

Armado de un medidor de flujo de muones

Autor: Germán Chiarelli¹

¹Licenciado en Física, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Director: Xavier Bertou²

²Laboratorio Detección de Partículas y Radiación

1 de marzo de 2019

Resumen

Con el objetivo final de realizar mediciones en favor de detectar la materia oscura, es necesario conocer todo el ruido proveniente de partículas ionizantes del lugar a medir. En este caso, es de interés estudiar completamente una instalación situada en una mina en Sierra grande, Rio Negro, a 400 mts bajo tierra. Se espera, casi exclusivamente, la presencia de muones. Con esto en mente, se pusieron a punto y se caracterizaron 4 detectores centelladores para medir en coincidencia. Durante el trabajo se los aisló lumínicamente, y se los reforzó estructuralmente para evitar cualquier tipo de movimiento accidental durante su transporte y manejo. Además, se analizó la uniformidad de los detectores, colocando una fuente radioactiva en distintos puntos de los mismos, encontrando mayor captura en la zona central y menor en los bordes, para todos los casos

Palabras claves: Muon, centellador, partículas subatómicas, PMT

Abstract

Looking forward to make measurements in favor of detecting dark matter, it is necessary to know all the noise coming from ionizing particles of the place to be measured. In this case, it is relevant to study an installation located in Sierra Grande, Rio Negro, 400 meters underground. It is heavily expected the presence of muons, over other types of particles.

With this in mind, 4 scintillator detectors were tuned and characterized to measure in coincidence. During the work they were isolated lightly, and reinforced structurally to avoid any kind of accidental movement during transport and handling. Moreover, the uniformity of the detectors is analyzed, placing a radioactive source in different points of the same. A lack of homogeneity was found that was characterized and was comparable between detectors

Keywords: Muon, scintillator, subatomic particles, PMT

Índice

1. Introducción	3
1.1. Rayos C3smicos	3
1.2. Componentes de una cascada	3
1.3. Motivaci3n del trabajo	4
1.3.1. Sitio de medici3n	4
1.4. Estado del arte	4
2. Desarrollo experimental	5
2.1. Centellador	5
2.2. Fotomultiplicadores	5
2.3. Construcci3n de los detectores de centelleo	6
2.4. Caja estanca a la luz	6
2.5. Detecci3n y an3lisis de la se1al	7
3. Resultados y discusiones	7
3.1. Se1ales medidas	8
3.2. Sellado de las cajas	8
3.3. Mejoras al sistema centellador-PMT	9
3.4. Caracterizaci3n de los detectores	9
4. Conclusiones	11
4.1. Trabajo a futuro	11

1. Introducción

1.1. Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente a la Tierra desde todas las direcciones. La mayoría de estas partículas son núcleos de átomos o electrones. Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza. Los rayos cósmicos ultra-energéticos viajan a una velocidad cercana a la de la luz y tienen cientos de millones de veces más energía que las partículas producidas por cualquier acelerador en el mundo.[1].

El descubrimiento de estos rayos cósmicos tuvo lugar a principios del siglo XX. En 1912, Victor F. Hess afirmó que la mejor interpretación para sus resultados consistía en suponer una radiación de gran poder penetrante, incidiendo desde arriba de la atmósfera[2]. Sin embargo, recién 24 años más tarde se descubrió que la radiación llegaba en forma de cascadas de partículas, gracias a P. Auger, R. Maze y T. Grivet-Meyer, que observaron coincidencias entre contadores separados 5 m entre sí[3].

Cuando un rayo cósmico o *primario* ingresa a la atmósfera, sufre su primera colisión con un núcleo de alguno de los elementos que la constituyen típicamente unos 12 km por sobre el nivel del mar. En el choque se generan más partículas, *secundarios*, de identidad diferente de la del primario. Los secundarios pueden o bien interactuar nuevamente, o bien decaer, generando más secundarios en ambos casos. Cual de estos procesos gana, depende de la vida media de la partícula en cuestión, de su energía y de la densidad del aire. A medida que la cascada se desarrolla, la energía de una cierta partícula secundaria es una fracción cada vez más pequeña de la energía del primario. En algún momento, la energía es suficiente solo para interactuar con el medio a través de la ionización, decaer o ser absorbidas. A partir de ese momento, el número de secundarios empieza a disminuir.

1.2. Componentes de una cascada

Por cada primario que colisiona con la atmósfera, se genera una cascada de secundarios particular. Es interesante describir las distintas partículas que se generan y las componentes más importantes.

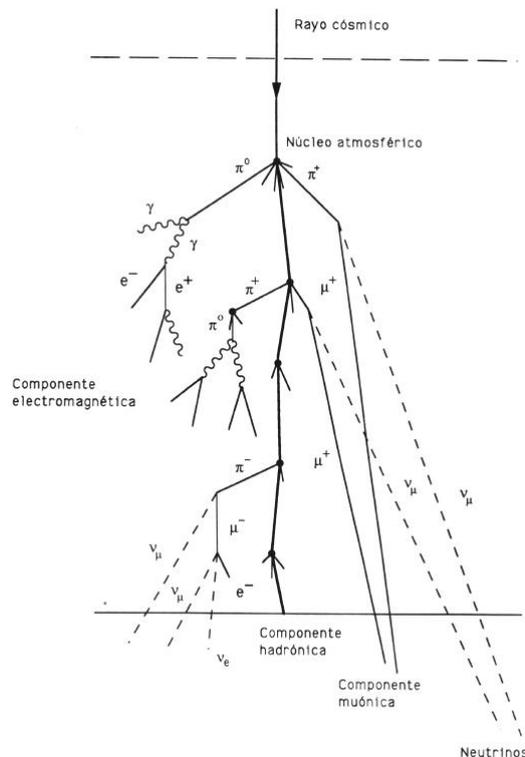


Figura 1: Esquema de una cascada de partículas iniciada por un rayo cósmico de alta energía. Se distinguen las componentes más importantes de la cascada: la componente electromagnética dominante, la componente hadrónica, y la muónica.

En la figura 1 se muestra un esquema de una cascada, explicitando las partículas que constituyen cada componente. Estas son:

- La componente hadrónica, conformada por protones y neutrones. En sus interacciones producen mesones como piones neutros π^0 , piones cargados $\pi^+\pi^-$ y kaones.

- La componente electromagnética, la dominante en todas las cascadas, en la que hay fotones γ , electrones e^- y positrones e^+ .
- la componente muónica, integrada por muones μ^- y antimuones μ^+

La componente electromagnética es la dominante, la más estudiada, y la mejor reproducida por las simulaciones. Por ejemplo, a 10 EeV un protón que interactúa con la parte superior de la atmósfera produce a nivel del mar del orden de 3×10^{10} partículas. De estas, el 99 % son fotones y electrones o positrones. Sus energías están dentro del rango de 1 a 10 MeV y transportan 85 % de la energía total. El resto de las partículas son muones, con una energía promedio de 1 GeV (10 % de la energía aprox.), piones de unos pocos GeV, neutrinos y bariones[4].

En este trabajo se tiene especial interés por la componente muónica.

1.3. Motivación del trabajo

Aproximadamente el 85 % de la materia del universo corresponde a la llamada *materia oscura*. [6]. Esta definición corresponde a una hipotética forma de masa necesaria para comprender ciertas observaciones astrofísicas, que incluyen efectos gravitacionales, que solo pueden ser explicados si hay más masa de la que se ve.

Se la llama materia oscura porque no interactúa con la radiación electromagnética, como la luz, y es invisible en todo el espectro, lo cual genera que sea extremadamente difícil de detectar.

Se sospecha que es de una naturaleza no-bariónica, pudiendo ser una partícula sub-atómica aún no descubierta[7]. El primer candidato a materia oscura es una especie de partícula elemental que no fue descubierta, llamada *WIMPs* por sus siglas en inglés *Weakly Interacting Massive Particles*. Actualmente se están realizando experimentos en busca de detectar y estudiar estas partículas de materia oscura, pero todavía ninguno alcanzó un resultado aceptado por la comunidad científica[8].

La hipótesis que se busca estudiar en el presente trabajo, se basa en un flujo aparente de materia oscura desde Cygnus debido al movimiento propio del sol dentro de la galaxia. Éste incide casi perpendicularmente sobre los 40° latitud sur y media vuelta de la tierra después, se encuentra diametralmente opuesto. Esto significa que al medir en esa latitud, se espera una modulación entre las partículas que inciden directamente, y 12 hs después, las que tienen que atravesar el núcleo masivo de la tierra.

Es este contexto es que el actual trabajo busca poner a punto una serie de detectores de muones para caracterizar la zona de medición antes de comenzar a buscar la materia oscura. Es muy importante caracterizar los eventos de detección, ya que, en caso de comprobarse la hipótesis planteada, estos serán modulados diariamente por el cambio del flujo de materia oscura.

1.3.1. Sitio de medición

En Sierra grande, Rio Negro, hay una mina que ya se usó para intentar medir partículas en el pasado. Ahora, 20 años después, con nueva tecnología, es de interés regresar a dicha mina en busca de materia oscura. Típicamente se eligen ubicaciones bajo tierra, para filtrar la mayor parte de las partículas de menor energía de los rayos cósmicos. Aún así, alguna partículas muy energéticas alcanzan a pasar, como es el caso de los muones. Este lugar en particular es elegido porque se encuentra a 40° latitud sur, y se conserva en condiciones seguras para acceder y medir.

Es de interés caracterizar este *fondo* de muones con los detectores desarrollados.

1.4. Estado del arte

Hoy día existen muchos experimentos a lo largo del globo buscando la materia oscura. En la mayoría de los casos lo que se utilizan son detectores lo más aislados posibles y con muy bajo ruido, para que la señal detectada sea una interacción con materia oscura. Limitaciones técnicas no permiten, hasta ahora, mirar por debajo de cierto umbral de energías.

El primer (y único) experimento que dice haber detectado materia oscura, es el del DAMA[9]. En este se mide una magnitud que corresponde al flujo de materia oscura que penetra la tierra, mientras esta viaja a favor del mismo, y en contra. Se esperaba ver una modulación distinta en cada caso, de frecuencia anual, y esto mismo se observó. Este experimento es bastante cuestionado, y existen otros experimentos que lo contradicen, como el caso del LUX y el SuperCDMS [10].

Por otro lado, el trabajo actual apunta a realizar otro tipo de medición de materia oscura. En este caso, se quiere observar una modulación diaria en las interacciones que ocurren en el detector. El ruido en si mismo no es un problema, ya que se puede caracterizar y luego observar las modulaciones sobre este. Esta configuración permite buscar en umbrales de energías mucho menores a los estudiados hasta el momento.

2. Desarrollo experimental

Existen varias maneras de construir un detector de partículas subatómicas. Típicamente se necesita que dichas partículas interactúen con algún material, y luego medir esta interacción.

En el caso de los tanques Cherenkov del conocido observatorio Pierre Auger, estos utilizan agua y la emisión que se genera por el efecto Cherenkov de las partículas al viajar más rápido que la luz en el medio [5]. Estos fotones son captados luego por uno o más fotomultiplicadores.

En el caso de estudio de este trabajo se utiliza un plástico centellador acoplado a un fotomultiplicador.

2.1. Centellador

Un centellador refiere a materiales que 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.

La mayoría de los materiales transparentes producen una pequeña cantidad de luz de centelleo cuando sobre ellos incide radiación ionizante. Sin embargo, en algunos pocos la conversión de energía de excitación a luz es eficiente: a estos los llamamos materiales centelladores.

2.2. Fotomultiplicadores

Para que un centellador sea útil en como detector de partículas es necesario acoplarle un fotodetector que traduzca la luz liberada en una señal eléctrica. Los tubos fotodetectores (PMT) son los dispositivos adecuados para esto [11]. Un PMT cuenta con un fotocátodo, el cual libera electrones cuando sobre él inciden fotones visibles, llamados fotoelectrones; y con un arreglo de electrodos conectados a alta tensión creciente llamados dínodos, encargados de la multiplicación de los fotoelectrones. En la figura 2 se puede ver un esquema de un centellador acoplado a un tubo fotomultiplicador.

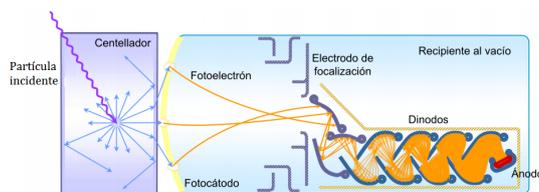


Figura 2: Esquema de un tubo fotomultiplicador acoplado a un centellador.

El fotocátodo es una fina capa de material fotosensible, de unos pocos nm, cuya función es liberar la mayor cantidad de electrones como sea posible, dada una cantidad de fotones incidentes. Cuando un fotón incide, transfiere su energía a un electrón del material, alrededor de 3 eV para un centellador con emisión en la región azul/violeta. La trayectoria del electrón tiene una distribución angular muy extendida. El efecto fotoeléctrico, dominante a estas energías, eyecta electrones con poca predilección por la dirección inicial del fotón, dado que el núcleo del átomo de donde se arranca el electrón toma parte del momento del fotón. A temperatura ambiente, la energía media de los electrones es 0,025 eV, con lo cual, el electrón perderá energía por colisiones en su trayecto hacia la superficie del material. Si, al llegar allí, aún posee suficiente energía como para superar la barrera energética inherente a la interfase material/vacío, el electrón podrá escapar del material. Esta barrera es frecuentemente llamada función trabajo, que para los metales supera los 4 eV, puede estar en el orden de 1,5 eV para semiconductores dopados ad hoc. Así, puede verse que tan solo una porción de los electrones liberados por los fotones incidentes serán capaces de escapar del fotocátodo.

Cuando un fotón incide sobre un dínodo con la energía cinética suficiente, puede arrancar electrones secundarios del material. De los electrones excitados por el electrón incidente, tan solo una pequeña fracción logrará escapar del dínodo para aportar a la multiplicación, por razones similares a las antes expuestas. El factor de multiplicación de un dínodo, δ , se define como la cantidad de electrones secundarios emitidos por electrón incidente. Los materiales frecuentemente utilizados en los dínodos tienen un $\delta \sim 5$, de modo que para obtener ganancias de 10^6 , típica de un PMT comercial, es necesario un arreglo del orden de 10 dínodos. El último de los dínodos es el ánodo. De donde se debe entender que el ánodo es aquel electrodo con potencial positivo, el cual atrae electrostáticamente a las cargas negativas.

2.3. Construcción de los detectores de centelleo

En este trabajo, se acopló un plástico centellador cuadrado de $25 \times 25 \times 2$ cm a un PMT *Hamamatsu, R1463* y una electrónica correspondiente para contar los pulsos. Todo esto se confinó dentro de una caja estanca a la luz, para obtener un detector compacto y robusto.

En la imagen 3 se muestra un esquema del detector. La sección eficaz del PMT es mucho mas pequeña que el tamaño del centellador. Por esto, típicamente se utiliza una guía de onda para que toda la luz emitida pueda ser detectada correctamente. En este trabajo se optó por no aumentar el tamaño de la caja, por lo tanto no se introdujo esta guía de onda. Se espera que esto genere una detección inhomogénea, que varía en cada sección del detector, y que será caracterizada mas adelante en este trabajo utilizando una fuente radiactiva.

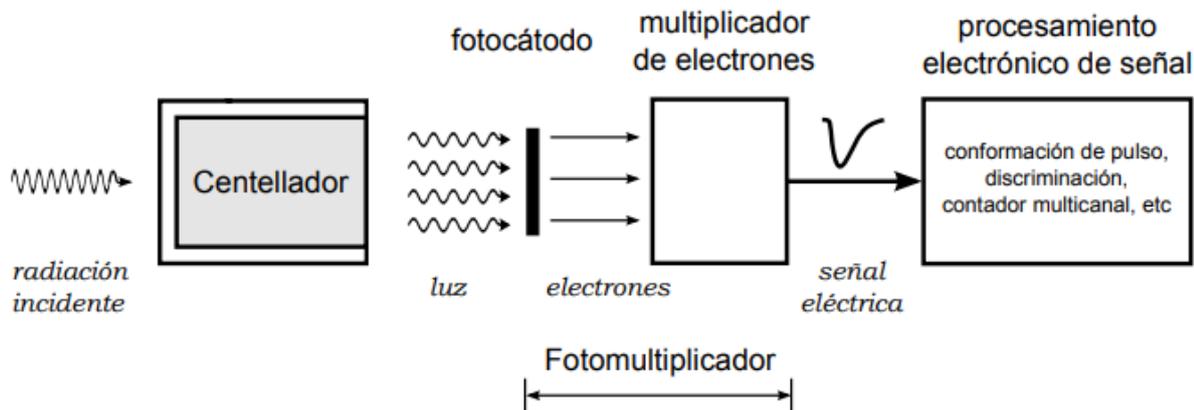


Figura 3: Esquema del setup experimental. La radiación incidente interactúa con el centellador, el cual genera algunos fotones que son captados por el PMT que los transforma en una señal eléctrica, que utilizamos para contar.

Las componentes mas importantes de los detectores descritos ya existían en el laboratorio al comenzar el proyecto. Es decir, se contó con una caja, un centellador, un PMT y su electrónica. La primera parte del trabajo consistió en obtener una caja efectivamente estanca, donde la luz no interfiera la medición de partículas. También es importante agregar que dicha caja tiene que poder abrirse, por motivos de traslado, y mantenimiento.

Por otro lado, se buscó mejorar la señal de detección con los medios disponibles. Se buscaron alternativas a la guía de ondas, en particular, la de envolver al centellador en papel aluminio. De esta manera se obtiene una probabilidad de que algún fotón que se emite en una dirección que no interactúa con el PMT, rebote contra el aluminio y se redirija a la zona de medición.

Además, se mecanizaron dos piezas de plástico personalizadas para sostener al PMT de manera estable y centrado respecto al centellador.

En cada etapa del proceso de construcción, se realizaron las mediciones necesarias para confirmar las mejoras parciales de cada caso, hasta obtener el resultado final que será completamente caracterizado para su uso en el campo.

En la imagen 4 se muestra el detector antes de iniciar el trabajo (a), y luego de realizarlo (b). Se puede apreciar que los bordes inferiores se cubrieron con cinta de aluminio, el PMT se fijó con unas piezas de plástico adicionales y el centellador fue cubierto en aluminio entre otras cosas.

2.4. Caja estanca a la luz

Al utilizar un detector de fotones, como es el caso del PMT, es muy importante evitar el ingreso de luz al detector. Ya que se observarían falsos positivos.

Para esto, se volvieron a pegar los cuatro laterales de la caja con pegamento para PVC, se sellaron todas las uniones con silicona negra, y se remató pegándole cinta de aluminio sobre la silicona. De esta manera, la cinta no sufre un doblez muy pronunciado y no es tan fácil que se rompa.

Para el lado de la tapa, se adicionó una goma aislante sobre el borde interno de la caja, para que ejerza presión, y se cerro con 19 tornillos bien distribuidos.

Para detectar posibles entradas de luz, se utilizó en primera instancia, una tela de blackout, con la cual se podía tapar y destapar completamente el detector. Luego, para un estudio mas fino, se diseñó una sonda de exploración con un led sincronizado en frecuencia al detector, para solo observar las cuentas que corresponden a dicho led. Se barrió toda la caja, para detectar posibles errores en la aislación lumínica localmente y resolverlos con algún agregado similar a los métodos ya descritos.

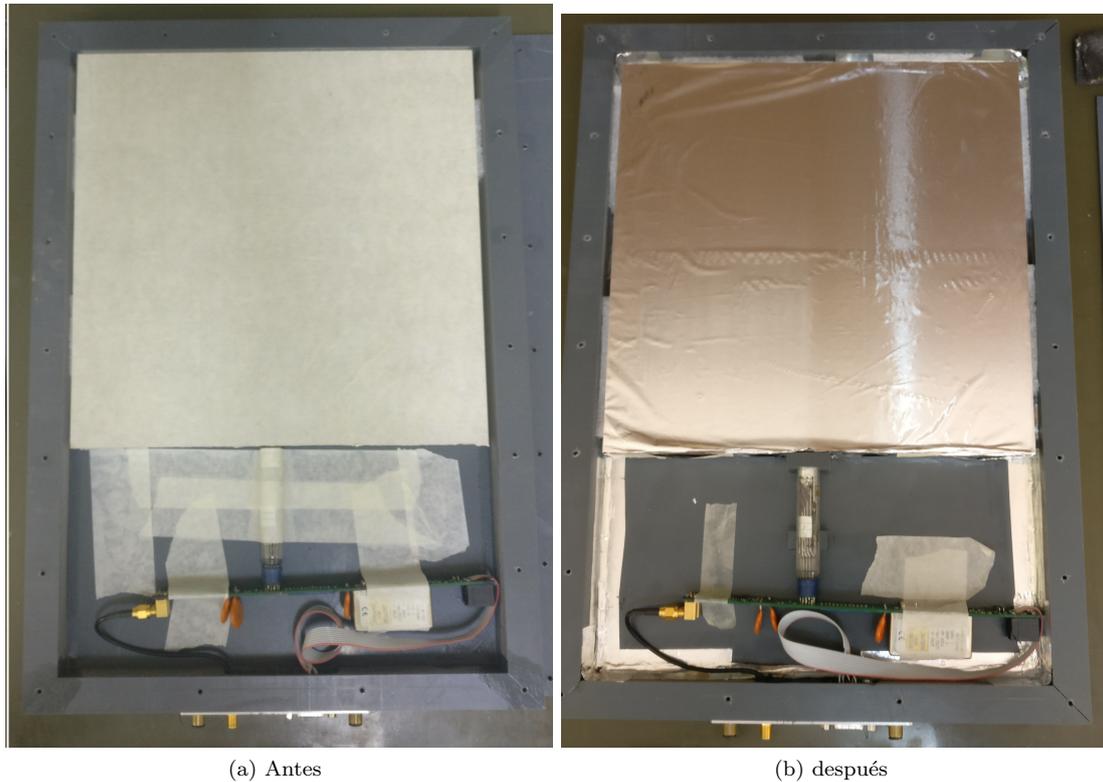


Figura 4: Comparación de como estaba el detector antes de iniciar el trabajo, y como fue modificado finalmente.

2.5. Detección y análisis de la señal

En todos los casos se adquirieron los pulsos del PMT utilizando un sistema de adquisición desarrollado previamente en el laboratorio basado en una tarjeta comercial *Red Pitaya*. La misma cuenta con un conversor analógico digital (ADC) de 14 bits, y una frecuencia de adquisición de 125 MHz, lo cual define una separación entre puntos adquiridos de 8 ns. Históricamente se observó que los pulsos no miden más de 100 ns, entonces, se eligió utilizar 32 bins para cada pulso, es decir, 256 ns de ventana temporal. Todos estos datos son almacenados para un posterior análisis.

Para detectar los pulsos de interés, se define un nivel de trigger *razonable*. La señal se adquiere solo cuando supera este nivel, guardando 8 puntos anteriores y 24 posteriores, 32 en total.

Para elegir este nivel, se observa en el osciloscopio los eventos que corresponden a partículas, pero alejado de la zona de ruido electrónico

Se utilizó un nivel de 36 mV como señal de trigger, con un voltaje de alimentación de 1800 mV para la electrónica, que se traduce en una tensión de 1800 V en el PMT, con la fuente interna del mismo. Con estos valores se observaron una cantidad de eventos aceptables y con poco ruido, para realizar las experiencias.

A medida que se fueron realizando estos cambios, fue necesario tener un programa para analizar los datos guardados. Para esto se generó un código en Python con el cual se automatizó la lectura de los archivos y su análisis.

3. Resultados y discusiones

Lo primero que se realizó fue un control del funcionamiento de los detectores ya existentes en el laboratorio. Con esto se observó que no estaban aislados a la luz, y eran mediciones poco reproducibles a causa de movimientos internos al manipularlos.

Una vez caracterizados como estaban se procedió a mejorarlos mediante un buen cierre hermético para la luz, y alguna mejora al sistema centellador-PMT.

Por ultimo se caracterizó su uniformidad con una fuente radiactiva de $Co - 60$.

En todos los casos, las mediciones realizadas se analizaron utilizando un programa desarrollado *Adhoc* durante el proyecto, bajo la plataforma de Python.

La primera parte del análisis consistió en calcular y remover la línea de base montada sobre la señal. Este cálculo fue posible introducirlo directamente sobre el firmware, por otro miembro del laboratorio, y se realizó automáticamente en cada medición.

3.1. Señales medidas

El análisis de los datos obtenidos se realizó aprovechando los conocimientos previos en Python. Lo primero fue observar efectivamente que existen los pulsos. Para esto se graficó una fracción de la información colectada, y se muestra en la figura 5.

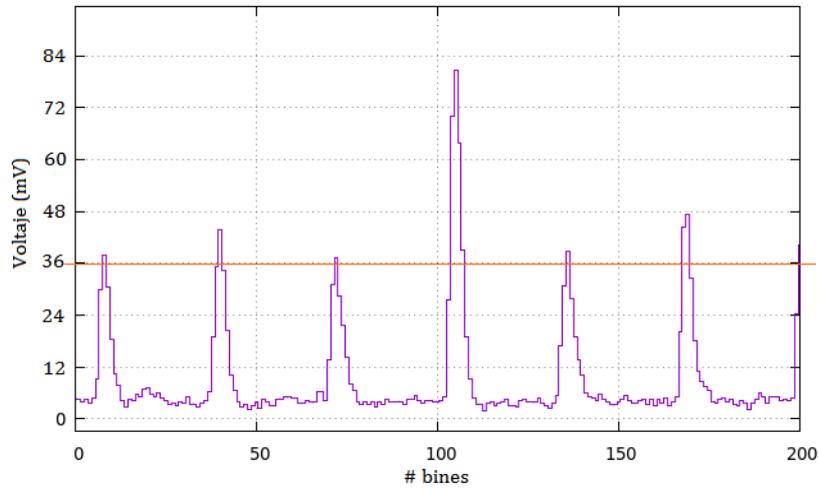


Figura 5: Gráfico de datos adquiridos en función del tiempo. Se pueden observar 6 pulsos bien discriminados sobre el valor, señalado en rojo, de 36 mV del trigger impuesto.

Luego, se estudió el comportamiento de la línea de base a lo largo de la medición, realizando un histograma con los primeros bins de cada pulso. Como se esperaba, se encontró una distribución gaussiana en derredor del valor al cual definimos como línea de base (ver figura 6). Se ajustó con una gaussiana para obtener su media y ancho con el cual corregir las mediciones. Más tarde este procesamiento fue automatizado vía firmware. A pesar de haberlo corregido, este histograma se siguió realizando en todas las mediciones, como una precaución más en el análisis.

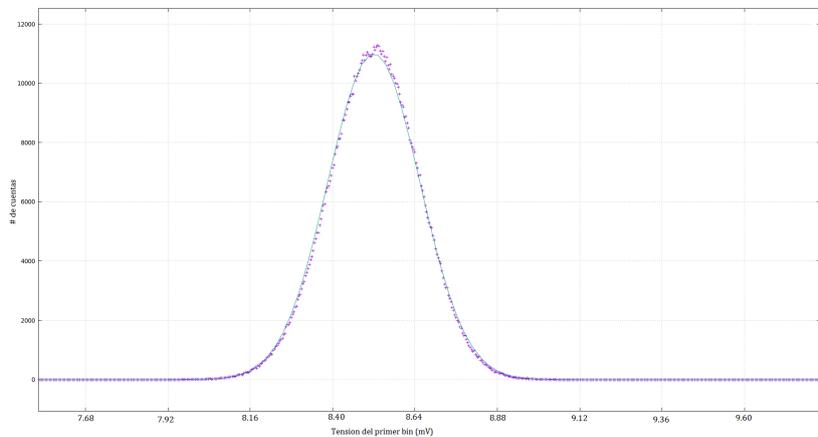


Figura 6: Histograma de los puntos para obtener la línea de base de la medición. Se ajustó con una gaussiana para obtener su valor medio y restarlo como línea de base.

3.2. Sellado de las cajas

Se midió la tasa de conteo del detector completamente cubierto por blackout, y descubierto con las luces del laboratorio prendidas. De esta manera se estudió cuanto afecta la luz ambiente a las cuentas del medidor.

Al medir con el blackout cubriendo completamente al detector, se obtuvieron del orden de unas pocas decenas de cuentas por segundo (aproximadamente 12 cuentas/s). Al retirar la tela, el detector aumentaba hasta saturar incluso en algunas partes (> 5000 cuentas/s). Era evidente el ingreso excesivo de luz.

Con esto en mente, se procedió a sellar completamente la caja (de la manera ya explicada) para poder independizarnos del blackout, y asegurar que no ingresa luz externa.

Para estar completamente seguro se lo iluminó con una linterna por todos los bordes. En los casos donde se detectó un aumento de cuentas, se utilizó la sonda led, para marcar el lugar preciso de fuga y corregirlo. Una vez corregidas todas las fugas, se repitió la experiencia de medición con blackout, obteniendo prácticamente los mismo valores tapado y destapado.

3.3. Mejoras al sistema centellador-PMT

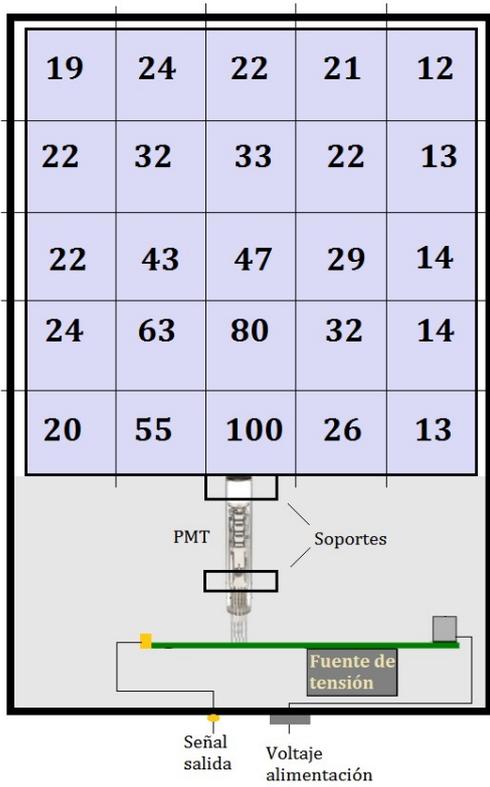
Para aumentar la probabilidad de que un fotón emitido por el centellador llegue a la sección eficaz del PMT, se envolvió al primero en papel aluminio. De esta manera, la luz emitida hacia afuera puede *rebotar* contra el papel y reorientarse hacia el PMT.

Además, se hizo especial hincapié en que el PMT se encuentre en el centro del centellador, para captar la mayor cantidad de fotones en todo el volumen.

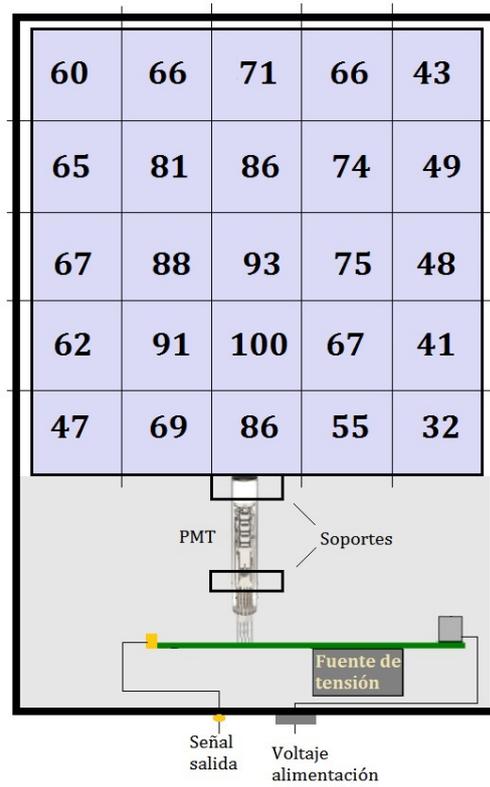
3.4. Caracterización de los detectores

Se realizaron mediciones de homogeneidad antes y después de intervenirlos. Para esto se dibujó una grilla de 5x5, que se ubicó sobre la parte del centellador por fuera de la caja del detector. Con una fuente radiactiva de cobalto-60 del tamaño de una moneda, se fue midiendo en cada locación. Los gammas emitidos por esta fuente corresponden a una energía de 1,3 MeV aproximadamente, y con una tasa de emisión de unos pocos μCi .

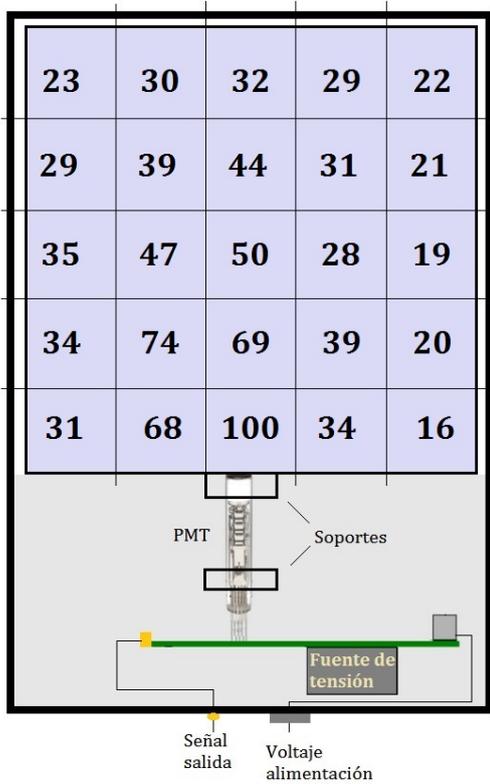
Se ubicó la fuente durante 1 minuto en cada posición de la grilla, y se promedió la cantidad de eventos por segundos obtenidos. De esta manera se conformó un mapa de efectividad sobre cada centellador, como se muestra en la figura 7. Como el interés consistía en comparar las distintas secciones, los valores presentados están referidos al máximo valor de cuentas obtenido, y expresados en porcentajes respecto del mismo.



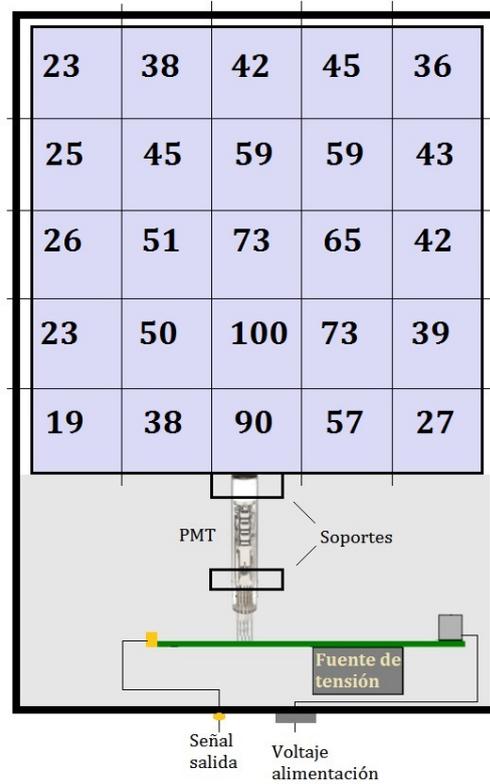
(a) Detector 1



(b) Detector 2



(c) Detector 3



(d) Detector 4

Figura 7: Mapa de los porcentajes de muestreo de acuerdo a cada zona del detector terminado. Se refirieron todas las medidas al valor máximo obtenido.

4. Conclusiones

Del trabajo propuesto se logró armar los detectores previstos, evitando la entrada de luz en todos los casos. Se trabajó mucho en el aspecto artesanal durante el sellado de las cajas, utilizando múltiples herramientas para la alineación y pegado de los distintos componentes.

Fue posible medir la homogeneidad de los mismos utilizando una fuente radiactiva. Se verificó que no son homogéneos, pero en todos los casos se observó que la zona central es la más eficiente y los bordes donde menos se detecta.

Además, se destaca que durante la experiencia se participó de las actividades del grupo, pudiendo conocer las actividades de cada uno y nutrirse de las mismas.

4.1. Trabajo a futuro

Luego del trabajo realizado, solo resta ajustar las ganancias de los cuatro detectores para hacerlas coincidir en cantidad de cuentas, y realizar una calibración de mediciones en coincidencia.

Es de interés para el grupo completar estas caracterizaciones en un tiempo acotado, para instalarse a medir en la mina de Sierra Grande.

Referencias

- [1] https://www.auger.org.ar/argentina/rayos_osmicos.shtml
- [2] STEINMAUER, R, *Recuerdos de V. F. Hess, descubrimiento de los rayos cósmicos, y los primeros años de funcionamiento del laboratorio Hafelekar*, Springer 1985.
- [3] JÁNÓSSY, L., LOVELL, A, *Nature of extensive cosmic ray showers*, Nature, 142, 716, 1938.
- [4] GOLUP, G, *Estudio de las direcciones de arribo de los rayos cósmicos de ultra-alta energía del observatorio Pierre Auger*, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Bariloche, 2012.
- [5] GRIEDER, P, *Extensive Air showers: high Energy Phenomena and Astrophysical Aspects A Tutorial, Reference Manual and Data Book*, tomo 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] *Dark Energy, Dark Matter*. NASA Science: Astrophysics. 2015.
- [7] GRIEDER, P, *Dark Matter*. CERN Physics. 2012.
- [8] BERTONE, G.; HOOPER, D.; SILK, J., *Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints*. Physics Reports 405 (5-6): 279-390, 2005
- [9] R. BERNABEI ET AL, *The DAMA/LIBRA apparatus*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 592 (3): 297-315, 2008.
- [10] DAVIS, JONATHAN H, *The Past and Future of Light Dark Matter Direct Detection*. Int. J. Mod. Phys. A., (2015).
- [11] *Caracterización de un sistema de detectores de centelleo y utilización del mismo en el estudio del flujo de rayos cósmicos secundarios*, David Melon Fuksman - Instituto Balseiro. 2014