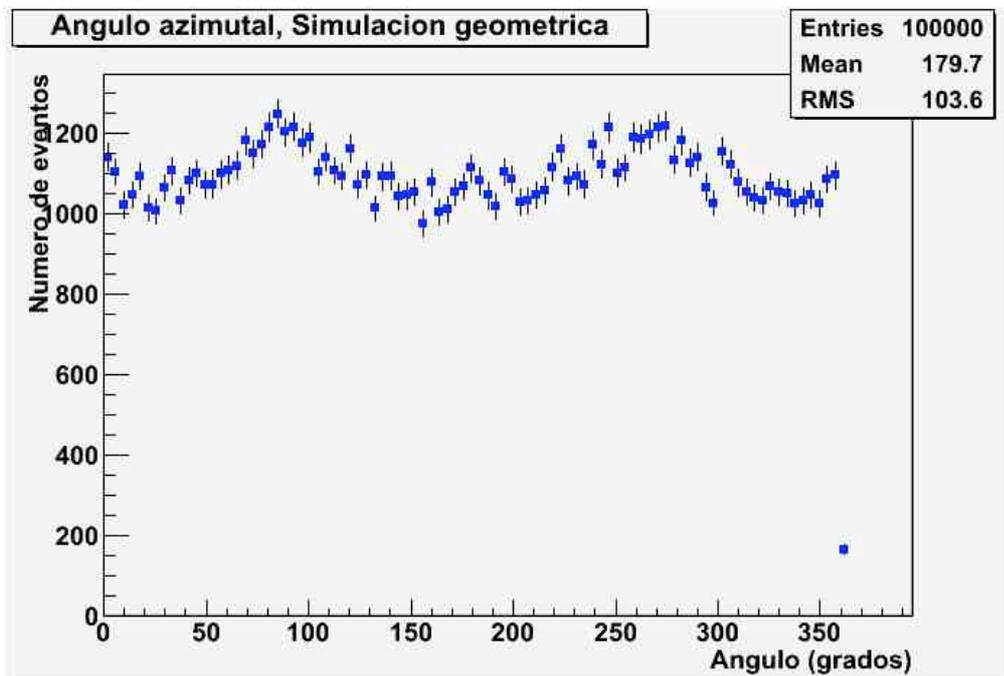


Figura 6.5: Angulo azimutal a partir de simulación geométrica, configuración con 28 cm de altura y caras rectangulares.

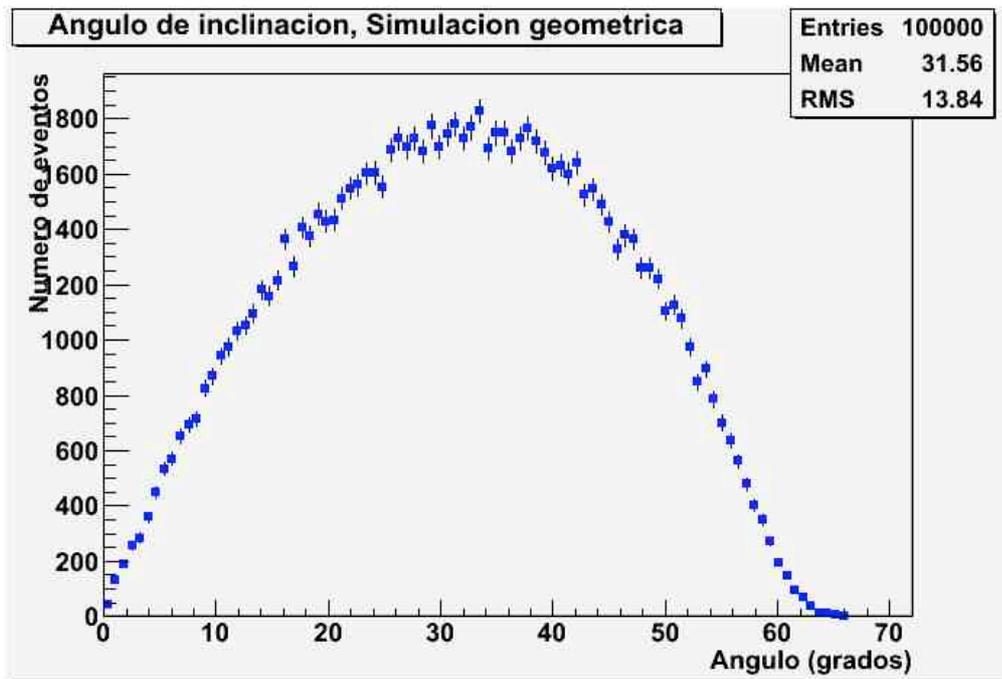


Figura 6.6: Angulo de inclinación a partir de simulación geométrica, configuración con 28 cm de altura y cara rectangulares.

El ángulo azimutal presentó compartimientos diferentes con las tres configuraciones. Para 119 cm (figura 6.1) los mínimos y máximos fueron muy claros y la distribución tuvo la forma observada en la simulación de GEANT4. Con la altura de 28 cm (figura 6.3) y caras cuadradas en la parte superior e inferior la distribución fue muy plana y no fue posible distinguir máximos o mínimos de manera clara. Cuando se usaban caras rectangulares (figura 6.5), la distribución presentó dos mínimos en 0 y en 180° y dos máximos en 90° y en 270°.

La forma del ángulo de inclinación fue la misma en los tres casos pero los valores del máximo y del ángulo de corte fueron distintos. Para la altura de 119 cm (figura 6.2) el máximo estuvo cerca de 20° y el ángulo de corte en 45°, valores muy similares a los vistos en la simulación de GEANT4. Cuando se usaron caras cuadradas y 28 cm de altura (figura 6.4), tanto el máximo como el ángulo de corte se presentaron en valores mayores, el máximo estuvo alrededor de los 32° y el ángulo de corte cerca de 68°. Los valores obtenidos para el arreglo de caras rectangulares (figura 6.6) fueron muy similares a estos últimos.

De los resultados obtenidos con los tres arreglos utilizados, el más cercano al comportamiento de los datos de CREAM-III fue el de 28 cm de altura y caras rectangulares, ya que tanto el ángulo azimutal como el ángulo de inclinación tenían las características observadas en los datos. El ángulo azimutal solo presentó dos máximos y dos mínimos en valores cercanos a los de los datos mientras que el máximo y el ángulo de corte del ángulo de inclinación también fueron muy parecidos a los observados en los datos. Esto puede significar que tanto la altura como el tipo de caras utilizadas en la simulación se asemejaron a las condiciones del detector.

Capítulo 7

Conclusiones

Este trabajo tuvo como finalidad entender el comportamiento de las distribuciones angulares para protones de los datos de CREAM-III. Los primeros análisis sobre estos datos estuvieron enfocados en entender los registros de carga y energía. Para la carga, se tuvieron una cantidad considerable de datos con una reconstrucción mala, lo que limitó mucho la cantidad de eventos útiles. Se pensó incorporar la energía en el análisis de los datos pero esto no pudo ser debido a la falta de una rutina confiable para la determinación de la energía incidente a partir de la energía depositada. Con estos dos análisis se ganó mucho conocimiento sobre los datos disponible y lo que podía obtenerse a partir de ellos. Al comenzar con el análisis de las distribuciones angulares, se esperaba que el ángulo azimutal tuviera máximos y mínimos correspondientes a las esquinas y puntos medios del detector debido a su simetría cuadrada en el plano X-Y pero este no fue el caso. Lo observado fueron solo dos máximos y dos mínimos lo que llevó a pensar que había una asimetría en la detección de partículas. El ángulo de inclinación tuvo dos ceros y un máximo como se esperaba.

Después de analizar los datos del vuelo, se corrió una simulación en GEANT4 del instrumento. Esta simulación arrojó una distribución del ángulo azimutal con cuatro máximos y cuatro mínimos bien definidos lo que corroboró que lo visto en los datos era algo atípico. El ángulo de inclinación presentó la misma forma que en los datos aunque los máximos y el ángulo de corte del segundo cero fueron menores a los observados. Esto se debió a que la altura que recorrían los eventos antes de llegar al fondo era mayor y por lo tanto los ángulos permitidos eran menores. Con esto se entendió que la altura que se toma como referencia para reconstruir los ángulos de inclinación en los datos era menor a la utilizada en la simulación de GEANT4.

Con la finalidad de verificar lo visto con GEANT4 se realizó una simulación geométrica del instrumento basada en C++ y ROOT. Esta simulación permitía lanzar rayos con una posición y dirección aleatoria sobre un arreglo de cajas que representaba al instrumento y graficar las distribuciones angulares de los rayos que llegaban hasta el fondo. Otra opción que tenía la simulación era la de modificar la altura y forma del arreglo por lo que se escogieron tres configuraciones, una para tratar de reproducir lo visto en la simulación de GEANT4, la segunda para entender la influencia de la altura del instrumento en el ángulo de inclinación y la tercera para saber como afecta la forma del plano de referencia del ángulo azimutal. Las distribuciones angulares de la primera configuración fueron muy similares a las obtenidas con GEANT4 lo que significó que el programa estaba trabajando correctamente. Para la segunda configuración se usó una altura que fuera la suma de las alturas del calorímetro, el SCD y los blancos de grafito entre ellas. El ángulo de inclinación fue muy parecido al obtenido en los datos del vuelo lo que supuso que la altura utilizada fue similar a la altura de referencia para la reconstrucción de trayectorias en los datos. En la tercera configuración se usó la misma altura que en la segunda pero con rectángulos como caras superiores e inferiores para tratar de reproducir la

asimetría vista en el ángulo azimutal de los datos. El ángulo azimutal obtenido tuvo solo dos máximos y dos mínimos como en los datos y la forma de la distribución también fue muy parecida.

Con en este trabajo se pudo comprobar que la asimetría del ángulo azimutal en los datos de CREAM-III se debió a que unas zonas en las orillas del calorímetro no estaban trabajando correctamente lo que se reflejó en una mayor cantidad de partículas detectadas en ciertas direcciones. También se pudo demostrar que los detectores arriba del calorímetro no fueron considerados para la reconstrucción del ángulo de inclinación por lo que fue posible tener trayectorias que no pasaban por todos los detectores del instrumento.

Bibliografía

- [1] B. Rossi, "Cosmic Rays," (New York: McGraw-Hill, 1964)
- [2] K.H. Kampert, "Cosmic Rays from the Knee to the Ankle – Status and Prospects," *Nuclear Physics B* (2007) **165**, 294
- [3] B. Wiebel-Sooth, P.L. Biermann: Landolt-Börnstein, vol. **VI/3c**, Springer Verlag 1999, pp. 37 - 90
- [4] Pierre Auger Collaboration, "Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory," *Physics Letters B* (2010) **685**, 239
- [5] F. Barao, "AMS – Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* (2004) **535**, 134
- [6] H.S. Ahn *et al.*, "The Cosmic Ray Energetics And Mass (CREAM) Instrument," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* (2007) **579**, 1034.
- [7] Y. Sallaz-Damaz *et al.*, "CHERCAM: The Cherenkov imager of the CREAM experiment," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* (2008) **595**, 62.
- [8] Y.S. Yoon *et al.*, "Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra from the First CREAM Flight," *Astrophysical Journal* (2011) **728**, 122.
- [9] Y.S. Yoon *et al.*, "Preliminary Proton and Helium Spectra from the CREAM-III Flight," *Proc. of the 31th International Cosmic-Ray Conference, Lodz* (2009)
- [10] S. Agostinelli *et al.*, "Geant4: a simulation toolkit," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* (2003) **506**, 250.
- [11] Takeda *et al.*, "Small Scale Anisotropy of Cosmic Rays above 10^{19} eV Observed with Akeno Giant Air Shower Array," *Astrophysical Journal* (1999) **522**, 225.
- [12] Abbasi *et al.*, "Study of Small-Scale Anisotropy of Ultra-High-Energy Cosmic Rays Observed in Stereo by the High Resolution Fly's Eye Detector," *The Astrophysical Journal Letters* (2004) **610** L73
- [13] Letessier-Selvon *et al.*, "Anisotropy Studies Around the Galactic Center," *Nuclear Physics B* (2007) **165** 254
- [14] H. S. Ahn *et al.*, "Energy Spectra of Cosmic-Ray Nuclei at High Energies," *Astrophysical Journal* (2009) **707** 593
- [15] Y.S. Yoon, "Proton and Helium Spectra from the First Flight of the CREAM Ballon-Borne Experiment", Disertación doctoral, (2010) University of Maryland

- [16] P.S. Marrocchesi *et al.*, "Preliminary results from the second flight of CREAM," *Advances in Space Research* (2008) **41** 2002