

Reporte Preliminar

Laboratorio Avanzado - Detección de Rayos Cósmicos

Favio Vázquez^{*1} and Susana Marín^{**2}

¹*Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México*

²*Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México*

Introducción

Los rayos cósmicos fueron descubiertos por el físico Austríaco-Americano, Víctor Hess. En 1912, Hess estableció que la ionización atmosférica aumenta con la altitud, y concluyó que la “radiación” que la origina debía proceder del espacio exterior lo que le valió el premio Nobel de Física del año 1936. En años posteriores los rayos cósmicos fueron estudiados utilizando cámaras de destellos que permiten trazar la trayectoria y distinguir entre diferentes tipos de partículas cargadas que, ya que éstas, en presencia de un campo magnético, son desviadas de una trayectoria recta. Lo mismo ocurre con los rayos cósmicos durante su propagación hasta la tierra, y por lo tanto no son convenientes para las observaciones astronómicas.

Desde su descubrimiento se han hecho una gran cantidad de experimentos y grandes colaboraciones para estudiar las propiedades y la naturaleza de los rayos cósmicos. Hoy en día tenemos una gran idea de sus características y origen, la teoría más aceptada dice que los rayos cósmicos están compuestos por partículas cargadas estables, fotones y núcleos atómicos con tiempos de vida de al rededor de 10^6 años o más. Técnicamente, podemos hablar que los rayos cósmicos primarios, están compuestos por partículas aceleradas desde fuentes astrofísicas y los secundarios son las partículas producidas en la interacción con las partículas de la atmósfera al llegar a la tierra. Sabemos que algunos provienen de adentro del sistema solar, otros de algún lugar de la galaxia y algunos pocos de afueras de nuestra galaxia. Pero el fenómeno físico completo aún no es entendido por completo, desde teorías muy plausibles y conservadoras, así como más radicales y exóticas se han propuesto para explicar el origen físico de los rayos cósmicos, y si lo que hoy en día sabemos es correcto, pero aún no hay un consenso completo sobre el tema. Es probable que con las nuevas mediciones de algunos grandes observatorios de rayos cósmicos comencemos a tener una mejor idea sobre la respuesta a estas preguntas, pero por ahora solo podemos mantenernos en espera y utilizar los resultados que se han obtenido hasta ahora.

En este informe preliminar de laboratorio se muestran los resultados y breves análisis de los experimentos que hemos realizado. Dejamos para el segundo, y final informe una conclusión y análisis un poco más detallados de los resultados que se obtendrán y de los que ya se han obtenido. Hasta el momento hemos completado 2 experimentos, el primero era la medición del punto de operación del sistema que utilizaremos para el resto del laboratorio (2.2), en el cual se hicieron mediciones de muones atmosféricos (1.2.3) a distintos voltajes, para determinar en qué rango de operación se encuentra el plató en el cual el sistema es estable,

*favio.vazquezp@gmail.com

**susyma3005@gmail.com

así como el punto medio del rango que tomamos como el punto de operación del sistema. El otro experimento completo consistió en determinar la distribución angular de los muones (2.3) y utilizando el punto de operación obtenido anteriormente, se quería validar que el sistema cumplía con las expectativas teóricas para la distribución del flujo a distintos ángulos, así como el porcentaje de muones que llegan a distintos ángulos al laboratorio. La medición que falta por completar es la atenuación de muones con placas de plomo (2.4), en la cual el plan es calcular cuánto afecta una cantidad dada de plomo, en atenuación, al flujo de muones que llegan al sistema.

El reporte está dividido en 3 secciones, en la primera (1) se comienza con una breve discusión teórica sobre rayos cósmicos, sus componentes, y su detección. En la segunda sección (2) se explica la metodología experimental seguida para la realización de cada uno de los experimentos y en la tercera sección (3) se muestran los resultados obtenidos y se hace un breve análisis de los mismos. Como ya se ha establecido al ser preliminar este reporte no se espera un tratamiento completo de cada experimento, y en el último que está en camino, nos muestra solamente el camino a seguir.

Marco Teórico

1.1 Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas energéticas o fotones originadas en fuentes externas a la Tierra. Antes de entrar en la atmósfera de la Tierra, los rayos cósmicos primarios están compuestos en un 90 % por protones, un 9 % de partículas alfa y algunos núcleos pesados [1]. Los rayos cósmicos se extienden en un amplio rango de energía, hasta un máximo de alrededor de 10^{20} eV. Existen diferentes fuentes de rayos cósmicos y, de acuerdo a su origen, pueden ser categorizados en:

- **Rayos cósmicos Solares:** Forman la componente de más baja energía en el espectro de los rayos cósmicos y están asociados a la actividad solar. Son partículas que tienen energía desde los pocos keV hasta algunos GeV o hasta los 15 – 30 GeV en los eventos de erupción solar poderosos.
- **Rayos cósmicos Galácticos:** Vienen de afuera del sistema solar pero generalmente de adentro de la Galaxia, la Vía Láctea. Comúnmente están compuestos de núcleos atómicos los cuales se han despojado de todos sus electrones circundantes durante su paso a altas velocidades a través de la galaxia. Probablemente han sido acelerados en los últimos pocos millones de años, y han viajado varias veces por la galaxia, atrapados por el campo magnético galáctico. Han sido acelerados a casi la velocidad de la luz, probablemente por los remanentes de supernovas. Mientras viajan por el fino fas del espacio interestelar, algunos de ellos interactúan y emiten rayos gamma, que es como sabemos que pasan por la Vía Láctea.
- **Rayos cósmicos Extra-Galácticos:** Están conformados por partículas que provienen de afuera de nuestra galaxia. Sus energías comúnmente exceden los 10^{15} eV. Se sabe muy poco de su procedencia, principalmente por la baja estadística que tenemos sobre ellos, solamente ~ 1 de éstos llega a la tierra por año por metro cuadrado. La mayoría de las estimaciones, basadas en modelos teóricos y numéricos, predicen que están compuestos en su mayoría de protones, pero algunos han teorizado que pueden estar compuestos por partículas y entidades generadas en el universo muy temprano como del decaimiento de partículas súper pesadas o defectos topológicos [2].

Los rayos cósmicos pueden ser usados como fuentes de partículas de altas energías para la producción de partículas fundamentales e, históricamente, han llevado al descubrimiento del positrón, el muón, el pión, el kaón, etc. Debido a que están cargados por naturaleza, los rayos

cósmicos interactúan con los campos magnéticos y esto resulta en que sigan movimientos complicados. Esto induce muchos efectos diferentes sobre los rayos cósmicos por los campos magnéticos de la Tierra, el Sol y las galaxias, así como efectos de latitudes de la Tierra y de modulación por parte del Sol. Debido a estos y algunos otros efectos, la dirección de la información de la componente galáctica y extra-galáctica de los rayos cósmicos es perdida y por lo tanto estas componentes bombardean a la Tierra isotrópicamente.

Debajo se encuentra una imagen del espectro de los rayos cósmicos, donde podemos ver el gran rango de energías que cubren y que mientras aumenta la energía, el flujo de partículas que llegan a la tierra decrece exponencialmente.

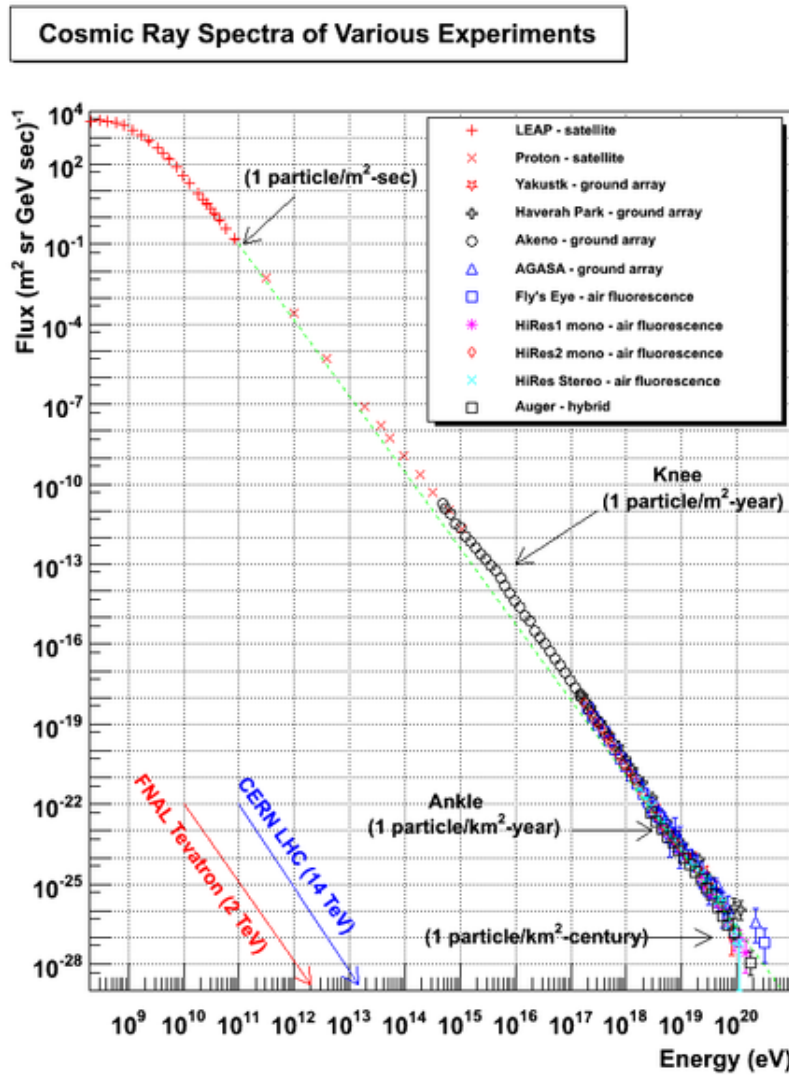


Figura 1: Espectro energético de los rayos cósmicos.

Cuando los rayos cósmicos primarios entran a la atmósfera de la Tierra, interactúan con las moléculas de aire y producen muchos rayos cósmicos secundarios, principalmente protones, neutrones, piones y otras partículas, a través de reacciones nucleares. Debido a que muchas de estas partículas secundarias son todavía de muy alta energía, inician producciones subsecuentes de otras partículas en la forma de cascadas meso-nucleares y electromagnéticas.

Estas cascadas nucleares-electromagnéticas complejas se conocen como lluvias extensas de aire o EAS¹ en inglés. Fue notado por primera vez por Bruno Bossi que, en las mediciones de rayos cósmicos a nivel del mar, las cuentas de coincidencia de partículas medidas por los detectores de partículas separados en un plano horizontal excedían por mucho la coincidencia aleatoria. Pierre Auger y sus colaboradores hicieron luego algunas investigaciones más sistemáticas en este fenómeno y encontraron que los eventos de coincidencia ocurrían a separaciones horizontales tan grandes como 75 metros. La tasa de cuentas decrecía rápidamente cuando la distancia entre los contadores se aumentaba de los 10 cm a los 10 m, y luego la tasa se mantenía relativamente constante a distancia más grandes. Hubo mucho interés en el estudio de las EAS en los 1940's debido a que la energía de las partículas de la lluvia era mucha más alta que la producida en los aceleradores de partículas de la época.

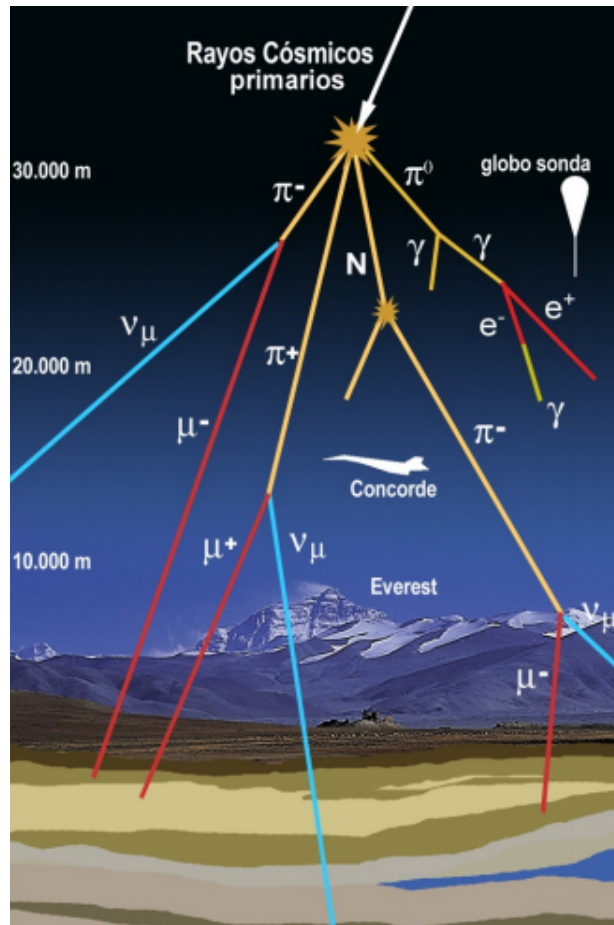


Figura 2: Lluvias extensas de aire producidas por rayos cósmicos primarios, y la producción subsecuente de rayos cósmicos secundarios.

1.2 Componentes de la radiación cósmica

Como ya se ha dicho, cuando un rayo cósmico llega a la atmósfera interactuará con una gran cantidad de átomos y moléculas. El proceso de interacción es bastante complejo, y tiene diferentes niveles. Debajo se encuentra un diagrama de las tres componentes que serán detalladas brevemente a continuación.

¹Extensive Air Shower.

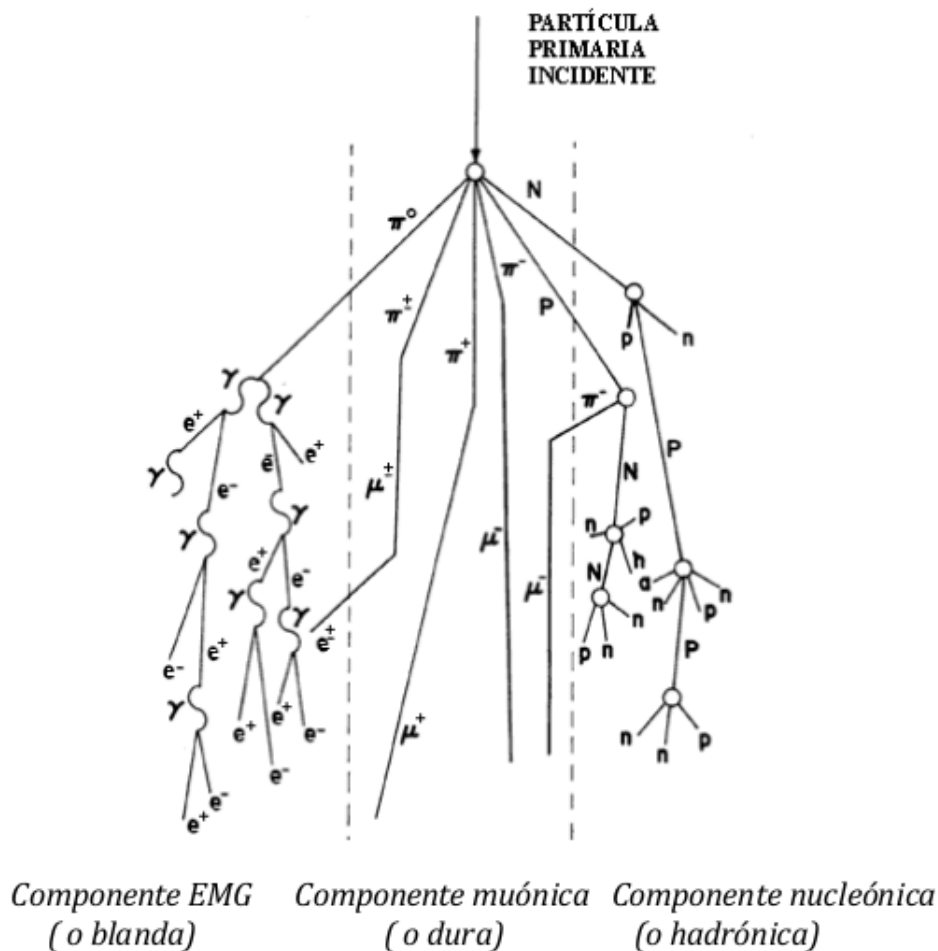


Figura 3: Las distintas componentes de una radiación cósmica.

1.2.1 Componente nucleónica

Partiremos de un rayo cósmico primario, digamos un portón, imaginemos que llega a la atmósfera alta y choca con una molécula de oxígeno. Lo que esperaríamos que sucediera es que al golpearla, se produzca un efecto tipo juego de billar, en la cual las componentes de las partículas saldrían esparcidas por todo el aire. Luego de esto, desaparecerá el rayo cósmico primario y dará paso a un rayo cósmico secundario, que seguirá su camino llevando a cabo más reacciones energéticas posteriores. Los componentes nucleares iniciarán su camino descendente, interactuando con otros átomos y volviendo a producir nuevas interacciones nucleares. El proceso continúa hasta que las nuevas partículas no tengan tanta energía para romper otros núcleos. Este proceso por lo general se detiene en la atmósfera, por lo que en la mayoría de los casos los rayos cósmicos primarios no llegan al suelo, pero pueden hacerlo ocasionalmente.

1.2.2 Componente electromagnética

La cascada se inicia cuando un núcleo primario choca con un núcleo atmosférico, produciendo una reacción nuclear en la que parte de la energía se transforma en materia, creándose nuevas partículas, sobre todo piones. Estos piones pueden ser positivos, neutros o negativos.

Los piones neutros, que originarán una cascada electromagnética, decaen casi instantáneamente, convirtiéndose en dos fotones. Cada fotón produce un par e^+e^- . Cada una de estas partículas avanza y emite un fotón que puede crear de nuevo un par e^+e^- , y esto ocurre hasta que los fotones no tienen suficiente energía para crear nuevos pares. Esto está ilustrado en la parte izquierda de la figura (3).

1.2.3 Componente muónica

Los piones positivos y negativos creados, pueden interaccionar con otros núcleos, rompiéndolos, o decaer espontáneamente. Cuando un pión decae se convierte en un muón y en un neutrino muónico. El muón puede llegar al suelo o desintegrarse a su vez en un electrón, neutrino muónico y un neutrino electrónico. Esto puede verse en el centro de la imagen (3). Debido a que esta es la componente que más nos interesa debido a que fue la que medimos en el laboratorio, hablaremos un poco más de la misma.

Muones atmosféricos

La mayoría de los muones observados en la superficie de la Tierra, son producidos por rayos cósmicos primarios en la atmósfera superior. Son las más numerosas partículas energéticas que llegan al nivel del mar, con un flujo de aproximadamente 1 muón por centímetro cuadrado por segundo. Esto se puede comparar con el flujo de neutrinos solares de aproximadamente 5×10^6 por centímetro cuadrado por segundo. Los muones pueden decaer por como:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad (1.1)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \quad (1.2)$$

La energía media de los muones que alcanzan el nivel del mar, es de aproximadamente 4 GeV. Los muones, siendo partículas, interactúan con la materia ionizándola. La pérdida de energía de los muones que pasan a través de la atmósfera, es proporcional a la cantidad de materia que atraviesan. El medio se caracteriza generalmente por su densidad (g/cm^3), multiplicada por la distancia recorrida en centímetros. Esto a veces se llama "longitud de interacción" se mide en g/cm^2 . La pérdida de energía de los muones es de aproximadamente 2 MeV por g/cm^2 . La profundidad de la interacción con la atmósfera, es de unos 1000 cm^2 , por lo que los muones pierden alrededor de 2 GeV al pasar por la atmósfera. Con una energía media de muones en la superficie del mar igual a 4 GeV, esto sugiere una energía original de muones en las proximidades de 6 GeV.

Se piensa que la mayoría de los muones se crean a una altura de unos 15.000 metros, y viajan con otras partículas a la Tierra en lluvias cónicas, dentro de aproximadamente 1° de la trayectoria de la partícula primaria que las crea.

1.3 Detección de rayos cósmicos

Se han ideado diversos mecanismos de detección para rayos cósmicos. La mayoría de estos son muy complejos, algunos sencillos como el que utilizamos en el laboratorio. Y cada mecanismo está ideado para detectar algún tipo específico de rayo cósmico y sus componente. Debajo dos imágenes ilustran algunas técnicas de detección que se utilizan para estudiar los rayos cósmicos.

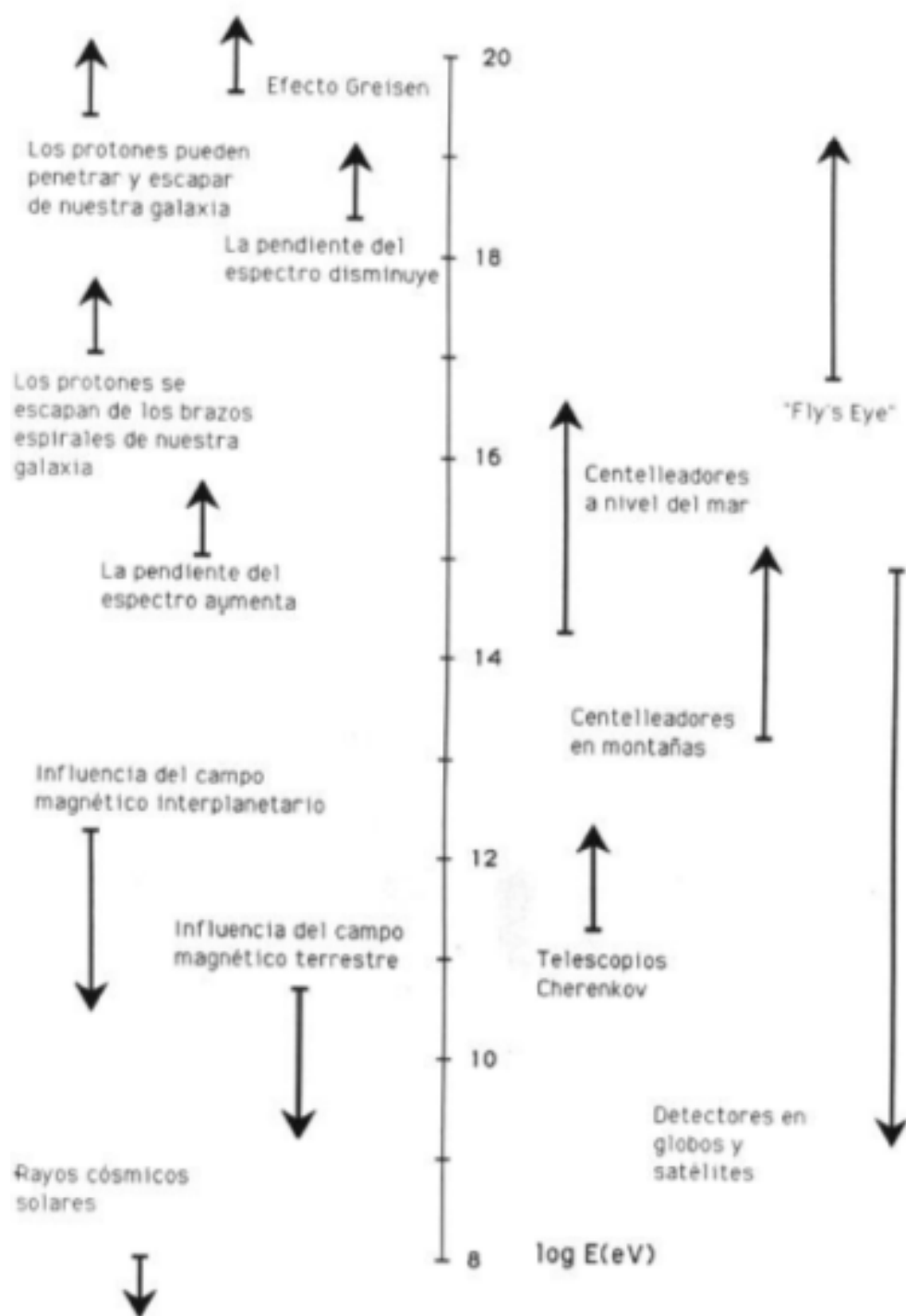


Figura 4: Diferentes intensidades de rayos cósmicos y sus detectores.

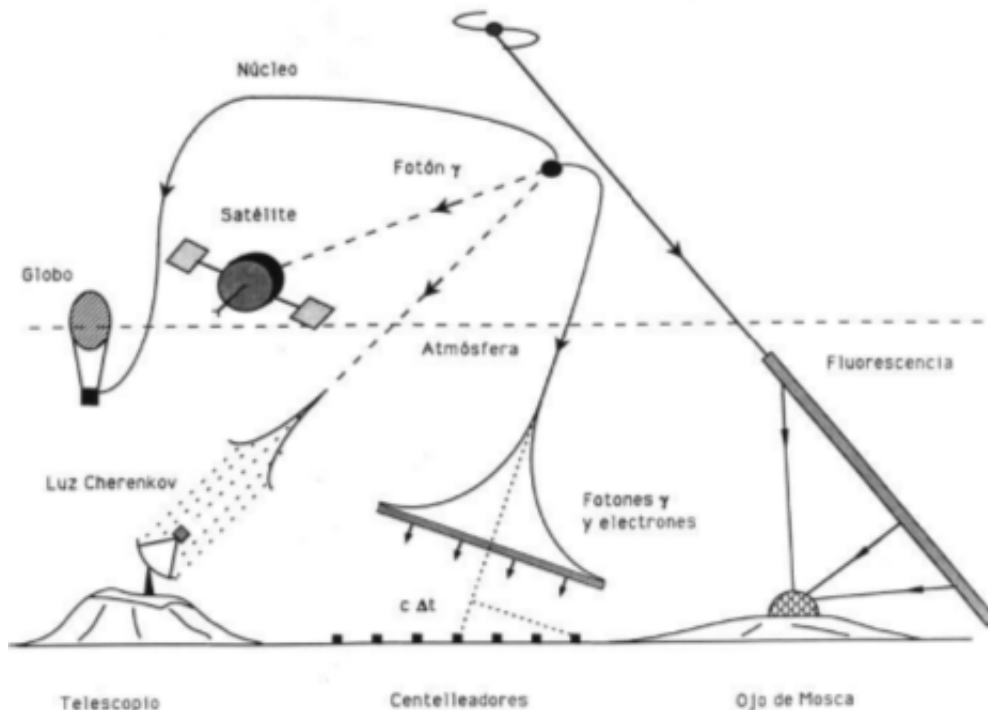


Figura 5: Distintos detectores para rayos cósmicos.

Es muy extenso el material que existe y que se puede recopilar sobre detectores de rayos cósmicos pero sale del objetivo de este informe. Solo se hará un resumen de los detectores y aparatos que se usaron en el laboratorio para las distintas mediciones que se hicieron. En la subsección (2.1) está una lista de todos los materiales utilizados para hacer las prácticas, ahora detallaremos brevemente algunos de los equipos que usamos para hacer las mediciones.

- **Centellador:** El centellador como su nombre lo indica centellea o exhibe luminiscencia cuando por el pasa una partícula altamente energética. Este proceso se basa en la excitación atómica molecular, esto se produce cuando una partícula muy energética pero no cargada pasa a través del plástico centellador y este absorbe parte de la energía de la partícula incidente provocando una excitación a los electrones de la banda de valencia hacia la banda de conducción, en cualquier estado de activación cada electrón regresa a su estado base emitiendo un fotón de energía exactamente igual a la necesaria para pasar de su estado fundamental a su estado excitado la des-excitación causa la emisión de la luz en un proceso conocido como fluorescencia. Comúnmente están hechos de materiales orgánicos o inorgánicos, los primeros se usan más para detecciones en el rango ultravioleta y los inorgánicos para luz visible.
- **Guía de luz:** La guía de luz sirve para dirigir el camino de los fotones desde el centellador hasta el tubo fotomultiplicador.
- **Tubo fotomultiplicador:** Los tubos fotomultiplicadores convierten señales de luz provenientes de los centelladores que constan típicamente de no más que unos cientos de fotones, en un pulso de corriente utilizable sin añadir una gran cantidad de ruido aleatorio a la señal. Los dos mayores componentes dentro del tubo son una capa fotosensible, llamada el *fotocátodo*, acoplado a una *estructura multiplicadora de fotones*. El fotocátodo sirve para convertir la mayor cantidad posible de fotones de luz en electrones de baja energía. La sección de multiplicadora de electrones en un

tubo fotomultiplicador provee una geometría de colección eficiente para los fotoelectrones, y sirve como un amplificador casi ideal para incrementar en altas cantidades su número. Luego de una amplificación a través de la estructura multiplicadora, un pulso típico de centellador dará lugar a unos $10^7 - 10^{10}$ electrones [3], suficientes para servir de señal de carga para el evento original de centelleo. Esta carga es colectada convencionalmente en el ánodo o la etapa de salida de la estructura multiplicadora.

- **Discriminador:** Es un dispositivo que responde solamente a señales de entrada con una altura de pulso mayor que cierto valor umbral. Si se satisface este criterio, el discriminador responde emitiendo una señal lógica estándar, sino, no hay ninguna respuesta. El principal uso para los discriminadores es bloquear ruidos de baja amplitud desde los fotomultiplicadores u otros detectores [4]. Los buenos pulsos son convertidos por una electrónica en pulsos lógicos, utilizando un convertidor analógico-digital.
- **Compuerta AND:** Es una puerta lógica digital que implementa la conjunción lógica – se comporta de acuerdo a la tabla de verdad mostrada a la derecha. Ésta entregará una salida ALTA (1), dependiendo de los valores de las entradas, siendo este caso, al recibir solo valores altos en ambas entradas. Si alguna de estas entradas no son ALTAS, entonces se mostrará un valor de salida BAJA (0). En otro sentido, la función de la compuerta AND efectivamente encuentra el mínimo entre dos dígitos binarios, así como la función OR encuentra el máximo. Por lo tanto, la salida X solamente es “1” (1 lógico, nivel alto) cuando la entrada A como la entrada B están en “1”. En otras palabras la salida X es igual a 1 cuando la entrada A y la entrada B son 1.

Metodología Experimental

2.1 Materiales utilizados

A continuación se listan los materiales que fueron utilizados para las distintas mediciones:

- Dos paletas centelladoras.
- Osciloscopio.
- Cables de 1, 3, 5, 10, 16 ns.
- Convertidores para cables.
- Fuente de alto voltaje.
- Placas de plomo.
- Flexómetro.
- Módulos de alto voltaje, temporización, discriminador y unidad lógica AND.
- Soporte de ángulo variable.

2.2 Medición del punto de operación

Se utilizó un arreglo de centelladores, llamado arreglo de coincidencias, con el cual se desea medir el punto de operación del sistema, y el rango de operación del mismo, lo cual nos servirá para mediciones posteriores. A continuación se describen los pasos realizados para hacer la primera parte del diseño experimental.

Pasos:

- Se activan las paletas y se ponen para hacer coincidencia. Se conectan las paletas a la fuente de alto voltaje y mediante el programa HyperTerminal se fija un voltaje inicial y se fue aumentando el voltaje lentamente. Las paletas se colocan para hacer coincidencia una sobre la otra y se fijan a la mesa.
- Posteriormente se conectan las paletas al osciloscopio con cables de 10 ns para comprobar la coincidencia, para esto se deben ajustar las escalas de voltaje y temporal del osciloscopio. La escala temporal se fija al rededor de 80 ns y el voltaje en 10 mV.
- Se conectan las paletas al discriminador con cables de la misma longitud, para evitar desfases en la señal.
- Se ajusta el voltaje del umbral (threshold) a 13 mV, y se revisa que exista coincidencia conectando cables de 16 ns al osciloscopio.
- Se conectan los canales correspondientes y se procede a tomar nota de las cuentas de partículas que llegan al sistema en coincidencia en un tiempo determinado, que fue de 5 minutos para cada voltaje.
- Estas mediciones se repiten para cada voltaje y así obtener una estadística del proceso de detección, se hace una tabla y se grafican los valores.

2.3 Medición de la distribución angular de los muones

Esta medición se hizo para medir la distribución angular de los muones y determinar el porcentaje de los mismos que llegan desde todo lugar.

Se utilizó el soporte de ángulo variable, se fijó una de las paletas en la parte inferior del soporte y la otra paleta en la parte superior, habiendo una distancia entre ellos dos de 7 cm. Se conectó el sistema y se comprobó la coincidencia de la misma manera que en la sección anterior. Se fue girando el dispositivo cada 10 grados, partiendo de 0° hasta 90° , y se anotó el número de cuentas de muones para cada ángulo en un tiempo de 5 minutos por medición, en la sección de resultados se encuentran estos datos tabulados y graficados.

2.4 Medición de la Atenuación de Muones mediante el uso de plomo

En esta sección el objetivo principal es cuantificar la atenuación de muones en función de la densidad del material utilizado para atenuar, en este caso el plomo, y la distancia entre las paletas.

Se conectaron los cables de la misma manera que en las secciones anteriores, se fija un voltaje de 740 V consistente con el punto de operación, y antes de comenzar las mediciones se comprobó que hubiera coincidencia, y se hicieron mediciones para saber si el aparato experimental se encontraba calibrado. Se acomodaron los bloques de plomo de tal manera que se forma una estructura que tenga un lado abierto y la parte superior descubierta, por el cual se introdujo una de las paletas. Para tener un punto de referencia, se colocó un bloque de hule espuma sobre la estructura de plomo, y la segunda paleta sobre este bloque, cuidando que la segunda se encontrara exactamente sobre la primera, de modo que se tenga coincidencia, habiendo una distancia de 21 cm entre las paletas. Se utilizó hule espuma, debido a su baja densidad y gracias a esta propiedad se puede tomar como referencia. Se anotó el número de cuentas cada cinco minutos. Posteriormente se sustituyó el bloque de hule espuma, por un bloque de plomo, se acomodaron las paletas de la misma manera a 21 cm y se realizó la misma medición. El plan siguiente es ir aumentando el número de bloques de tal manera que la atenuación aumente hasta dejar de tener cuentas en un tiempo dado. Se harán las mediciones primero con hule espuma para tener una referencia y posteriormente se sustituyen con plomo.

Resultados

Todos los errores reportados en las siguientes tablas fueron calculados con la desviación estándar, cuya ecuación es

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (3.1)$$

donde N es la cantidad de datos, $\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N x_i$ es la media de los datos y x_i es cada dato puntual. Esta fue calculada con la función `std` del paquete `Distributions` de Julia.

3.1 Medición del punto de operación

Se realizaron tres mediciones debido a que los errores en las primeras dos fueron muy altos, ya que habían problemas con el cableado, y mucho ruido desde la fuente de la alto voltaje, y en el sistema en general. La medición que fue tomada en cuenta para calcular el punto y rango de operación fue la tercera, que consistió en 5 mediciones para cada voltaje partiendo de 650 V a 850 V, subiendo de el voltaje de 20 en 20.

Cuadro 1: Mediciones a distintos voltajes para el flujo de muones

Voltaje	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Promedio	Error
650	90	89	91	104	90	92.8	6.3
670	133	113	130	135	123	126.8	8.9
690	135	138	147	146	133	139.8	6.3
710	131	131	159	152	142	143.0	12.5
730	153	142	157	153	170	155.0	10.0
750	148	139	138	146	149	144.0	5.1
770	139	146	168	159	159	154.2	11.5
790	143	148	168	171	165	159.0	12.6
810	144	140	162	177	178	160.2	17.8
830	178	166	192	173	204	182.6	15.2
850	180	195	197	199	193	192.8	7.4

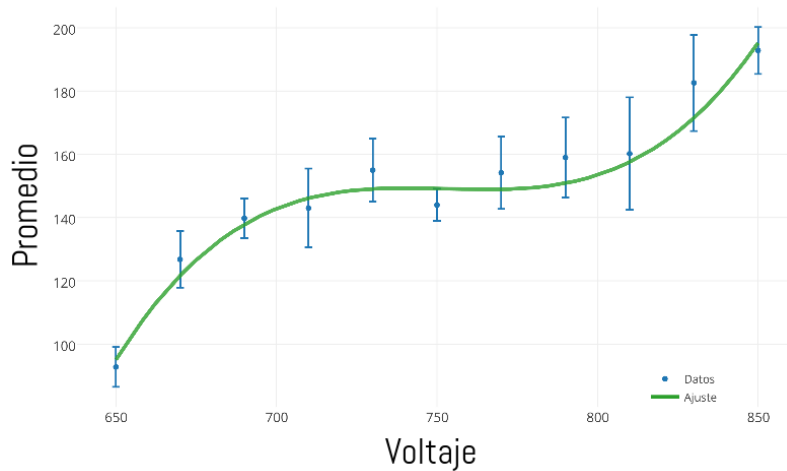


Figura 6: Distribución angular de muones y curva de mejor ajuste.

De la anterior gráfica observamos que el rango de operación está entre 690 V y 770 V, y por lo tanto tomamos el punto de operación como 740 V.

3.2 Medición de la distribución angular de los muones

Debajo se muestra la tabla de datos registrados para la medición de distribución angular de los muones,

Cuadro 2: Mediciones a distintos ángulos para el flujo de muones

Ángulo	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Error
0	48	42	42	44.0	3.4
10	39	31	42	37.3	5.6
20	31	37	38	35.3	3.7
30	23	30	34	29.0	5.5
40	27	23	24	24.6	2.0
50	24	21	23	22.6	1.5
60	16	14	14	14.6	1.1
70	11	11	7	9.6	2.3
80	4	6	3	4.3	1.5
90	5	4	4	4.3	0.5

Notamos una caída conforme nos acercamos a los 90° pues al estar las paletas en los 0° (en el zenit) el numero de cuentas es mayor ya que los muones procedentes de los rayos cósmicos caen directamente sobre las paletas y conforme no vamos moviendo a los 90° el número de cuentas disminuye ya que las partículas interaccionan con otras (presentes en el ambiente) antes de llegar a las paletas y así de esta manera las partículas que pasan a través de las paletas son mucho menor. Debajo se encuentra graficada esta tabla y el mejor ajuste que será discutido a continuación,

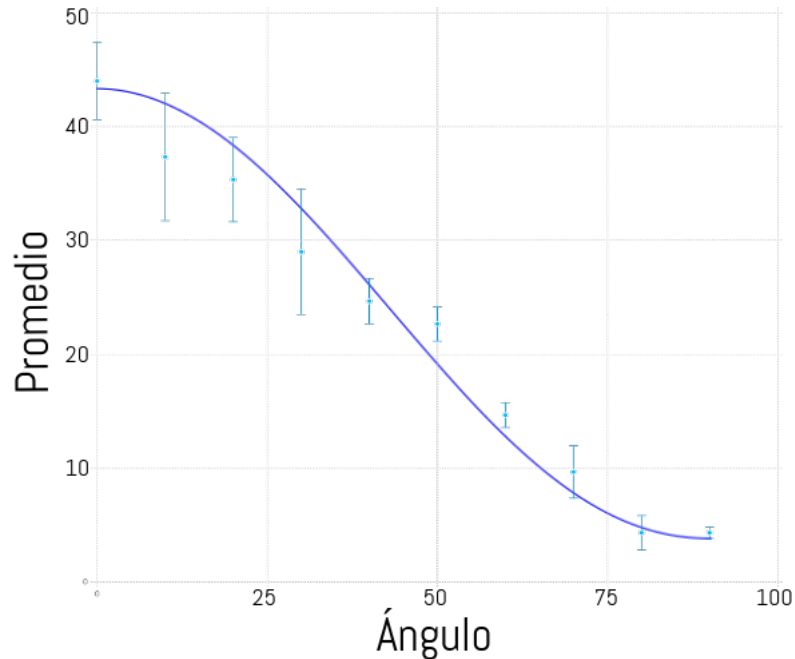


Figura 7: Distribución angular de muones y curva de mejor ajuste.

Junto con los puntos y las barras de error se encuentra la línea de mejor ajuste. Crookes y Rastin en 1972 [5] determinaron que la distribución del flujo es proporcional a $\cos^{2,16} \theta$, donde θ es el ángulo medido con respecto al zenit. La ecuación completa para el flujo a diferentes ángulos es

$$F(\theta) = F_v \cos^{2,16} \theta, \quad (3.2)$$

donde F_v es el flujo vertical. Este parámetro se ajusta dependiendo del ángulo sólido sobre el cual se hacen las mediciones y del umbral que se escoge en el discriminador para las mediciones, en nuestro caso se usó un umbral de 13 mV, y por lo tanto el flujo vertical de muones es menor que el teórico reportado. El flujo vertical de muones será mayor a nivel del mar debido a que mientras más atmósfera recorran los rayos cósmicos, es más probable que hayan más interacciones, y debido a que los muones son partículas secundarias, entonces debemos esperar una disminución en este flujo debido a que la Ciudad de México se encuentra a 2,225 m sobre el nivel del mar.

En nuestro caso el mejor ajuste, que es la línea azul sólida en la figura (7) fue de

$$F(\theta) = 40 \cos^{2,16} \theta + 4, \quad (3.3)$$

En comparación, el valor reportado teórico es de

$$F(\theta) = 110 \cos^{2,16} \theta, \quad (3.4)$$

y entonces en promedio nuestro flujo vertical es de 63.64% menor que el reportado a nivel del mar. En relación a la altura de la Ciudad de México y el umbral que se utilizó, el valor obtenido y el ajuste a los datos, está en correspondencia con los valores teóricos, con lo cual hemos demostrado experimentalmente lo predicho por la teoría, claro con ciertos errores visibles en las barras de error entre los 10 y 30 grados.

3.3 Medición de la Atenuación de Muones mediante el uso de plomo

En esta sección no tenemos muchos resultados que mostrar debido a que solo se ha comenzado a hacer las mediciones. Solo se ha hecho una medición en el vacío y una con plomo y debajo se muestran estos puntos.

Consideramos que el hule espuma que utilizamos en las primeras mediciones sin atenuación como un vacío debido a que su densidad es muy baja. El volumen de la pieza que usamos era de 1125 cm³ y su masa es de 25,7414 g, por lo tanto su densidad es $\rho = 0,022$ g/cm³. Claramente no nos referimos a un vacío físico, sino que como su densidad es muy parecida al aire, y comparada con la densidad del plomo que es de 11,34 g/cm³, puede considerarse como un vacío.

Cuadro 3: Medición en el vacío.

Distancia	#1	#2	#3	#4	#5	Promedio	Error
21 cm	14	12	10	13	10	11.8	1.78

Cuadro 4: Medición con plomo.

Distancia	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	Promedio	Error
21 cm	6	8	9	6	8	9	9	7.8	1.3

Claramente esperamos ver más atenuación mientras más plomo se le agregue al arreglo, y es la medición que falta por realizar.

Referencias

- [1] H. Mok, *Cosmic Rays: Climate, Weather and Applications*, Nova Publishers, 2012.
- [2] M. Nagano y A. Watson, *Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays*, Reviews of Modern Physics **72**, pp. 689-732.
- [3] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4ta edición, John Wiley & Sons, 2010.
- [4] W. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how to approach*, 2da edición, Springer-Verlag, 1987.
- [5] J. Crookes y B. Rastin, *An Investigation of the Absolute Intensity of Muons at Sea Level*, Nucl Phys B **39**, p. 493, 1972.