Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Identificación de trazas de los muones atmosféricos usando detectores gaseosos

Tesis presentada al

Colegio de Física

Como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física Aplicada

Por

Alexis Garay Robles

Asesorado por

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz

Dr. Arturo Fernández Téllez

Puebla, Puebla

Junio 2019

Hoja de jurado

Agradecimientos

Índice general

Introducción

Resumen

1.-Interacción de la radiación de la materia……...1

1.1.-Clasificación de la radiación……...1

1.2.- Tipos de radiación……...1

1.3.- Tipos de colisión de la radiación con la materia……....2

1.4.- Fuentes de radiación natural……4

2.-Detectores……..….5

2.1.- Tipos de detectores. ……..…..5

2.2.-Propiedades generales de los detectores…….....8

2.2.1.-Zonas de operación del detector……..…8

2.2.2.-Regiones de operación……..9

2.2.3.-Eficiencia……10

2.2.4.-Resolución energética y temporal……...11

2.2.5.- Tiempo muerto……..12

2.2.6.- Respuesta…….....12

2.3- Ionización..……14

2.3.1.- Movimiento de electrones e iones dentro del gas……..…14

2.3.2.-Avalancha, campo espacio-carga y sus efectos..……...15

2.4.-Detectores RPCs……..16

2.4.1.-Timming……18

2.4.2.-Trigger……18

2.5.-Modo de operación: streamer y avalancha……...18

2.6.-Rayos cósmicos……20

2.7.-Muones atmosféricos……22

2.8.-Telescopio de muones……..23

3.- Propiedades de los Materiales……...……...24

3.1. Acrílico……..24
3.2.- Aluminio…….…...25
3.3.-Placa de cobre…….....25
3.4.- Vidrio…….....26
3.5.-Pintura……...….27
3.6.- Gas……..…..27
3.7.- Electrónica para la lectura de datos…….....29
3.8.-PMTs…….……..31
4.-Diseño y construcción de los RPCs…….....34
4.1.- Caja de acrílico…….....34
4.2.- Electrodos…….....35
4.3.- Conexiones de gas y alto voltaje…….....37
4.4.- Caja de aluminio…….....39
4.5.- Telescopio de RPCs…….....42
5.- Experimento de cada prueba con su arreglo experimental y resultados…….....43
5.1.- Resistividad de la superficie……43
5.2.- Cuenta de los eventos…….…....45
5.3.- Eficiencia……....48
5.4.- Distribución de carga…….…...54
5.5.- Resolución temporal……56
Conclusión…….…59
Referencias bibliográficas
Anexos

Resumen

Este trabajo consistirá en el desarrollo y construcción de un telescopio de muones para identificar las trazas de los muones atmosféricos. Primero se dará a conocer la teoría de la interacción de la radiación con la materia y la de los detectores, de los gaseosos, como el modo de operación en que se trabajó, la ionización que ocurre dentro de los gaps y tipo de detectores. Después se estudiaron las propiedades de los materiales usados. Se prosiguió a la construcción, arreglo experimental con la electrónica y por último el análisis. Las pruebas que se estudiaron fueron la de la resistividad de superficie, conteo de eventos, eficiencia, resolución temporal y distribución de carga. El tipo de detector fue gaseoso, RPC. Se construyeron tres detectores con su base de modo que hiciesen un modelo de telescopio.

Introducción

"De los escombros de estrellas moribundas,
esta lluvia de partículas
despojos húmedos con brillo ...

Una ola de átomos apresurándose a volver a casa
colapso del gigante,
huésped inestable que no puede detenerse ...

El corazón del sol enrojece y se expande
Su poderosa aspiración es eterna,
como la corteza de su sustancia
un día será hielo blanco.

En el campo resplandeciente de Orion
grandes cúmulos de estrellas en formación,
tal como vemos todas las noches,
ardiente e incansable hasta el final.

Alejándose del polvo frío
que nunca y siempre existe,
el silencio y los restos se acercan...

Este brazo, esta mano,
mi voz, su cara, este amor"

John Haines (1983)

Uno de los estudios más interesantes, para entender el universo, son los rayos cósmicos. A ciencia cierta no se sabe el origen de dichos rayos, pero se ha debatido que pueden provenir desde los rincones del universo o de una galaxia lejana. Los rayos cósmicos es radiación que viaja a una velocidad cercana a la luz. Esta radiación es natural que siempre nos está bombardeando.

Al momento que los rayos llegan a nuestra atmosfera, surgen infinidades de colisiones y de estas surgen otras partículas. A partir de estas partículas se ha podido estudiar las propiedades de los rayos por medio de detectores. Al pasar de los años se han hecho varios tipos de detectores, conforme va evolucionando la tecnología se han hecho detectores con un mejor rendimiento. Cada detector puede detectar una partícula en especial, pues hasta ahorita no hay un detector universal.

1.-Interacción de la radiación de la materia

La radiación es energía que se propaga por medio de ondas electromagnéticas o partículas. Penetra la materia y deposita energía en ella, sea por fotones o partículas.

1.1-Clasificación de la radiación

La radiación se clasifica en ionizante y no ionizante.

La radiación ionizante es aquella que ioniza el átomo, es decir, es la expulsión de electrones de un átomo. Este fenómeno origina un par iónico. Este proceso ocurre cuando el átomo recibe una energía suficiente para separar un electrón o varios electrones de su capa orbital. Así, el átomo queda con una carga positiva porque que el número de cargas positivas es mayor a la de las cargas negativas. La carga positiva se llama ion positivo, mientras que la negativa se llama ion negativo.
La radiación no ionizante no tiene suficiente energía para ionizar a los átomos.

1.2.-Tipos de radiación

Hay dos formas de radiación que son las ondas electromagnéticas y corpusculares.

La radiación electromagnética se propaga por medio ondas de energía, eléctrica y magnética. Tiene una velocidad en el vacío de $3x10^8$ m/s. La energía de dicha radiación depende de su frecuencia o longitud de onda.

El espectro electromagnético describe la distribución energética de las ondas electromagnéticas por medio de su frecuencia, que va desde la mayor longitud de onda hasta la de menor longitud. En el espectro se puede apreciar tanto radiación ionizante como no ionizante.

Los tipos de radiación electromagnética son las ondas de radio, infrarrojo, luz visible, luz ultravioleta, rayos x y gamma. Los rayos x y gamma son radiaciones ionizantes por la energía que tienen.

Los rayos x tienen una frecuencia entre 10^{16} y 10^{25} Hz. Se producen cuando los electrones inciden en el objetivo, colisionan con un átomo y pierde la mayor parte de su energía por ionización y excitación del átomo, lo cual este emite fotones [1].

Los rayos gamma tienen una frecuencia igual o superior a 10^{25} Hz. Se originan en el núcleo excitado. Son emitidos como energía pura junto con partículas alfa o beta durante la desintegración radiactiva. La interacción de los

rayos gamma con la materia se caracteriza por el hecho de que cada fotón incidente se elimina individualmente en un solo evento [2].
La absorción de la energía radiante depende de la estructura de la materia. Si la energía que separa el estado fundamental de la molécula es mayor que 3.2 eV (380nm), se necesitan fotones de la zona UV para producir la transición del estado fundamental al excitado [3].

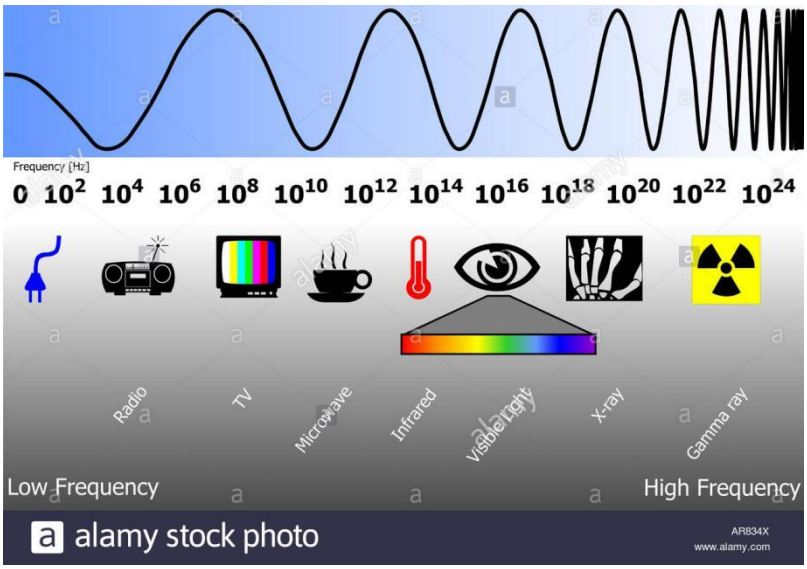


Imagen 1. Espectro electromagnético

1.3.-Tipos de colisiones con la materia

En general hay dos características principales de las partículas cargadas que pasan a través de la materia: (1) perdida de energía de la partícula y (2) desviación de la partícula incidente. Estos efectos son los resultados primarios de dos procesos [4]:

-Colisiones inelásticas con los electrones del átomo.

-Dispersión elástica de los núcleos.

Estas reacciones ocurren muchas veces por unidad de longitud de la trayectoria. Sin embargo, no son las únicas reacciones que pueden ocurrir. Los otros procesos son:

-Emisión de radiación Cherenkov.

-Reacciones nucleares.

-Bremsstrahlung.

Hay tres principales tipos de interacción con la materia, que son los más conocidos:

Efecto Compton

El físico Arthur H. Compton descubrió este efecto al observar interacciones de la radiación con la capa o nivel externo del átomo. Cuando el fotón interactúa con el electrón, el fotón rebota y pierde algo de su energía. El fotón juega el papel de proyectil que colisiona con un electrón como objetivo. Al momento de la colisión el electrón toma un cierto ángulo, mientras que el fotón con menos energía toma otro ángulo. La energía del fotón es la diferencia entre la energía de incidencia y la transmitida al electrón. Después de la colisión puedes haber más interacciones, pues esto depende de la energía que tengan. La fórmula de Compton:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - cos\theta)$$

Donde $\Delta\lambda$ es la diferencia entre las longitudes, m es la masa del electro que es igual a m=9.10x10^{-31} kg, el ángulo theta es el ángulo entre los fotones incidentes y dispersados y c es la velocidad de la luz.

Efecto fotoeléctrico

Este efecto fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887. La radiación interactúa con un electrón muy ligado al núcleo. La energía del fotón es transmitida al electrón el cual sale expulsado de la capa, siguiendo la trayectoria del fotón incidente.

En 1905 Albert Einstein explicó que el efecto fotoeléctrico; asumió que la luz consiste en cuantos de energía hv lo cual actúa en un solo proceso elemental. Estos cuantos de luz son llamados fotones. Los numeros de fotones en la onda de luz son proporcional a la intensidad [5].

La ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico esta dado con lo siguiente:

$$hf = w_o + E_0$$

Donde h es la constante de Plank, f es la frecuencia de la partícula incidente, w_o es la función de trabajo y E_0 es la energía cinética del fotoelectrón.

Producción de pares

Consiste en que toda la energía del fotón incidente atraviesa la nube de electrones e impacta en el núcleo de la partícula, produciéndose dos partículas. Estas dos partículas se llaman positrón y electrón, que se desvían en direcciones opuestas, cada una con una energía a la mitad de la partícula incidente. La partícula incidente debe tener una energía de al menos 1.022 MeV.

1.4.-Fuentes de radiación natural

Hay dos fuentes de radiación, la artificial y natural. Estamos rodeado de la radiación natural desde los orígenes del universo.

Existen 92 elementos químicos de los cuales algunos tienen más de un isotopo. Hasta ahorita existen 325 variedades de átomos. La mayoría son estables. Los que son inestables son los que contienen un exceso de protones o neutrones, dando origen a las desintegraciones radioactivas. Las desintegraciones radioactivas emiten radiación en forma de partícula o electromagnética. En la naturaleza existen 51 variedades de átomos radiactivos [6].

Las fuentes de radiación natural se encuentran por todas partes. Como en nuestra alimentación que se encuentra el potasio -40, tritio, etc. La cósmica, donde muchas partículas nos atraviesan en cada instante de tiempo. El radón es un gas radioactivo que se produce por la descomposición del uranio que es un elemento que se encuentra presente en varias rocas. El gas emigra hacia la atmósfera donde se desintegra y se une a las partículas de la atmósfera y así andar por el aire que nos rodea. Cabe destacar que el radón en la radiación natural más abundante que nos rodea. El radón es peligroso ya que es un emisor de partículas alpha que produce ionizaciones en la materia celular. Más adelante se hablará a detalle de los rayos cósmicos que interactúan con la atmósfera y llegan a la superficie terrestre.

Imagen 2. Fuentes de radiación.

2.-Detectores

Al paso de los años científicos han estudiado las propiedades de las partículas.

La radiación no se puede sentir, ver ni oler, pero se puede detectar por medio de instrumentos que pueden medir, al paso de la partícula, su energía, localización, momento, tiempo de llegada, etc. La detección puede determinar ciertas propiedades de las partículas. Las partículas subatómicas cargadas pueden ser detectadas por las interacciones electromagnéticas de la materia, y las partículas que no tienen carga pueden ser detectadas por medio de interacciones.

Los primeros detectores de radiación fueron de niebla y burbuja. Mientras se iban desarrollando nuevas tecnologías se hicieron nuevos detectores optimizando su funcionamiento. Cada partícula es detectada por un detector en especial. No hay un detector que mida todas las partículas.

2.1.-Tipos de detectores

Detectores gaseosos

Introducido por Geiger en 1908, donde el detector tenía una forma cilíndrica hasta detectores actuales que tiene muchas configuraciones. El primer detector moderno con configuraciones electrónicas a la adquisición de datos es el MWPC creado por G.Charpak [7].

El detector gaseoso funciona gracias a que la radiación ioniza el gas por medio de un voltaje que se aplica al detector. Al momento que se ioniza el gas se manda una señal eléctrica, dependiendo del rango de la diferencia de voltaje. Las partículas interactúan con el gas creando ionizaciones primarias y secundarias dando lugar a iones.

Los detectores gaseosos tienen aplicaciones interesantes como:

-Astronomía

Se aplica en dos especializaciones que son espectroscopia y polarimetría de rayos x en donde se usan en satélites de observación y por la polarización del fotón que está relacionada de la interacción fotoeléctrica [8].

-Física de altas energías

Los detectores gaseosos se usan mucho en algunos experimentos de CERN. El experimento de alta energía de iones pesados ALICE se basa en gran medida en detectores de gases. Tiene tecnología de última generación que Incluyen MWPC, como un sostificado foto detector de gran superficie para RICH3 en el sistema de identificación para la partícula de alto momentum y

como un detector de rayos x para la transición de la radiación; una gran cámara de proyección de tiempo; RPCs en el sistema de trigger para muones y en el sistema de tiempo de vuelo [9].

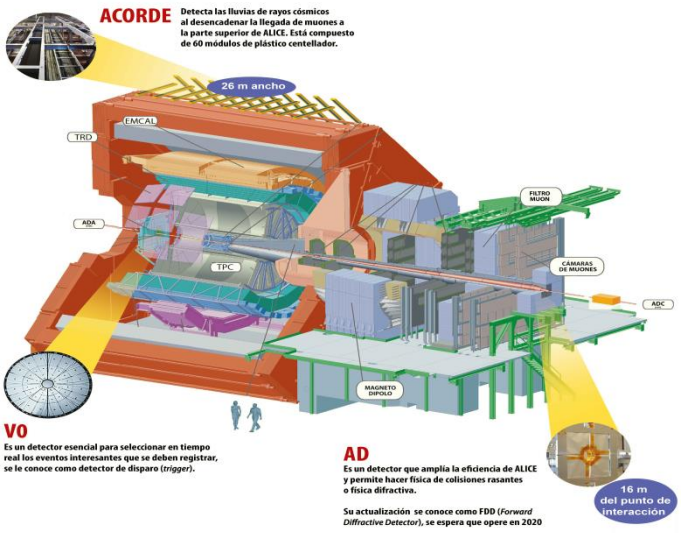


Imagen 3. Detector ALICE.

-Medicina y biología

Se ha desarrollado la radiografía digital y la emisión de positrón por tomografía.

Son tres los detectores más ultilizados:

Cámara de ionización

La cámara de ionización es un detector en la cual pares iónicos son recolectados a partir de un gas. Mientras las partículas cargadas pasan a través del gas, muchas interacciones ocurren ionizando así la molécula del gas. La ionización puede ocurrir por interacción directa de la partícula incidente o por interacciones secundarias. El voltaje aplicado determina la velocidad de deriva de los iones, por lo tanto, si el campo eléctrico es más intenso, pueden ocurrir más ionizaciones en las moléculas.

La intensidad de dicha radiación es recogida como una corriente por las interacciones ocurridas.

Contadores proporcionales

Al aumentar el voltaje aumenta el campo eléctrico y por lo tanto los electrones tienen una energía cinética mayor. Los electrones secundarios acelerados producen nuevas ionizaciones, lo que esto origina es un fenómeno de multiplicación de carga al unirse ionizaciones primarias y secundarias. El

proceso de multiplicación en el gas implica la formación de cascadas llamadas Townsend [10].

Contador Geiger-Muller

Fue el primer detector fabricado y es el más usado. Puede medir radiación en personas y lugares.

Para el contador Geiger-Muller, se aumenta más el campo eléctrico lo cual genera varias avalanchas secundarias producidas por fotones emitidos por átomos excitados en la avalancha inicial.

Detectores de centelleo

La radiación es capaz de excitar ciertos átomos de algunos materiales, es decir, estos materiales emiten fotones. Los detectores de centelleo son capaces de transformar la radiación es una señal eléctrica, y así amplificando la señal con un tubo fotomultiplicador.

Las propiedades ideales que debe seguir un material centellador son los siguientes:

-Ser capaz de convertir la energía cinética de las partículas en luz detectable con una alta eficiencia.

-El medio debe ser transparente para el paso de la onda, para así obtener una buena colección de luz.

-El tiempo de caída de la luminancia inducida debe ser corto para que los pulsos de la señal puedan ser generados.

-El material debe tener una buena calidad óptica, así como una fabricación de las medidas exactas y de área grande para que el material tenga las características de un detector de partículas [10].

Detectores semiconductores

Los detectores semiconductores son los más sensibles a la radiación. El material semiconductor esta hecho a base de germanio o silicio. La energía se deposita y se convierte en una señal eléctrica. Forman una red cristalina con otros átomos de mismo tipo a través de enlaces covalentes de los 4 electrones de valencia que tienen. Funciona por medio de estructura de bandas y banda de valencia.

Imagen 4. Detectores de radiación. Semiconductor y Geiger.

2.2.-Propiedades generales de los detectores

Cada detector tiene propiedades diferentes y es lo que hace distinguirse de los demás. A continuación, se mencionarán las propiedades más relevantes de un detector.

2.2.1.-Zonas de operación del detector

Antes de dar a conocer los modos de operación, hablemos del modelo simplificado. Una carga eléctrica Q es depositada en el detector en el tiempo $t = 0$, cuando varias partículas interaccionan con el mismo. Al aplicarle un campo eléctrico al detector, una carga Q es recolectada en los electrodos.

El tiempo de recolección T_c, de toda carga liberada, varía en cada detector. El tiempo T_c incluye el tiempo de movilidad de la partícula en el detector y el tiempo en que la carga emitida llega a los electrodos. Después se genera corriente en el tiempo T_c en donde se generan señales de pulsos (cuenta de pulsos) que tienen información en su amplitud y forma [11].

$$Q = \int_0^{t_c} i(t)dt$$

Modo corriente

Un detector funciona en modo corriente cuando la señal de salida o intensidad de corriente es medida durante un intervalo de tiempo grande a comparación con la del impulso.

El promedio de la intensidad está dado por la siguiente ecuación:

$$< i >= \frac{Q}{t_c}$$

Que es la intensidad producida por sucesos conocidos en dicho intervalo. El valor promedio de la intensidad de corriente en un intervalo de tiempo T esta dado como

$$i(t) = \frac{1}{T}\int_{t_c-T}^{t_c} i(t')dt'$$

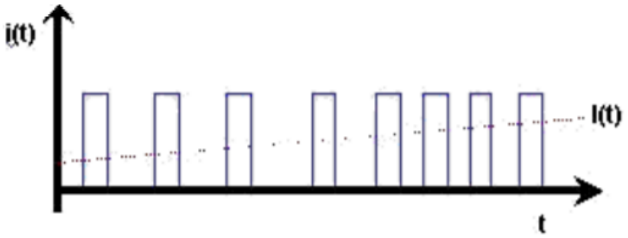


Imagen 5. Detector de radiación basado en la medida de corriente.

Modo pulso

Es la información detallada de cada suceso. Se mide la señal de salida para cada pulso de corriente, la corriente de salida es esencialmente instantánea y de ella se deriva un impulso de voltaje que es proporcional a la intensidad de la corriente. La sensibilidad y la información de cada impulso son las ventajas destacadas de este modo de operación.

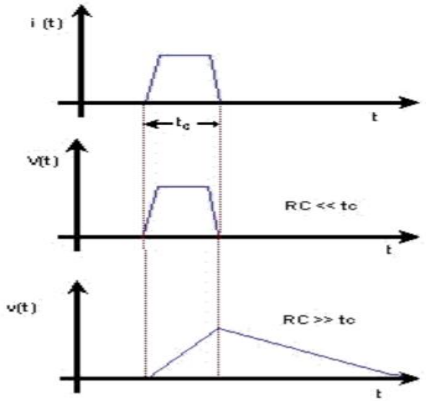


Imagen 6. Detector basado en modo impulso.

2.2.2.- Regiones de operación

Aumentando la tensión aplicada entre los electrodos y midiendo la amplitud del impulso de corriente se obtiene una curva y de ella se dividen entre regiones de operación que se enunciaran en seguida.

Región I

El voltaje es bajo que la velocidad de los iones también es bajo y por ende no se obtiene información útil.

Región II

El número de iones colectados no cambia si se aumenta el voltaje. Los iones primarios son los que son recolectados y por eso no hay recombinación. El tamaño de los pulsos es por los iones primarios y de la energía depositada.

Región III

La curva empieza a crecer porque los electrones tienen mayor energía para producir ionizaciones secundarias producidas por los choques de la molécula del gas.

Región IV

El crecimiento deja de ser lineal porque pasa a depender también de la intensidad es la radiación, así ambas curvas presentan trayectorias convergentes.

Región V

El campo eléctrico es tan intenso que provoca el fenómeno de avalancha producidos por las ionizaciones secundarias. Los pulsos son grandes por la colección de iones, pero se pierde el conteo de la ionización primaria.

Región VI

Región de descarga continua donde ya no hay conteo, lo cual no llevaría información relevante.

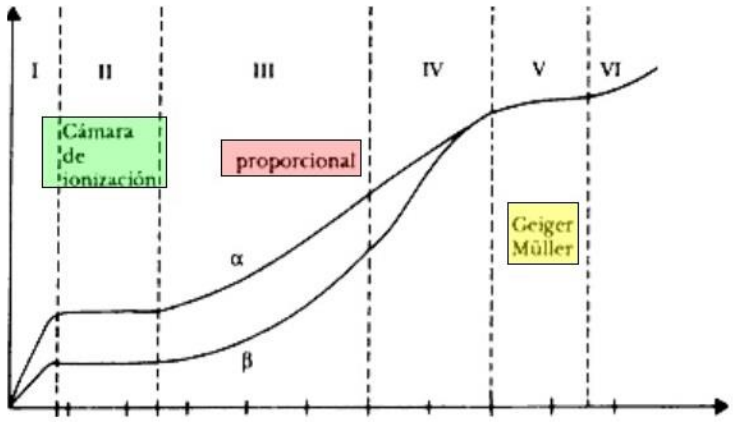


Imagen 7. Regiones de operación.

2.2.3.-Eficiencia

Un detector no es perfecto, no responde al paso de todas las partículas que lo atraviesan. La eficiencia total de un detector de partículas se define como el

cociente entre el número de partículas detectadas y el número de partículas emitidas. La eficiencia total se puede descomponer en geométrica y en intrínseca. La geométrica, es consecuencia del tamaño finito del detector y su distancia de la fuente de la partícula. La intrínseca depende de la sección eficaz de la radiación incidente, su energía y material del detector [10]. Supongamos que si hay una eficiencia 100 % implica que todas las radiaciones fueron detectadas.

La eficiencia puede ser afectada por el tipo y energía de la radiación, así como el nivel de discriminación, la magnitud de amplificación de los pulsos y valores de voltaje que pueden afectar el conteo.

La eficiencia total está definida como:

$$\in_{tot} = \frac{Pulsos\ \ registrados}{Particulas\ \ emitidas}$$

Y la eficiencia intrínseca:

$$\in_{int} = \frac{Particulas\ \ detectadas}{Particulas\ \ que\ \ llegan\ \ al\ \ detector}$$

2.2.4.-Resolución energética y temporal

La resolución energética puede medir y distinguir dos energías cercanas en donde incide un haz de radiación monoenergético. Al medirlo se observa una estructura de pico, de forma gaussiana, que tiene un ancho definido. El ancho se produce por el número de ionizaciones y fluctuaciones.

La resolución de un detector se define como la anchura a la mitad de su altura, de una línea monocromática, expresado como Full Width at Half Maximum (FWHM). Si el ancho se define como ΔE, la resolución relativa para la energía es:

$$Resolución = R = \frac{\Delta E}{E}$$

En detectores delgados, el número de ionizaciones $N_{\pm}$es pequeño, entonces se aplica la estadística de Poisson, partiendo $N_{\pm} = E/w$, donde w es la energía necesaria para crear un par, luego se tiene que $N_{\pm} = \sigma^2$, por lo que el error estadístico viene dado por:

$$R = \frac{\Delta E}{E} = 2{,}35\frac{\sqrt{N_{\pm}}}{N_{\pm}} = 2{,}35\frac{\sqrt{w}}{E}$$

Llegando a que $\mathrm{FWHM} = 2\sqrt{2ln2}\sigma = 2{,}35\sigma$.

Si otras fuentes de fluctuaciones simétricas e independientes se suman al ruido estadístico en la señal, la resolución de la energía del detector será la

contribución de todas las $FHWM_{inoise}$ de todas las fuentes del ruido del sistema. En general la función de respuesta siempre tenderá a una forma gaussiana, aun si cada fuente tiene una distribución diferente [12].

La contribución de todas las $FHWM_{inoise}$:

$$FWHM_{total}^2 = FWHM_{ruido_e}^2 + FWHM_{ruido_i}^2 \ldots$$

en un periodo de tiempo. Es bueno tener una buena resolución temporal para obtener con mayor precisión los eventos ocurridos en un determinado rango. La resolución temporal se mide con la desviación estándar, parecida a la resolución energética.

La resolución puede ser afectada por algunas propiedades como las del material, medidas, electrónica, etc. Cabe destacar que le resolución también depende de la velocidad de deriva del electrón, la cual esta velocidad de deriva depende del tipo de gas y el valor del campo eléctrico.

2.2.5.-Tiempo muerto

Con cualquier detector para cualquier electrónica asociada, existe un intervalo de tiempo mínimo que debe separar a dos sucesos consecutivos si se quiere que ambos sean registrados separadamente. Este intervalo acostumbra a denominarse tiempo muerto.

El tiempo muerto limita la capacidad de reconteo. Se distinguen dos tipos de tiempo muerto, extensible y no extensible**.** Si una partícula atraviesa en el detector en el tiempo muerto lo prolonga, lo cual es en el caso extensible. En el caso no extensible, si durante un tiempo T el contador registra un número de K cuentas, entonces $k = K/T$ donde k son las cuentas por segundo. Por lo tanto, las verdaderas cuentas por segundo m, cumple con $mT = kT + mkt$ con lo que [13]:

$$m = \frac{k}{1 - k\tau}$$

2.2.6.-Respuesta

El tiempo de respuesta del detector no es más que tiempo que transcurre entre el paso de la partícula y la formación de la señal. La sensibilidad es uno de los factores más importantes de la respuesta ya que es la capacidad para producir una señal medible. Entonces la sensibilidad y la duración de la señal es relevante ya que durante ese periodo puede surgir un segundo evento, por lo tanto, no puede ser detectado lo cual no contribuye a la tasa de conteo y si contribuye al tiempo muerto.

2.3.-Ionización

Al paso de la partícula en el gas suceden muchas interacciones, una interacción puede ionizar las moléculas del gas. La ionización no se observa, pero se puede medir por dichas interacciones que suceden. La interacción de Coulomb entre la partícula incidente y los átomos del gas, se produce la ionización o excitación de los átomos. Cuando se ioniza el gas se produce un electro libre y un ion positivo.

Todos los gases tienen diferente nivel de ionización, pero la mayoría de ellos está entre 10 y 20 eV; para la producción de un ion par se necesita en promedio el doble de energía. Esto se debe a que la energía transferida al electrón es mayor a la que se necesita para ionizar el átomo, porque parte de esta esta energía se disipa en calor. Cada electrón primario típicamente da lugar a tres pares ion-electrón.

Si una partícula cargada viaja a través del gas a una distancia fija, esta deja una cantidad de energía depositada que varía en cada instante. Esto es en parte debido a las fluctuaciones en el número de electrones expulsados del átomo del gas y en parte debido a la fluctuación de la cantidad de energía recibida por cada electrón. Esto dará a una distribución del número de cargas más amplio de lo que se puede esperar de una distribución de Poisson [10].

El potencial de ionización es la energía necesaria para extraer un electrón de un átomo neutro. La energía de ionización puede ser considerada como una propiedad en contra de la electronegatividad. Una alta electronegatividad implica que un elemento busca fuertemente tomar electrones a una reacción. Más adelante, en la sección de gases, se mencionará a detalle los enlaces químicos y como implican en la energía de ionización de los gases.

Gas	Potencial de ionización (eV)
Ar	15.7
Xe	12.1
He	24.5
CO_2	13.8
H_2	15.6
N_2	15.5
O_2	12.5

Tabla 1. Gases con su respectico potencial de ionización [10].

2.3.1.-Movimiento de electrones e iones dentro del gas.

Hay algunos fenómenos que están implicados directamente en el movimiento de las cargas en el detector. La velocidad de las cargas no es constante ya que hay muchas colisiones, y también no son iguales. Una de las razones de las que la velocidad no es igual es porque la masa de los iones en promedio es mucho más grande que la de los electrones por lo que la velocidad de los iones positivos en promedio es del orden de 10^4 m/s, mientras que la de los electrones es de 10^6 m/s.

Movimiento térmico y difusión

La difusión de un electrón en el gas es causada por colisiones aleatorias con los átomos del gas debido por el movimiento térmico. Una carga libre en el gas asumirá una energía siguiendo la distribución de Maxwell -Boltzmann alrededor del promedio:

$$< E >= \frac{3}{2}kT$$

Donde k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura.

En caso de ausencia de un campo eléctrico externo, la difusión es isotrópico y puede ser descrito por la distribución Gaussiana. Una nube de electrones que está en la posición $\vec{r}$ en el tiempo *t*=0, está dado por la siguiente distribución:

$$\varphi(\vec{r},t) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma(t))^3} exp(-\frac{(\vec{r}-\vec{r}_0)^2}{2\sigma(t)^2})$$

La sigma va creciendo con el tiempo, $\sigma = \sqrt{2Dt}$ donde *D* es el coeficiente de difusión.

Movimiento del electrón debido al campo eléctrico.

Si hay un campo eléctrico presente, el movimiento de difusión se superpone con un movimiento de deriva constante debido al campo eléctrico. En ausencia de un campo magnético, el vector velocidad de deriva siempre en dirección del campo eléctrico. A nivel microscópico el electrón toma una energía cinética:

$$E_c = e_0|\vec{E}|\delta\mathcal{Z}$$

$\delta\mathcal{Z}$ es la distancia de deriva entre dos colisiones. La unidad de carga es e_0 y $|\vec{E}|$ es el campo eléctrico. Después de ciertas colisiones, las partículas van perdiendo energía cinética y por lo tanto se reducen su velocidad, pero son acelerados por el campo eléctrico. En el nivel macroscópico, haciendo un promedio de las colisiones, la velocidad promedio es V_D. La velocidad de deriva está en función de *E/p,* donde *E* es el campo eléctrico detectado por los electrones y *p* es la presión [14].

2.3.2.-Avalancha, campo espacio-carga y sus efectos.

Cada electrón crea una avalancha lo cual crece conforme va llegando al ánodo. Un electrón tiene una probabilidad de crear una avalancha y multiplicarse.

La avalancha tiene forma de una gota de agua y esto se debe a que los electrones se mueven más rápido que los iones positivos. Los electrones se encuentran en la parte de la cabeza y los iones en la parte angosta que van arrastrándose respecto al campo eléctrico.

El coeficiente de Townsend α es la trayectoria libre media de los electrones para que suceda una colisión de ionización secundaria. Tendiendo la siguiente ecuación donde tenemos *n* electrones en una trayectoria *dx* produciendo nuevos electrones*:*

$$dn = n\alpha dx$$

Integrando tenemos:

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

n_0 es el número de inicial de dichos electrones.

Llegando así una multiplicación de electrones, donde tenemos el factor de multiplicación:

$$M = \frac{n}{n_o} = e^{\alpha x}$$

Durante la progresión de la avalancha, las nubes de las cargas se superponen en el espacio donde generan su propio campo eléctrico. Este fenómeno se llama campo espacio-eléctrico. Este campo se superpone al aplicado, reduciéndolo entre las regiones de los electrones e iones [4].

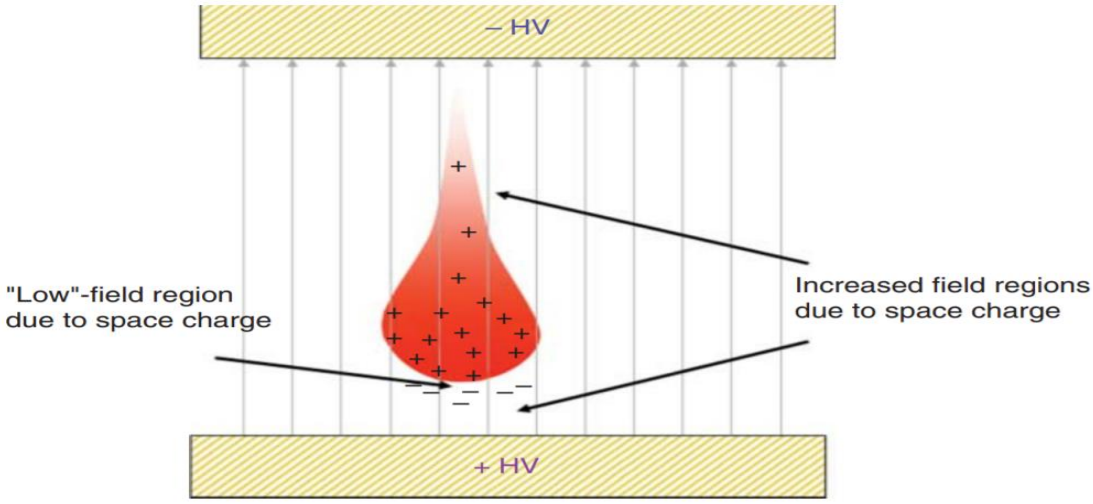


Imagen 8. Avalancha donde el campo eléctrico es diferente en algunas regiones por el campo eléctrico debido al efecto espacio-carga.

Hay dos efectos que genera el campo espacio-carga: reduciendo la ganancia de la avalancha, porque para el bulto de la gota el campo eléctrico se reduce con respecto al campo aplicado y la aparición de pulsos grandes llamados streamers.

El efecto formado puedes observarse de varias maneras:

-Para la irradiación y geometría fijas, el crecimiento de la carga inducida con el voltaje aplicado se desvía del comportamiento exponencial y se vuelve lineal.

-La relación de la carga y la carga inducida total es mayor que las avalanchas de Tonwsend.

-La distribución de carga cambia su forma, con la supresión de avalanchas mayores [15].

2.4.-Detectores RPCs

El detector RPC fue desarrollado e inducido por Santonico y Cardarelli en 1981, como un detector eficiente y rápido. Está conformado por dos placas paralelas con gas entre ellas con un campo eléctrico aplicado. Partículas pasan a través del detector para ionizar las moléculas del gas y así formar avalanchas o streamers. Después de esto, las partículas ionizadas viajan hacia los electrodos y así formar una señal detectable. Varios aspectos han hecho que los RPCs sean viables para la detección de muones. Tiene una resolución temporal y espacial buena, fácil de construir y de bajo costo.

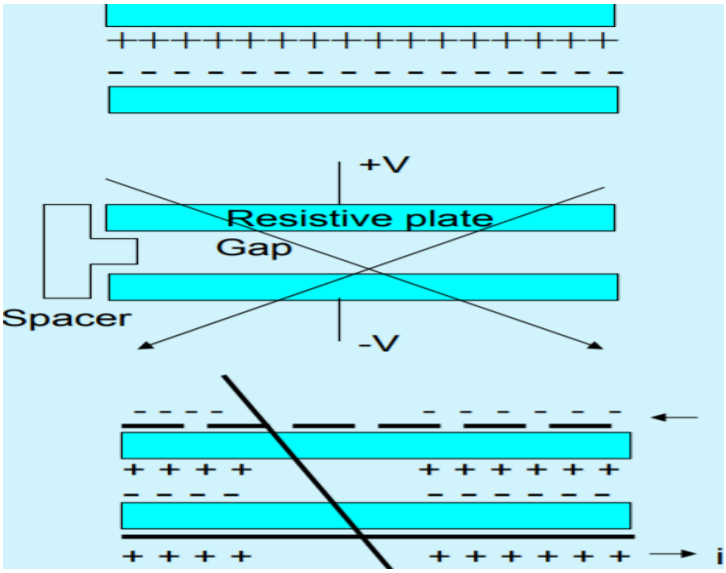


Imagen 9. RPC.

Cabe mencionar que dependiendo de la electrónica se puede optimizar más la detección y obtener una adquisición de datos precisos; también varios parámetros de calidad de material implican en la eficiencia de la detección.

Hay varios diseños del detector de gas de placas resistivas.

El RPC de gap simple consiste en un gap que tiene dos electrodos y entre ellas el gas. El potencial eléctrico se aplica a través de los electrodos.

Para mejorar los resultados se improvisó usando dos módulos de RPC, pero de tal manera que la señal inducida de los dos gaps fuera al mismo readout de los electrodos. La partícula cargada ioniza las partículas en los dos gaps, y con la configuración apropiada para el campo eléctrico, las señales inducidas serán simultáneas por las avalanchas en los dos gaps. Por supuesto que esto mejorara la eficiencia, así como la resolución temporal del dispositivo [16].

Existen los RPCs multigap que fue propuesto en el año 1996 en el grupo liderado por M.C.S Williams, y desde entonces han evolucionado los conceptos de los de doble gap, donde satisfactoriamente han logrado ventajas en el conteo, eficiencia y resolución temporal.

Esencialmente la idea era dividir la brecha de gas donde la ionización primaria toma lugar en rebanadas más pequeñas, es decir, más de dos gaps. Los electrodos externos se alimentan del voltaje mientras que los otros flotan eléctricamente, lo cual no es necesario poner más cable para la alimentación de voltaje. Bajo condiciones estáticas esto se debe a la electroestática simple, porque estas placas están en un campo eléctrico simétrico. En condiciones dinámicas, hay un mecanismo de retroalimentación que tiende a mantener los electrodos a un potencial correcto y da corriente por igual a todos los gaps. Básicamente por alguna razón el voltaje en una placa resistiva se desvía, esto causa un aumento del campo eléctrico en un gap y decrecerá en otra. En un gap con el campo alto se producirán avalanchas largas. Las avalanchas implican en el crecimiento del flujo de electrones e iones positivos, trayendo más carga en uno de los electrodos que está al respectivo al gap. Esto cambiará el potencial de los dos electrodos, y al final, tendrá el efecto de restaurar el campo correcto y ganancia en ambos [16].

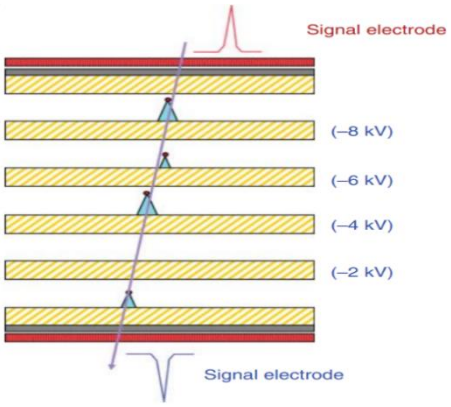


Imagen 10. Modelo de un multigap y una partícula cargada que cruza y que puede crear una ionización en cualquier gap.

Los RPCS se clasifican en dos, timing y trigger. Los RPC de timing proporcionan una mejor resolución temporal y se usaron primero como detectores de tiempo de vuelo. Los que funcionan en trigger proporcionan la detección del paso de la partícula de mínima ionización.

2.4.1.-Timing

En el área de los RPC temporizadores (timing) se utilizan gaps de 0.2 a 0.3 mm, son ampliamente utilizados en las configuraciones de multigap y proporcionan una eficiencia del 99%, con resolución temporal hasta de 50 ps. Un RPC que funciona en el modo de avalancha con un campo eléctrico de 100 kV/cm, es comparable a la tecnología de centelleo basada en TOF. El principio de operación de los RPCs en timing puede ser descrito como sigue. La corriente inicial crece exponencialmente hasta que el nivel de discriminación es alcanzado. El tiempo de retraso entre la ionización primaria y la señal de detección es independiente de la posición ocupada por las cargas iniciales en el gap, esto comprueba un modo timing excelente.

2.4.2.-Trigger

Gran parte de los RPC con gaps sencillos o dobles con ancho de 2 mm son operados en el modo avalancha y proporcionan eficiencias del 98% para un flujo de partículas de varios $\mathrm{kHz/cm^2}$. Normalmente este tipo de RPC se utiliza como RPC de disparo. Por ejemplo, en un acelerador, se utilizan con el fin de identificar de un grupo de haces cuál de ellos pertenece al muon y al hacer coincidencia se limita la radiación de fondo, para ello se necesita una resolución temporal de alrededor de 1 ns [17].

2.5.-Modo de operación: streamer y avalancha

Streamer

En un cierto voltaje de operación se generan avalanchas, después de un voltaje alto se producen unas chispas llamadas streamers. Una de las conclusiones es que las chispas aparecen cuando la carga total en la avalancha está cerca o excede a un orden de 10^8 electrones.

La forma de un streamer empieza con una intensa avalancha, luego genera un campo eléctrico debido a la distribución espacial de la carga interna. Al momento de exceder el campo eléctrico aplicado se forma el streamer. Después crece y se propaga. Hay dos tipos de streamers, el positivo y negativo.

Streamer positivo

Cuando la avalancha no ha crecido lo suficiente y el campo espacio-carga no es lo suficientemente fuerte para crear una región ionizada antes de alcanzar el ánodo, entonces el streamer comienza en el ánodo y crece hasta el cátado. Dicho crecimiento es debido a las avalanchas secundarias de la cabecera (+). Los electrones son rápidamente atraídos por la cabecera del streamer, neutralizando su carga positiva y dejando atrás los iones positivos.

Streamer negativo

El campo de la avalancha es suficientemente alto para crear el streamer antes de llegar al ánodo.

La transición entre avalancha y el streamer se produce en el espacio de separación de los electrodos. Si la transición avalancha-streamer ocurre cerca del cátodo, se denomina negativa [18].

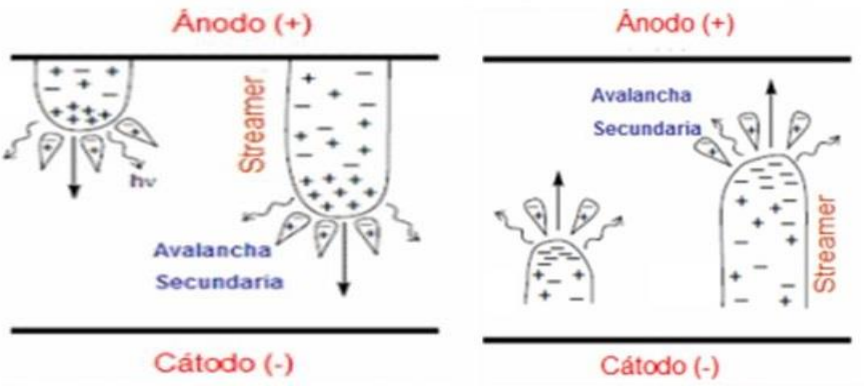


Imagen 11. Streamer positivo y negativo.

Avalancha

La ventaja de operar en modo avalancha es de reducir la carga que viaja a través del gas, lo cual es un beneficio para la capacidad de conteo. Los electrones pueden aparecer ya sea por ionización o por la emisión de los cátodos. Como ya se había mencionado antes, el campo eléctrico acelera los electrones y estas colisionan con los átomos del gas liberando electrones de sus capas de nivel, lo cual después estos electrones liberados también son acelerados por el campo y colisionan con el resto de las moléculas del gas hasta llegar a forma una cascada llamada avalancha de Tonwsend.

El campo espacio-carga se opone al campo eléctrico aplicado y algún momento el proceso de multiplicación se detiene. Luego las cargas viajan hacia los electrodos y son colectados. Debido a la reducción del campo eléctrico en el gap se requiere una amplificación de señal para la señal de salida del detector [19].

Este modo corresponde a la generación de las avalanchas de Townsend creadas a partir de las partículas primarias. Es operado a bajo voltaje y tiene menos ganancia. Este modo puede trabajar con electrones del orden de 10^6.

Así como los electrones e iones fluyen, pasan a través de varias colisiones aleatorias que van dejando un camino recto para formar varios caminos desplazados.

Cabe destacar que es importante saber que gas usar para la generación de las avalanchas, pues la electronegatividad es una de las propiedades más importantes. Más adelante se verá a profundidad el funcionamiento del gas en la formación de las avalanchas.

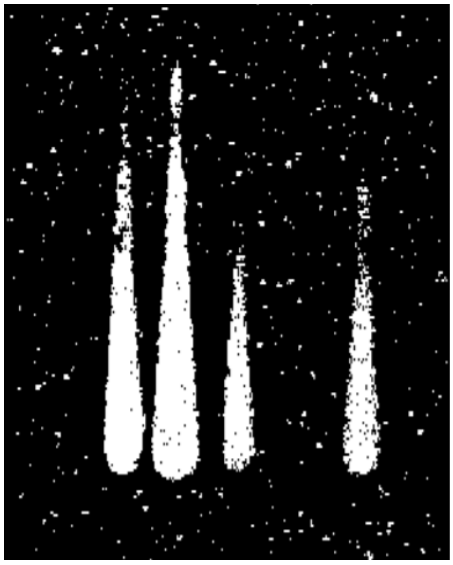


Imagen 12. Fotografía de avalancha.

2.6.-Rayos cósmicos

Desde el siglo pasado, han sido de gran interés para la comunidad científica. Muchos experimentos han sido desarrollados, como vuelos en globo e inmersiones submarinas. Fue Victor Hess quien presento la variación de este fenómeno respecto a la altitud. Mililikan propuso que los rayos cósmicos eran causados por fotones. Fue tiempo después que se descubrió que los rayos cósmicos estaban constituidos mayoritariamente por fotones, sin embargo, la naturaleza de la energía alta de los rayos cósmicos aún está en debate.

Los rayos cósmicos son partículas de altas energías que entran a la atmosfera. Mientras que aún se desconoce el origen de dichas partículas, se conoce que son una fuente de información de todo el universo. Sin embargo, ha habido pruebas de que pueden venir de supernovas y de otros eventos astronómicos, pero aún sigue siendo un tema controversial en la comunidad científica.

Con la construcción del primer acelerador de partículas en los años 1950´s, la física de partículas se abrió en dos caminos experimentales. Ahora era posible estudiar y controlar los haces de partículas colisionados entre ellas o uno podría seguir estudiando las partículas provenientes del espacio.

La evolución de la física de los rayos cósmicos estuvo siempre acompañada de las nuevas tecnologías, más claro, en el área de los detectores y observatorios [20].

Se sabe que los rayos cósmicos están compuestos por partículas cargadas de tamaño subatómico y que viajan a velocidades cercanas a de la luz. Entre estas partículas encontramos principalmente núcleos atómicos que se encuentran en la tabla periódica, los cuales lo más ambulantes son los núcleos de hidrogeno y helio. Los rayos cósmicos tienen energías tan altas que incluso llegan a superar en millones las partículas producidas en el gran colisionador de hadrones. Con tales energías implica que los rayos cósmicos pueden provenir de lugar muy lejanos.

A lo largo de los años se ha observado un amplio espectro de rayos cósmicos. Se pueden dividir en grupos:

-Electrones y positrones.
-Núcleos de hidrógeno
-Núcleos de helio.
-Litio, Berilio, Boro.
-Carbono, Nitrógeno, Oxígeno, Flúor.
-Pesados: del Neón al Potasio.
-Muy pesados: del Calcio al Zinc.
-Ultrapesados: Z>30.
-Antimateria.
-Neutrinos.

Imagen 13. Rayos cósmicos.

2.7.-Muones atmosféricos

En los años 1930´s Pierre Auger concluyó, tras observar coincidencias en diversos contadores Geiger diseminados por el terreno, la existencia de las llamadas cascadas atmosféricas generadas por la entrada de dichos rayos cósmicos en la atmosfera.

Al entrar en contacto los rayos cósmicos con la atmosfera, los rayos primarios colisionan con los núcleos de la atmósfera, desintegrándose, dando lugar a una cascada de partículas (rayos cósmicos secundarios) que volverán a colisionar generando nuevas cascadas y así sucesivamente hasta llegar a la superficie de la tierra. Al momento de las colisiones se desprenden una alta energía que dará lugar a nuevas partículas y antipartículas, como piones, hadrones, neutrinos, gamma y generalmente de muones.

El muon es una partícula elemental. Se encuentra en los rayos cósmicos y en los laboratorios. El tiempo de vida el muon es de 2,2 microsegundos, de cargar negativa y una masa de 206,77 veces mayor que la del electrón.

Los muones atmosféricos son una de las formas naturales de radiación. Debido a su alta masa, tienen una gran capacidad de penetración. Los muones son las partículas cargadas que más llegan a la superficie al nivel del mar. La mayoría de los muones son producidos en la atmosfera (típicamente 15 km) y pierde alrededor de 2 GeV en el proceso de la ionización antes de llegar al suelo. Su energía y distribución angular refleja una pérdida de energía en la atmósfera. Por ejemplo, con 2.4 GeV de energía tiene un decaimiento de 15 km de longitud, lo cual es reducido a 8.7 km por energía perdida. La energía promedio de los muones en la superficie es de aproximadamente 4 GeV [21].

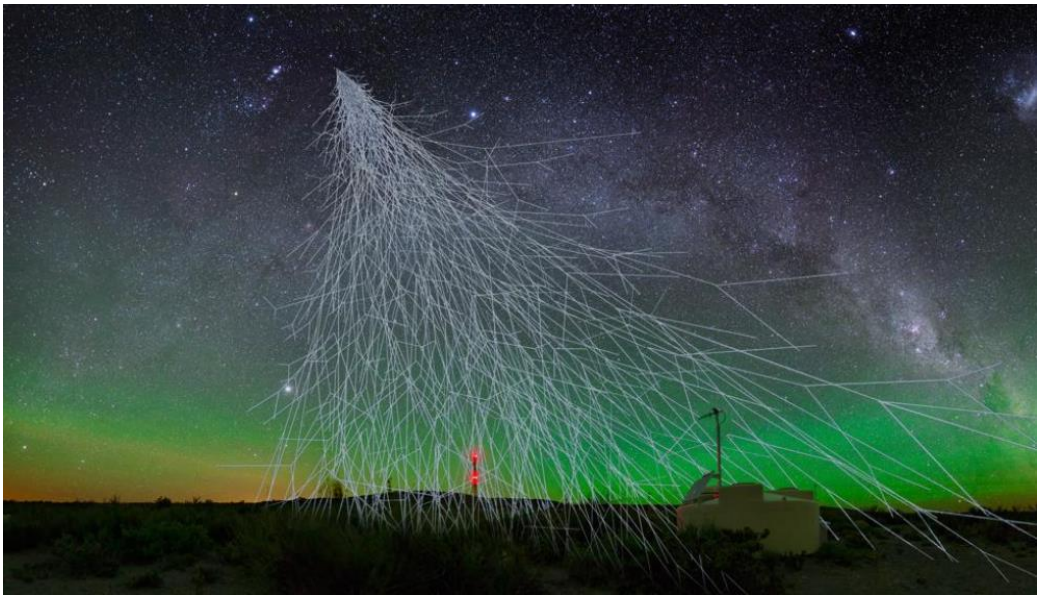


Imagen 14. Cascada producida por los rayos cósmicos primarios. Observatorio Pierre Auger.

2.8.-Telescopio de muones.

Un telescopio de muones es un arreglo de detectores (dos o más detectores) que están alineados y se aplica en la trayectoria de dicha partícula.

El telescopio de rayos cósmicos es vital para la confiabilidad y precisión de las medidas de algunos parámetros. Una de las maneras más fáciles se realiza mediante la tasa de conteo individual, así como varias coincidencias en el telescopio.

La reconstrucción de varias trayectorias se realiza por medio de una buena resolución temporal, claro, que depende del rendimiento del telescopio y de las perturbaciones experimentales. Mucho aspecto del rendimiento del detector, como si eficiencia, sensibilidad, tiempo de respuesta y muerto, propiedades de alineación, etc. Influyen en la capacidad de trabajo (detección) del telescopio.

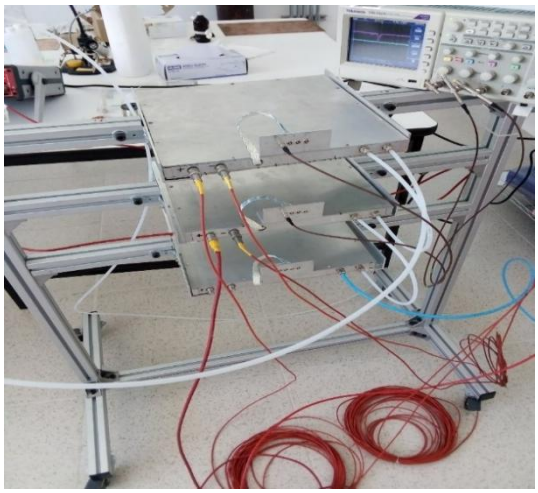


Imagen 15. Telescopio de detectores RPC.

3.- Propiedades de los Materiales.

3.1.-Acrílico

Se produjo en 1928 y fue introducido en el mercado por Rohm and Hass Compan. El acrílico es derivado del platico. Es un material parecido al policarbonato por el hecho de que es resistente. Es muy usado por su transparencia, alta calidad y estética.

Sus propiedades son:

-No se opaca con el tiempo.

-Peso bajo.

-Transmisión de la luz al 90 %.

-Resistencia a la intemperie.

-Es aislante eléctrico.

-Facilidad eliminación de manchas.

-Resistencia al impacto.

Cabe destacar que la resistencia a la intemperie y composición química son los más interesantes. Se mencionarán a detalle:

Resistencia a la intemperie:

Resiste a la exposición de la radiación solar, cambios en la temperatura (con una temperatura al servicio de 80 grados centígrados), frio extremo y entre otras condiciones meteorológicas. Es un material cuyas calidades estéticas y funcionales siguen intactas durante años de uso. Su capacidad de filtrar la radiación ultravioleta es estable y no muestra cambios con el paso del tiempo. Es más ligero que el vidrio, aproximadamente un 50% y 43 % más ligero que el aluminio.

Composición química:

El polímero componente de las fibras acrílicas está constituido por macromoléculas lineales cuya cadena contiene un mínimo del 85 % en masa de la unidad estructural correspondiente al acrilonitrilo. Resiste a la mayoría de los productos químicos como bases, ácidos, amoniaco y entre otros. Lo que no resiste es a los hidrocarburos clarinados, solventes aromáticos y metílicos.

Otra propiedad importante es su dureza, similar a la de los metales no ferrosos. Dureza Bercol 50 unidades.

3.2.-Aluminio

El aluminio se ocupó para hacer las cajas externas de los detectores para aislarlo del medio ambiente, tener una temperatura, presión constante y estética. Más adelante se describirá el diseño de dichas cajas.

El aluminio es un metal no ferromagnético. Es un material ligero, dúctil, resistente estético, reciclable. No es toxico, protege de la luz, humedad y oxigeno; y es por esto por lo que se usó para el embalaje.

Su número atómico es 13, y los últimos valores aceptados para el peso atómico son 26.981 y 26.989 basados en C^{12} y 0^{16}. El isotopo principal es Al^{27}, lo cual es estable y consiste de 14 neutrones y 13 protones. La valencia del aluminio es 3, con 13 electrones distribuidos como sigue: $1s^2$, $2\ s^2$, $2p^6$, $3\ s^2$ y $3p^1$ [22].

3.3.-Placa de cobre.

La placa de cobre, como dice el nombre, este hecho de cobre y este se usó para la lectura de datos, es decir, recolectaba la carga que se originaba entre los gaps. En el siguiente capítulo se describirá a detalle sobre la construcción.

El metal es maleable y es un buen conductor de electricidad y calor. Su número y peso atómico es 29 y 63.546 respectivamente. Los isotopos principales son C^{63} y C^{65}. Tiene una resistividad eléctrica de $1.6x10^6\ \Omega cm$ [23].

Cómo se mencionó anteriormente, el cobre tiene 29 como número atómico. Se sabe que la conductividad eléctrica es el movimiento de partículas cargadas eléctricamente desde un medio de transmisión a otro, para ser más claro es la capacidad de transportar electricidad. El transporte se realiza con los electrones. La última capa, llamada valencia, se encuentran 1,2 o 3 electrones; estos electrones de valencia se caracterizan por una tendencia a liberarse de la órbita para lograr cierta estabilidad, así los átomos se unen formando enlaces metálicos que le da una estructura estable y ordenado al metal. Los átomos liberados forman una nube de electrones lo cual conduce la electricidad sin resistencia alguna.

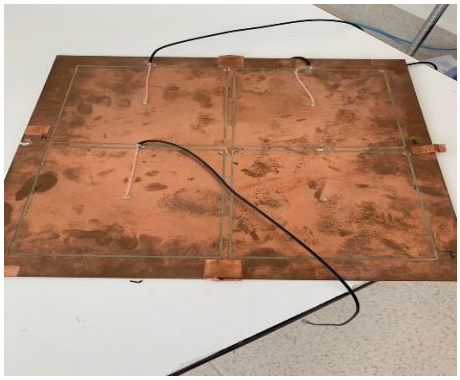


Imagen 16. Placa de cobre.

3.4.-Vidrio

Se obtiene de una mezcla de silicio con óxidos metálicos secos pulverizados que se funden a temperaturas altas. El vidrio es una sustancia en que las unidades moleculares tienen una disposición desordenada, pero con suficiente cohesión para garantizar una fuerte rigidez.

Observando en tres dimensiones, cada átomo de silicio se encuentra en el centro de un tetraedro que está unido a cuatro átomos de oxígeno. Los tetraedros están dispuestos simétricamente en el espacio para que cada átomo ocupe un vértice para unirlos con otros dos tetraedros [16].

Si dicho cristal es calentado a temperaturas cercanas a 1500°C, los enlaces químicos son debilitados considerablemente. Por lo tanto, los átomos en el vidrio o pequeños grupos de átomos se colapsan en un estado fundido que tiene una estructura aleatoria y desordenada. Luego si es enfriado rápidamente, algunos átomos no regresan en la estructura cristalina, llegando hacer una estructura pura de silicio.

La conductividad de un vidrio depende de su composición, temperatura y condiciones ambientales alrededor. A bajas temperaturas el vidrio es un aislante. La resistividad del vidrio disminuye rápidamente a medida que aumenta la temperatura, entonces se dice que es un semiconductor. Esto se debe a que la temperatura de un cuerpo es la medida de la agitación de los átomos o moléculas que la forman, y así los electrones avanzan sin mucha resistencia, dando una corriente eléctrica, claro por medio de la diferencia de voltaje que se aplica y que se mencionará a detalle en el próximo capítulo, así como sus medidas y estructura.

El vidrio que se uso es de la marca Saint Gobain por su transparencia, uniformidad y rigidez.

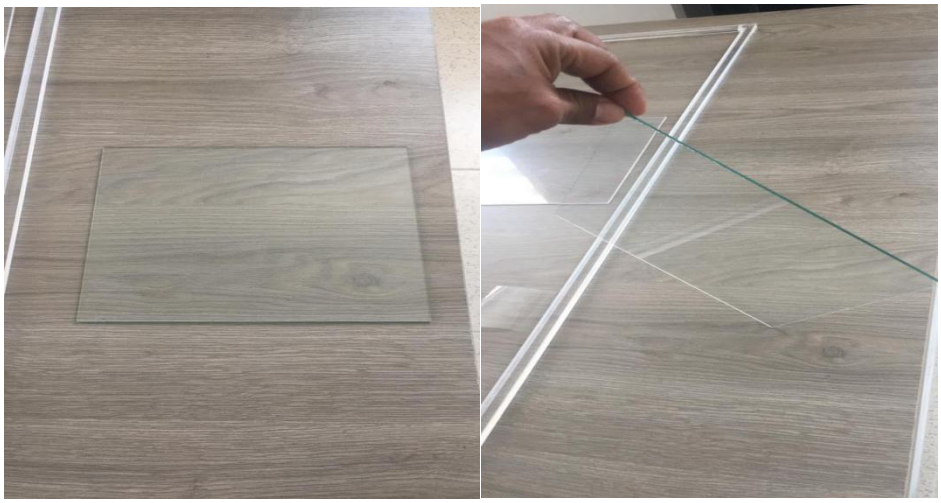
1. 

Imagen 17. Vidrio Saint Gobain.

3.5.-Pintura

La pintura es una mezcla de grafito y acrílico. La razón de la pintura es para dar una uniformidad a la tensión aplicada sobre la superficie del vidrio y para tener una resistividad. La resistividad debe ser alta para que los pulsos eléctricos sean transparentes. Generados por las cargas que se desplazan entre los gaps. También se usó pintura de plata para tener una conductividad eficaz, pero en pequeñas cantidades porque fue puesta en las orillas del vidrio mientras que la mezcla del grafito fue en toda la superficie.

La conductividad del grafito radica en que los anillos hexagonales existen dobles enlaces o enlaces pi (π), conjugados, que permiten la migración de electrones. Además, los carbonos asumen una hibridación sp2 (plana), formando hojas superpuestas como colmenas, esto es, que están paralelas; y enlaces en planos diferentes, que son más débiles, permitiendo el movimiento de electrones entre los planos, es decir, ocurre la transferencia de la electricidad.

Imagen 18. Pintura.

3.6.-Gas

Se usaron dos gases: argón y freón. El argón se usó para la limpieza de los RPCs y el freón para las pruebas en modo avalancha. Con el freón se puede trabajar con voltaje de operación bajo, alto conteo y ganancia. Tiene la capacidad de absorber fotones que son indeseables porque crean más avalanchas. Luego de absorber los fotones, disipan esta energía a través de la disociación o colisiones super-elasticas, donde la energía cinética de las dos moléculas en el estado final es más que la de la inicial al igual que es un gas

electronegativo que puede atraer electrones libres, esto hace a que no se crean más avalanchas.

La electronegatividad es una medida de la capacidad en que un átomo en una molécula para extraer electrones de enlace a sí mismo.

El freón es una excelente combinación por la de energía de ionización y la electronegatividad, porque se requiere un voltaje bajo para ionizar el gas y así producir avalanchas detectables/contables.

El freón 134a es un refrigerante que no daña la capa de ozono. Tiene una gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad y no es inflamable, además de tener una excelente compatibilidad con la mayoría de las materias.

Algunas propiedades físicas del gas se presentan en la siguiente tabla.

Propiedades físicas	Unidades	134a
Peso molecular	g/mol	102
Punto de ebullición	°C	-26.1
Punto de congelación	°C	-103
Temperatura critica	°C	101.1
Presión critica	Bar	40.6
Densidad critica	Kg/m^3	508

Tabla 2. Propiedades del refrigerante [24].

Imagen 19. Gas argón y freón.

3.7.-Electrónica para la lectura de datos

Aparte de la fuente de voltaje, la electrónica usada para la adquisición de datos fueron los módulos marca CAEN y otros sistemas que se mencionarán a continuación [25]:

Módulo V1718

El V1718 es un puente VME a USB 2.0, alojado en un módulo VME 6U de una unidad de ancho. La unidad actúa como un módulo VME master y puede operarse desde el puerto USB de una computadora.

Módulo V1290N

El V1290N-2eSST es un TDC multihit de 16 canales, alojado en un módulo VME 6U de una unidad de ancho. El LSB es de 25 ps (resolución de 21 bits, 52 µs FSR). Los canales pueden habilitarse para la detección de golpes ascendentes / descendentes. Para cada canal hay un ajuste digital. La adquisición de datos se puede programar en "Eventos" ("Modo de coincidencia de activación, con una ventana de tiempo programable) o en "Modo de almacenamiento continuo".

Módulo V975

El mod. El V975 es un amplificador de tiempo de subida rápida de 8 canales alojado en un módulo VME de una unidad. Los canales son bipolares, no se invierten y se pueden conectar en cascada para obtener valores de ganancia mayores. Tiene una ganancia fija de 10 y una impedancia de salida de 50 ohm.

La función principal es transformar la señal a una de mayor amplitud en un factor de ganancia.

Módulo V976

El mod. V976 es un módulo VME de una unidad que contiene cuatro secciones de entrada / salida de coincidencia de 4 entradas y NIM - TTL / TTL - NIM. Cada sección cuenta con 4 entradas y 4 salidas en los conectores LEMO 00 y puede funcionar como un traductor de nivel de 4 canales o como ventana de AND / OR.

Este módulo convierte la señal de entrada de una señal NIM para que el TDC lo pueda leer.

Módulo N842

El mod. N842 es un Discriminador de fracciones constantes, conocido como constant fraction discriminator, de 8 canales alojado en un módulo NIM de una unidad de ancho. El módulo acepta 8 entradas negativas y produce 2 × 8 salidas NIM (las salidas NIM se suministran con un abanico de salida de dos) + 8 / salidas NIM (negadas) en los conectores LEMO 00 del panel frontal.

Tienen una impedancia de 50 ohm y un rango de discriminación entre -1mV a -255Mv. El pulso de salida del discriminador con una anchura ajustable es en un rango de 16.5 ns a 273 ns.

Rechaza los pulsos que no están en un nivel de lectura.

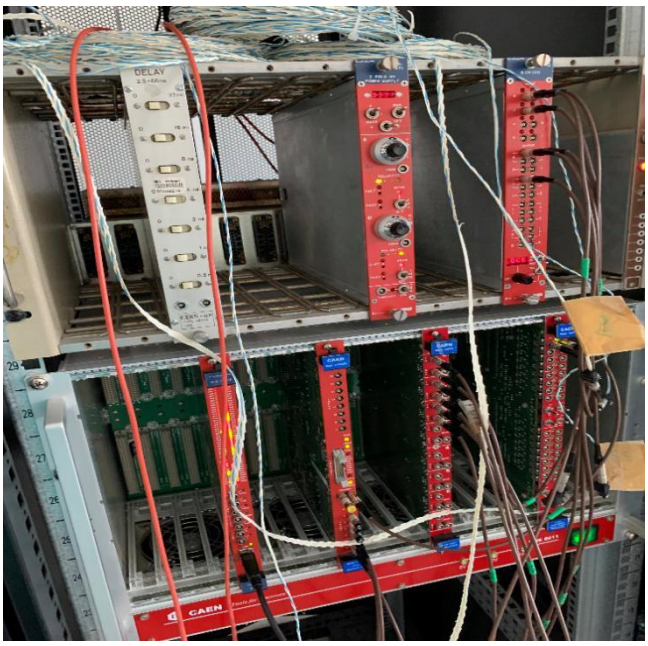


Imagen 20. Módulo CAEN.

También su usó un contador hecho por investigadores de la FCFM BUAP. Dicho contador tiene 4 canales y tiene la opción de contar los eventos en un determinado tiempo y discriminación. Al igual, un sistema de adquisición de datos, y que da la señal de los PMTs, independiente de los módulos pero iba conectado a ello es el del trigger, que operaba a un voltaje de operación y discriminación determinado.

Imagen 21. Contador

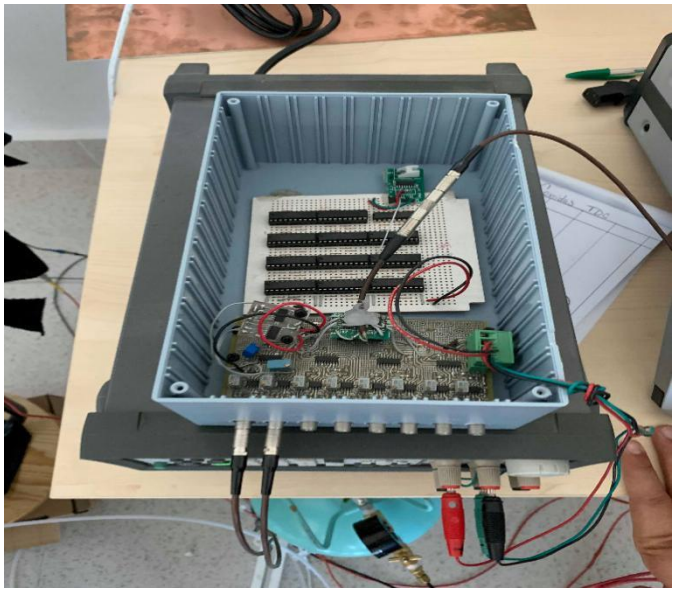


Imagen 22. Electrónica del trigger.

3.8.-PMTs

Los tubos fotodetectores (PMT) conformaron el sistema de trigger. Los PMT son de platico centellador. Cuando son expuestos a radiación ionizante, emiten un pequeño destello de luz, es decir un centelleo. Este fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando un gran número de átomos y moléculas, las cuales al volver a su estado fundamental, se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible o en los alrededores de él.

Un detector centellador cuenta con un material centellador como primer transductor, el cual transforma la radiación ionizante en fotones visibles. Para poder obtener información útil debemos adicionar un fotodetector, que convierta la luz de centelleo en una señal eléctrica. El fotodetector más utilizado en un detector centellador es el tubo fotomultiplicador. Conceptualmente, un

fotomultiplicador cuenta con un fotocátodo y un multiplicador de electrones. El primero es una fina capa de un compuesto que emite electrones cuando absorbe fotones en el espectro visible o en las cercanías de él. Los electrones emitidos por el fotocátodo son llamados fotoelectrones. El segundo, de nombre sugestivo, es un arreglo de electrodos conectados a alta tensión que permite obtener ganancias de 10^6.

Como se digo anteriormente, un PMT cuenta con un fotocátodo y el arreglo de electrodos conectados a alta tensión creciente llamados dínodos, que permiten la multiplicación de los fotoelectrones [26].

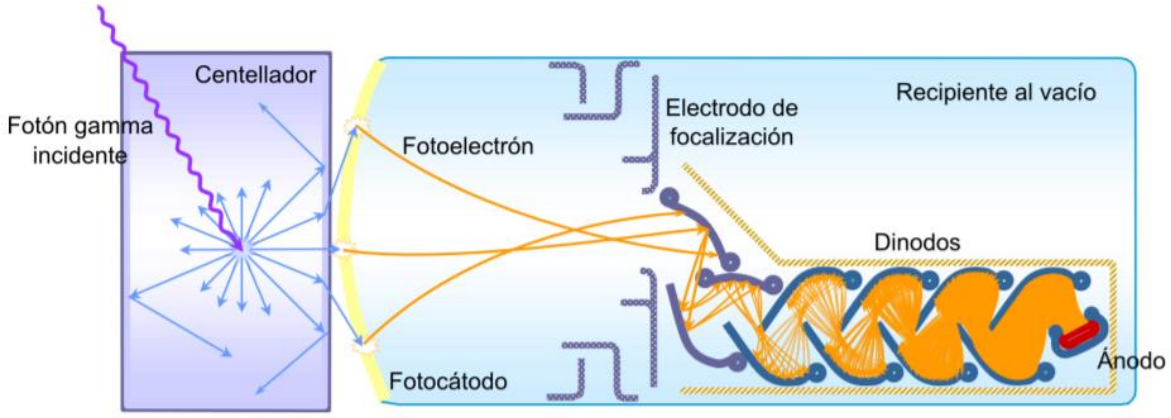


Imagen 23. Esquema de un tubo fotomultiplicador acoplado a un centellador.

Se usaron dos modelos diferentes de PMT, unos con forma cuadrada tienen un área 400 cm^2 y el otro de 75 cm^2 que tiene forma hexagonal regular.

Imagen 24. PMT.

Como se muestra en las fotos, los PMT están cubierto de nylon y tela color negro para evitar la luz y así no haya ruido.

4.-Diseño y construcción de los RPCs.

En las próximas secciones se describirá a detalle la construcción de un RPC. Se construyeron tres RPCS, los tres con un mismo diseño y con la finalidad de armar un telescopio de muones. El proceso de construcción se hizo en el laboratorio de física de partículas de la facultad de ciencias físico-matemáticas de la BUAP y en las instalaciones del Ecocampus BUAP.

El diseño de los detectores es cuadrado, se hicieron dos, uno correspondía de acrílico y otro de aluminio. En la caja de acrílico se encuentran los electrodos y gas, mientras que en el de aluminio se encuentran la placa de lectura de pulsos y cableado de la circulación de gas y voltaje.

4.1.-Caja de acrílico.

La caja de acrílico es la parte donde se encuentran los electrodos y por lo tanto donde va a circular el gas.

Se hicieron los marcos con una dimensión de 25x25 cm^2. En los extremos de cada barra se realizó una diagonal para así formar el cuadro, el grosor es de 1 cm. Después se creó un canal, aproximadamente de 2 mm, en cada barra para que las tapas se insertaran y así tener una superficie uniforme. Se cortaron las tapas con una dimensión de 23x23 cm^2. Luego se fabricaron los espaciadores para el sostenimiento de los electrodos y circulación del gas. Los espaciadores son pequeños que miden 1 cm de largo y 0.8 cm de grosor. Se ejecutó en cada espaciador un canal y dos agujeros. Se muestra lo anterior dicho en las siguientes imágenes.

Imagen 25. Marco y espaciadores.

Para hacer todo lo dicho, nos tuvimos que apoyar con una fresadora Carving-cnc que pertenece al laboratorio de partículas.

Para unir las piezas se usó el mismo acrílico en estado líquido, con algunas cuantas gotas en cada esquina, donde se encuentra la diagonal de la barra y de ahí dejarlo reposar un día para que pegará bien. Se prosiguió a unir las tapas (solo una tapa) a los marcos con el mismo pegamento e igual se dejó secar varias horas. Finalmente se hizo una limpieza para su mejor transparencia y calidad.

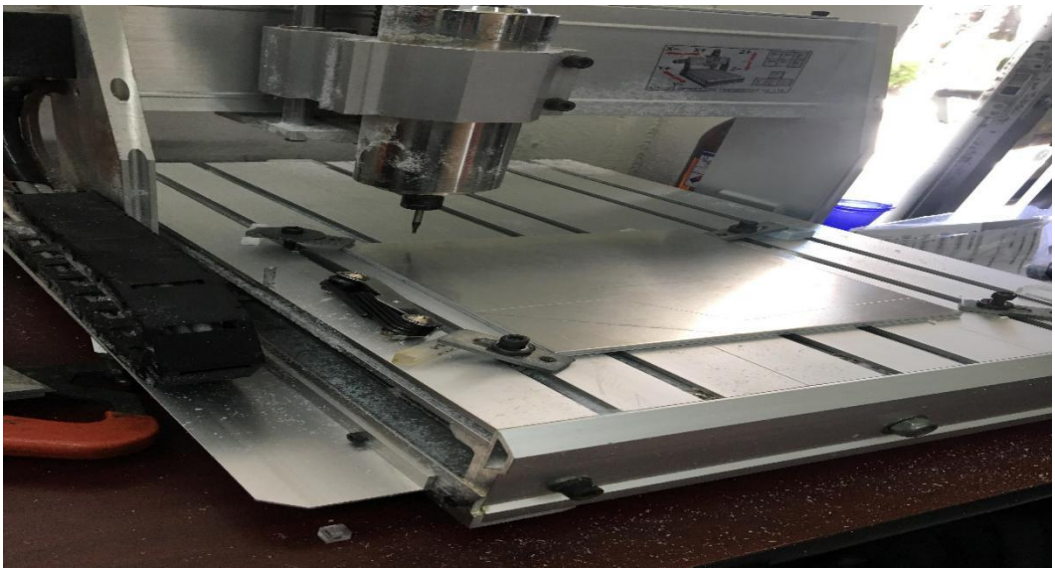


Imagen 26. CNC.

4.2.-Electrodos

Los electrodos es la parte esencial del detector porque es donde ocurre la detección de la radiación cósmica y todos los procesos físicos.

Cada vidrio tiene dimensión de 20x20 cm^2 y 2 mm de grosor, que fueron 6 vidrios, 2 por cada detector. Se ligaron los bordes del vidrio, enjuagamos con agua y jabón las superficies y por último limpiamos con alcohol metílico.

Lo siguiente fue hacer los electrodos y para eso usamos cinta de cobre, pintura y alambre. Se Adhiero cinta de cobre, de 4.5 cm de largo y 3 cm de ancho, a cada vidrio. Posteriormente unimos el alambre, aproximadamente de 8 cm de largo, a la cinta de cobre y en seguida pintamos los vidrios con un atomizador. El proceso de pintado fue rápido ya que el atomizador abanicaba perfectamente a la superficie del vidrio, aparte se abaniqueo tres veces en forma de zigzag para que obtuviésemos una superficie uniforme.

Imagen 27. Electrodos y unión de alambres con el cobre.

Para que los electrodos queden en forma ordenadas, sostenibles, haya un espacio entre ellas de 2mm de distancia y circule el gas, se hizo un amarre de sostenimiento con los espaciadores. Los amarres se hicieron con cintas de platico acrílico.

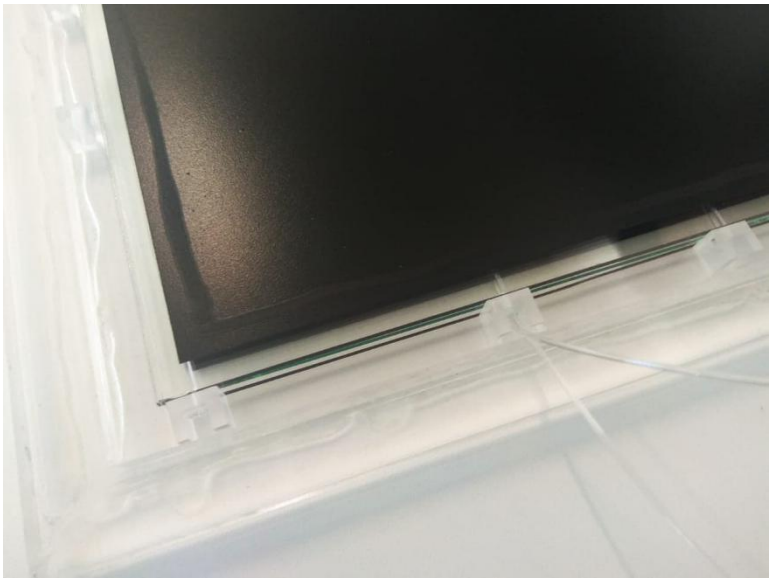


Imagen 28. Amarre de sostenimiento para los electrodos.

Al final se hace otro amarre, 4 amarres con los espaciadores, para que los dos electrodos estén bien alineados.

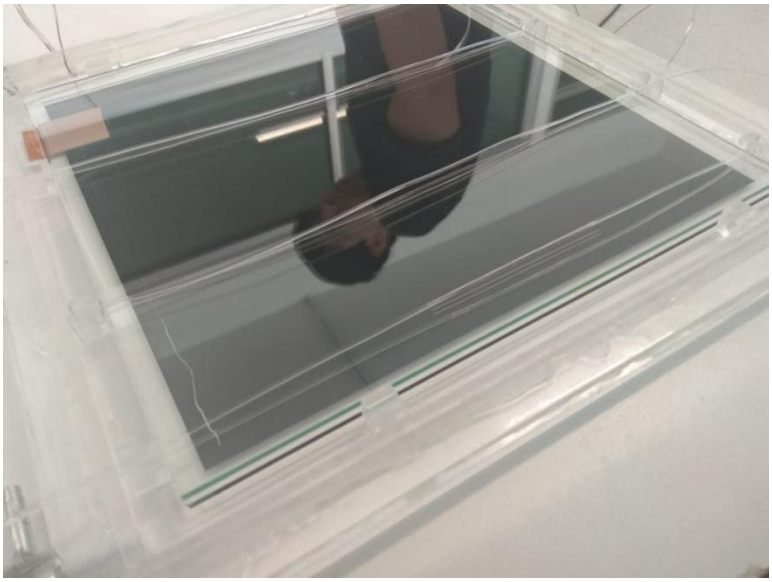


Imagen 29. Electrodos alineados.

Por último, colocamos la tapa para sellar con pegamento. Dejamos pasar un día para que quedara firme.

4.3.-Conexiones de gas y alto voltaje

Los alambres unidos a los electrodos son los cables de alto voltaje. Estos van a ir soldados a conectores. El electrodo de arriba es el ánodo y el de abajo el

cátodo mientras que la tierra fue en la orilla de la superficie de la placa de cobre que es la lectura de los pulsos de las señales que a continuación describiré.

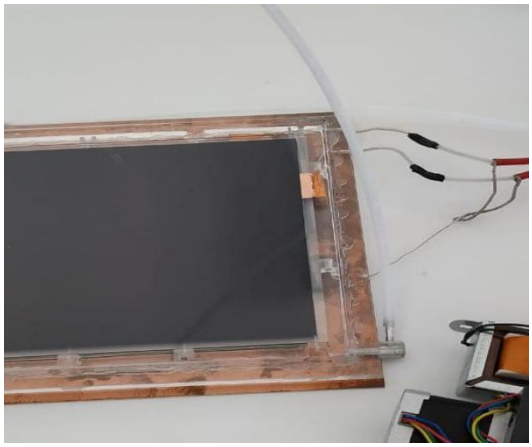


Imagen 30. Conexión de los electrodos.

La placa de cobre tiene una dimensión igual que los vidrios, 25x25 cm^2, y está dividido en 4 pads que corresponderán a una canal cada uno. Cada cable se soldó en medio de cada gap y su respectiva tierra que está en la orilla de la placa. Se soldó en medio por cuestiones de resolución temporal y espacial.

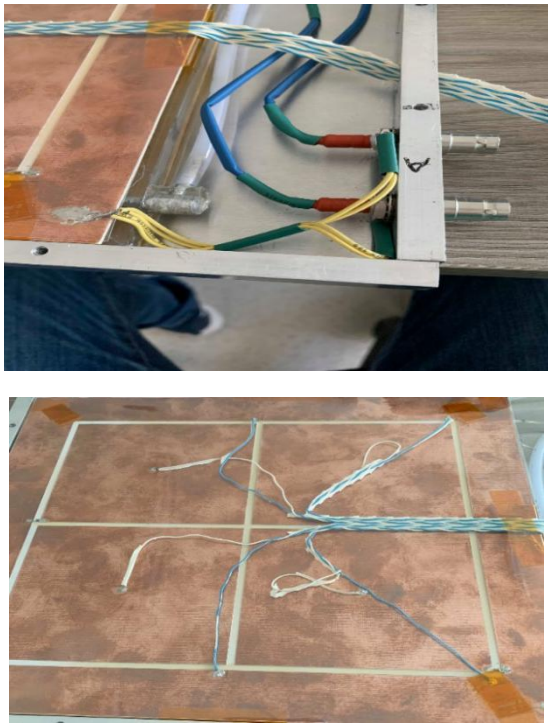


Imagen 31. Conectores de alto voltaje y canales con sus respectivos pads.

Los conectores de gas se fabricaron con la ayuda del torno que se encuentra en el laboratorio. Para hacer los conectores tuvimos que cortar en pequeñas piezas, 3 cm de largo y claro de diferente grosor, y acoplarlos de tal manera que quedaran en forma de “L” que tiene dos diámetros diferentes en los extremos. El diámetro grande con una medida de 1.25 cm y el chico de 0.75

cm. Son dos conectores por cada caja de acrílico porque uno es de la entrada de gas y otro es de salida. Haciendo dos incisiones en los lados del marco y uniendo los conectores de gas con pegamento acrílico. Al final entrelazamos las mangueras, quedando de la siguiente manera.

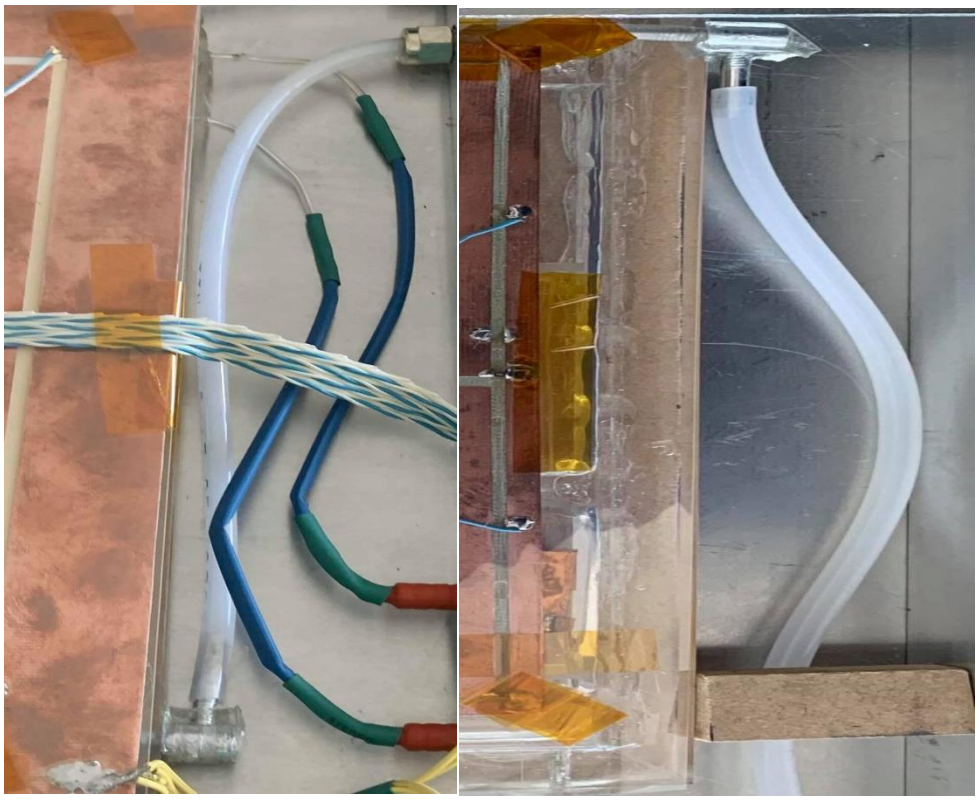


Imagen 32. Conexión de gas.

4.4.-Caja de aluminio

La caja exterior es de aluminio y consiste en cuatro barras de aluminio que hacen el marco y dos tapas para las superficies. Dos barras son de la misma medida que son de 31 cm de largo, 1 cm de ancho y 1.5 de altura. Las otras barras miden 29 cm de largo y tienen las mismas medidas de grosor y altura que las anteriores. Por lo tanto se tiene una caja de forma rectangular de 31x28 cm^2.

Lo primero que se hizo fue cortar las barras con herramientas como la segueta y el cnc para rectificar, 6 barras de 31 cm y 29 cm de largo.

Cortadas las tapas (31x29 cm^2), se prosiguió hacer los tres agujeros por cada barra y tapa para los tornillos. Luego se hicieron 5 orificios grandes en una barra por cada detector, porque es donde entraron los conectores de alto voltaje, gas y los cables de lectura de pulsos.

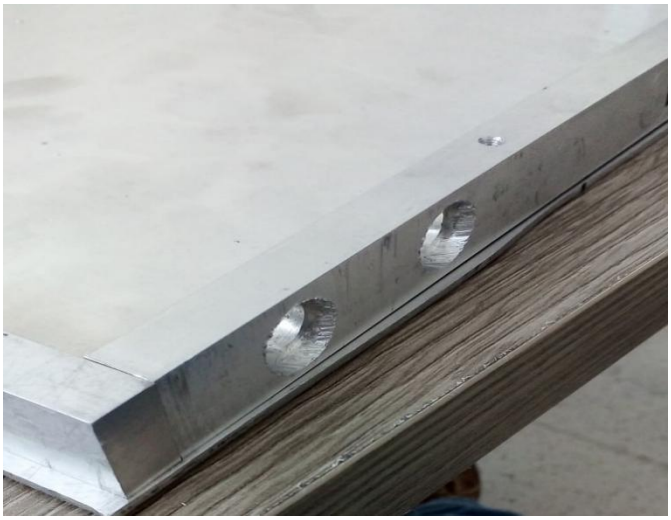


Imagen 33. Primera imagen de arriba para abajo, orificios en las tapas de aluminio, orificios grandes de alto voltaje y acoplamiento de los conectores de gas y alto voltaje.

Hecho la caja, lo siguiente que se hizo fue colocar papel comprimido y fomi de la misma medida que la caja de acrílico y unos espaciadores para el nulo movimiento de la caja de acrílico dentro de la caja de aluminio y trabajen mejor los RPCs. Por último, conectamos los conectores correspondientes.

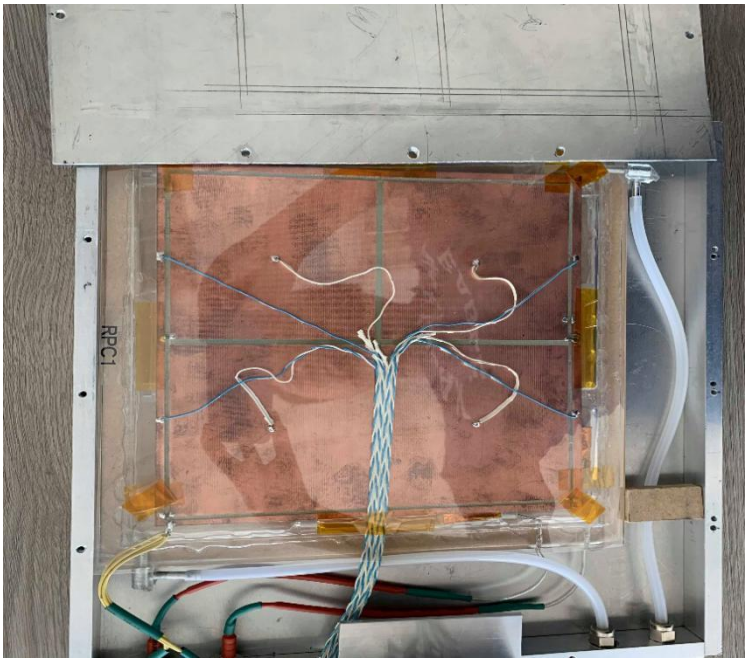


Imagen 34. RPC.

Los cables de lectura se soldaron a la entrada de los conectores tipo lemo. Estas entradas están a fuera de la caja de aluminio.

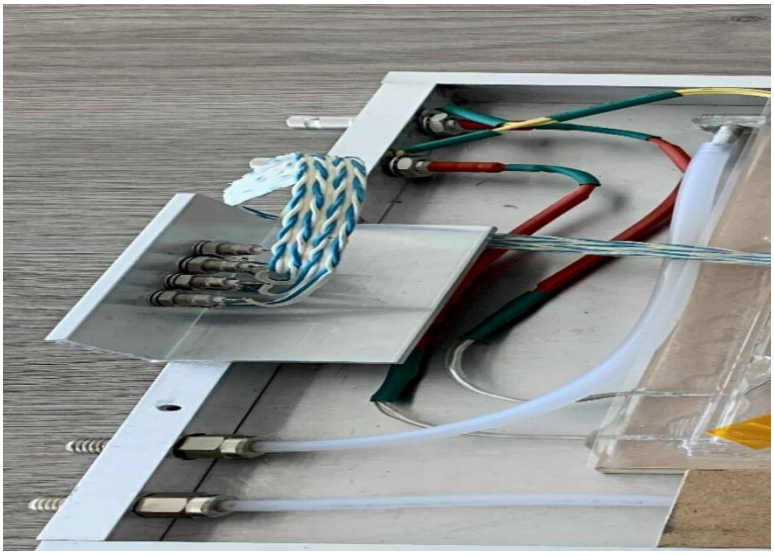


Imagen 35. Cables para la lectura (blanco y azul) de pulsos conectados a los conectores lemo.

4.5.-Telescopio de RPCs

Armados los detectores con sus conectores y cables, empezamos a construir el telescopio.

La base del telescopio es de aluminio. En la parte de abajo consta de dos rieles con 4 ruedas. Cada riel con dos ruedas, uno en cada extremo.

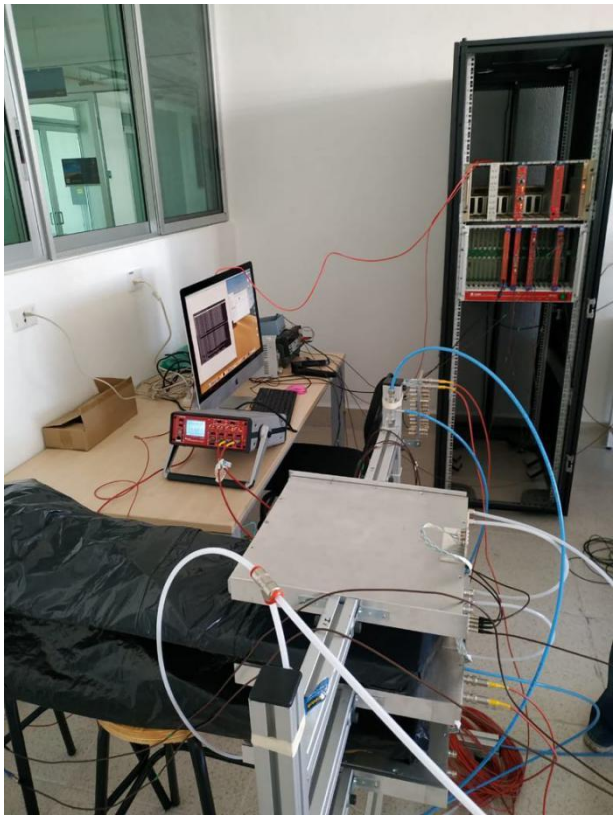


Imagen 36. Telescopio de muones con la electrónica de adquisición de datos.

Los RPCs que se montaron a la base quedaron de una separación nula. Se alinearon los detectores y finalmente quedó el telescopio de muones.

En el siguiente capítulo se mencionará a detalle la instrumentación del conectado del telescopio a la electrónica con su respectiva prueba de estudio.

5.- Experimento de cada prueba con su arreglo experimental y resultados.

5.1.- Resistividad de la superficie.

Hay dos tipos de resistividad. Uno relacionada a la pintura de grafito y la otra al volumen resistivo del detector, es decir, los vidrios empleados como electrodos, Como se mencionó anteriormente, los vidrios tienen un área de 20 x20 cm^2 con un grosor de 2 mm. La capa de la pintura de grafito tiene un grosor de 0.02 mm. Para medir la resistividad se usó una base de cobre que tiene dos cilindros como se muestra en la imagen y un multímetro. Dicha base se puso en medio del electrodo para tener una mayor precisión de la resistividad. Poniendo las puntas sobre la superficie de los cilindros y estos sobre la superficie del electrodo con una presión moderada, esperamos a que se estabilizará la medición. El valor de la resistividad esta entre 1.8-2.2 MΩ.

Como se dijo anteriormente, el grafito debe ser lo más uniforme posible para la uniformidad del campo eléctrico.

Imagen 37. Medición de resistividad sobre la superficie.

La resistividad de la superficie no debe ser tan alta porque los pulsos de señal no serán adecuadamente transmitidos, pero también la resistividad no debe ser tan baja por la trasparencia de las señales, es decir, habrá muchos pulsos en toda la superficie. Al generarse muchos pulsos, la resolución espacial será pobre.

Después se prosiguió a medir la resistividad de los electrodos. No se pudo medir directamente la resistiva con el multímetro porque no mide resistividades

muy altas. Lo que se hizo fue calcular la resistencia para después calcular la resistividad por medio de la ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

R es la resistencia, p es la resistividad, l es la longitud y s es la sección transversal.

Para calcular la resistencia, usamos una fuente de poder y se conectó a los electrodos. Variamos el voltaje en un rango de 2300-5000 V. Cada valor de voltaje correspondía a un valor de corriente. A continuación se muestra la tabla de valores y grafica de voltaje-corriente.

Voltaje (V)	Corriente (A)
2300	$5x10^{-9}$
2400	$3x10^{-8}$
2500	$6x10^{-8}$
2600	$7.5x10^{-7}$
2700	$1x10^{-7}$
2800	$1.35x10^{-7}$
2900	$1.4x10^{-7}$
3000	$1.55x10^{-7}$
3100	$1.75x10^{-7}$
3200	$1.95x10^{-7}$
3300	$2.2x10^{-7}$
3400	$2.25x10^{-7}$
3500	$2.5x10^{-7}$
3600	$2.7x10^{-7}$
3700	$2.75x10^{-7}$
3800	$3x10^{-7}$
3900	$3.15x10^{-7}$
4000	$3.3x10^{-7}$
4100	$3.35x10^{-7}$
4200	$3.65x10^{-7}$
4300	$3.7x10^{-7}$
4400	$3.9x10^{-7}$
4500	$4.15x10^{-7}$
4600	$4x10^{-7}$
4700	$4.3x10^{-7}$
4800	$4.4x10^{-7}$
4900	$04.7x10^{-7}$
5000	$5.15x10^{-7}$

Tabla 3. Valores de voltaje-corriente

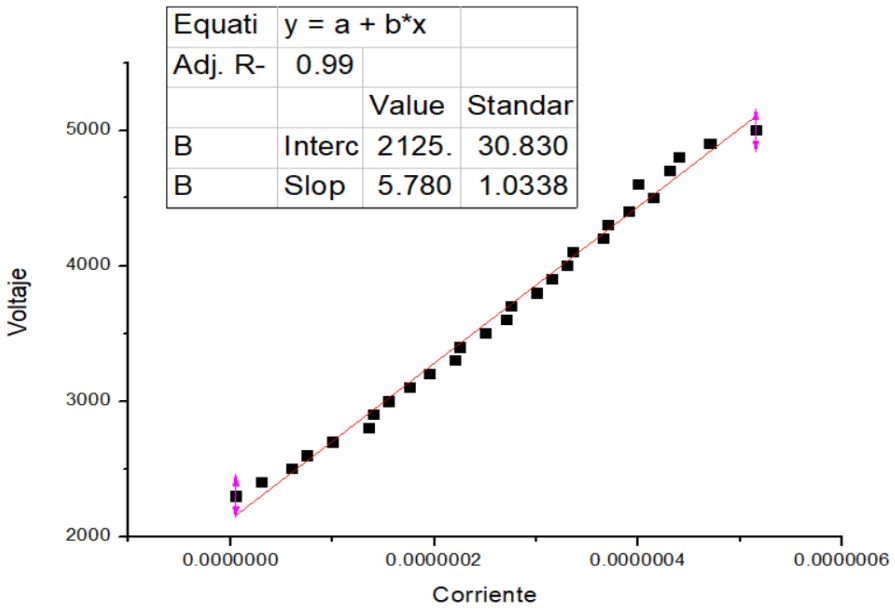


Imagen 38. Gráfica de la resistencia de la pintura.

Haciendo un ajuste lineal para conocer la resistencia nos dio el valor de 5.780×10^{9} (V/A).

Teniendo el valor de la resistencia, se prosiguió a calcular la resistividad de los electrodos por la ecuación mencionada.

$$R = \rho \frac{l}{s} \rightarrow \rho = R \frac{s}{l}$$

Los valores de s, R y l fueron de 4×10^{-4} m^2, 5.780×10^{9} Ohm y 0.2 m respectivamente. La resistividad que no dio fue de p=2.89×10^{12} Ohm/m.

5.2.- Cuenta de los eventos

El conteo de los eventos es la detección de muones en cada pad de los tres RPCs.

El arreglo experimental consiste en la conexión del contador a un RPC alimentados por una fuente de poder. El contador tiene 4 canales y cada canal correspondía a un pad del RPC. El valor de discriminación fue de 10 mV.

Para el estudio, se varió el voltaje en un rango de 9000-11000 V, es decir, se aumentaba el voltaje en 200 V hasta llegar a 11000 V. El tiempo del conteo por cada subida de voltaje fue de dos minutos. Se registraron tres datos por cada pad en cada intervalo de tiempo y voltaje, después se calculó el promedio de los datos que proporciono el contador.

A continuación se presentan las gráficas.

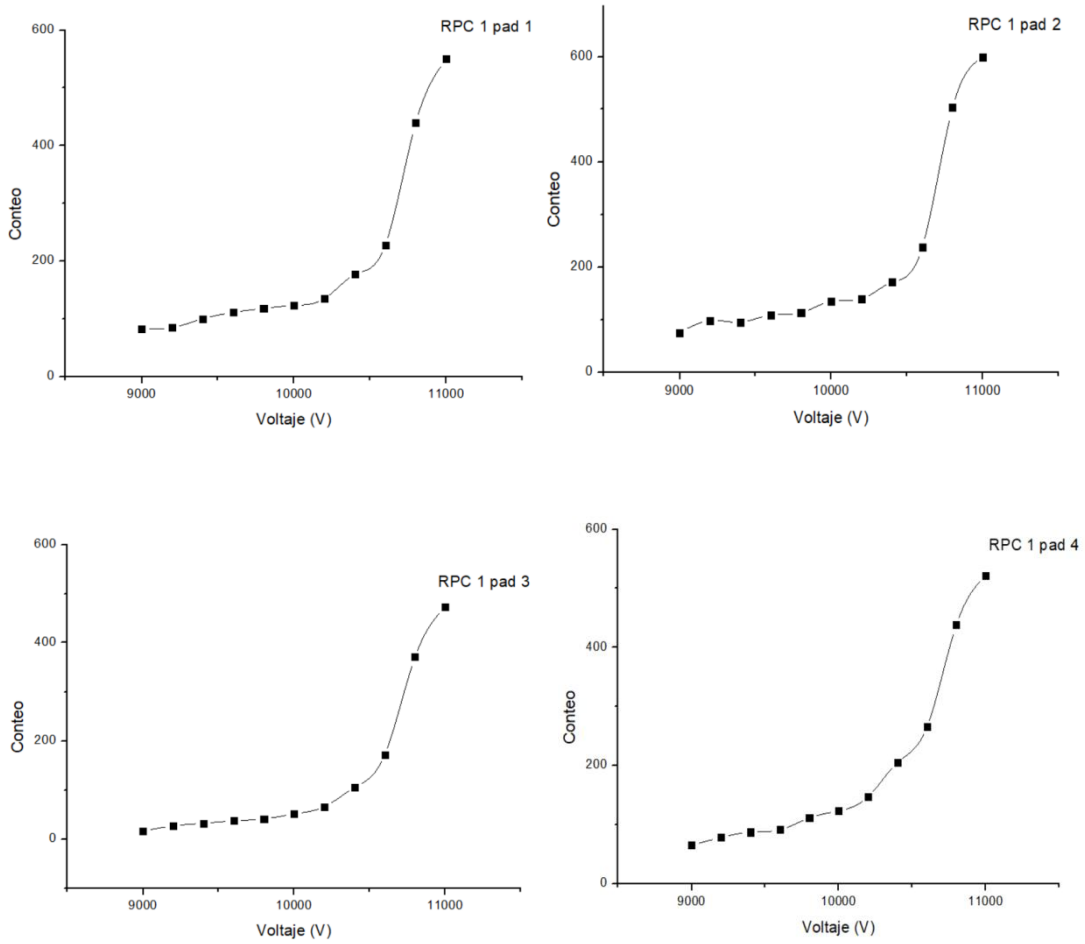
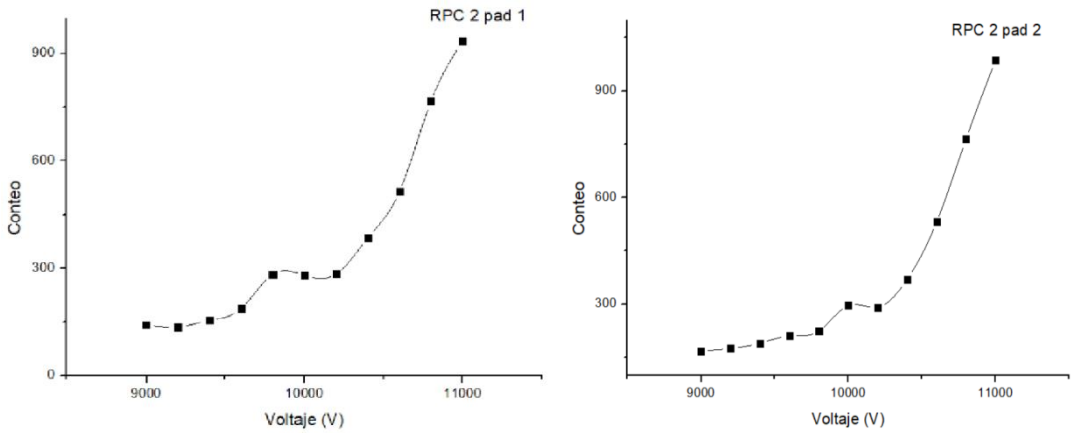


Imagen 39. RPC 1. Cuentas por pad en funcion del voltaje.



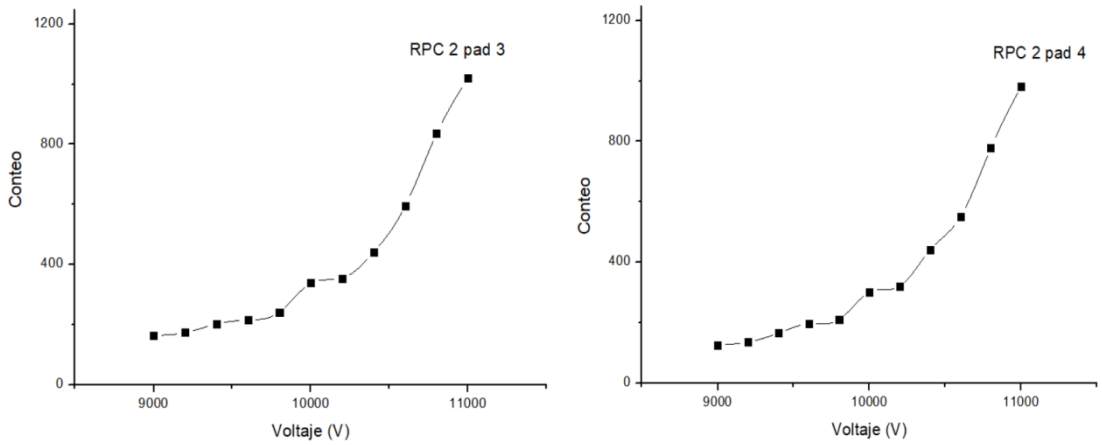


Imagen 40. RPC 2. Cuentas por pad en función del voltaje.

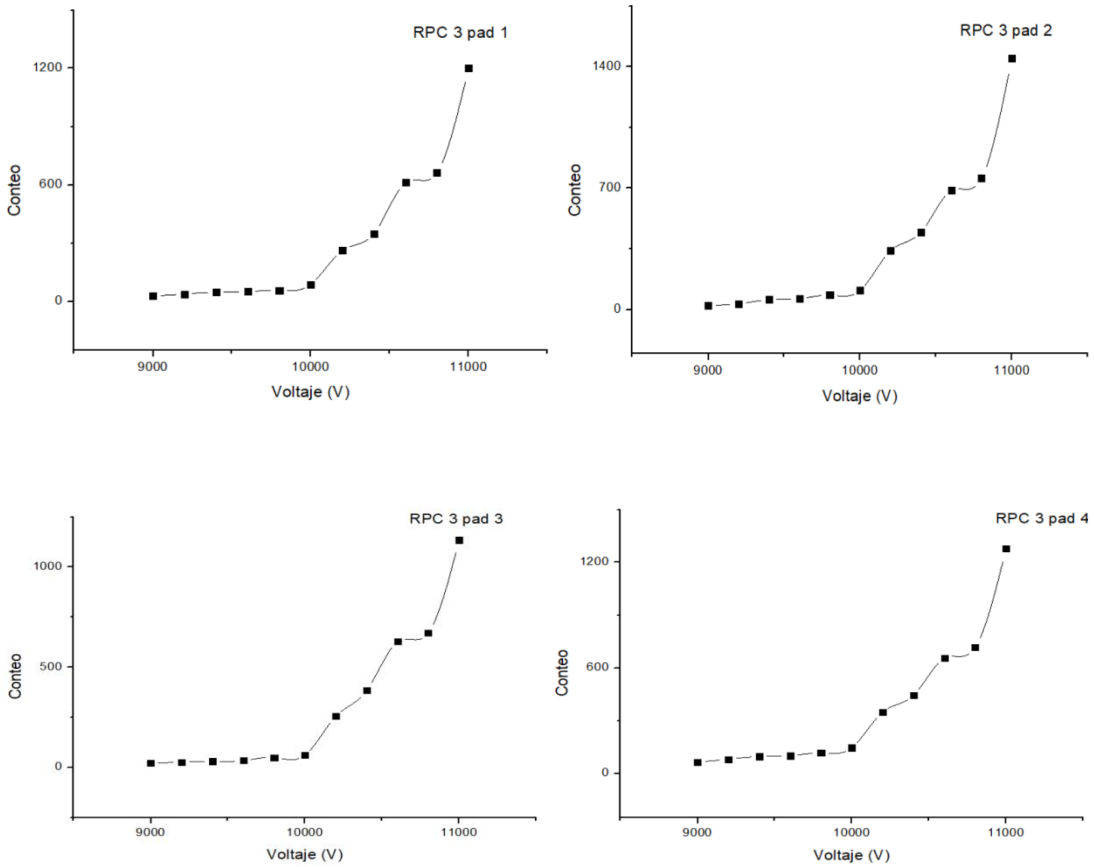


Imagen 41. RPC 3. Cuentas por pad en función del voltaje.

Se observa que todos los pads de los tres RPCs tiene el mismo comportamiento. El que registro más cuentas fue el RPC 3 de hasta 1400 y el de menor que fue de 500 corresponde al RPC 1.

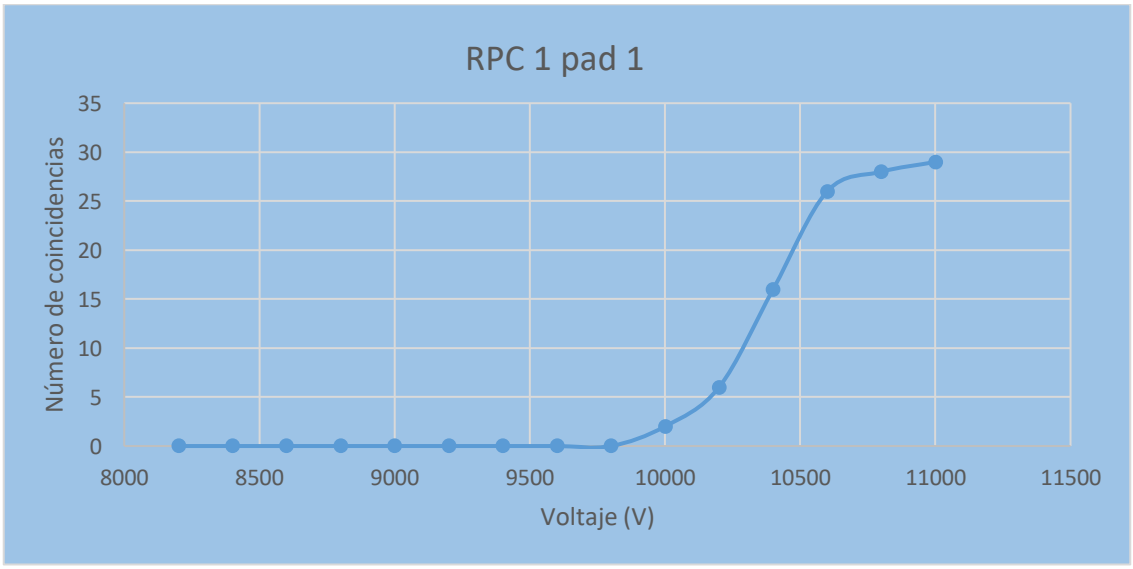
5.3.-Eficiencia

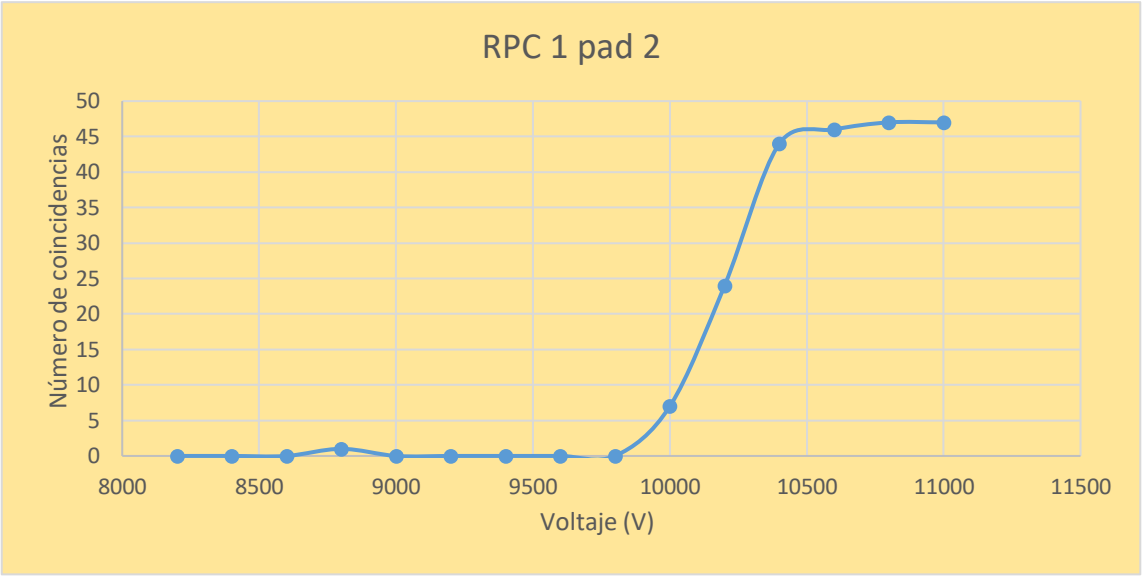
Para la medición de la eficiencia de los RPCs fue de la misma manera que en el caso del conteo de los eventos, pero con ligeros cambios.

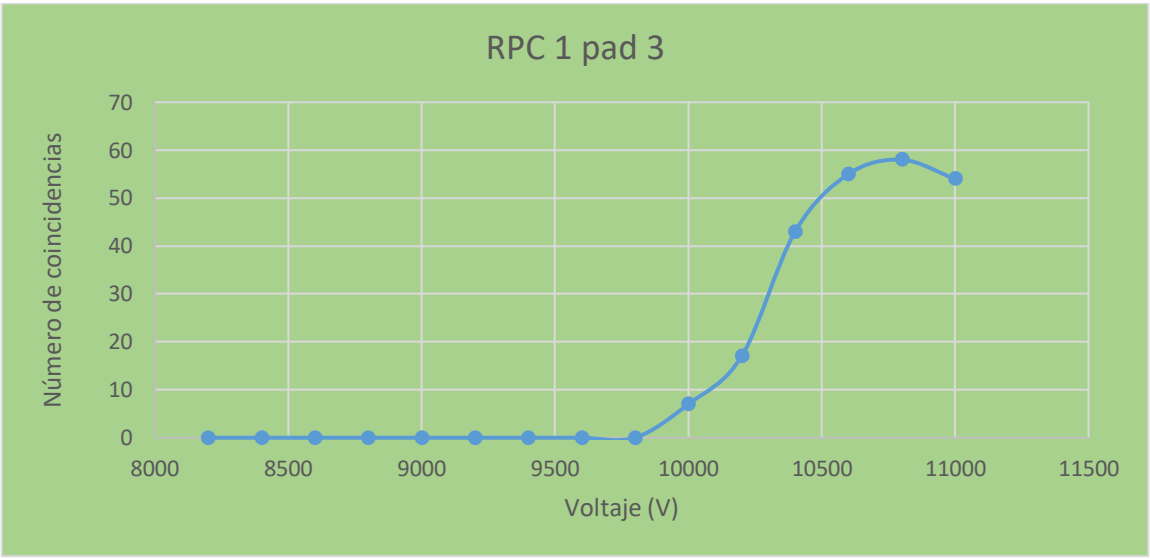
En este caso se usaron los PMTs de área grande como sistema de trigger y se configuro el contador en modo AND. Los RPCs se colocaron entre los PMTs, con una distancia de separación entre los PMTs y RPCs de aproximadamente 9 cm. Como se dijo anteriormente el contador tiene 4 canales, dos fueron conectados a los PMTs, uno a un pad y un canal no estaba conectado porque correspondía el de las coincidencias, es decir, la detección del mismo evento entre los PMTs y el pad. Se alimentaron los PMTs con un voltaje adecuado de tal manera que tuviesen el mismo conteo de eventos con voltaje de discriminación de 10 mV. Con un voltaje de 1400 V para el PMT de arriba y 1230 V para el de abajo, se hicieron todas las mediciones.

Se varió la diferencia de voltaje de los RPCs en un rango de 8200 V-11000 V. Se aumentaba la diferencia de voltaje en 200 V con una duración de prueba de 2 minutos por cada pad.

Se presentan las gráficas de eficiencia de los RPCs por pad, coincidencias-voltaje.







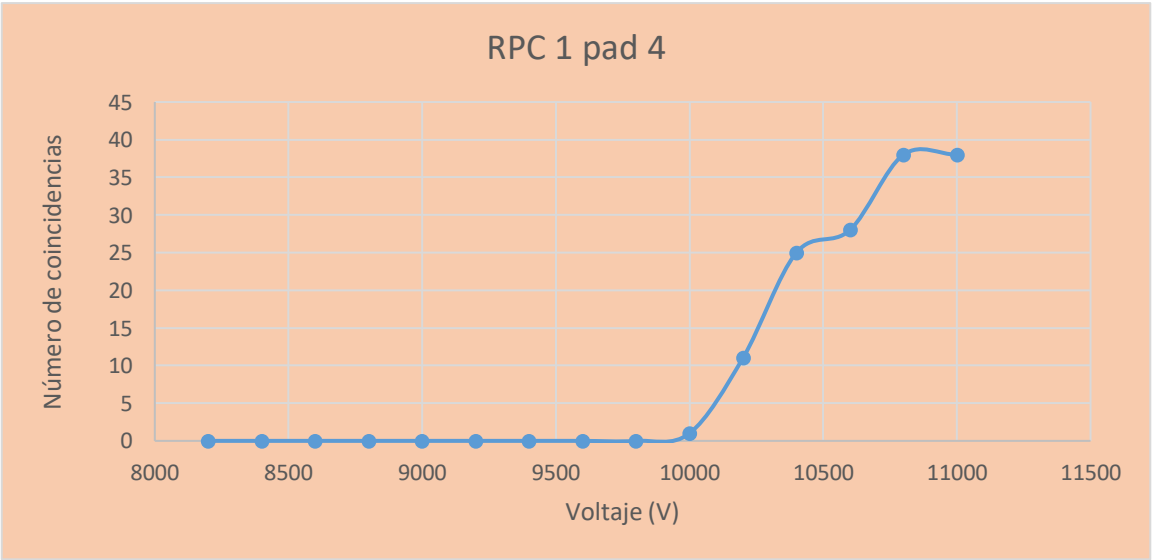
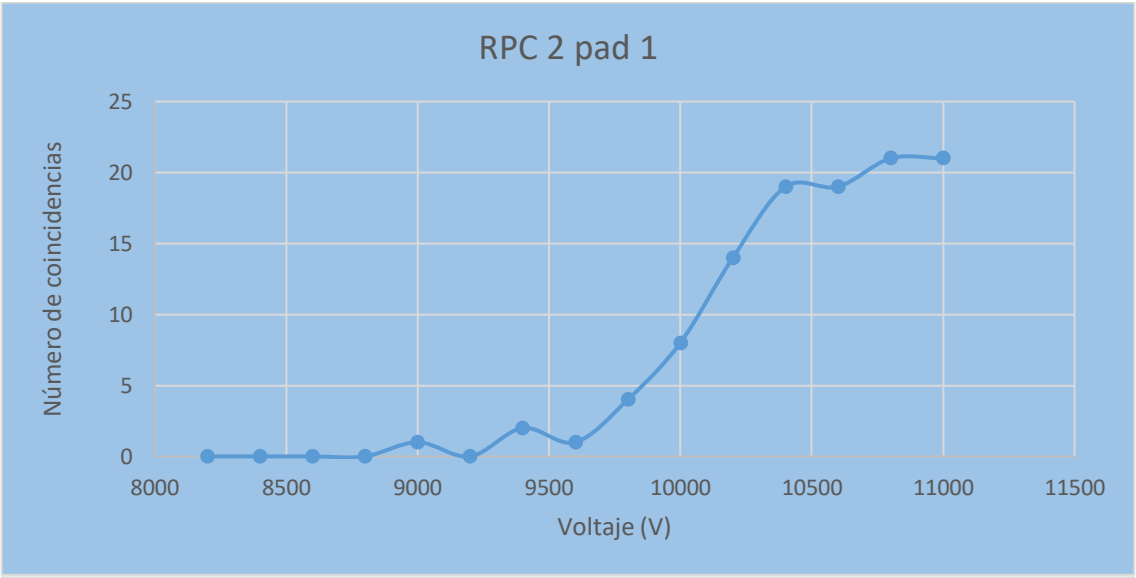


Imagen 42. Graficas de eficiencia de los 4 pads del RPC 1.


RPC 2 pad 1
Número de coincidencias
25
20
15
10
5
0
8000
8500
9000
9500
10000
10500
11000
11500
Voltaje (V)

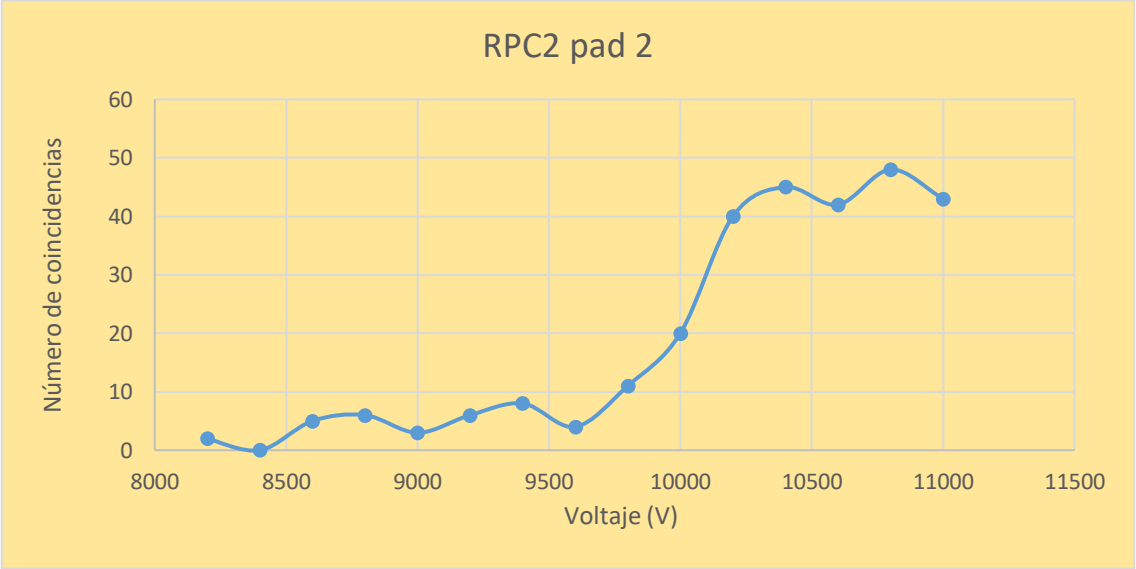
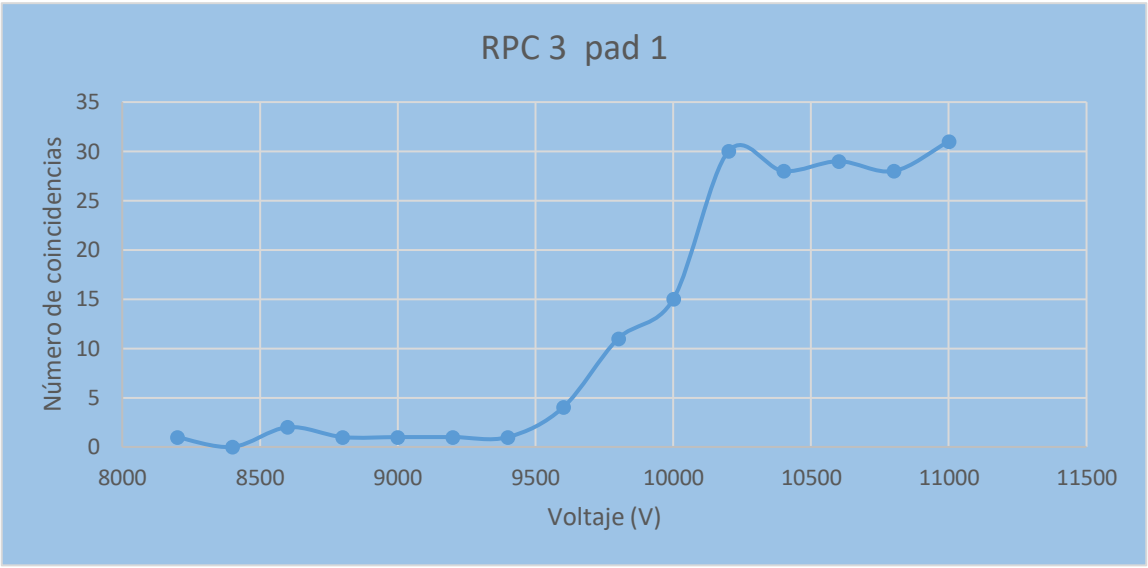

RPC2 pad 2
Número de coincidencias
60
50
40
30
20
10
0
8000
8500
9000
9500
10000
10500
11000
11500
Voltaje (V)

Imagen 43. Graficas de eficiencia de los 4 pads del RPC 2.


RPC 3 pad 1
Número de coincidencias
35
30
25
20
15
10
5
0
8000
8500
9000
9500
10000
10500
11000
11500
Voltaje (V)

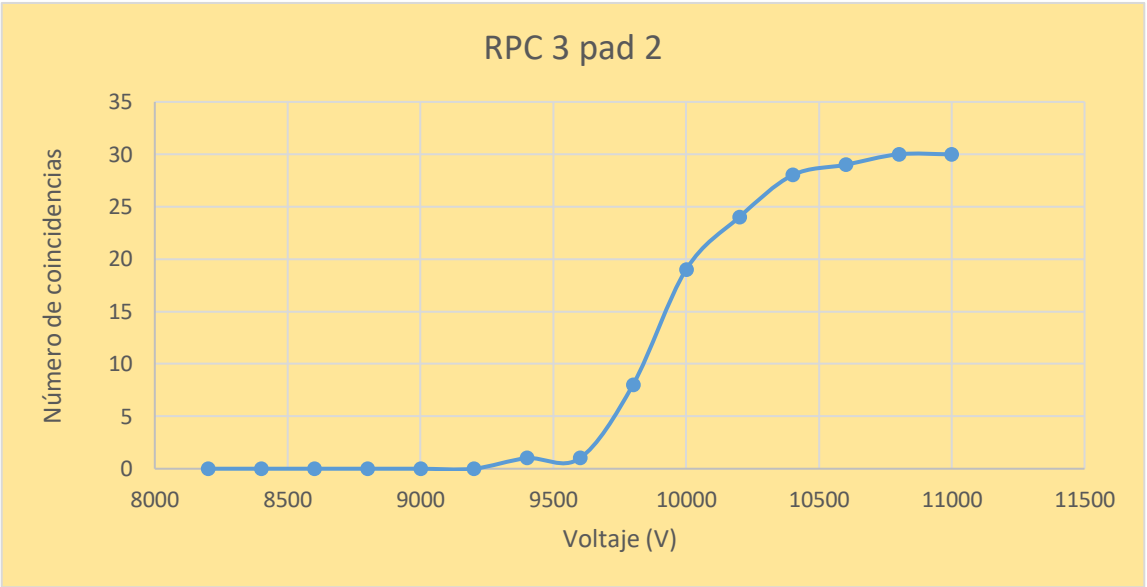

RPC 3 pad 2
Número de coincidencias
35
30
25
20
15
10
5
0
8000
8500
9000
9500
10000
10500
11000
11500
Voltaje (V)

Imagen 44. Graficas de eficiencia de los 4 pads del RPC 3.

La eficiencia de los RPCs es determinado por la llegada de eventos, donde la señal del RPC está sobre del umbral de discriminación configurado en el contador.

El número de eventos crece gradualmente a partir de una diferencia de voltaje de 9800 V. Aproximadamente a 10600 V se estabiliza el número de eventos. El 3 RPC tiene una mayor eficiencia. Los pads del canal 2 de los 3 RPCs presentan una mayor estabilidad de conteo a partir de 10600 V. Donde se presenta la región de Plateu.

5.4.-Distribución de carga

El estudio de carga fue realizado con un dispositivo electrónico hecho por investigadores de la BUAP. Dicho dispositivo puede medir simultáneamente la carga de cuatro canales. El nivel de discriminación fue de 10 mV con un tiempo de estudio de 2 horas para todos los canales. Se midieron los pads 1,3 y 4 porque el pad 2 estaba bajo estudio con el TDC, que se explicará más adelante. La diferencia de voltaje operado en este estudio fue de 11200 V. A continuación se presentan las gráficas de distribución de carga.

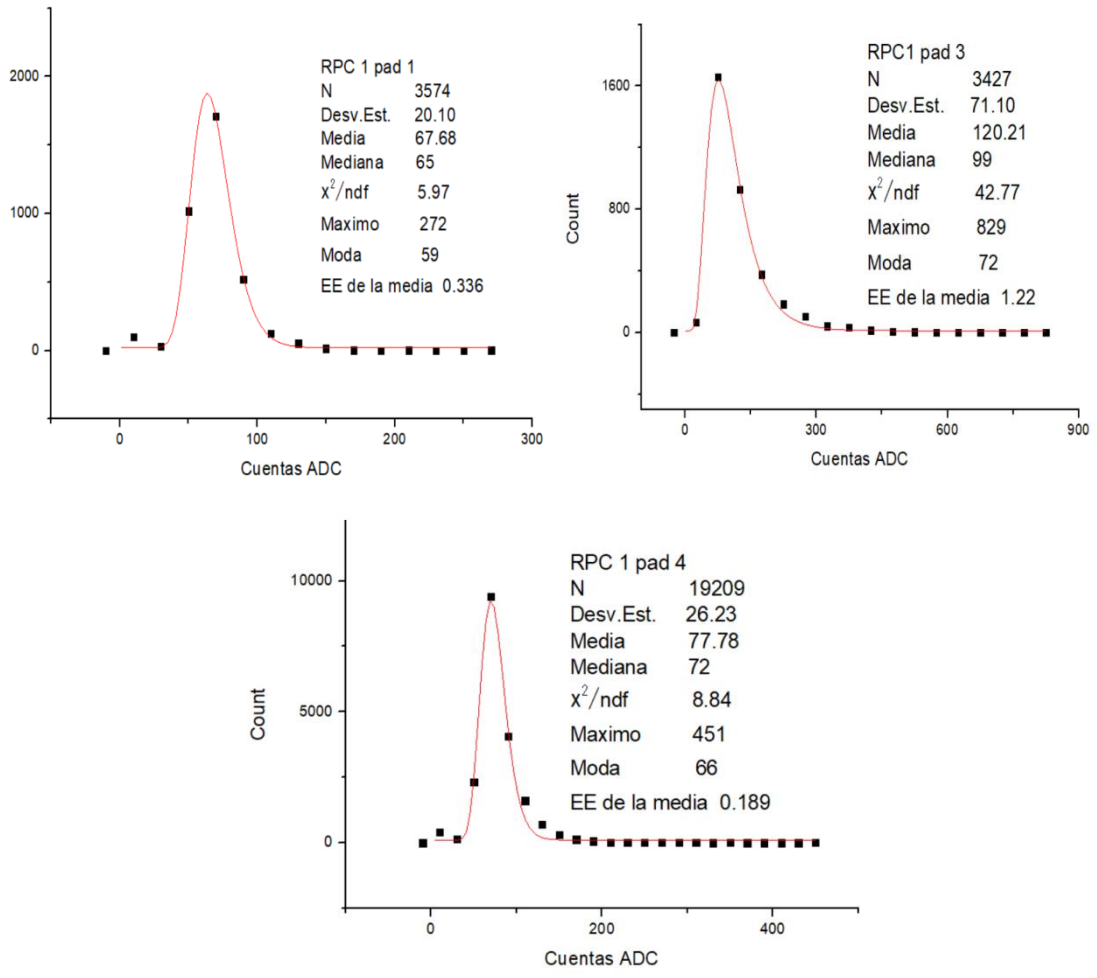


Imagen 45. Graficas de distribución de cargar de los pads del RPC 1

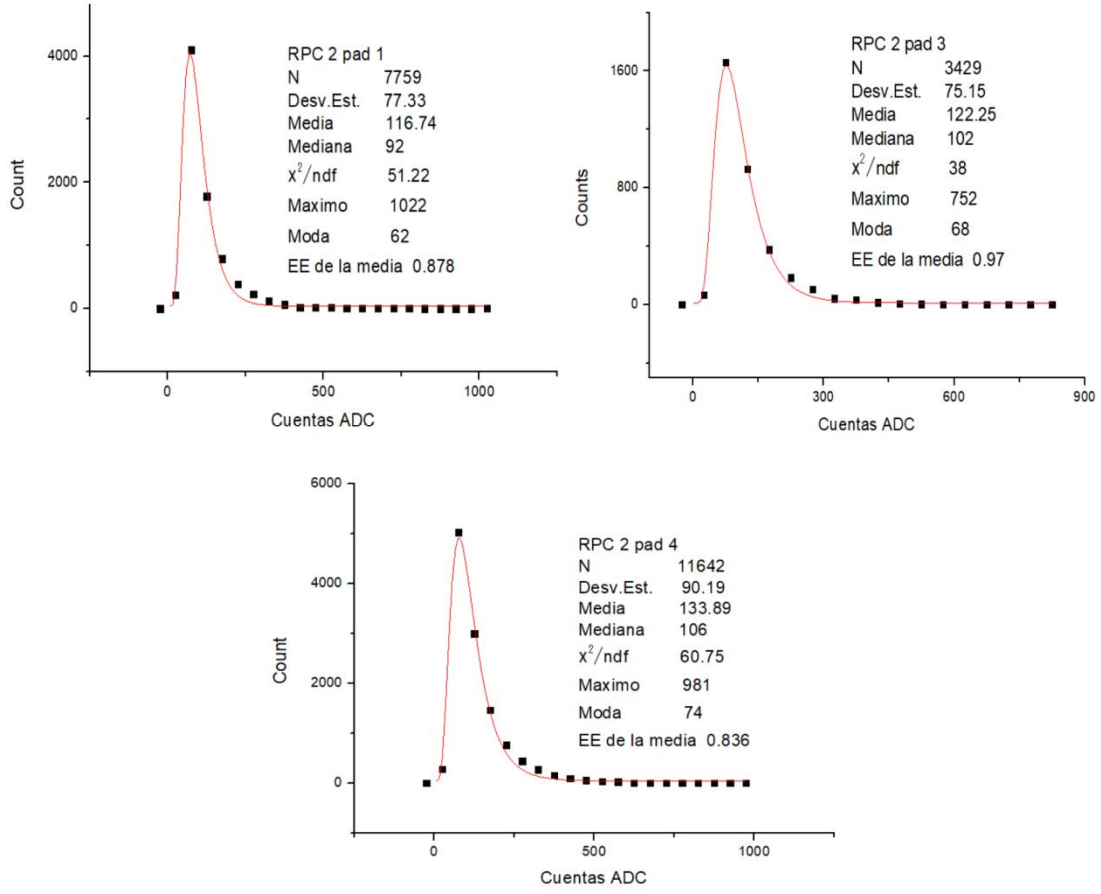
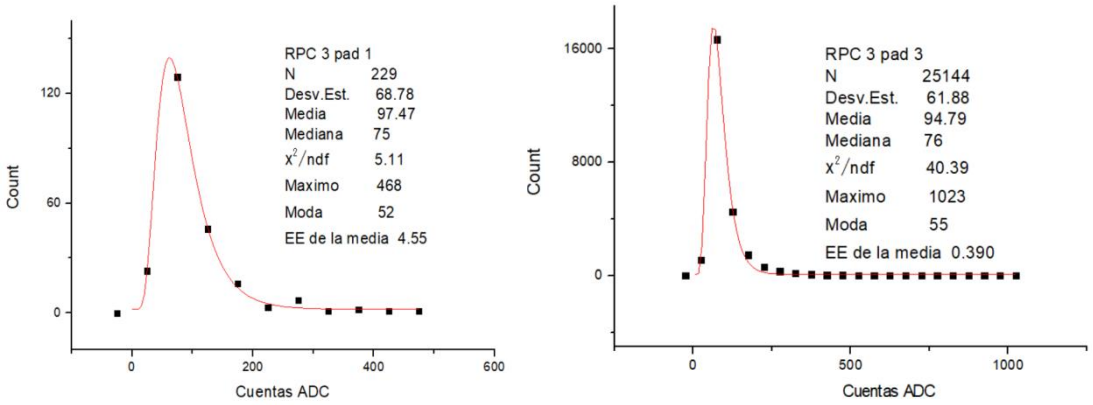


Imagen 46. Graficas de distribución de cargar de los pads del RPC 2.



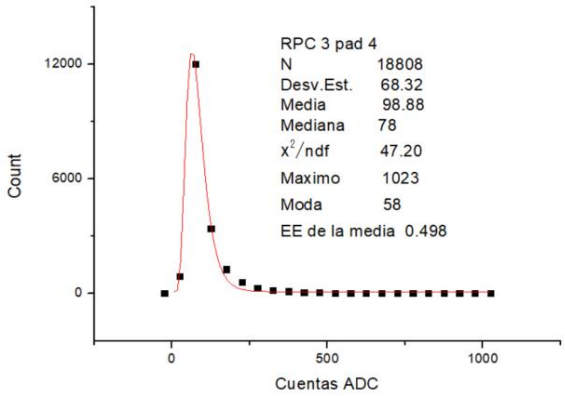


Imagen 47. Graficas de distribución de cargar de los pads del RPC 3.

Los datos obtenidos se ajustan aproximadamente a la distribución gaussiana, pero se ajusta mejor a la distribución de Landau o normal logarítmica. Landau describió teóricamente las fluctuaciones de la pérdida de energía por ionización de una partícula cargada en una capa delgada de materia en 1944 (28).
Se observa que cada pad registró diferente número de carga y esto se debe a los detalles de construcción del detector.

5.5.-Resolución temporal

El arreglo experimental fue el mismo que la de la eficiencia. Únicamente se midió el pad 2 que corresponde al canal 2 de los tres detectores, pero solo se midieron 2 que fueron el detector 2 y 3.

Los PMTs usados fueron los hexágonos y fueron alimentados con un módulo de fuente de poder a un voltaje 11200 V. Los PMTs fueron colocados en el centro del pad. El nivel de discriminación del trigger fue de 50 mV. Las pruebas se realizaron durante 19 días.

La medición fue posible por un módulo electrónico llamado TDC, en el cual en un intervalo de tiempo entre la llegada del muon en el plástico centellador y en la llegada de impacto en uno de los detectores. En este caso se midió la resolución temporal en modo coincidencia entre los dos detectores ya mencionados.

Los PMTs fueron conectados directamente a la a la electrónica de trigger con una entrada y salida de 10 ns, después fueron conectados al módulo v976 con una salida de 2 ns, luego va conectado al módulo V1290N.

Los detectores fueron conectados al módulo del amplificador (V975) con una extensión de 10 ns, este iba conectado al módulo N842 y por ultimo al módulo V129ON.

Como se verán a continuación las gráficas, cada RPC presenta diferente características estadísticas y este se debe al tiempo de llegada del muon y lo más importante pos los detalle de la construcción del detector. Se midió el pad 2 porque presenta mayor eficiencia.

Como se observa, la distribución esperada es Gaussiana.

La resolución temporal del RPC 2 es de 2.1 ns y la del RPC 3 es de 1.69 ns.

Tomando en cuenta las coincidencias que nos dio el TDC y teniendo los tiempos del RPC 2 y 3 respecto al trigger, para saber la traza de la partícula, se hizo la diferencia de tiempo entre los detectores para saber la forma aproximada la traza de la partículas.

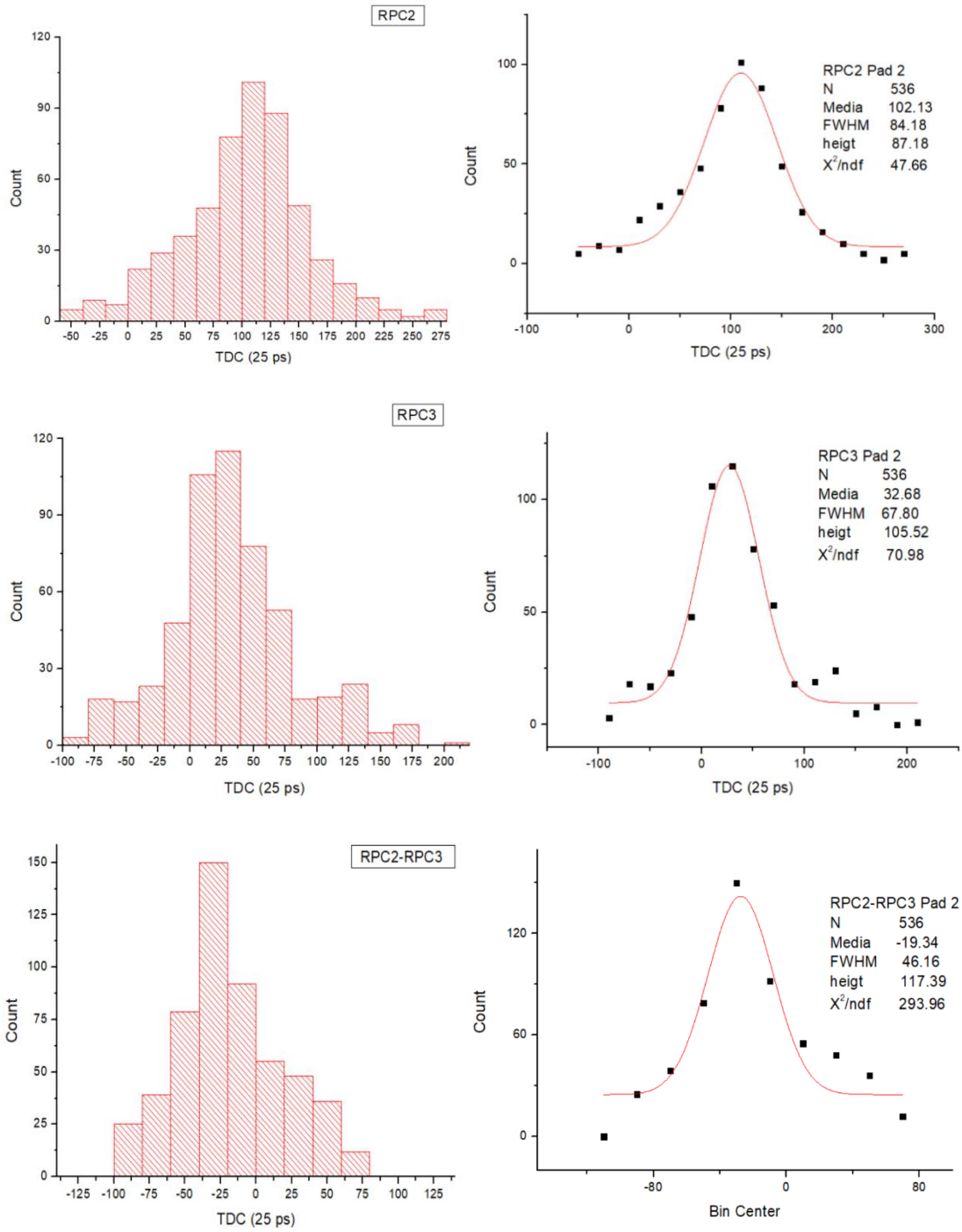


Imagen 48. Graficas de datos obtenidos con el TDC de los detectores 2, 3 y diferencia de tiempos entre el detector 2 y 3.

Al tener en cuenta los siguientes puntos:

-Modo coincidencia entre los detectores y el sistema de trigger.

-Arreglo experimental, el telescopio.

-Área limitada donde ocurren las trayectorias.

-Tiempos obtenidos por el TDC.

Se puede obtener las trazas de los muones atmosféricos

Conclusión

Los detectores de gas son una buena herramienta para la medición de rayos cósmicos si se hace una construcción impecable y cuidadosa. El ruido es una de los factores importantes que afectan en la calidad de medición.

La construcción de un detector de placas resistivas no es tan complicado y en cuestión económica no es dispendioso. Es importante conocer las propiedades de construcción y materiales, así como la parte electrónica.

Las cámaras de placas resistivas obtuvieron una resistividad aceptable para la conducción de los pulsos. Se observó que la eficiencia llego a un rango de 10600 a 10800 V y que la distribución de carga se comporta a una distribución esperada. Se esperaba tener una resolución temporal menor a lo esperado.

Las pruebas mencionadas se hicieron a voltajes diferentes, porque a 10600 V que es la de la eficiencia, no se obtuvieron muchos datos en las prueba de la resolución temporal, es decir, no se registraron una cantidad grande de coincidencias entre los tres detectores. Por lo que solo tomamos en cuenta los detectores 2 y 3. Además medimos los detectores por separado y vimos mejor los pulsos en el osciloscopio

El tiempo de todas las pruebas fue relativamente corto, mientras que la de resolución temporal fue de mucho tiempo porque no obteníamos los suficientes datos para tener una buena confiabilidad de resultados, no se obtuvieron muchas coincidencias porque los tres detectores tenia diferentes cualidades de calidad, como dije anteriormente, por la construcción. Además el área de coincidencia entre el trigger y los detectores fue muy pequeña, por lo que lo que medimos todo el día, durante 19 días. Fueron pocos datos, pero de mayor precisión.

Teniendo en cuenta la coincidencia entre dos detectores y por la forma del arreglo experimental, telescopio de muones, se puede detectar la traza de la partícula en un determinado pad, que en este caso fue el pad 2 de los dos detectores que estuvieron alineados. La resolución temporal de los demás pads es parecido y se obtiene los mismo resultados aproximados, porque se hicieron de forma similar.

Referencias bibliográficas.

[1] Hooshang Nikjoo. (2012). Interaction of radiotan of matter. Sound Parkway: CRR Press.

[2] Kai Siegbahn. (1968). Alpha, beta and gammma ray spectroscopy. New York: North-Holland.

[3] F.Pino perez. . (1983). Análisis de elementos-trazas por espectrometría de absorción molecular uv-visible. Sevilla: Universidad de Sevilla.

[4] William R.Leo. (1987). Techniques for nuclear and particle physics experiments. Berlin: Spinger-Verlag.

[5] Siegmund Brandt, Hans Dieter (1985). The picture book of quantum mechanics. New York: Spinger.

[6] Beatriz Eugenia López Muñoz, José Luis Iturbide García. (2004). Readiactivuidad natural y artificial en nuestro entorno. 2004, de La radiactividad al servicio del ser humano Sitio web: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/55_2/radiactividad_nuclear.pdf.

[7] E. Rutherford, H. Geiger. (1908). An electrical metal of couting the number of alpha particles from radio-active Subtances. University of Manchester, 81, 21.

[8] Costa E et al. 2008 XPOL: a photoelectric polarimeter onboard XEUS Proceedings of SPIE Astronomical Instrumentation 2008 Conference, 23-28 June 2008 Marseille, France 7011.

[9] P. Fonte, V. Peskov. 2008. On the physics and tecnology of gaseous particle detectors. En FEDER, CERN (1, 10).

[10] Stefaan Tavernier. (2010). Experimental Techniques in nuclear and particle physics. New York: Springer.

[11] Glenn F. Knoll. (2000). Radiation detection and measurement. Toronto: Jong Wiley & Sons, Inc.

[12] Rocío García Gínez.(2014). Estimación del espectro de alturas de pulsos con corrección del efecto apilamiento para el monitor de neutrones. UNAM, Ciudad de México.

[13] Antonio Ferrer Soria, Eduardo Ros Martínez. (2005). Física de partículas y astro partículas. Valencia: Maite Simón.

[14] Christian Lippmann. (2003). Detector physics of resistive plate chambers. Frankurt: CERN.

[15] P. Fonte. (2013). Survey of physical modelling in resistive plate chambers. Sissa Medialab, 1, 70.

[16] Marcello Abbrescia, Vladimir Peskov, and Paulo Fonte. (2018). Resistive gaseous detectors. Germany: Wiley-VCH.

[17] P.Fonte, IEEE Trans. on Nucl. Sci. 49 (2002), 881.

[18] Universdad de Sevilla. (2015). Descargas electricas en gases: concepto clasificación y fenómenos asociados. En Trabajo fin de master (15). Sevilla: Universidad de Sevilla.

[19] R.R. Shinde, E. Yuvaraj. (2009). Fabrication and characterization of glass resistive plate chamber. http://www.tifr.res.in/~ehep2019/pdfs/exp04_rpc.pdf.

[20] Pedro Alexandre Glória Cardoso. (2014). Instrumentation and testing of RPC detectors in the Pierre Auger Collaboration. Técnico Lisboa, Portugal.

[21] J.J Beatty, J. Matthews, and S.P Wakely. (2017). Cosmic Rays. http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf.

[22] Jonh E. Hatch. (1984). Aluminium. Ohio: American society for metals.

[23] H.Wayne. Richardson. (1997). Handbook of cooper compounds and applications. Sumter, South Carolina: Marcel Dekker Inc..

[24] Ficha técnica R134 a. (2019). http://www.kosim.cl/images/R134A-Ficha%20Tecnica.pdf.

[25] CAEN tools for discovery. (2019). https://www.caen.it/.

[26] Centelladores. (2019). http://instrumentacion.ecfm.usac.edu.gt/escaramujo/documentos/izraelevitch.pdf

Anexos

Imagen 1. Espectro electromagnético.

Imagen 2. Fuentes de radiación.

Imagen 3. Detector ALICE.

Imagen 4. Detectores de radiación. Semiconductor y Geiger.

Imagen 5. Detector de radiación basado en la medida de corriente.

Imagen 6. Detector basado en modo impulso.

Imagen 7. Regiones de operación.

Imagen 8. Avalancha donde el campo eléctrico es diferente en algunas regiones por el campo eléctrico debido al efecto espacio-carga.

Imagen 9. RPC.

Imagen 10. Modelo de un multigap y una partícula cargada que cruza y que puede crear una ionización en cualquier gap.

Imagen 11. Streamer positivo y negativo.

Imagen 12. Fotografía de avalancha.

Imagen 13. Rayos cósmicos.

Imagen 14. Cascada producida por los rayos cósmicos primarios. Observatorio Pierre Auger.

Imagen 15. Telescopio de detectores RPC.

Imagen 16. Placa de cobre.

Imagen 17. Vidrio Saint Gobain.

Imagen 18. Pintura.

Imagen 19. Gas argón y freón.

Imagen 20. Módulo CAEN.

Imagen 21. Contador

Imagen 22. Electrónica del trigger.

Imagen 23. Esquema de un tubo fotomultiplicador acoplado a un centellador.

Imagen 24. PMT.

Imagen 25. Marco y espaciadores.

Imagen 26. CNC.

Imagen 27. Electrodos y unión de alambres con el cobre.

Imagen 28. Amarre de sostenimiento para los electrodos.

Imagen 29. Electrodos alineados.

Imagen 30. Conexión de los electrodos.

Imagen 31. Conectores de alto voltaje y canales con sus respectivos pads.

Imagen 32. Conexión de gas.

Imagen 33. Primera imagen de arriba para abajo, orificios en las tapas de aluminio, orificios grandes de alto voltaje y acoplamiento de los conectores de gas y alto voltaje.

Imagen 34. RPC.

Imagen 35. Cables para la lectura (blanco y azul) de pulsos conectados a los conectores lemo.

Imagen 36. Telescopio de muones con la electrónica de adquisición de datos.

Imagen 37. Medición de resistividad sobre la superficie.

Imagen 38. Gráfica de la resistencia de la pintura.

Imagen 39. RPC 1. Cuentas por pad en funcion del voltaje.

Imagen 40. RPC 2. Cuentas por pad en función del voltaje.

Imagen 41. RPC 3. Cuentas por pad en función del voltaje.

Imagen 42. Graficas de eficiencia de los 4 pads del RPC 1.

Imagen 43. Graficas de eficiencia de los 4 pads del RPC 2.

Imagen 44. Graficas de eficiencia de los 4 pads del RPC 3.

Imagen 45. Graficas de distribución de cargar de los pads del RPC 1.

Imagen 46. Graficas de distribución de cargar de los pads del RPC 2.

Imagen 47. Graficas de distribución de cargar de los pads del RPC 3.

Imagen 48. Graficas de datos obtenidos con el TDC de los detectores 2 y 3.

Tabla 1. Gases con su respectico potencial de ionización [10].

Tabla 2. Propiedades del refrigerante [25].

Tabla 3. Valores de voltaje-corriente