

Calibración y caracterización de un CCD, para medición de partículas y materia oscura

Pasian Franco

Comisión Nacional de Energía Atómica, (8400) Bariloche,
Argentina. Experimental IV, Licenciatura en Física,
Instituto Balseiro, CNEA-UNCuyo.

Lugar de Trabajo: Departamento de Física de Neutrones
y Laboratorio de Detección de Partículas y Radiación.

Tutores: Dr. Xavier Bertou,

Dr. Mariano Berisso, Ing. Miguel Sofo Haro.

Fecha: 28 de mayo, 2015

En este trabajo se puso en marcha un CCD, desarrollándose algoritmos competentes, en el entorno de MATLAB, para el procesamiento de imágenes tomadas el detector. Se realizó un análisis del ruido presentado en las mismas, junto con los procesamientos para su eliminación. Se desarrolló luego un algoritmo capaz de realizar el procesamiento de los eventos con éxito. Se presentaron diversas formas de filtrado de ruido en imágenes mediante la *transformada discreta de Fourier*. Sin embargo, no se han obtenido resultados satisfactorios con este último método.

Con el procesamiento de las imágenes se obtuvo un histograma para las fuentes de ^{55}Fe y ^{241}Am , y con ello se realizó una calibración de cuentas ADC de los eventos en el CCD en función de la energía de las partículas incidentes.

Por otro lado, se logró visualizar el espectro del ^{57}Co , pudiéndose interpretar la aparición de un nuevo pico en el espectrograma, debido al efecto fotoeléctrico de los fotones provenientes del codo Compton en el Si.

Por último, se pudo realizar un análisis satisfactorio para la construcción de una nueva cámara de contención para el CCD. Las simulaciones se realizaron en lenguaje C, y revelaron que la construcción de una cámara de vacío capaz de contener al CCD en la temperatura de 110 K es posible dentro de las dimensiones empleadas para su desarrollo.

I. INTRODUCCIÓN

A. Dispositivo CCD

Un **dispositivo de carga acoplada** (CCD) consiste en un circuito integrado a base de silicio (Si) constituido por un arreglo bidimensional de capacitores MOS [1] (metal-óxido-semiconductor) acoplados. Al incidir fotones sobre el Si estos son capaces de promover electrones de la capa de valencia a la capa de conducción, y generar de esta manera pares electrón-hueco en el material, debido al efecto fotoeléctrico. La función primaria de un CCD es la de coleccionar las cargas fotogeneradas en "pozos de potencial" (o pixeles) al exponer al CCD a una determinada fuente de radiación. Esto permite realizar detecciones de partículas con una muy buena resolución espacial, $225 \mu\text{m}^2$ en el caso del CCD utilizado en este trabajo, y un nivel de ruido suficientemente bajo como para considerar a esta clase de detectores propicios para la detección de interacciones con energía depositada menor a 1 keV, permitiendo por ejemplo, utilizarlos en la búsqueda de materia oscura [6].

1. Funcionamiento del CCD

Cada pixel es generado mediante la implementación de tres fases de tensión aplicadas sobre una estructura de compuertas en Si policristalino. Entre el sustrato de Si tipo n y las compuertas se encuentra una capa aislante de SiO_2 y una capa de Si tipo p, como se muestra en la figura 1. Al aplicar una diferencia de potencial en

los extremos del capacitor, esta combinación de metal-óxido-semiconductor genera un pozo de potencial capaz de atrapar paquetes de carga en el canal de Si tipo p; siendo los paquetes de carga en este caso los huecos (figura 2).

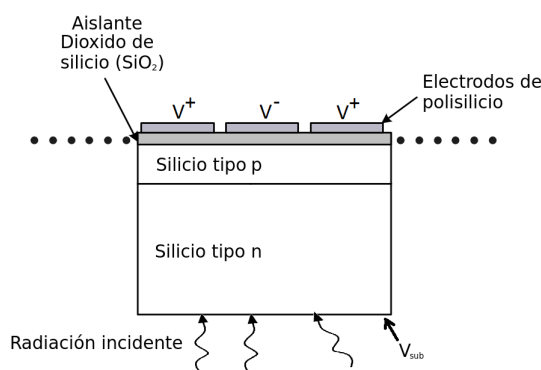


Figura 1. Estructura de un pixel del CCD. En el volumen fotosensible de Si tipo n es donde se produce el efecto fotoeléctrico, debido a la radiación incidente. Los fotoelectrones son almacenados en el Si tipo p. V_{sub} es la tensión que se aplica sobre el pixel para lograr el almacenamiento de las cargas. El tamaño de estos pixeles es de $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m} \times 200 - 300 \mu\text{m}$, en el caso del CCD utilizado en este trabajo.

Cada pixel se compone por un capacitor MOS con tres fases de tensión, con la correcta configuración de tensión de las compuertas de los capacitores es posible confinar paquetes de carga en cada pixel. En el momento en que la radiación proveniente de una fuente

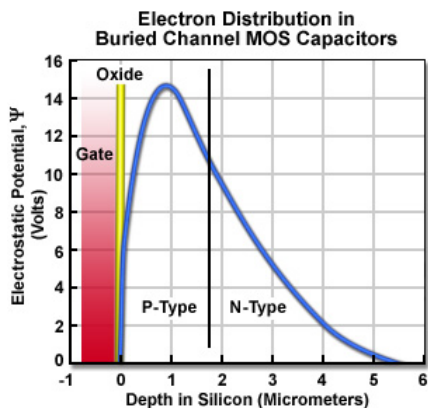


Figura 2. Voltaje en función de la posición en un pixel del CCD. Puede notarse como se alcanza un máximo en la zona del Si tipo p, y decrece a cero en el óxido. Esto hace que los huecos se vean atrapados en el Si tipo p.

incide en el CCD, las dos fases externas del pixel se encuentran a un voltaje mayor respecto de la tercera de ellas. Esto genera un pozo de potencial que atrae a los huecos fotogenerados y los confina. Cada píxel además está separado de sus vecinos verticales mediante un canal llamado canal de contención (stop channel), constituidos esencialmente por iones de boro para impedir que las cargas sean desplazadas verticalmente.

Una vez recolectada la carga, se emplea el sistema de lectura del CCD. En la figura 3 se observa un esquema de un CCD de 3x3 píxeles. Manipulando las tensiones de las fases de cada capacitor es posible transferir las cargas colectadas de un píxel a otro en sentido horizontal, como se muestra en la figura. Este procedimiento se lleva a cabo por igual en todos los píxeles al mismo tiempo. Las cargas contenidas en los píxeles del extremo izquierdo del CCD son transferidas al registro horizontal. Una vez allí éstas son desplazadas de la misma manera hacia un amplificador, el cual amplifica la señal y la envía a una electrónica de lectura. Este proceso se repite hasta leer las intensidades de las cargas colectadas en todos los píxeles del arreglo.

2. Características generales de un CCD

En un CCD se deben tener en cuenta algunas de sus características más importantes para la generación de imágenes. Entre ellas, la *generación de carga*, que es, la habilidad de un CCD de interceptar un fotón incidente y generar un paquete de carga en la banda de conducción. Esto se define mediante la *eficiencia cuántica (QE)*, que es la fracción de fotones incidentes que generan carga. En un CCD de silicio, en el rango de 5 keV-1000 keV de energía de los fotones incidentes, la QE decae rápidamente con la energía del fotón. Por otra parte, la energía necesaria para promover un electrón en el Si es de 3,65 eV a temperatura ambiente [2].

Otra característica importante que posee un CCD, es el *almacenamiento de carga*, que indica qué tan bien se reproduce la imagen con los electrones colectados.

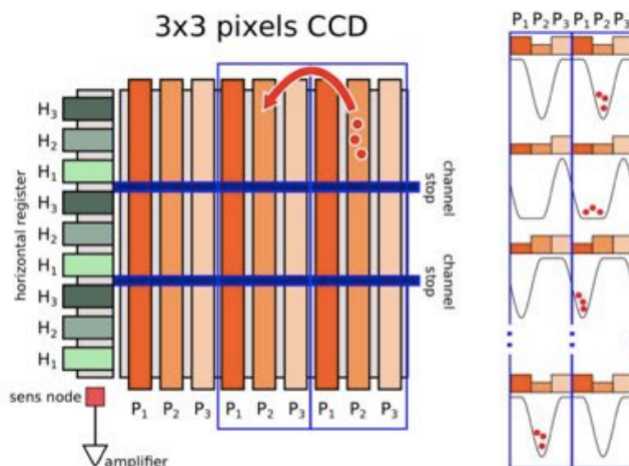


Figura 3. Esquema de un CCD de 3 x 3 píxeles. A la derecha se muestra cómo se genera la transferencia de carga mediante la manipulación de los potenciales de las compuertas de un píxel. Con esto, las cargas son transferidas hasta el registro horizontal, para luego, de la misma forma ser llevadas hasta el amplificador donde son leídas.

Para indicar esto, es importante tener en cuenta el número de píxeles que contiene el CCD, la capacidad de carga que posee cada píxel, y la eficiencia con la que se colectan los electrones ya generados. Al promover un electrón en la superficie del CCD, los huecos deben viajar casi todo el espesor del material hasta llegar al pozo de potencial; esto genera difusión de carga eléctrica en su recorrido, lo que hace que el Si no pueda tener cualquier espesor; en general estos están en el orden de decenas de micrones. Por otro lado las capacidades típicas son de 10^5 - 10^6 electrones por píxel. Esta capacidad está limitada por el área de cada píxel, la cual no puede tener valores arbitrarios, dado que se pierde tanto en resolución, como en la eficiencia de *transferencia de carga* de un píxel a otro. Esta última, es otra de las características importantes de un CCD, la cual tiene en cuenta la velocidad de transferencia, y la eficiencia de transferencia que es dependiente de la primera. En general, los valores de eficiencia de transferencia son mayor a 99,9999

Por último, un aspecto importante de un CCD es la *medición de la carga* colectada en cada píxel. Esto se logra mediante la disposición de un pequeño capacitor conectado a un amplificador MOSFET a la salida. Este amplificador genera una tensión proporcional a la carga de cada píxel, que luego es enviada a un ADC. Se han logrado tensiones de hasta $25 \mu\text{V}$ por electrón. Sin embargo, las sensibilidades típicas de los CCD utilizados van de $2\text{-}4 \mu\text{V}$ por electrón.

Como todo dispositivo fotosensible el CCD posee además ruido térmico, la denominada *corriente oscura* o *dark current* es producto de este tipo de ruido. Esta consiste en la generación espontánea de electrones-huecos debida a la agitación térmica en el material. Para reducir el nivel de ruido el detector es llevado a temperaturas suficientemente bajas. Sin embargo, exis-

te un límite inferior para la temperatura, puesto que a temperaturas cercanas a 77 K, los átomos dopantes del semiconductor se recombinan dejando de existir en estado ionizado como uno desea para su correcto funcionamiento. Por otro lado, las temperaturas bajas afectan a la transferencia de carga de un píxel a otro [2].

B. Efecto fotoeléctrico y efecto Compton

Dado que el funcionamiento del CCD no sería posible sin el efecto fotoeléctrico, cabe recordar algunas nociones importantes del mismo. El efecto fotoeléctrico es un tipo de interacción entre un fotón γ y un electrón ligado. Si el fotón tiene una energía mayor que la energía de ligadura, es decir $h\nu > E_{lig}$, este será completamente absorbido. El electrón, por su parte, será emitido con una energía correspondiente a $E_e = h\nu - E_{lig}$. Teniendo en cuenta que las energías de ligadura son del orden de los electronvolts (eV) se cumple que $h\nu \gg E_{lig}$, por lo que la energía de ligadura puede aproximarse según $E_{e-} \simeq h\nu$.

Por otro lado, existe otro efecto, llamado efecto Compton. El efecto Compton es una clase de dispersión en la cual un fotón γ colisiona con un electrón y es dispersado un cierto ángulo θ . Parte de la energía del fotón incidente se transforma en energía cinética del electrón, mientras que el fotón dispersado se lleva la energía restante. Planteando la conservación de impulso y energía se puede llegar a [3]:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos(\theta))} \quad (1)$$

donde $h\nu'$ es la energía del fotón dispersado y $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$ es el cociente entre la energía del fotón incidente y la energía en reposo del electrón. En base a esto se puede llegar a que la energía máxima que puede ser transferida al electrón va a estar dada por [4]:

$$E_{e-(max)} = \frac{2h\nu\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (2)$$

Ocurre que en el CCD, el gamma residual de efecto Compton puede ser nuevamente absorbido en el material, generando de esta manera un nuevo pico en el espectrograma. Suponiendo que estará bastante bien localizado, y que estos gamma residuales son los provenientes en su mayoría del codo Compton, se espera un pico ubicado en el valor de energía:

$$E_{nuevo\ pico} = E_{fotoeléctrico} - E_{e-(max)} = h\nu - \frac{2h\nu\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (3)$$

$$E_{nuevo\ pico} = h\nu \left(1 - \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha}\right) = \frac{h\nu}{1 + 2\alpha} \quad (4)$$

Con esto en mente, se requiere trabajar con elementos que emitan pocos gammas, con energías relativamente altas para detectar el pico del gamma residual, y suficientemente bajas para que no haya creación de pares. De las fuentes de laboratorio que se poseen, la más apta para este trabajo fue la fuente de ^{57}Co .

C. Aplicaciones del CCD como detector de partículas

1. Aplicación en Neutrografía

Una de las aplicaciones más novedosas, y con aplicación directa en la física, es la de la implementación de los CCD como detectores de neutrones en neutrografía. La neutrografía es un caso particular de radiografía en la que se emplean neutrones como radiación. Las características principales al utilizar neutrones, son la elevada absorción neutrónica en parte de los elementos livianos, y la alta contrastación de materiales de similares densidades[5].

Sin embargo, para detectar a estos neutrones hace falta un detector, es aquí donde el CCD puede jugar un papel importante como tal. Jerónimo Blostein, Juan Estrada, et al. citeblostein han trabajado en un detector de neutrones cuya patente está en trámite. Este consiste en la deposición de boro enriquecido en ^{10}B sobre el CCD. El objeto a neutrografiar se coloca entre el haz de neutrones y la lámina de boro, como se observa en la figura 4. Los neutrones que atraviesan el objeto llegan a la lámina de boro generando partículas α , que son detectadas con el CCD. Estas partículas tienen un rango máximo de penetración de $10 \mu\text{m}$, dando información muy localizada del lugar donde se produjo interacción neutrónica. Siendo el espesor de la lámina de boro suficientemente grande para favorecer la reacción, y tan fina como para que los α puedan escapar. Teniendo esto en mente es posible generar neutrografías con resoluciones del orden de $15 \mu\text{m}$.

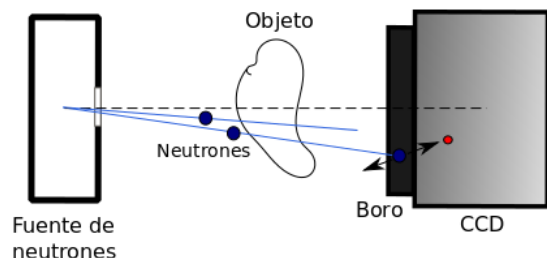


Figura 4. Esquema del detector de neutrones. Un objeto es bombardeado por neutrones provenientes de una fuente. Estos atraviesan el material, e interactúan con una lámina de ^{10}B , la cual emite α , que son detectados por el CCD.

Entre las aplicaciones típicas de la neutrografía se puede mencionar, el análisis de combustibles nuclea-

res, detección de materiales hidrogenados, control de calidad de materiales cerámicos, detección de fallas en álabes de turbinas, entre otras.

2. Detección de materia oscura

La evidencia de materia oscura (DM) se ha establecido mediante observaciones astronómicas. Esto ha producido un gran programa experimental para la detección directa de DM en el laboratorio. Muchos de estos experimentos han sido optimizados para partículas *masivas de interacción débil* (WIMPs) con masa de ~ 50 GeV. Esta gran masa está motivada por las teorías supersimétricas del modelo estándar, pero existen otros modelos que predicen masas del orden de ~ 5 GeV. Los experimentos de detección más comunes hoy en día se basan en la interacción de partículas de materia oscura por los núcleos de un detector. Los tipos de interacciones conocidos de la materia oscura con la materia (M) son mediante la fuerza débil y la gravedad. Esto hace que la detección de estas partículas sea realmente difícil de lograr.

Un posible detector de materia oscura es el CCD por su bajo nivel de ruido. El método de detección fue ideado por el físico Juan Estrada, que dió lugar al proyecto DAMIC (Dark Matter in CCDs). Este consiste en utilizar los núcleos de Si del CCD como blanco para los WIMPs [6].

II. MÉTODO EXPERIMENTAL

En este trabajo se realizó una calibración de cuentas ADC en energía, utilizando fuentes radiactivas de ^{55}Fe y ^{241}Am . Se puso en funcionamiento el detector, y se realizó un análisis de los datos obtenidos del mismo, trabajando tanto en la reducción del ruido en las mediciones, como en el correcto procesamiento de los datos.

Una vez realizada la calibración, se obtuvo un espectrograma con la fuente de ^{57}Co , pudiéndose observar el pico debido a los γ de efecto Compton que producen fotoeléctrico en el Si.

Por otra parte se realizó un análisis para la puesta en marcha de una nueva cámara contenedora del CCD. Para ello se realizó el cálculo de las dimensiones del link térmico para fijar la temperatura del CCD a 110 K, haciéndose un análisis del diseño del contenedor, y las simulaciones numéricas pertinentes. Todo esto se detalla en la sección siguiente.

A. Equipamiento experimental

1. CCD utilizado

El CCD utilizado posee un tamaño de 3 cm x 3 cm, con 2048 x 2048 píxeles de $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$. El arreglo

de compuertas MOS se encuentran ubicadas sobre una capa de SiO_2 de 500 Å de espesor y otra de Si_3N_4 del mismo espesor. Bajo la capa de Si tipo p (de $\approx 1 \mu\text{m}$) se encuentra el sustrato de Si tipo n de 250 μm de espesor, y una resistividad de 10 k Ω -cm. La diferencia de potencial suministrada al sustrato fue de $V_{SUB}=36$ V.

El mapa de píxeles del CCD se encuentra dividido en dos regiones L y R, donde cada una es leída por un amplificador distinto a la salida (derecha e izquierda). Esto permite generar dos lecturas independientes entre sí, pudiéndose realizar un mejor análisis del ruido producto de la electrónica. Sin embargo, en este trabajo se trabajó solamente con el lado derecho del CCD, debido a que en el lado izquierdo se tuvieron inconvenientes con la electrónica de lectura, limitando esto a trabajar con una cantidad de 1024 x 2048 píxeles [7].

2. Sistema de lectura del CCD

Para la manipulación de las tensiones de trabajo del CCD se utilizó un controlador Leach [8].

Para la adquisición de imágenes son necesarias cuatro placas de control y adquisición. La primera de ellas, la placa de video ARC-45, procesa la señal analógica proveniente del sistema de medición de carga del CCD, para convertirla en una señal digital de video por medio de dos conversores de 16 bits. La placa ARC-22 se encarga de la comunicación con el controlador, y la ARC-64 se encarga exclusivamente de la comunicación con la PC. Por último, la placa ARC-32 provee las señales de reloj necesarias para el funcionamiento del controlador.

Una vez que se finaliza el proceso de recolección de carga en los píxeles, mediante la correcta manipulación de potenciales en los píxeles las cargas se transfieren a una electrónica de lectura. En la figura II A 2 se muestra un esquema del circuito de lectura dispuesto junto con los amplificadores del CCD. Estos son alimentados mediante dos tensiones, la tensión del transistor de *reset*, que es $V_{REF}=-12,5$ V. Este valor de tensión es al que se carga el capacitor *sense-node* antes de transferir la carga. Por otra parte, la tensión $V_{DD}=22$ V alimenta al transistor MOSFET, que justo con la resistencia ajustan la ganancia del amplificador. La señal de salida se envía a la placa de video ARC-45 que la digitaliza.

3. Equipo de medición

Para la implementación del trabajo se contó con tres fuentes de tensión, las cuales proporcionaban la tensión V_{ref} para el circuito de lectura, la tensión de alimentación del amplificador MOSFET, y la tensión del sustrato, cada una. Además, se contó con un osciloscopio para visualizar las señales analógicas de salida del CCD. Por otro lado, el rack de placas de adquisición proporcionaba las señales de las imágenes que se obtenían mediante una PC a la cual estaba conectada,

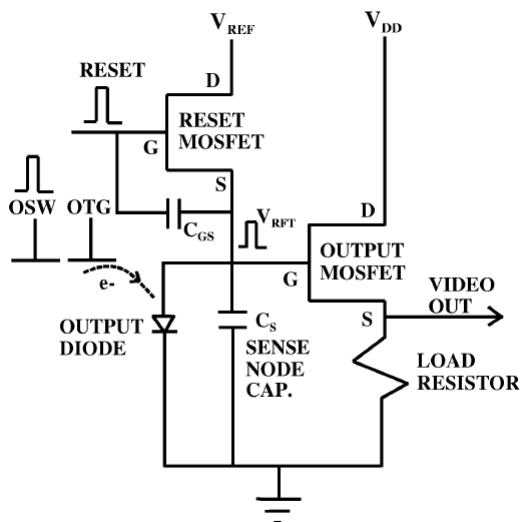


Figura 5. Esquema del circuito de lectura. La carga que llega del registro horizontal, se transfiere al capacitor *sense-node*, el cual posee una tensión de $V_{REF} = -12.5$ V. La carga del capacitor es sensada por el amplificador MOSFET que se alimenta con una tensión $V_{DD} = -22$ V. Luego el RESET MOSFET se encarga de llevar la carga del capacitor a cero.

como se observa en la figura 6.

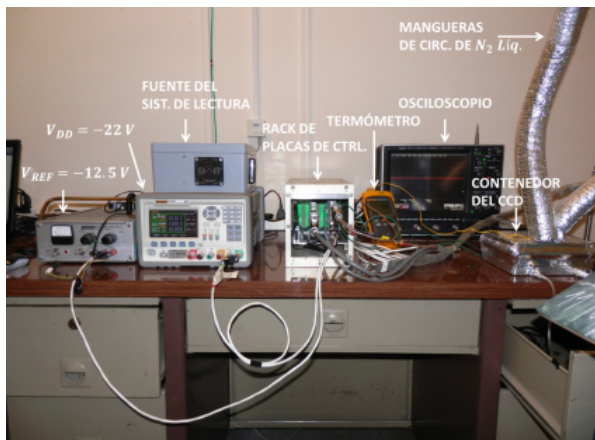


Figura 6. Equipamiento experimental utilizado. En la imagen se observan las fuentes de alimentación

Por otra parte, para la disminución de ruido térmico, se trabajó con el CCD a una temperatura de ~ 110 K. Esto se logró, mediante la utilización de N_2 . El CCD se encontraba contenido en una caja, donde conductos de Cu permitían lograr circular nitrógeno líquido para la refrigeración de una placa de cobre adosada al CCD, como se muestra en la figura 7. La caja de contención del CCD se encontraba sellada con cinta de aluminio para impedir el ingreso de la radiación lumínica del ambiente.

Por otra parte, se hacía circular vapor de N_2 en la caja de contención para disminuir la humedad dentro de la misma, y así evitar la posible condensación del agua en el circuito del CCD.

La temperatura fue controlada manualmente mediante el aumento o disminución de presión de N_2 en los tubos de refrigeración mediante la apertura o el cierre de una válvula. Un sensor de termocupla dispuesto en la placa de Cu indicaba con cierta estimación la temperatura en el CCD. La temperatura de trabajo variaba entre 101-115 K.

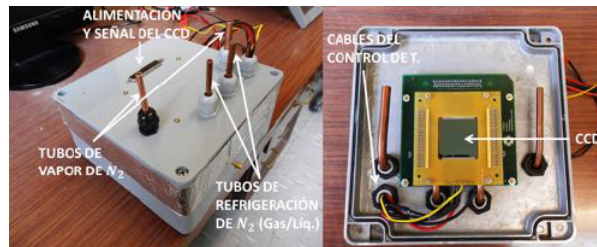


Figura 7. Caja de contención del CCD. A la izquierda con la caja cerrada pueden distinguirse los tubos de refrigeración y de vapor de N_2 . Los primeros mantienen la temperatura del CCD, y los últimos evitan la condensación dentro de la cámara. A la derecha se muestra el CCD y los conectores que lo acompañan.

B. Procedimiento experimental

Dentro del recipiente del CCD se ubicaban fuentes radiactivas a una distancia de ≈ 5 cm respecto de la placa de Si. En este trabajo se utilizaron principalmente dos fuentes radiactivas para realizar las mediciones, una fuente de rayos X de baja energía de ^{55}Fe , y una fuente de rayos γ de ^{241}Am . Ambas fuentes fueron ubicadas en la cámara del CCD. En todas las mediciones fue ubicada una lámina de captón para evitar la llegada de rayos α al CCD. Una vez ubicadas las fuentes en su lugar, el recipiente era cerrado y sellado con cinta de aluminio. Luego, se procedía a limpiar los píxeles del CCD mediante una lectura, y a partir de allí tomar imágenes de 10 segundos de exposición con la fuente, y 40 segundos de lectura; dando esto un tiempo. Para obtener mayor estadística y poder realizar un mejor tratamiento del ruido, que se explica a continuación, fueron tomadas 70 imágenes con las fuentes, y otras 70 imágenes del ruido de fondo sin fuentes (*background*).

Para lograr un mejor tratamiento del ruido en las mediciones, el sistema de lectura funciona de tal forma que una vez leídos todos los píxeles del CCD se siguen leyendo píxeles *virtuales*, es decir, píxeles que no existen físicamente sino que son solo la señal que generan los registros de lectura por solo operar. Esto permite obtener el valor del nivel del ruido producido por la electrónica de lectura.

C. Tratamiento del ruido

Obtenidas las imágenes de las fuentes radiactivas de ^{55}Fe y ^{241}Am , se procedió a filtrar todo el ruido posible

de las mismas. Para ello, se desarrolló un algoritmo para el procesamiento de las imágenes en el entorno de MATLAB.

El algoritmo desarrollado dividía su función en tres partes. En primer lugar, tomaba las 70 imágenes obtenidas con las fuentes, y realizaba un cálculo de la *mediana estadística* en cada píxel. Dada la baja probabilidad de ocurrencia de un evento, la mediana estadística da un valor muy preciso del ruido que se tiene en cada píxel. La mediana fue hallada por cada píxel, en las 70 imágenes, dando esto un valor muy preciso del ruido que se tiene en cada píxel. Esto se realizaba de esta manera dado que cada píxel posee una sensibilidad distinta al ruido térmico, debido principalmente a las sutiles diferencias en cada uno durante en proceso de fabricación.

En la segunda parte del algoritmo, este tomaba la información contenida en el *overscan*. Se tomaban las distintas líneas del *overscan* y se obtenía un promedio de los valores de intensidad para cada una de ellas. Esto se realizaba para cada una de las imágenes, y dicho promedio obtenido en cada línea era sustraído de cada línea del mapa de píxeles del CCD. Esto pretendía deshacerse tanto del ruido electrónico, como de los gradientes de temperatura en el CCD que afectaban a cada imagen.

Por último, existen fuentes de ruido de radiación electromagnética que pueden afectar al CCD. Este tipo de ruido pudo haber sido sustraído con los pasos anteriores del algoritmo, a excepción que, debido a los tiempos de trabajo y de lectura del CCD, este ruido sistemático esté desfasado en cada imagen, y por supuesto sea distinto píxel a píxel. Para sustraer este tipo de ruido se utilizó la *transformada discreta de Fourier bidimensional*[9]. Esto permite obtener de una imagen bidimensional, de igual tamaño a la analizada y que contiene la información del espectro de frecuencias.

Una vez implementado este algoritmo, se obtienen imágenes procesadas con el menor ruido posible. Para analizarlas se desarrolló un nuevo algoritmo en MATLAB, el cual se encargaba de buscar y encontrar eventos en cada una de las imágenes. Para ello, este buscaba píxeles con un valor de intensidad mayor a 3σ del ruido de cada imagen. Una vez encontrado dicho píxel, buscaba entre los píxeles vecinos a este, valores de intensidad mayores a dicho *trigger*. Esto se repetía hasta que encontrara a todos los píxeles que cumplían la condición y que fueran vecinos entre sí; a ese cúmulo de píxeles se lo denomina evento, y es producto de la interacción de un solo fotón con el CCD. Los eventos encontrados compuestos solo de un píxel no fueron tomados en cuenta, puesto que fueron considerados parte del ruido. El programa calculaba tanto la cantidad de eventos por imagen como la carga de cada uno de ellos, es decir, la suma de las intensidades de los píxeles que los conforman; la cual da noción de la energía del fotón incidente, puesto que todos los procesos anteriores son procesos lineales.

Una vez obtenida esta información, se realizaron

histogramas de carga, con los cuales fue posible realizar una calibración de cuentas ADC en energía. Hecho esto, se realizó una medición de la fuente de ^{57}Co , obteniéndose el espectrograma del mismo, y realizándose un análisis de los pico encontrados.

D. Cálculos realizados para la nueva cámara de CCD

La construcción de una nueva cámara nace con la idea de poder utilizar al CCD, en las condiciones de laboratorio, en el acelerador de partículas TANDEM [10] para diversas pruebas, entre ellas acelerar átomos de Si contra el blanco del CCD, así como hacer pruebas de neutrografía bombardeando al CCD con neutrones. Para todo esto es necesario una nueva cámara de contención, que pueda soportar el vacío generado en esta clase de experimentos, como la portabilidad del mismo, en principio es indispensable la ausencia de los tanques de nitrógenos usados en este experimento. Por ello, se realizaron algunos cálculos para la construcción de una nueva cámara de contención. La nueva cámara debe poder soportar la presión atmosférica, considerando la presión interna despreciable, es decir 1 kgr/cm^2 . Por ello, éstas en general poseen formas cilíndricas, evitándose de esta forma las caras planas en las paredes del recipiente. La capacidad de un cilindro a no colapsar dependerá de su diámetro, el espesor de las paredes, su largo, y la firmeza del material. En general, los materiales utilizados para este tipo de cámaras son aluminio y acero inoxidable. La ASME [11] (American Society of Mechanical Engineers) posee valores tabulados de espesores mínimos en función del largo para cilindros tanto de aluminio como de acero inoxidable, estos se muestran en la figura 8.

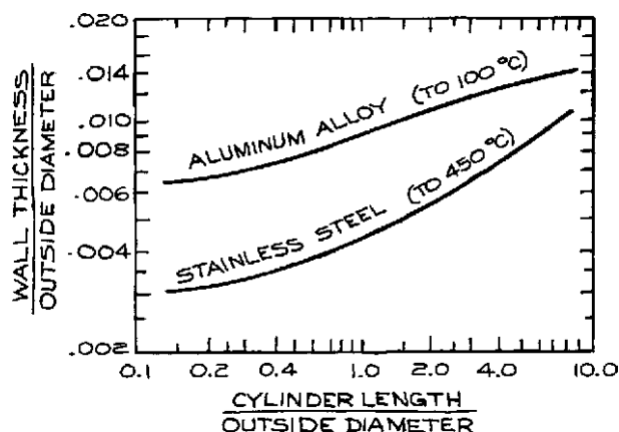


Figura 8. Espesor mínimo de las paredes del cilindro, sobre su diámetro, recomendado para cámaras de vacío tanto de aluminio, como de acero inoxidable, con una presión atmosférica externa, en función del largo/diámetro del mismo.

Por las aplicaciones antes mencionadas, de estos dos materiales, lo ideal sería utilizar aluminio dado el corto

tiempo de vida media del producto resultante por la activación neutrónica [12] ~ 2 minutos; mientras que en el acero es de un par días aproximadamente. Con todo esto en mente, se presenta el diseño de la cámara del CCD, junto con sus dimensiones, en la figura 9. Ésta posee una abertura por la cual se deja entrar la radiación a detectar. La temperatura del CCD es regulada mediante un link térmico de Cu, entre el mismo, y un tanque de N₂ líquido. Las dimensiones del link térmico deben ser las adecuadas para dejar al CCD a una temperatura determinada. Estos cálculos se muestran en la sección Resultados y discusión”.

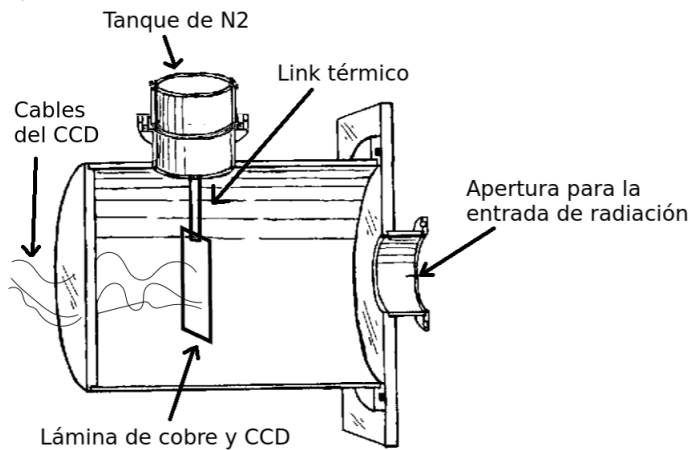


Figura 9. Diseño de la nueva cámara del CCD. Esta consiste en un cilindro de aluminio de $\approx 8,5$ pulgadas de diámetro. La temperatura del CCD es regulada mediante un link térmico conectado a un tanque de N₂. Los cables de señal y potencia del CCD, y la termocupla, salen de la cámara a través de la tapa izquierda de la misma. A la derecha, una apertura en la tapa del cilindro permite la entrada de partículas para su detección.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Calibración en energía del CCD

Una vez instalado correctamente el equipamiento experimental se procedió a tomar imágenes de las muestras radiactivas utilizadas. En la figura 10 se muestra una imagen típica obtenida del CCD, de 1150 x 2300 píxeles, sin ningún procesamiento adicional. Esta imagen es obtenida mediante uno solo de los amplificadores del CCD. En ella se puede apreciar el *overscan* a los lados de la imagen, que no corresponden a píxeles físicamente existentes. Diversa cantidad de eventos son encontrados en las imágenes, siendo posible, en general, identificar el tipo de partículas que los generaron, observando la forma de dicho evento. En la figura 11 se muestran algunos de los eventos más comunes, en ella pueden detectarse fácilmente eventos producidos por fotones, muones y electrones. Los fotones son fácilmente diferenciables, puesto que al generar efecto foto-

eléctrico en el material promueven a un solo electrón, que en su viaje a la zona de menor potencial, generan difusión, es decir, se promueven más y más electrones, dejando en general un evento circularmente uniforme de pocos píxeles (figura III A). Por otro lado los muones, las partículas con mayor energía detectadas en este trabajo, dependiendo del ángulo con que ingresan al detector, dejan una traza recta en las imágenes (figura III A). Por último, los electrones que ingresan al CCD, al no ser muy energéticos ni masivos, y por su interacción con las cargas en el material, sus trayectorias son complicadas, estas pueden ser visibles en las imágenes (figura III A). De cualquier manera, la manera cuantitativa de diferenciar a los eventos es mediante la *carga* de los mismos, es decir, la suma de las intensidades de todos los píxeles que los componen.

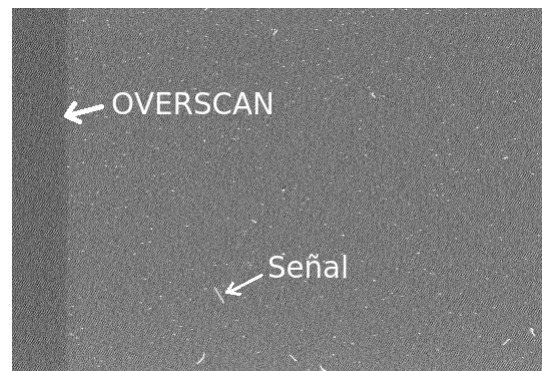


Figura 10. Imagen típica de 2300 x 1150 píxeles obtenida de uno solo de los amplificadores del CCD. Siendo 2048 x 1024 píxeles reales pertenecientes al CCD, y los restantes al *overscan* (píxeles virtuales). Se ajustó el contraste de la imagen para una mejor visualización.

Para cada grupo imágenes obtenidas de las distintas fuentes radiactivas, se realizó el mismo tratamiento del ruido, presentándose algunos resultados a continuación.

1. Tratamiento de imágenes

Una vez realizados los algoritmos competentes en MATLAB se realizó el tratamiento de imágenes. Se halló la mediana de cada píxel en las 70 imágenes, y cada valor hallado fue sustraído del píxel correspondiente en todas las imágenes. Hecho esto, se implementó un algoritmo realizado en MATLAB, el cual promediaba los valores de intensidad a lo largo de cada fila del *overscan*, y estos valores fueron sustraídos en cada píxel perteneciente a la misma fila en la imagen.

En la figura III A 1 puede observarse el histograma de intensidad producido por todos los píxeles de las 70 imágenes, sin procesamiento alguno. En la figura III A 1 se muestra el histograma obtenido de intensidad de todos los píxeles de las 70 imágenes con los procesamientos descritos anteriormente. Puede notarse que el ancho del pico no se modifica apreciablemente entre los

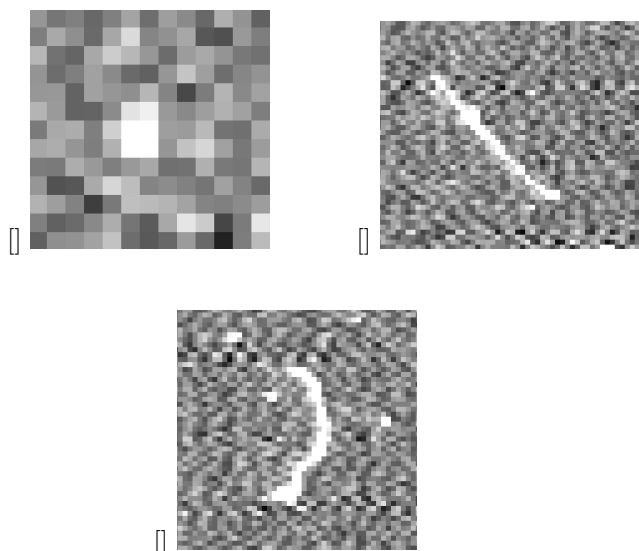


Figura 11. En esta imagen se pueden apreciar algunos de los eventos más comunes observados en las imágenes, estos son el conjunto de píxeles de mayor intensidad. En (a) se observa un evento producido por un fotón de baja energía ($\sim 5KeV$), en (b) el producido por un muón, y el (c) por un electrón. La cantidad de píxeles y la intensidad de los mismos en un evento, está íntimamente relacionada con la energía de la partícula que lo produjo.

histogramas. Existen pequeñas fluctuaciones en el pico (a) que se ven corregidas en el pico (b). Sin embargo, el desvío estándar del valor medio de la intensidad de los píxeles se ve afectado por una fuente de ruido distinta a las tenidas en cuenta hasta el momento. En el histograma de los datos procesados (figura III A 1) se ajustó una gaussiana. Puede observarse como ésta no se solapa adecuadamente a los datos, estos mas bien, están más concentrados cerca del origen, y luego decaen más rápido que una gaussiana. Esto podría indicar, que las variaciones en las intensidades de los píxeles no es completamente aleatoria, sino que sigue algún tipo de patrón.

En la figura 13 se muestra un evento producido por un fotón, en esta se puede apreciar la intensidad de los píxeles en función de la posición en el CCD, siendo el píxel central correspondiente al de mayor intensidad. En ella puede notarse también, el nivel de ruido con respecto al píxel de máxima intensidad logrado con los procesamientos realizados. Sin embargo, aquí es posible observar que el comportamiento del ruido no es completamente aleatorio, esto se hace evidente en la figura 14, donde se muestra la transformada discreta de Fourier[13] de la imagen presentada en la figura 10. Estando ubicadas las bajas frecuencia en el centro de la imagen transformada, y las altas frecuencias en sus extremos. Se pueden observar dos franjas claras en la escala de grises, que corresponden a máximos de intensidad en el espacio de las frecuencias, esto muestra que el ruido no es completamente aleatorio sino que tiene un comportamiento oscilatorio con una frecuencia determinada. Este tipo de ruido, en general, es producto de la superposición de radiación electromagnéticas en

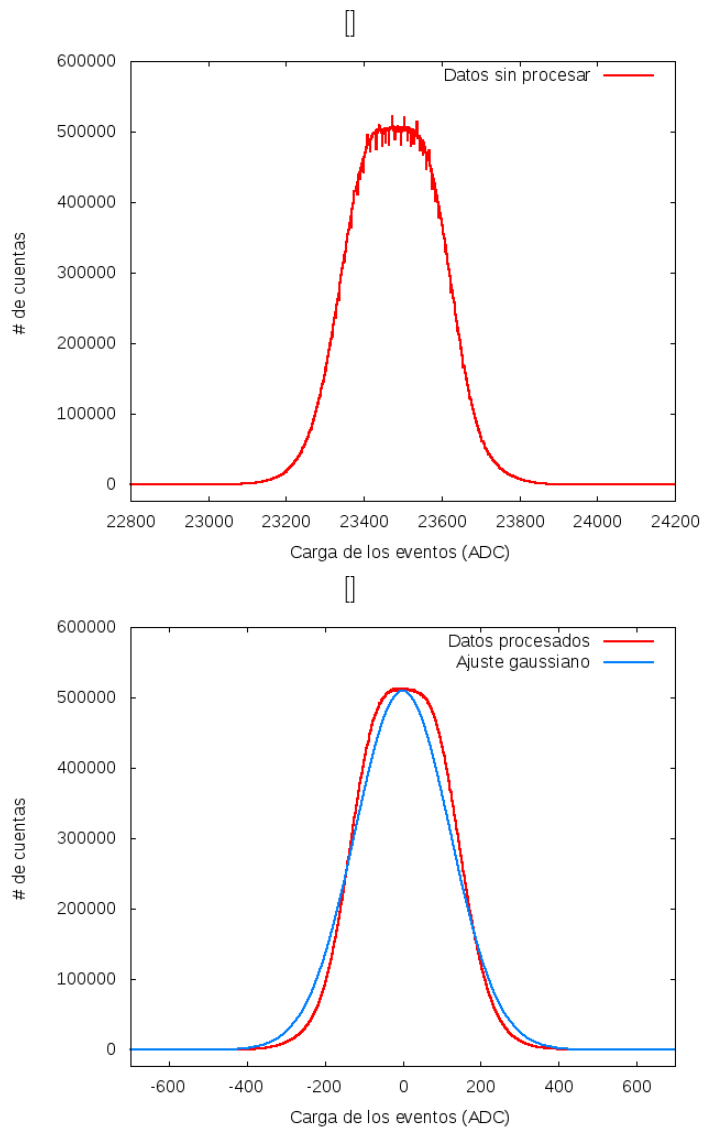


Figura 12. En la imagen (a) se presenta el histograma de intensidades de los píxeles de las 70 imágenes tomadas en la medición, sin procesamiento alguno. En la imagen (b) se muestra el mismo histograma pero de las imágenes obtenidas luego de los procesamientos descritos. En ésta también se observa el ajuste de una gaussiana. Puede notarse como la gaussiana decae de manera más lenta hacia los lados, que los datos del histograma.

la zona, que afecta al instrumental. Dado que existen tiempos característicos en la lectura del CCD, la fase de estas ondas es distinta en cada imagen, haciendo que esto no desaparezca con los métodos realizados hasta el momento.

2. Filtros mediante transformada discreta de Fourier

Mediante la utilización de la transformada discreta de Fourier se utilizaron distintos métodos de filtrado. Estos consisten en la eliminación, o reducción de intensidad, de los puntos de alta intensidad en las imágenes

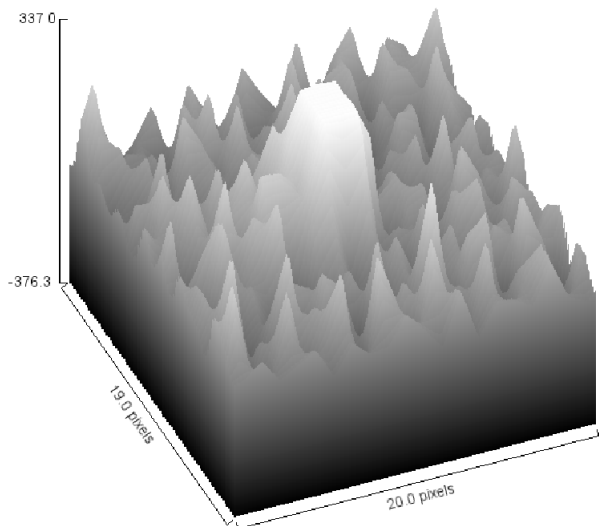


Figura 13. Gráfico obtenido de un evento de las imágenes procesadas. El tamaño de la imagen es de 19 x 20 píxeles.

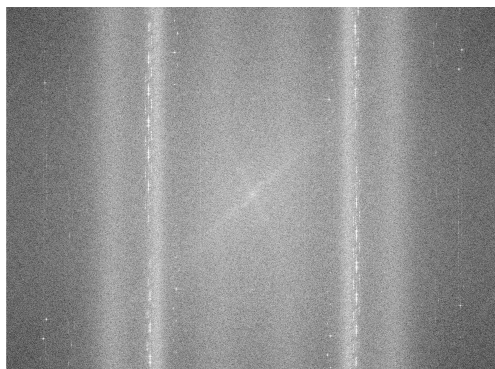


Figura 14. Transformada de Fourier de la imagen presentada en la figura 10. Se observan máximos de intensidad a lo largo del eje de las abscisas. Estando ubicadas las bajas frecuencias en el centro de la imagen, y las altas frecuencias en sus extremos.

transformadas, para determinados valores de frecuencia. Por las imágenes obtenidas del CCD, y dado que la aparición de un evento en determinado grupo de píxeles es aleatoria, como primera estimación se espera que la información de los eventos esté contenida en el origen de coordenadas de la transformada de Fourier, por ser estos de baja frecuencia. Por ello, se utilizan filtros que reduzcan, o anulen, los valores de alta frecuencia en la imagen transformada. Esto se logra mediante la utilización de filtros de alta frecuencia adecuados. Una vez hecho esto, se antitransforma la imagen obtenida, dando como resultado una imagen sin eventos de frecuencia alta, como ser oscilaciones periódicas de intensidad en los píxeles.

Primeramente se procedió a realizar un filtro pasa bajo *ideal*. Este consiste en realizar un corte en determinados valores de frecuencia, en este caso se realizaron cortes en distintos w_0 , siendo $w_0 = \sqrt{(w_{x0})^2 + (w_{y0})^2}$. Esto se logra mediante el producto de la matriz que posee el valor de las intensida-

des de la imagen transformada, con una función escalón $f(w_x, w_y) = \sigma(\sqrt{(w_x)^2 + (w_y)^2} - w_0)$; con w_0 el valor de frecuencia donde se desea realizar el corte, siendo w_x e w_y las coordenadas de cada píxel en la imagen, y σ la función escalón. Luego se aplica la antitransformada a la imagen así obtenida. En la figura 15 se presenta el mismo evento presentado en la figura 13 con este tipo de filtro. Puede notarse aquí un patrón de difracción, esto presenta un problema a la hora de definir la carga de un evento, y de discriminar a un evento de otro. Para corregir este problema, se utilizan filtros que decaigan de manera continua en intensidad.

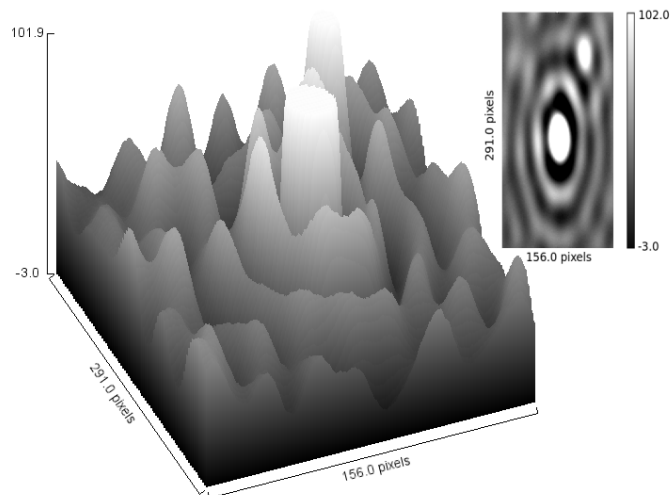


Figura 15. Aquí se presenta el evento de la figura 13 luego de la aplicación del filtro *ideal*. A la derecha se observa al mismo desde otra perspectiva, mostrándose de manera más clara la difracción obtenida, producto del tipo de filtro utilizado.

Entre los filtros más utilizados, están el filtro *Butterworth* [14], que consiste en mantener constante el valor de intensidad de los píxeles hasta cierta *frecuencia de corte*. La función filtro que multiplica a la matriz imagen es:

$$H(w_x, w_y) = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{w_c}} \quad (5)$$

siendo W_c la frecuencia de corte.

Por otra parte, otro filtro muy utilizado también es el *filtro gaussiano*, cuya forma funcional de la función filtro es:

$$G(w_x, w_y) = \exp\left(-\frac{w_x^2 + w_y^2}{\lambda}\right) \quad (6)$$

siendo λ un parámetro que indica cuanto decae la función $G(w_x, w_y)$ a medida que se aleja del origen de coordenadas.

Se utilizaron ambos filtros, obteniéndose un mejor resultado con el filtro *gaussiano*, puesto que el primero

producía una mayor difusión en los eventos. Con el filtro *gaussiano* se ha podido reducir considerablemente la difracción en los eventos. Sin embargo, se observa cómo el evento se ha difuminado, es decir, la intensidad de los píxeles que componen al evento decae de una manera más lenta a medida que se aleja del píxel de máxima intensidad. Esto hace que la carga del evento esté repartida en mayor cantidad de píxeles, haciendo que los más alejados posean valores de intensidad muy cercanos al ruido presentado en las imágenes, haciendo que se pierda información del evento. Esto sucede puesto que se han eliminado las altas frecuencias, haciendo que los cambios abruptos de intensidad de un píxel a otro no sean posibles; es decir, se suaviza la imagen con esta clase de filtros.

Para resolver el problema del suavizado se han implementado diversos tipos de filtros además de los anteriores. Un filtro implementado, fue el de asignar intensidad nula a los píxeles que pasen cierto valor de *trigger* en la imagen transformada, esto permite deshacerse de frecuencias específicas; sin embargo esto vuelve a producir difracción en los eventos. Por ello, se implementaron otras técnicas de filtrado, entre ellas se utilizó una función filtro dependiente solo de la coordenada w_x , y que posee un valor nulo donde se presentan los máximos de intensidad (w_{x0}) en la imagen transformada (respecto solo al eje w_x), y vale 1 en los valores de frecuencia alejados de w_{x0} . En la figura 16 se muestra la imagen transformada con el filtro aplicado, y la forma funcional de la función filtro implementada; estas son dos *gaussianas* invertidas. Esta clase de filtro posee problemas, puesto que filtran frecuencia altas a lo largo del eje w_y produciendo un suavizado en la imagen de los eventos en el eje w_x ; obteniendo nuevamente parte del problema antes planteado. Por ello se plantea nuevamente un filtro con simetría circular, aplicando una *gaussiana* invertida, como el descrito, pero a lo largo de la coordenada radial. Esto mantiene las frecuencias altas y bajas, y filtra las frecuencias intermedias. Con este último filtro se logró la menor difusión de los eventos en los píxeles vecinos. Los valores de λ óptimos, en los filtros implementados, fueron encontrados manualmente. En la figura III A 2 se observa un evento obtenido con este tipo de filtrado. No se observan procesos de difracción, y la relación señal-ruido lograda fue realmente muy buena.

3. Espectrograma obtenido del ^{55}Fe y el ^{241}Am

Teniendo las imágenes ya procesadas se implementó el algoritmo desarrollado, hallándose la carga de los eventos en cada imagen. Obtenidos estos, se realizó un histograma de carga de los eventos producidos por las muestras radiactivas. Se obtuvieron histogramas tanto de las imágenes procesadas con los filtros utilizando la transformada de Fourier, como de las que no se realizaron este último paso. En los espectros obtenidos, sin el filtrado de Fourier, fue posible detectar

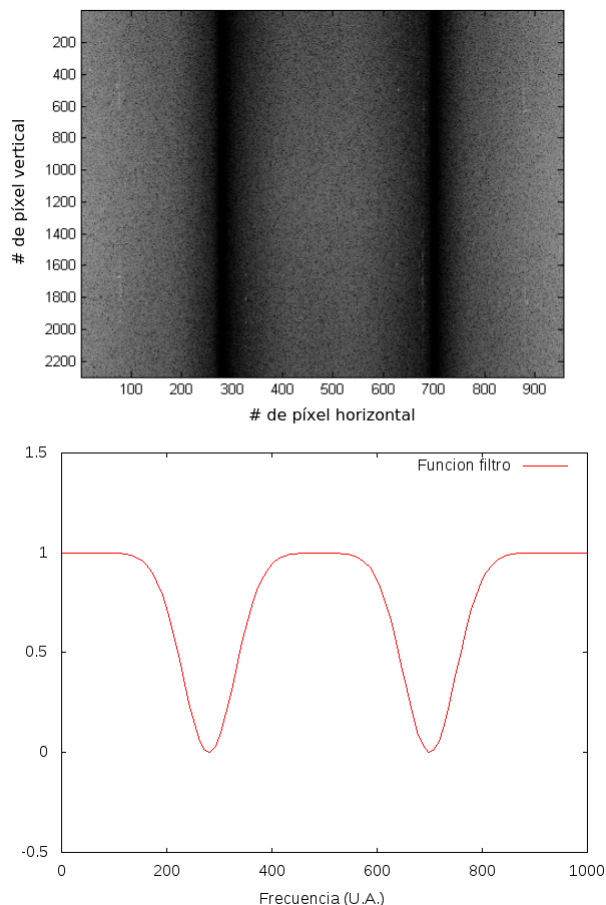


Figura 16. Arriba se muestra la imagen transformada aplicando el filtro presentado en la figura de abajo, realizado con dos gaussianas.

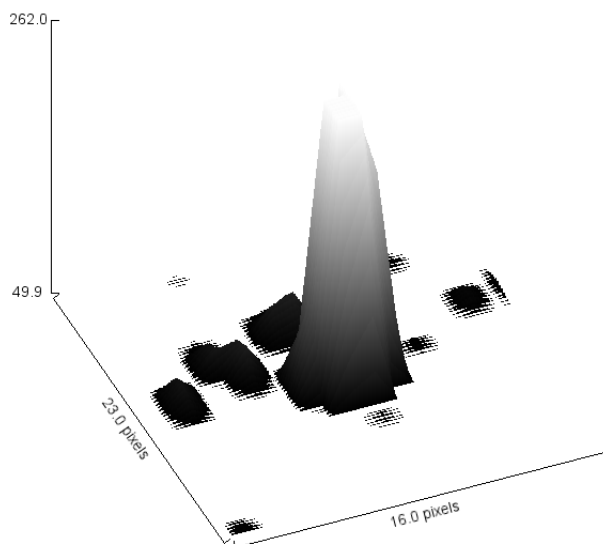


Figura 17. Se presenta un evento tomado de la imagen con el filtro aplicado. El filtro utilizado en este caso, fueron dos gaussianas en la dirección radial. Se puede notar que la relación señal-ruido es menor que para la imagen sin filtrar 13

claramente los picos esperados por las fuentes utilizadas. Sin embargo, al realizar el filtrado, la ubicación de

los picos deja de ser tan clara. Esto puede deberse a que la difusión de los eventos al aplicar este filtro no puede evitarse completamente, parte de la información del evento se pierde en el ruido. Se obtuvieron los espectrogramas aplicando todos los filtros mencionados anteriormente, sin poder llegar a la claridad del espectrograma obtenido sin la aplicación de estos. Esto puede deberse a que la mínima dispersión de los eventos, afecta a la estadística de los datos, y con los filtros utilizados no se ha podido reducir más dicha dispersión. En efecto, esto podría indicar que dichos filtros no son apropiados para el análisis de imágenes como objetivo del presente trabajo. Existen otros tipos de filtros no probados en el presente trabajo, los cuales algunos autores aseguran obtener menor dispersión en los objetos de las imágenes, como ser el filtrado mediante la transformada *wavelet* [15].

El valor de *trigger* utilizado por el programa para detectar eventos, fue de 3σ del ruido en las imágenes. La cantidad de eventos detectados por imagen con este valor de *trigger* fue de 1033. Considerando la cantidad de píxeles que posee cada evento considerado, y que para que el mismo sea tenido en cuenta, al menos un píxel vecino debe pertenecer al evento, 0.6 píxeles de cada 100 forman parte de un evento. Este es el error cometido al considerar a los histogramas obtenidos como compuestos únicamente de valores de intensidad dados esencialmente por ruido.

En la figura 18 se observa el espectrograma hallados para el ^{55}Fe y el ^{241}Am . Aquí se muestran los picos de los con mayor intensidad emitidos por el ^{241}Am y los X de mayor intensidad emitidos por el ^{55}Fe . Se realizó un ajuste con cuatro gaussianas centradas en los picos del histograma. Dado los valores en energía tabulados [16] de los fotones emitidos por las fuentes se realizó una calibración en energía, ésta se presenta en la figura 19. En esta imagen se observan los puntos correspondientes a la energía de los fotones y la carga hallada de los eventos generados por estos, junto con su error. El ajuste lineal realizado para estos valores dio un resultado igual a: $Energía(keV) = (0,002 \pm 0,0002) \times (ADC)(keV/ADC)$.

B. Espectro obtenido del ^{57}Co

Realizando el debido procesamiento de imágenes, se obtuvo el espectro del ^{57}Co , con la calibración en energía obtenido con las fuentes de ^{55}Fe y ^{241}Am se obtuvo el espectrograma presentado en la figura 20. Se observan aquí picos correspondientes a los γ característicos de la fuente, ubicados en las energías de 11 ± 2 keV, 116 ± 11 keV, y un tercer pico ubicado en $83 \pm$, keV; de acuerdo a la calibración hallada. Este último pico es el resultado de los γ se mayor energía producido por el efecto Compton que produjeron fotoeléctrico en el Si. Si se obtiene la diferencia de energía entre el codo Compton y el fotopico, esta concuerda con

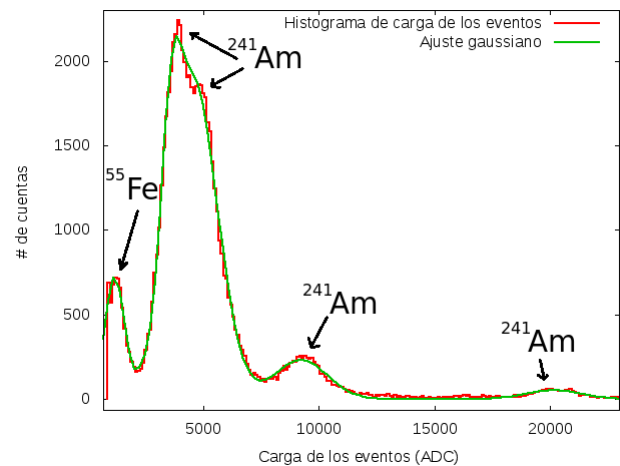


Figura 18. Espectrograma hallado para las fuentes de ^{55}Fe y ^{241}Am . Se observan los picos de producidos por la radiación emitida por cada una de las fuentes, estos son: 5.888 keV y 5.899 keV del ^{55}Fe ; y 13.946 keV, 16.816 keV, 26.344 keV, y 59.541 keV del ^{241}Am . La curva verde muestra un ajuste realizado de los datos con cuatro gaussianas centradas en cada uno de los picos.

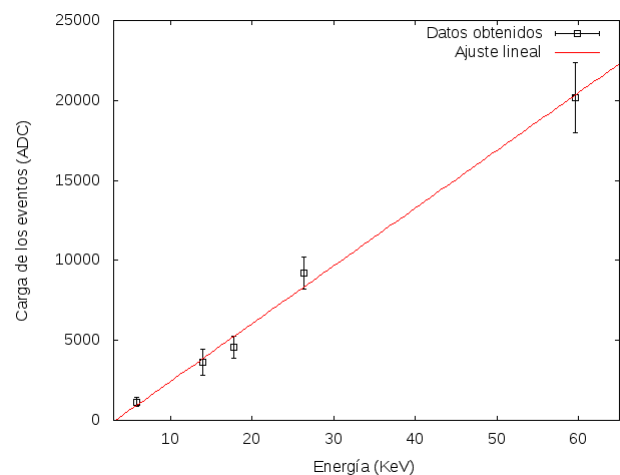


Figura 19. Calibración de la carga de los eventos correspondientes a los picos del histograma de la figura 18 en función de la energía de los fonotes que los produjeron.

la energía del pico adicional encontrado en el espectro. Por tablas, las energías de la radiación de mayor intensidad del ^{57}Co son: 14.413 keV y 122.061 keV, que concuerdan con los valores hallados.

C. Cálculos realizados del link térmico para la nueva cámara del CCD

Teniendo en mente el diseño de la cámara, y la disposición de los conectores (cables y link térmico) del CCD, se desarrolló su circuito térmico presentado en la figura 21. Siendo T_N la temperatura del Nitrógeno, T_a la temperatura ambiente, R_c la resistencia térmica de los cables de señal y potencia del CCD, R_l la resistencia del link térmico, R_{ccd} la resistencia térmica

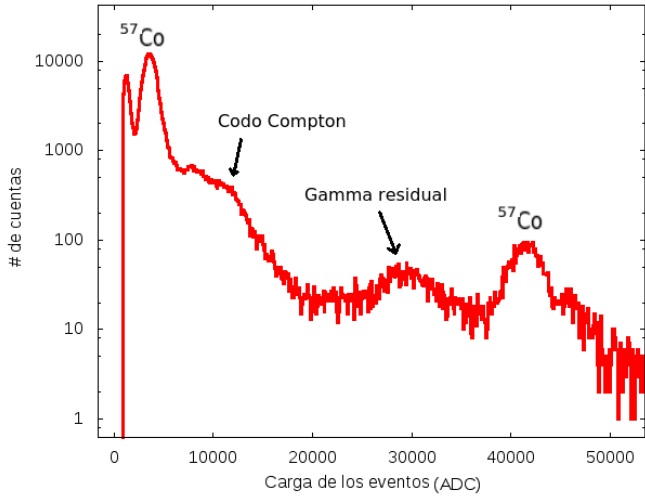


Figura 20. Espectrograma hallado para la fuente ^{57}Co . Se observan los picos de producidos por la radiación emitida ésta fuente, y el pico debido al efecto fotoeléctrico producido por los γ provenientes del codo Compton.

ca tanto del ccd como de la placa de cobre disipadora de calor, C_{ccd} la capacidad calorífica de estos últimos, e I_{ccd} la potencia disipada por el circuito. Es circuito térmico puede ser asimilado a un circuito eléctrico, teniendo como hipótesis que la ley de Fourier [17] se cumple; lo cual presenta una buena aproximación.

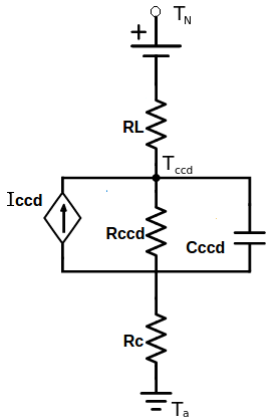


Figura 21. Esquema del circuito térmico del CCD (fijarse donde puse T_{ccd}).

Los cables de alimentación y señal provienen de un solo conector que está constituido por 50 pines de cobre de 1 mm de diámetro. Tomando a la conductividad térmica del cobre como 360 W/mK la resistencia tiene un valor de $R_c = 7,07 \text{ W/K}$.

Tanto la resistencia como la capacidad calorífica asignada al CCD están dadas por las características de la lámina disipadora, que al ser ésta de cobre y de un volumen de $6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ la resistencia térmica obtiene un valor de $R_{ccd} = 0.00115 \text{ w/K}$. Considerando que la densidad del cobre a temperatura ambiente es aproximadamente de 8900 Kg/m^3 y su calor específico

$C_{cobre} = 0.385 \text{ J/(g K)}$, se obtiene un valor de la capacidad calorífica $C_{ccd} = 131.5 \text{ J/(K)}$.

Por último, dado que para trabajar con el CCD es conveniente que este se encuentre a temperaturas mayores a 77 K , debido al congelamiento de carga (sección II-a), se estimó que la resistencia del link térmico para lograr una temperatura de 110 K en el CCD debería de ser de $R_l = 1,227 \text{ W/mK}$, en estado estacionario. Con lo cual, por las dimensiones planteadas para la cámara de vacío, se puede estimar con este valor, que para un largo de 10 cm del link térmico, este debe poseer un diámetro de 3 mm aproximadamente. En el estado estacionario, se considera que el capacitor está lleno, ya no hay cambios de temperatura en el CCD, y por lo tanto no pasa corriente por allí. Por otra parte se desprecia la I_{ccd} por ser de 50 mW . En los cálculos siguientes se observa que la corriente debida al gradiente de temperatura es mucho mayor a la I_{ccd} . Teniendo estos datos se realizó una simulación numérica mediante métodos finitos, escrita en lenguaje C.

Los datos obtenidos para la temperatura en el CCD en función del tiempo se observan en la figura 22, puede verse aquí que el tiempo que el sistema utiliza para llegar al estado estacionario es de aproximadamente de 20 segundos , en las condiciones planteadas. Por otra parte, en la figura 23, se observa que la corriente en el estado estacionario es de aproximadamente 26 W , que es mucho mayor a los 0.5 W que disipa el CCD; esto justifica el hecho de haber despreciado dicha corriente en los cálculos.

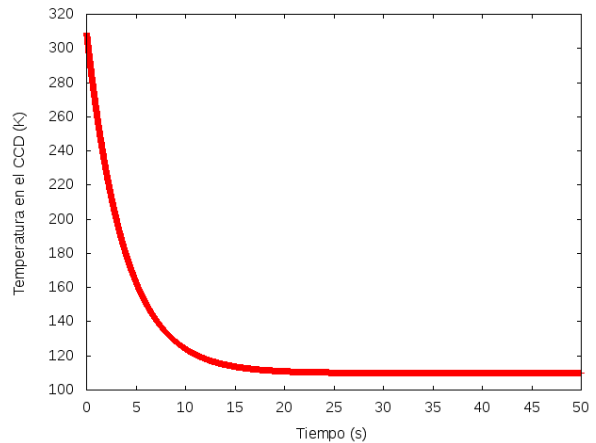


Figura 22. Temperatura en el CCD en función del tiempo. Siendo la temperatura en el estado estacionario de 110 K .

Teniendo que el flujo de calor es de $\approx 26 \text{ W}$ en el estado estacionario, se estimó que el volumen de N_2 para mantener la temperatura del CCD a 110 K durante un hora, es de aproximadamente 1 litro . Este volumen para el tanque de N_2 hace posible la construcción de una cámara de vacío con las dimensiones planteadas.

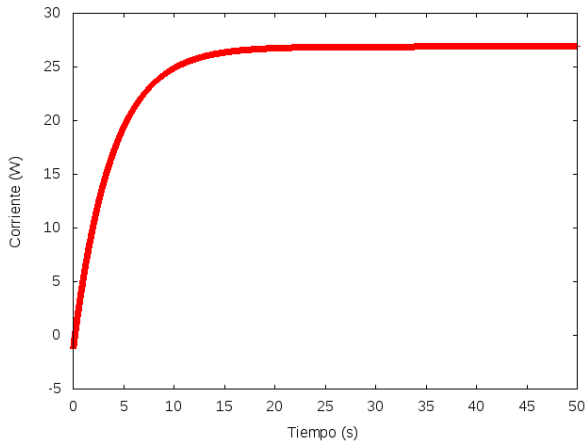


Figura 23. Corriente debida al gradiente de temperatura en el circuito en función del tiempo. Siendo la corriente en el estado estacionario de aproximadamente 26 W.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo poner en marcha un CCD. Se logró desarrollar algoritmos competentes, en el entorno de MATLAB, para el procesamiento de imágenes tomadas con el mismo. Se pudo realizar un análisis del ruido presentado en las mismas, junto con los procesamientos para la eliminación de los mismos. Se desarrollo luego un algoritmo capaz de realizar el pro-

cesamiento de los eventos con éxito. Por otra parte, se presentó un método de filtrado del ruido sistemático mediante la *transformada discreta de Fourier*, por medio de la utilización de diversos filtros en el espacio de frecuencias, que no resultaron satisfactorios por el tipo de análisis de datos requeridos para la detección de partículas. No se logró eliminar el "suavizado" de los eventos causado en las imágenes por este tipo de métodos, lo cual agrega un problema a la hora de realizar un análisis de la carga (en cuentas ADC) de los eventos producidos por las partículas incidentes.

Sin embargo, se deja la posibilidad de la existencia de otro tipo de filtrado en frecuencias, con potenciales aplicaciones en este ámbito.

Con el procesamiento de las imágenes, se pudo realizar la calibración de cuentas ADC en energía, con las fuentes de ^{55}Fe y ^{241}Am , dando como resultado: Energía (keV) = $(0.002 \pm 0.062) \times (\text{ADC})$ (keV/ADC).

Por otro lado, se logró visualizar el espectro del ^{57}Co , pudiendose interpretar la aparición de un nuevo pico en el espectrograma, debida al efecto fotoeléctrico de los fotones provenientes del codo Compton.

Por último, se pudo realizar un análisis satisfactorio para la construcción de una nueva cámara de contención para el CCD. Las simulaciones aquí realizadas, revelan que la construcción de una cámara de vacío capaz de contener al CCD en la temperatura de 110 K es posible dadas las dimensiones empleadas.

-
- [1] On the Edge: The Spectacular Rise and Fall of Commodore (2005) Variant Press, ISBN 0-9738649-0-7
 - [2] James R. Janesick, "Scientific Charge-Coupled Devices", SPIE Press-The International Society for Optical Engineering, ISBN 0-8194-3698-4, Bellingham, WA, 2001.
 - [3] Rodrigo Bonazzola, Mauricio Montellano Durán, Hernán Saraceni, Alberto Villagrán. "Espectroscopia gamma utilizando un centellador de NaI", Instituto Balseiro - Universidad de Cuyo. Páginas 1-2.
 - [4] Di Paolo Agustín, Fabre Ignacio, Mangussi Franco, y Sesin Pablo Ezequiel. "Espectroscopia Gamma de baja resolución utilizando un centellador de NaI(Tl)", Instituto Balseiro - Universidad de Cuyo. Páginas 1-2.
 - [5] J. J. Blostein, J. Estrada, J. Molina, G. Fernández, "Plasma effect in silicon charge coupled devices (CCDs)". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, A 665 (2011) 90-93.
 - [6] S. Matarrese, M. Colpi, V. Gorini, U. Moschella, "Dark Matter and Dark Energy: a challenge for modern cosmology", ISBN 978-90-481-8684-6 Springer (2011).
 - [7] C. Bebek "4k x 2k and 4k x 4k CCD Technical Manual", November 2006, Berkeley Lab.
 - [8] Di Paolo, Agustín. "Puesta en funcionamiento y caracterización de un CCD como detector de partículas, radiación y materia oscura". Instituto Balseiro - Universidad de Cuyo.
 - [9] T. G. Stockham, Jr., "High-speed convolution and correlation, in 1966 Proc. AFIPS Spring Joint Computing Conf. Reprinted in Digital Signal Processing, L. R. Rabiner and C. M. Rader, editors, New York: IEEE Press, 1972.
 - [10] www.cab.cnea.gov.ar/index.../acelerador-de-iones-tandem-de-1-7-mv
 - [11] John H. Moore, Christopher C. Davis, Michael A. C. "Building scientific apparatus". Fourth edition. Cambridge. pág: 138-145.
 - [12] Montoya Rossi, Eduardo Haroldo. "Evaluación y estandarización del análisis por activación neutrónica según el método del k-sub cero en el reactor nuclear RP-10: Estudio preliminar empleando irradiaciones cortas".
 - [13] José Vicente Romero Bauset, María Dolores Roselló Ferragud, Ricardo Zalaya Báez. "Fundamentos matemáticos para la ingeniería con MATLAB"
 - [14] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll. "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales". pág: 144.
 - [15] Camilo Andrés Moreno González, Oscar Alexander Bertel García, Eduin José Toro Bello. "Aplicación De La Transformada Wavelet Para El Reconocimiento De Formas En Visión Artificial".
 - [16] <http://ie.lbl.gov/>
 - [17] Lestina, Thomas; Serth, Robert W. (2010). Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb. Academic Press.