

Calibración del experimento de búsqueda de modulación diaria de materia oscura, DM².

Alumno: M. Mantiñan

Directores: X. Bertou, M. Sofo Haro
Laboratorio Avanzado - Instituto Balseiro
(Fecha: 12 de agosto de 2020)

Se realizaron distintas etapas de calibración del experimento DM², un experimento de búsqueda de modulación diaria de materia oscura que se llevará a cabo en una mina de hierro en Sierra Grande. El experimento cuenta con un *skipper-CCD* de cuatro canales. La calibración del mismo consistió en estudiar el ruido sub-electrón y medir la ganancia de cada uno de los canales, obteniendo $G_1 = 595(1)$ adu/e, $G_2 = 515(4)$ adu/e, $G_3 = 463(4)$ adu/e, y $G_4 = 606(2)$ adu/e. Por otro lado se caracterizó el ruido físico producido por partículas que atraviesan el detector en el laboratorio. Se logró distinguir entre distintos tipos de partículas y clasificarlas a partir de sus trazas. Se realizó un histograma de la potencia de frenado de los muones que llegan al detector, lo cual representa otro elemento en el proceso de calibración. Por último se estudió el espectro de energía depositada por todos los eventos registrados y se observó el pico producido por los rayos X del cobre, permitiendo verificar la calibración realizada.

INTRODUCCIÓN

En la década de 1930 Fritz Zwicky observó que el movimiento de las galaxias en el cúmulo Coma no se encontraba en concordancia con la cantidad de materia que se estimaba a partir de su luminosidad. Zwicky conjeturó que debía haber más materia que no emitía radiación, y por lo tanto no era visible con los telescopios. Años más tarde Vera Rubin observó lo mismo para un conjunto mayor de galaxias y logró obtener una curva de velocidad en función de la distancia al centro de la galaxia.

El movimiento Kepleriano a grandes escalas es de la forma $v(r) \sim \sqrt{M(r)/r}$ donde $M(r)$ es la masa encerrada por la órbita. Lo que Rubin observó fue que el giro de las galaxias se comportaba como si la masa de la galaxia aumentara linealmente inclusive lejos del centro. Fue Zwicky quien hizo uso del término materia oscura para describir este exceso de masa. A lo largo del siglo pasado se realizaron varias hipótesis para explicar este movimiento, algunos fueron descartados, como la presencia de agujeros negros u otros objetos poco luminosos, y otras perseveran. Actualmente la hipótesis más aceptada es que la materia oscura está formada por un tipo de partícula que aun no se observó.[1][2]

Otras observaciones astronómicas como el cúmulo de Bala y el fondo de microondas del universo apuntan hacia algunas propiedades de la materia oscura, se sabe que debe existir, debe ser fría. Esto hace referencia a la energía cinética. También debe ser poco interactuante, en especial con la radiación electromagnética.

El experimento Dark Matter Daily Modulation que se realizará en Sierra Grande consiste en detectar la modulación producida por la materia oscura según el Standard Halo Model, el cual consiste en proponer una distribución maxwelliana para la materia oscura.[3]

En este trabajo nos encargaremos de algunos aspectos de la puesta en marcha y calibración del detector que se colocará en la mina de Sierra Grande, para el experimento de Dark Matter Daily Modulation, DM².

Charge Coupled Device (CCD)

El *CCD* es un sensor que consta de un blanco de Silicio y cada pixel es una porción de ese blanco. El detector que se utilizó en este trabajo tiene 1248x724 pixeles. Los pixeles son de $15\mu m \times 15\mu m$, y el espesor del sensor es de $200\mu m$. Cada pixel tiene una diferencia de potencial que hace que cuando un evento genera carga en el blanco, la carga se desplace hacia la superficie del sensor. Los voltajes en los pixeles son controlados a partir de tres líneas verticales V1, V2 y V3, como se muestra en la figura 1. A partir de una secuencia como la que se muestra en la figura 2, la carga se transfiere de una fila a la otra siguiendo las flechas de la figura 1. Al llegar a la fila de lectura donde hay tres líneas horizontales H1, H2 y H3. Estas desplazan la carga de forma análoga a través de la fila hasta la zona de lectura, llamada *Sense Node*.

En resumen, el *CCD* transfiere carga de una fila a la otra y luego en la última fila transfiere de un pixel a otro, hasta el *Sense Node* donde se lee la carga del pixel.

Los *CCD* son buenos para eliminar el ruido de alta frecuencia, ya que estos miden a lo largo de un tiempo de integración variable. La principal desventaja es que las imágenes se leen a través de un único punto y esto implica mayores tiempos de lectura. Los *skipper-CCD* se encargan del ruido de baja frecuencia, el cual es relevante en la electrónica del sistema debido al ruido 1/f. La forma en la que el *skipper-CCD* se encarga del ruido de baja frecuencia es haciendo estadística sobre los datos. Esto se logra midiendo la carga un número arbitrario de veces en el *Sense Node*. En la figura 3 se esquematiza como tomando muchas muestras se puede eliminar el ruido de baja frecuencia. Entonces, los dos parámetros principales en los *skipper-CCD* son el tiempo de integración por pixel (ssamp) y la cantidad de muestras por píxel (nsamp).

Una propiedad de los *skipper-CCD* es su capacidad de medir con ruido sub-electrón, es decir, medir la carga de un solo par electrón-hueco generado. La energía necesaria para producir un par es conocida y para el silicio es 3.73(9) eV [5], es por eso que se utiliza el electrón como unidad de energía. Esto permite calibrar los *skipper-CCD* en función de la energía de 1 e

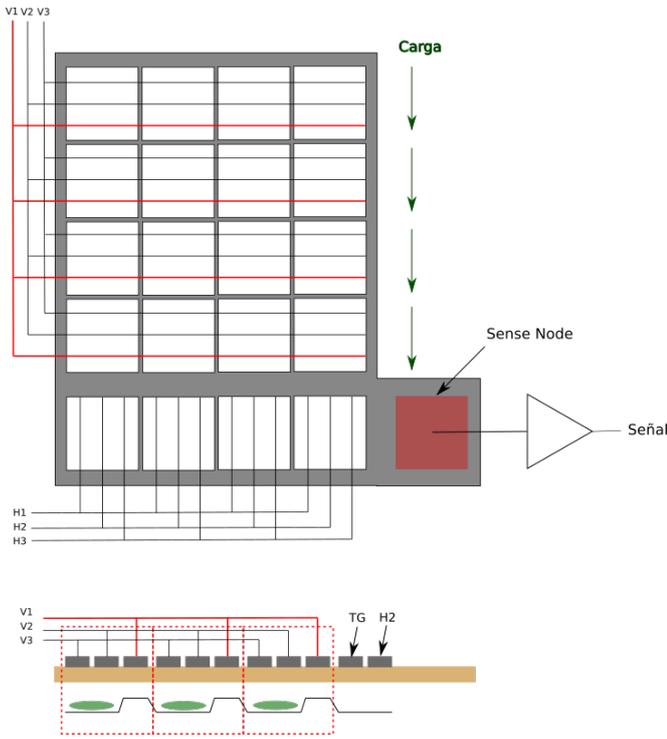


Figura 1: Esquema de conexiones de un *skipper-CCD*. Se muestran las líneas principales como se conectan, la transferencia de carga a lo largo de las líneas y el *Sense Node*. En el esquema se muestra el diagrama de tensiones al encender V1, y como se confina la carga.

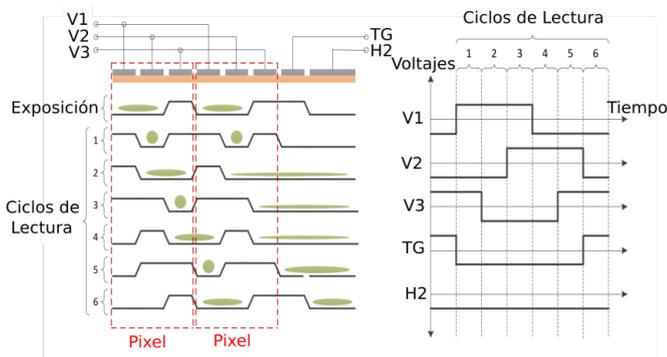


Figura 2: Esquema del desplazamiento de cargas a través del *CCD* por medio de la secuencia de voltajes de V1, V2, V3, TG y H2, imagen tomada de [4]

Los *CCD* son detectores formados por conjuntos de capacitores acoplados que se suelen usar en cámaras digitales. Aunque también se pueden usar para medir la deposición de carga en su blanco por partículas que pueden tener distintos orígenes. Pueden ser partículas provenientes del espacio pero también pueden ser partículas generadas en el laboratorio. Un ejemplo de esto último son los rayos X del cobre de las instalaciones o del experimento. Eventos producidos por partículas, que no son materia oscura, se denominan ruido físico.

En este trabajo nos encargaremos del armado de algunos módulos auxiliares del detector. Estos son, una fuente switch que servirá como calentador y una UPS que servirá para chequear la tensión y el apagado seguro del equipo. Por otro lado vamos a estudiar el ruido de un

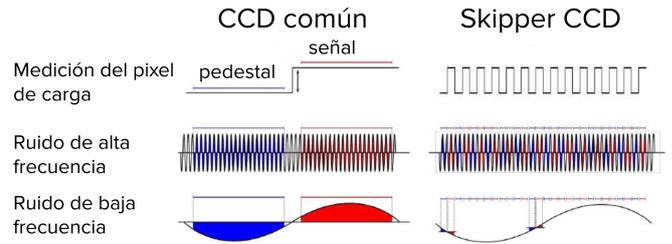


Figura 3: Muestreo en un *skipper-CCD*. Esquema del método de muestreo que permite eliminar el ruido de baja frecuencia, esta imagen fue tomada de [4]

skipper-CCD al modificar el número de muestras. Luego analizaremos el ruido sub-electrón y la posición del pico de 1 e el cual usaremos para calibrar el detector. En cuanto al ruido físico, se analizarán las trazas producidas por partículas que atraviesan el detector. Vamos a clasificar los eventos para analizar las trazas de los muones encontrados. Y vamos a hacer un espectro de energía para observar el pico debido a los rayos X del cobre, k_{α} .

MÉTODO EXPERIMENTAL

El detector funciona a temperaturas del orden de los 120 K, para minimizar la corriente oscura y en vacío de mecánica para evitar que se condense vapor de agua sobre su superficie. El armado del sistema de vacío fue realizado por gente del departamento de Bajas Temperaturas del Centro Atómico Bariloche. En la figura 4 se muestra un esquema simplificado del experimento.

Para realizar el experimento DM^2 en Sierra Grande, es necesario tener un detector al que se pueda acceder remotamente y que pueda trabajar de forma autónoma. Esto implica, entre otras cosas, que el sistema pueda verificar la tensión de línea, y tomar una decisión si esta no se encuentra dentro de los parámetros preestablecidos. El experimento se controla a través de una Raspberry Pi 4, la cual a su vez puede ser comandada por SSH.

Algunas soluciones a estas cuestiones ya habían sido implementadas con anterioridad, sin embargo otras aun se encontraban abiertas. Lo primero que se hizo en este trabajo fue el armado del sistema de verificación de tensión de línea.

Se utilizó una UPS Smart-UPS RT 1000 XL, la cual se conectaba a la tensión de línea y a la que se conectan todos los dispositivos del experimento. La UPS a su vez, puede ser controlada de forma serial por la misma Raspberry, lo cual permite acceder a la tensión de línea en el momento de realizar la medición. La UPS tiene una autonomía de más de 3h, esto da tiempo a la Raspberry a apagar todo de forma controlada. En este trabajo se realizó un programa de control que permitía acceder a los parámetros la UPS en tiempo real. Estos parámetros son, un bit de falla de tensión de línea, que indica si hubo un corte de luz, bit de batería baja que indica el estado de la batería de la UPS y tensión de línea, entre otros.

La cámara no puede ser abierta a temperatura de nitrógeno porque la condensación de agua sobre el detector

podría dañarlo. Es por esto que se necesita un sistema de calefacción que permita llevar el sistema a temperatura ambiente en caso de que se necesite acceder manualmente al detector. El experimento cuenta con un sistema de poleas que permite levantar la cámara de vacío y separar el dedo frío del nitrógeno. Además de separar el dedo frío, es necesario un calentador que permita levantar la temperatura más rápido.

El sistema de calefacción se logró montando una resistencia a la placa de aluminio sobre la que está montado el detector. Y por medio de una fuente switching se hace circular una corriente por la resistencia. Esta fuente se controla con un arduino que interrumpe o permite el paso de corriente a través de un relé.

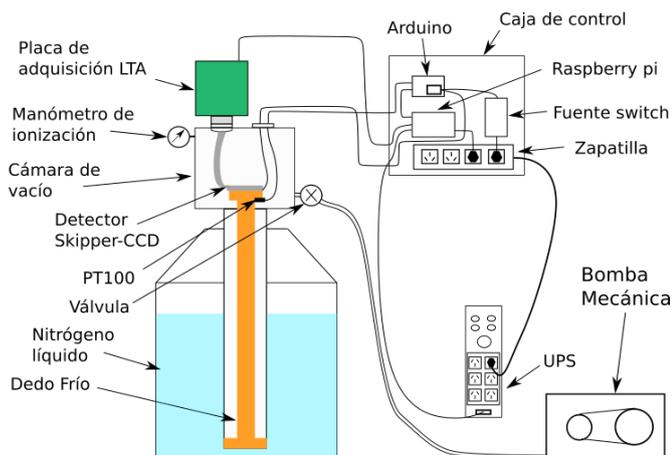


Figura 4: Esquema simplificado del experimento. El detector se encuentra en una cámara de vacío, con una bomba mecánica, y en contacto térmico con un tanque de nitrógeno líquido por medio de un dedo frío. La adquisición se realiza a través de una placa LTA. La Raspberry Pi controla el experimento, en cada medición verifica la temperatura del detector y la tensión de línea. Todos los equipos se conectan a una zapatilla, la cual a su vez se conecta a la UPS.

El detector

El detector está dividido en cuatro secciones o canales, llamados hds. Cada canal es una porción del detector. Cada canal tiene un *Sense Node* propio, con su amplificador. Esto hace que la ganancia sea distinta para cada canal.

Las imágenes skipper pueden pensarse como muchas imágenes tomadas en el detector. La forma en la que el programa de adquisición guarda las imágenes es como un archivo que contiene todas las imágenes concatenadas. Para su utilización se comienza por promediar todas las muestras en una sola. La adquisición se hace por medio de una placa de adquisición LTA (Low Threshold Acquisition), que se encarga de enviar todas las tensiones al detector y leer salida de cada canal.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las imágenes tomadas por el detector son arreglos de píxeles, donde su valor representa la carga depositada en el detector por partículas que interactúan con el blanco de silicio. En la figura 5 se muestra un ejemplo de una imagen skipper ya promediada. En la misma se pueden ver eventos en amarillo, algunos de estos eventos son trazas que dejan partículas al interactuar con el detector, más adelante estudiaremos estas trazas.

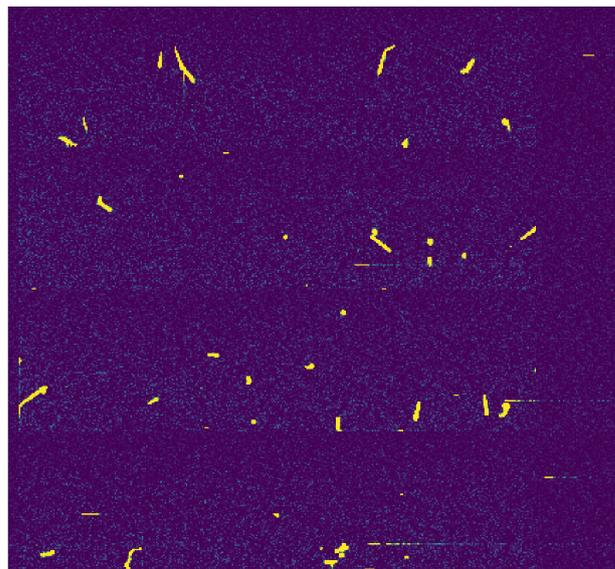


Figura 5: Imagen tomada del detector, luego de promediar nsamp lecturas. Los cuatro canales se colocaron uno abajo del otro para formar una sola imagen. En la imagen se observan algunos eventos que pueden corresponder a trazas de partículas en amarillo.

Con las imágenes se puede tomar el valor de cada píxel y hacer un histograma. Estos espectros de carga depositada tienen un ruido intrínseco a la electrónica del sistema. En la figura 6 se muestran algunos histogramas de carga, para un canal del detector. Al aumentar el número de muestras, el histograma de cargas se hace más fino.

Si los píxeles siguen una distribución gaussiana, la desviación estándar decae con $1/\sqrt{N}$, siendo N el número de muestras [6]. Esto es lo que se observa en la figura 7, donde se realizó un gráfico de la desviación estándar σ en función del número de muestras. En este caso σ se presenta en unidades de e, la conversión se hizo utilizando la ganancia del canal que se presenta en la sección siguiente. En este gráfico se realizó un ajuste $\frac{A}{\sqrt{N}} + B$, obteniendo $A = 5.9593(14)e$, $B = 0.05714(7)e$ con una bondad de $r^2 = 0.988$. Para entender este resultado, B está relacionado con errores irreducibles que no son gaussianos y no van a desaparecer al tomar más datos. A está relacionado con el ruido de una sola muestra. Es importante recalcar que B establece un límite para cuanto se puede reducir el ruido, y aun si no existiera este límite, para disminuir el ruido estadístico en $\frac{1}{\sqrt{N}}$ es necesario tomar N muestras, lo cual implica tomar imágenes más grandes.

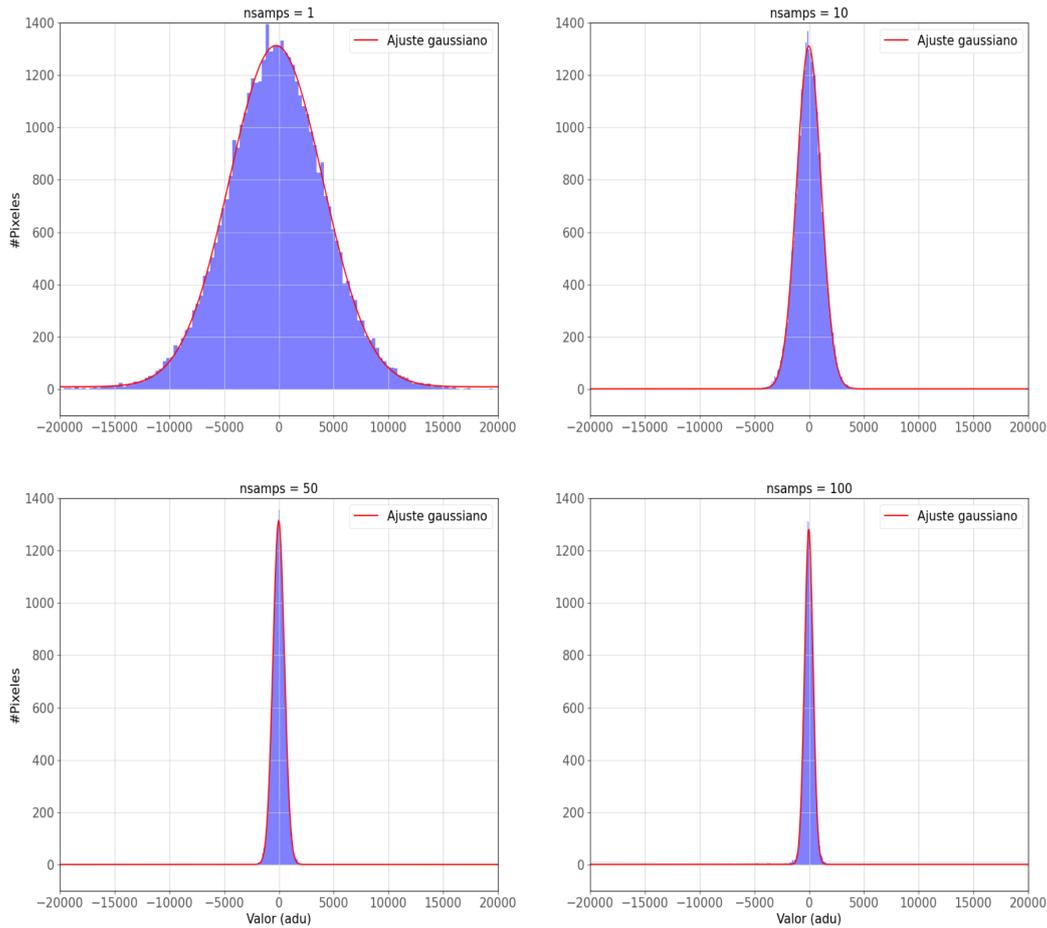


Figura 6: Histogramas realizados de carga por píxel en adu. Se muestran cuatro histogramas distintos cambiando el número de muestras (nsamps). En todos los casos se obtiene una campana centrada en 0 adu y el ancho disminuye al aumentar el número de muestras. Para todos se realizó un ajuste por una función de Gauss.

Calibración y ruido sub-electrón

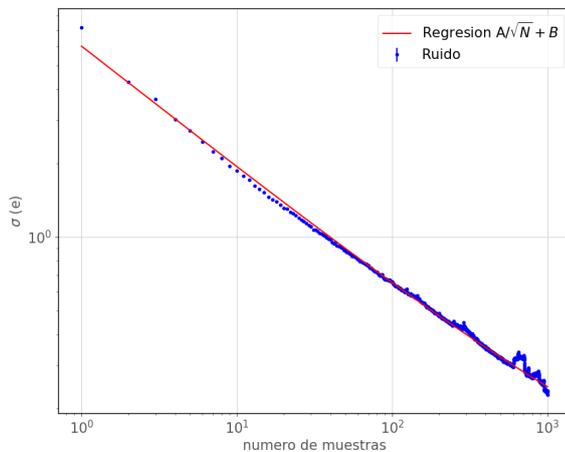


Figura 7: Ruido en función del número de muestras. Se tomo el σ obtenido de los ajustes gaussianos como los que se muestran en la figura 6 y se graficaron en función del número de muestras. El ruido se convirtió a electrones utilizando las ganancias obtenidas.

Como ya se discutió, una de las grandes ventajas de los *skipper-CCD* es su bajo ruido de lectura. El ruido de lectura es tan bajo que se puede medir el ruido sub-electrón y se hace uso de esto para la calibración de los mismos. Si aumentamos mucho el número de muestras, los histogramas de carga pasan a tomar una forma como la que se muestra en la figura 8, donde se observan sucesivas gaussianas centradas en 0, 1 e, 2 e, etc. En este caso se utilizó nsamps=1000 muestras por píxel.

La ganancia de un canal está dada por la posición del pico de 1e. Para hallar las ganancias se realizaron ajustes de una suma de dos funciones de Gauss, una para el pico de 0 e y otra para el pico de 1 e. En la figura 8 se muestra un ejemplo de estos ajustes. Esta es la forma en la que se suelen calibrar los *skipper-CCD*. Se utiliza la energía de un par electrón-hueco y a partir del ajuste se obtiene la ganancia del canal. Las ganancias de los cuatro canales pueden diferir, en el caso del skipper utilizado los amplificadores de cada canal son distintos, por lo que es de esperarse una diferencia. Las ganancias obtenidas a par-

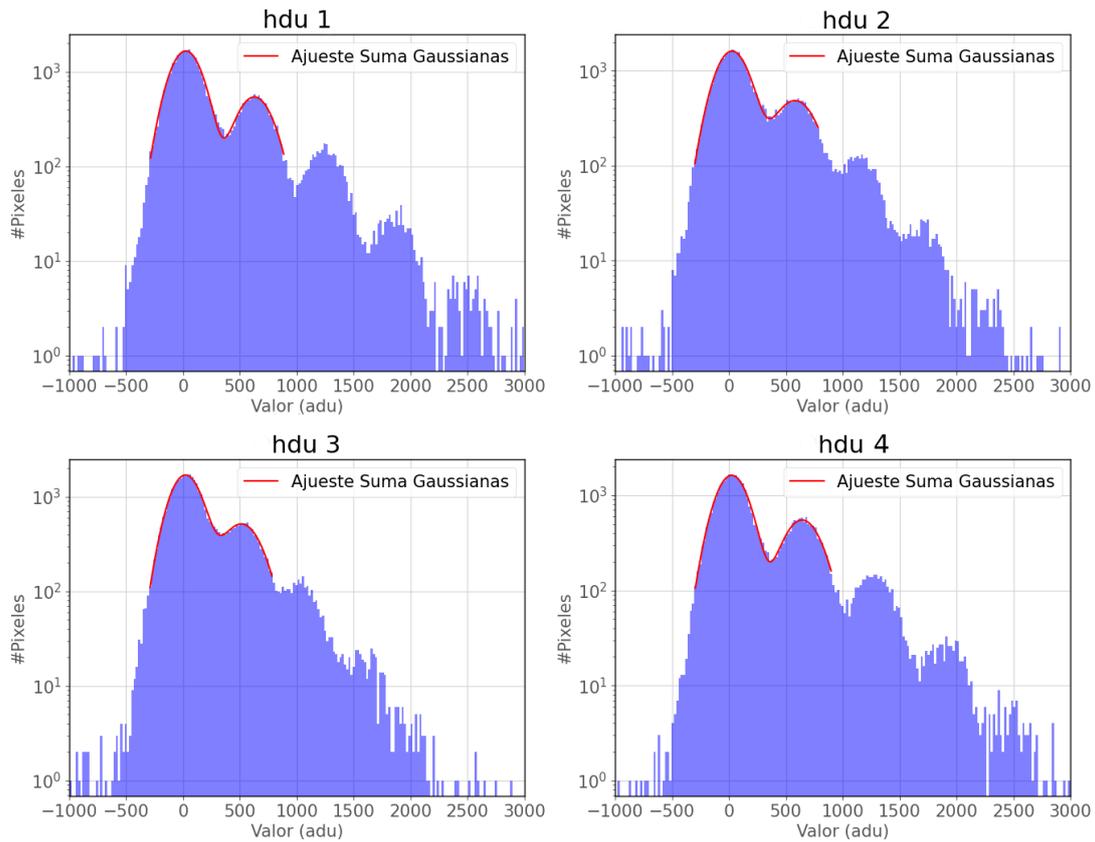


Figura 8: Histogramas con 1000 muestras por pixel, se observa que en todos los canales la campana se divide formando picos correspondientes a la energía de 0, 1 e, 2 e, 3 e, etc. Se realizó un ajuste de una suma de dos funciones de Gauss para obtener los picos en 0 y 1 e.

tir de las regresiones y promediando sobre las imágenes del primer día de medición fueron,

$$G_1 = 595(1) \text{ adu/e,}$$

$$G_2 = 515(4) \text{ adu/e,}$$

$$G_3 = 463(4) \text{ adu/e,}$$

$$G_4 = 606(2) \text{ adu/e,}$$

donde G_i es la ganancia del i -ésimo canal. A su vez se obtuvieron los ruidos de cada canal,

$$\sigma_1 = 0.195(3) \text{ e,}$$

$$\sigma_2 = 0.246(3) \text{ e,}$$

$$\sigma_3 = 0.261(3) \text{ e,}$$

$$\sigma_4 = 0.208(2) \text{ e,}$$

donde una vez más el subíndice representa el canal. Se logró reducir el ruido hasta un quinto de electrón.

Análisis del ruido físico

Al principio de esta sección habíamos señalado que los eventos que se observan en la figura 5 son trazas de partículas. En esta sección vamos a estudiar esos eventos. Los

eventos que se suelen encontrar en los detectores son de cuatro tipos. Los muones dejan trazas rectas y su potencia de frenado es casi constante a lo largo del paso por el detector. Los electrones dejan trazas curvas que siguen trayectorias estocásticas. Las partículas α dejan manchas circulares. Por último están los eventos difusos, que son simplemente puntos de algunos pocos píxeles con carga, estos pueden ser producidos por rayos X, un retroceso nuclear o incluso por fluctuaciones estadísticas. Para poder identificar los tipos de partículas se realizó un algoritmo de clasificación, en el que se utilizaron las características comentadas para clasificar y seleccionar eventos correspondientes a cada tipo de partícula. El algoritmo distingue entre tres grupos: muones, electrones y un tercer grupo que engloba el resto de los eventos. En la figura 9 se muestran tres de los cuatro posibles eventos, no se muestran eventos de partículas α porque no se encontraron eventos de ese estilo a lo largo de este trabajo. Los eventos que se presentan fueron hallados con el algoritmo de clasificación.

Muones

Como se mencionó anteriormente los muones tienen una potencia de frenado aproximadamente constante a lo largo del detector. Esto se debe a que la mayor par-

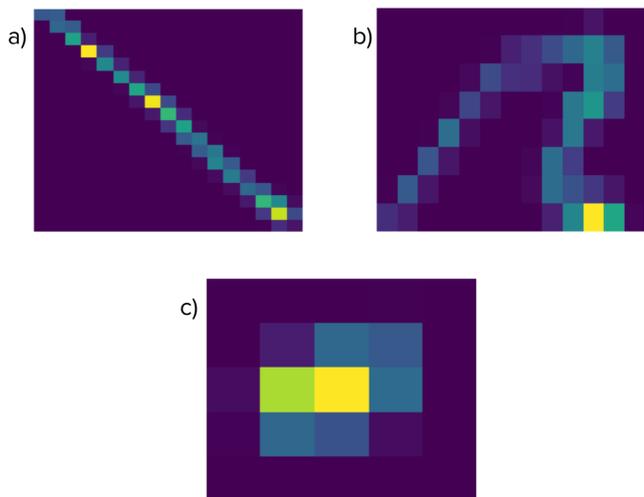


Figura 9: Eventos característicos de los que se encontraron en el detector. a) Muón, la traza es recta, la carga que deposita a lo largo de su trayectoria es aproximadamente constante. b) Electrón, traza curva, al final de su recorrido deposita más carga. c) Evento difuso, puede tratarse de un rayo X, retroceso nuclear u otros, son eventos pequeños y puntuales de unos pocos píxeles.

te de los muones que atraviesan el detector se forman a partir del decaimiento de piones en la atmósfera y con una energía fija. Entonces la energía con la que llegan al detector es la misma y es muy alta para ser frenados por el blanco del detector, por lo que lo atraviesan sin modificar su trayectoria. A su vez la potencia de frenado varía muy poco en la zona de energía en la que se encuentran los muones.

Si bien los muones se generan por la misma reacción tienen la misma energía, al llegar a la superficie de la tierra la energía de los mismos depende de donde se crearon, esto produce una distribución de energía conocida, y como a cada energía la partícula tiene una potencia de frenado, la potencia de frenado de los muones también sigue una distribución conocida. La distribución de potencia de frenado de los muones es una distribución de Landau. La distribución de Landau se puede aproximar por una función Moyal.

En la figura 10 se muestra un histograma de potencia de frenado de los muones, obtenidos a partir de las imágenes de 3 días de medición. En total se encontraron 223 muones por medio del algoritmo de selección, y sobre estos se calculó la potencia de frenado como la carga total depositada en su trayectoria dividido por el camino recorrido. Sobre el histograma se realizó un ajuste de por una función Moyal, obteniendo un máximo en $250(4) \text{ eV}/\mu\text{m}$, el cual es consistente con el valor teórico para una partícula de mínima ionización.[2]

Rayos X

Otra forma de calibrar un *CCD* es a través de rayos X de elementos conocidos. Este método es menos relevante para un *skipper-CCD*, pero puede ser útil para verificar una calibración. En este caso se espera ver el pico de los

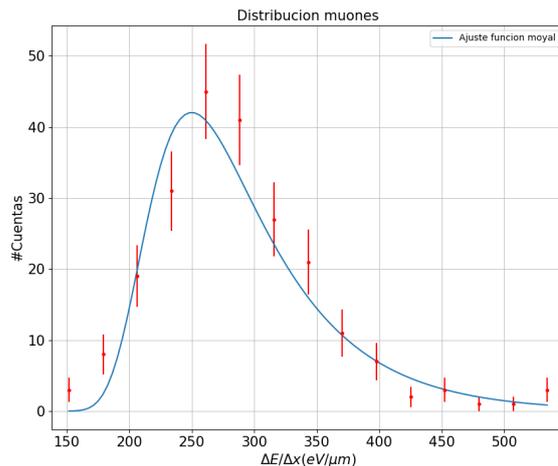


Figura 10: Histograma del número de muones con potencia de frenado $\Delta E/\Delta x$, sobre el cual se realizó un ajuste por una función moyal. La bondad del ajuste fue de $\chi^2/p = 1,6$, donde p es el número de grados de libertad, y $r^2 = 0,925$

k_α del cobre debido a la estructura del experimento y en particular a la caja de cobre que recubre el detector. En la figura 11 se muestra un histograma de la energía de los eventos encontrados en las imágenes. El histograma presenta un pico alrededor de 8 keV, el cual es consistente con los k_α del cobre.

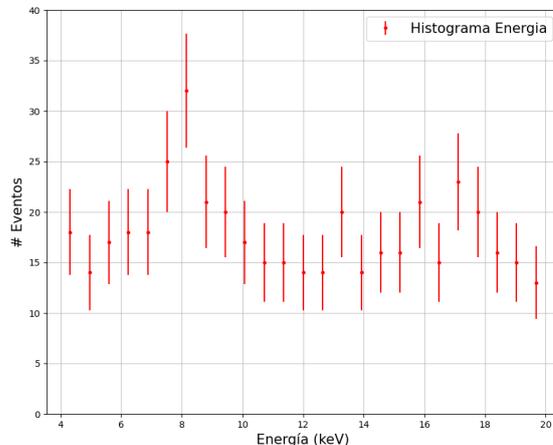


Figura 11: Histograma de energías de los eventos, se observa un pico alrededor de 8 keV, esto está en concordancia con los k_α del cobre.

CONCLUSIONES

Se implementaron los módulos adicionales para calefacción del detector y el módulo de control de la UPS, todos los módulos se colocaron en una caja de control que permite transportar el detector a la mina en Sierra Grande.

Se estudió el ruido en función del número de muestras

para un *skipper-CCD*, se obtuvo una ley de decaimiento $1/\sqrt{N}$, como es de esperarse para el ruido gaussiano.

Se logró calibrar el *skipper-CCD*, obteniendo la ganancia en cada uno de sus canales, estas fueron de $G_1 = 595(1)$ adu/e, $G_2 = 515(4)$ adu/e, $G_3 = 463(4)$ adu/e y $G_4 = 606(2)$ adu/e. Esto representa una resolución en energía de menos del 0.9 % en cada canal.

Además se logró caracterizar el ruido sub-electrón, obteniendo $\sigma_1 = 0.195(3)$ e, $\sigma_2 = 0.246(3)$ e, $\sigma_3 = 0.261(3)$ e, $\sigma_4 = 0.208(2)$ e, para cada canal.

Por último, se hizo un análisis detallado del ruido físico que producían partículas al interactuar con el detector. Se realizó un programa de clasificación de eventos y con este se estudiaron las trazas de dichas partículas. Se distinguieron las trazas de muones y electrones, y se obtuvieron eventos difusos. Para los muones se realizó un histograma en la potencia de frenado, el cual luego se ajustó con una función moyal para obtener el máximo en $250(4)$ eV/ μm , lo cual es consistente con una partícula de mínima ionización. Para terminar, se hizo un espectro

de energía donde se observó un pico consistente con los k_α del cobre. Este último permite verificar la calibración realizada a partir del pico de 1 e

-
- [1] Avalos, Nicolas: *El experimento Dark Matter Daily Modulation*. 2019.
 - [2] M. Tanabashi, et al.: *Review of Particle Physics*. 2018.
 - [3] S. K. Lee, M. Lisanti, S Mishra Sharma B. R. Safdi: *Modulation Effects in Dark Matter-Electron Scattering Experiments*. arxiv:1508.07361v1, 2020.
 - [4] Sofo Haro, M.: *Sensores multipixel ccd de ultra bajo ruido de lectura para detección de partículas*. 2017.
 - [5] B.G. Lowe, R.A. Sareen: *A measurement of the electron-hole pair creation energy and the Fano factor in silicon for 5.9 keV X-rays and their temperature dependance in range 80-270 K*. Nuc. and Meth. A, 2007.
 - [6] Baird, D. C.: *Experimentación*, capítulo 1.2. Royal Military College, Kingston, Ontario., 1ª edición, 1991.