

Reporte Preliminar

Laboratorio Avanzado - Detección de Rayos Cósmicos

Favio Vázquez*, Susana Marín**

Introducción

Marco Teórico

2.1 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 gas 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 [].

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

*Correo: favio.vazquezp@gmail.com

**Correo: susyma3005@gmail.com

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.

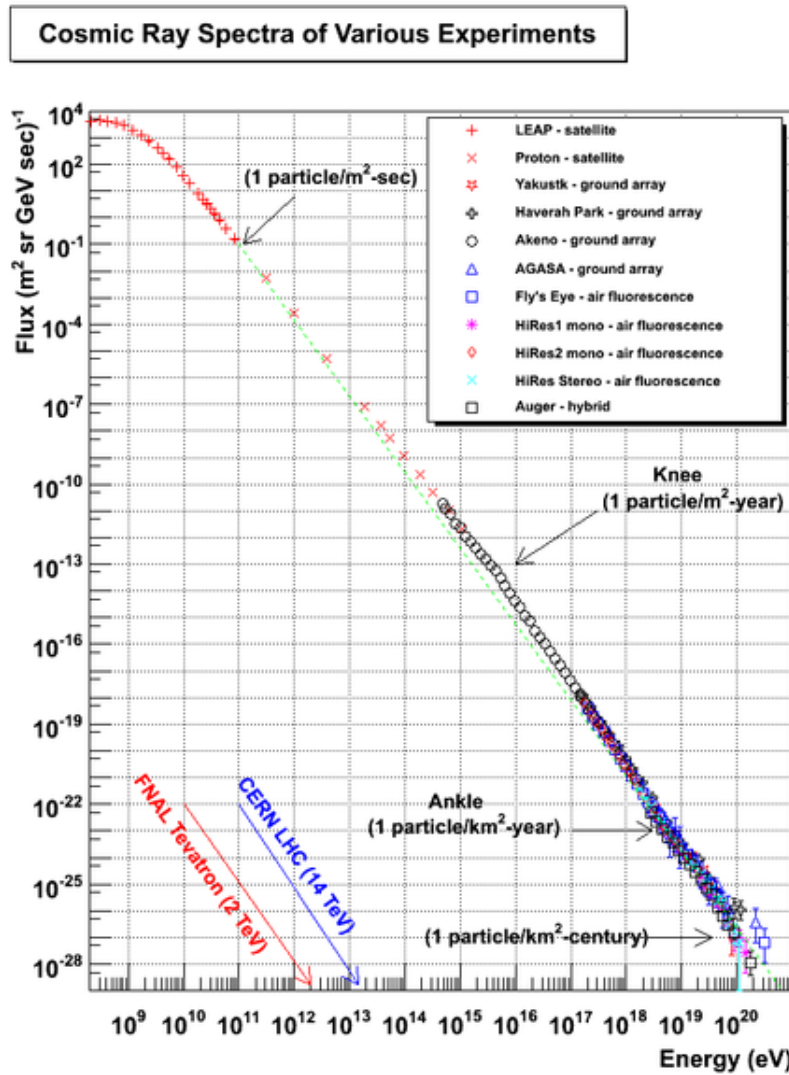


Figura 1: Espectro energético de los rayos cósmicos.

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.

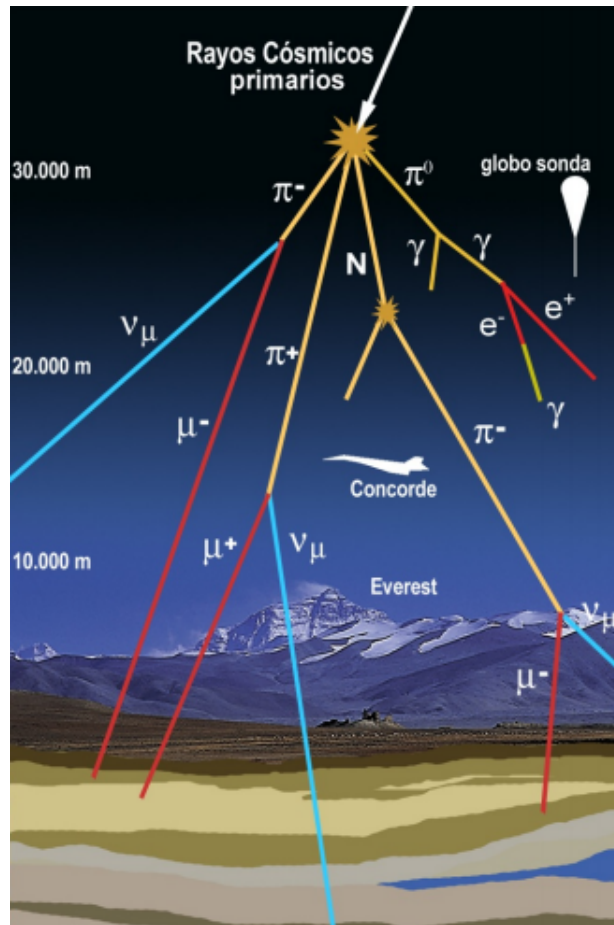


Figura 2: Lluvias extensas de aire producidas por rayos cósmicos primarios, y la producción subsecuente de rayos cósmicos secundarios.

2.2 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.

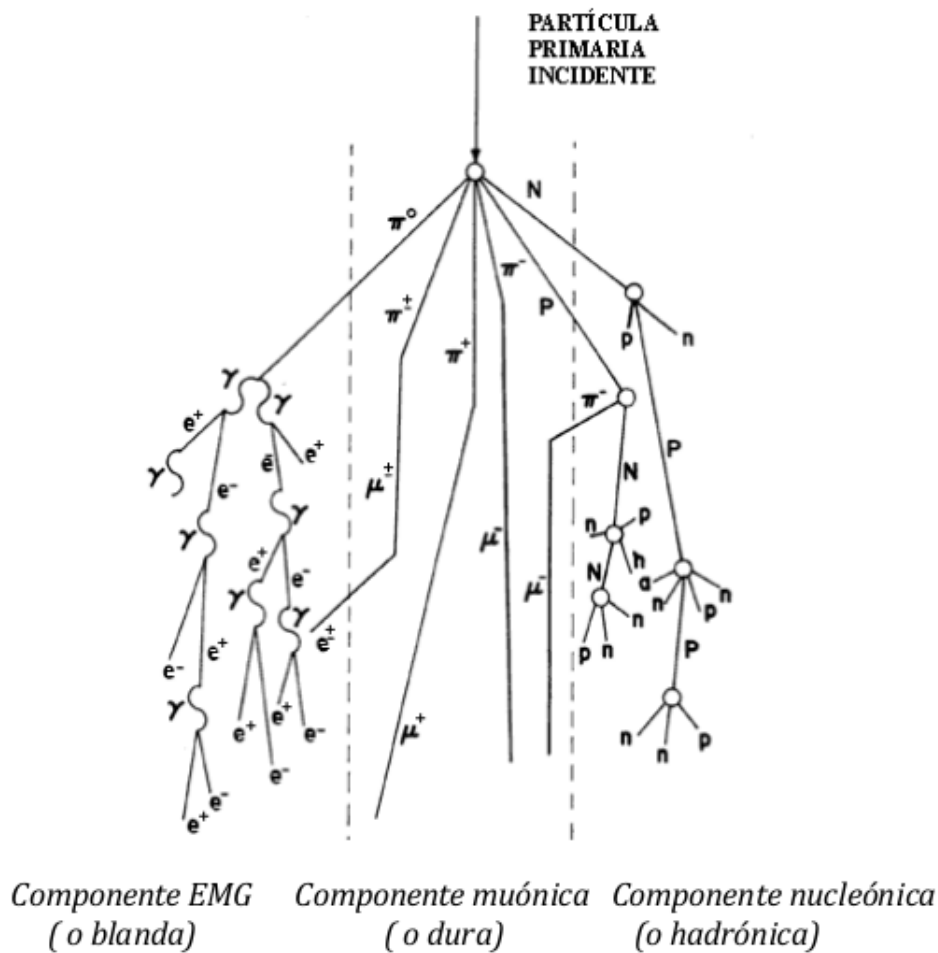


Figura 3: Las distintas componentes de una radiación cósmica.

2.2.1 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.

2.2.2 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).

2.2.3 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:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad (2.1)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \quad (2.2)$$

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.

2.3 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.

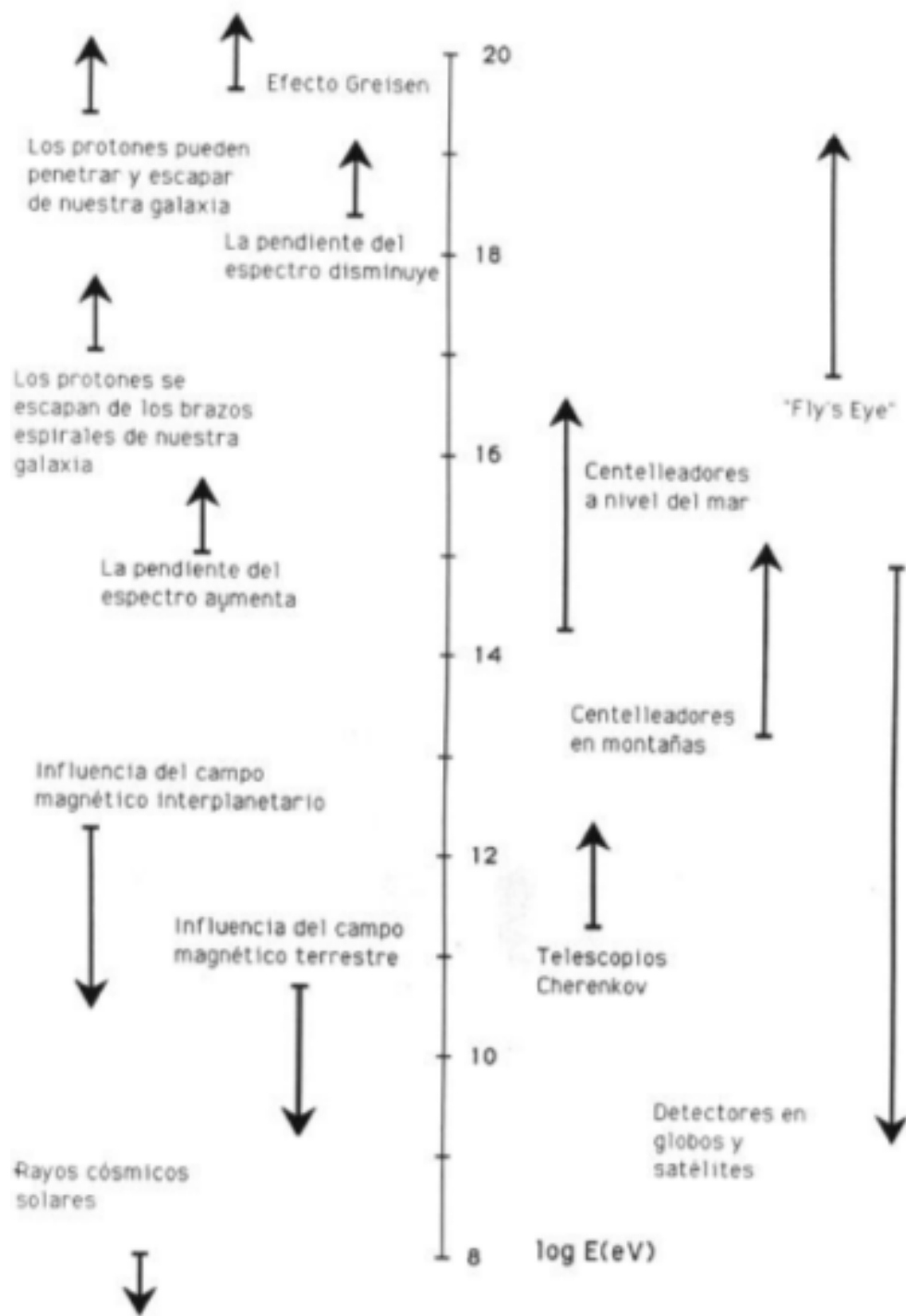


Figura 4: Diferentes intensidades de rayos cósmicos y sus detectores.

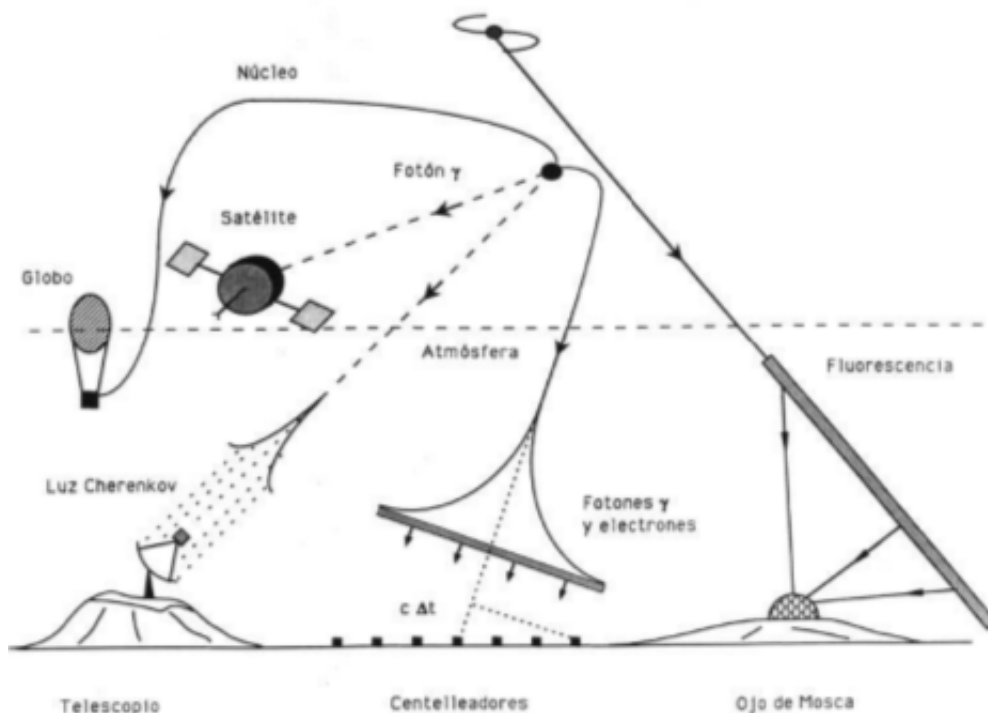


Figura 5: Distintos detectores para rayos cósmicos.

Metodología Experimental

3.1 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.

3.2 Medición del punto de operación

Se utilizó un arreglo de centelleadores, 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.

3.3 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.

Resultados

4.1 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	Medicion1	Medicion2	Medicion3	Medicion4	Medicion5	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

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.

4.2 Medición de la distribución angular de los muones

Referencias

- [1] H. Mok, *Cosmic Rays: Climate, Weather and Applications*, Nova Publishers, 2012. M. Nagano y A. Watson, *Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays*, *Reviews of Modern Physics* **72**, pp. 689-732.