



Universidad Nacional Autónoma  
de México

---

---

Facultad de Ciencias

DISPOSITIVOS CCD PARA LA  
BÚSQUEDA DIRECTA DE MATERIA  
OSCURA: EL EXPERIMENTO DAMIC

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
F Í S I C A

P R E S E N T A:  
GUADALUPE MORENO GRANADOS

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ALEXIS A. AGUILAR ARÉVALO



Cd. Universitaria, D.F. 2015



## Hoja de Datos del Jurado

### 1. Datos del alumno

Moreno

Granados

Guadalupe

54 28 46 10

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

307178042

### 2. Datos del tutor

Dr

Alexis Armando

Aguilar

Arévalo

### 3. Datos del sinodal 1

Dr

Darío

Núñez

Zúñiga

### 4. Datos del sinodal 2

Dr

Vladimir

Ávila

Reese

### 5. Datos del sinodal 3

Dra

Myriam

Mondragón

Ceballos

### 6. Datos del sinodal 4

Dr

Eric

Vázquez

Jáuregui

### 7. Datos del trabajo escrito.

Dispositivos CCD para la búsqueda directa de  
materia oscura: el experimento DAMIC

122p

2015





*Dedicado a  
mi amada familia*



# Agradecimientos

Siempre me faltaran palabras para expresar el enorme y perpetuo agradecimiento que tengo hacia todas las personas que han estado conmigo, hasta estos momentos de mi formación académica.

A mi asesor, Alexis, por ser mi guía desde que tuve la fortuna de trabajar con él en mi servicio social y quien sigue siendo la persona que encamina mi formación académica. Te agradezco la enorme paciencia, ayuda y dedicación que has tenido hacia mi persona. También, agradezco el que compartas tus conocimientos conmigo y que antes de ser un brillante hombre de ciencia seas un gran ser humano.

Sin duda, la gratitud más grande que tengo es hacia mi familia. Le agradezco que siempre me ha estado apoyando y dando ánimos para continuar en cada paso que doy. Le agradezco infinitamente a mi May por haber sido tan tolerante conmigo, brindándome su tiempo, cariño y amistad; al igual que a mi papi por brindarme su apoyo y su eterna confianza. A mis dos hermanos Ura y Alex les agradezco que hayan sido mi guía y los mejores maestros para mostarme que nunca hay que darse por vencido sin importar el colosal obstáculo que se nos presente en la vida.

Agradezco a la Dra. Myriam Mondragón, Dr. Eric Vázquez, Dr. Dario Nuñez y Dr. Vladimir Ávila por todas sus sugerencias y recomendaciones que aportaron para este trabajo.

Desde que me integré al grupo mexicano que colabora con el experimento DAMIC he tenido la fortuna de trabajar con el Dr. Juan Carlos D'Olivo y Dr. Frederic Trillaud; a quienes les agradezco su paciencia y sus valiosos comentarios hacia el trabajo que desempeño en las reuniones que hemos llevado a cabo. Así mismo le agradezco a mis camaradas Iker, Youssef, Alejandro, Pamela, Marisol y Samuel, por todo el apoyo que me han brindado. Es una enorme satisfacción el trabajar con todos ustedes.

Durante la preparación de este trabajo, realicé una estancia de un par de meses en el laboratorio Fermilab. Ahí estuve la dicha de trabajar con Juan Estrada, líder del experimento DAMIC y con quien estoy sinceramente agradecida por el apoyo brindado durante mi estancia. También agradezco a Javier Tiffenberg, Alvaro Chavarria, Gustavo Cancelo, Federico Izraelevitch, Marco Reyes, Kevin Kuk, Andrew Lathrop e Irma Campos por su apoyo, asesoramiento y por hacerme sentir en casa durante mi estancia en Fermilab.

Qué sería de la vida si no tuvieramos amigos con los cuales compartir aventuras. Quiero agradecer el haber conocido a tres personas que me han mostrado una mirada

diferente que tiene la vida, quienes se han convertido no sólo en mis cómplices de un sin fin de aventuras, sino que son mis hermanas de vida, mis queridas "mtds" Lili, Fany y Ara.

Al conocer por primera vez a una persona, nunca se sabe cómo resultará ese encuentro. Quiero agradecer la maravillosa amistad que encontré en Mary, Miguel, Paola, Hector, Diana, Brenda, Lesli y Lulú.

Agradezco el apoyo de los proyectos UNAM-PAPIIT No.IN112213 y No.IB100413, de igual manera agradezco a la DGECI por haberme apoyado en mi estancia en el laboratorio Fermilab.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>IX</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. El problema de la materia oscura</b>	<b>3</b>
1.1. Candidatos a materia oscura . . . . .	5
1.2. Estatus de búsquedas experimentales . . . . .	7
1.2.1. DAMA . . . . .	8
1.2.2. CRESST . . . . .	9
1.2.3. XENON . . . . .	10
1.2.4. CoGeNT . . . . .	10
1.2.5. LUX . . . . .	10
1.2.6. CDMS . . . . .	11
1.2.7. COUPP, PICASSO, PICO . . . . .	11
1.2.8. DAMIC . . . . .	12
<b>2. Los CCD como detectores de partículas ionizantes</b>	<b>13</b>
2.1. Operación del CCD . . . . .	14
2.1.1. Funciones de desempeño . . . . .	18
2.2. El pixel de una CCD científica . . . . .	19
<b>3. El experimento DAMIC</b>	<b>23</b>
3.1. Los CCD de DAMIC . . . . .	23
3.2. Umbral de energía . . . . .	24
3.3. Respuesta a la deposición de energía . . . . .	26
3.4. Reconstrucción de la posición . . . . .	28
3.5. Evolución del montaje de DAMIC en SNOLAB . . . . .	29
3.6. Análisis de los datos de SNOLAB . . . . .	36

3.7. Coincidencias espaciales de $\alpha$ y $\beta$ . . . . .	36
3.8. Futuro próximo y DAMIC100 . . . . .	38
3.9. Dispersión de neutrones rápidos: El experimento ANTONELLA . . . . .	39
<b>4. Herramientas de análisis de datos de DAMIC</b>	<b>41</b>
4.1. Substracción del ruido de sobre escaneo ( <i>Subtract over-scan</i> ) . . . . .	43
4.2. Substracción del sesgo maestro ( <i>Subtract master bias</i> ) . . . . .	43
4.3. Obtención de la máscara ( <i>Mask</i> ) . . . . .	43
4.4. Substracción del ruido correlacionado ( <i>Subtract correlated noise</i> ) . . . . .	44
4.5. Extracción del catálogo (archivo en ROOT) . . . . .	48
4.6. Trazas de partículas en los CCD . . . . .	54
<b>5. Calibración y análisis de los datos obtenidos de los CCD</b>	<b>57</b>
5.1. Fuentes radiactivas de rayos X . . . . .	57
5.2. Calibración del espectro de energía usando fuentes radiactivas de rayos X	59
5.3. Cálculo de eventos de ruido en SNOLAB . . . . .	60
<b>6. Resultados</b>	<b>63</b>
6.1. Calibración del espectro de energía usando una fuente de $^{55}\text{Fe}$ . . . . .	63
6.2. Calibración del espectro de energía usando una fuente de $^{241}\text{Am}$ . . . . .	67
6.3. Resultado total de las exposiciones usando fuentes de rayos X de $^{55}\text{Fe}$ y $^{241}\text{Am}$ . . . . .	70
6.4. Nivel de ruido en el experimento DAMIC . . . . .	72
<b>7. Conclusiones</b>	<b>99</b>
<b>A. Capacitor MOS</b>	<b>103</b>
<b>B. Contaminación radiactiva en los CCD</b>	<b>105</b>
<b>C. FITS</b>	<b>107</b>
<b>D. Cálculo de la Varianza de <math>\hat{R}_i</math> para la extracción del ruido correlacionado</b>	<b>109</b>
<b>E. Características de un archivo de configuración para la extracción de un archivo ROOT</b>	<b>113</b>
<b>F. Detector de Ge de alta pureza</b>	<b>115</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>119</b>



## Dispositivos CCD para la búsqueda directa de materia oscura: el experimento DAMIC

por

Guadalupe Moreno Granados

Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM

### Resumen

En este trabajo se realizó un estudio de la calibración de energía de los dispositivos CCD del experimento DAMIC, utilizando fuentes de rayos X de  $^{55}\text{Fe}$  y  $^{241}\text{Am}$ . Se obtuvieron constantes de calibración y se evaluó la resolución de CCD de 2kx4k pixeles con grosores de  $250\ \mu\text{m}$  y  $650\ \mu\text{m}$ , obteniendo resultados consistentes con los de estudios previos. El estudio muestra que los CCD de DAMIC tienen un comportamiento cercano al de un detector de ionización ideal con un factor de Fano de  $\sim 0.16$  para energías mayores a  $\sim 10\ \text{keV}$ . Se presentan también estimaciones del nivel de eventos de ruido de fondo en los CCD de la instalación de DAMIC en SNOLAB a lo largo de la evolución del montaje experimental en el período de marzo de 2014 a marzo de 2015. Con las mejoras realizadas se ha logrado una disminución del nivel de ruido de más de un orden de magnitud.

Director: Dr. Alexis Armando Aguilar Arévalo, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.



**CCD sensors for the direct search  
of dark matter: the DAMIC experiment**

by

Guadalupe Moreno Granados  
Bachelor Thesis. Facultad de Ciencias, UNAM

**Abstract**

In this work a study of the energy calibration of the CCDs used in the DAMIC experiment was carried out with  $^{55}\text{Fe}$  and  $^{241}\text{Am}$  X-ray sources. Calibration constants were obtained and the energy resolution of the sensors was evaluated for 2kx4k-pixel CCDs with thicknesses of 250  $\mu\text{m}$  and 650  $\mu\text{m}$ . The results are consistent with those of previous studies, showing that the DAMIC CCDs behave like an ideal ionization detector with a Fano factor of  $\sim 0.16$  for energies above  $\sim 10$  keV. Estimates of the level of background events in the CCDs in the installation at SNOLAB along the evolution of the experimental setup in the period from March 2014 to March 2015 are also presented. With the various upgrades the background level has been reduced by more than one order of magnitude.

Thesis Advisor: Dr. Alexis Armando Aguilar Arévalo, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.



# Introducción

La materia oscura es uno de los problemas más controversiales a los que se ha tenido que enfrentar la física de este siglo, ya que existe una fuerte evidencia astrofísica y cosmológica (e.g. mediciones de las curvas de rotación galácticas, el cúmulo de la bala, etc.), que apoya la existencia de la materia oscura fría no-bariónica como un constituyente importante del Universo [35, 36]. Algunos modelos teóricos proponen la existencia de partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP) cuyas masas están en el rango de 1-15  $\text{GeV}/c^2$  como posibles candidatos para la materia oscura [37]. Algunos experimentos han reportado la detección de señales provenientes de la dispersión elástica de WIMP con núcleos ligeros, las cuales a su vez han sido excluidas por otros [38, 39]. Actualmente existe un gran esfuerzo internacional abocado a aclarar esta situación.

El objetivo del experimento DAMIC es la implementación del silicio de un dispositivo de carga acoplada (CCD) de uso científico, como el blanco para la dispersión elástica WIMP-núcleo. La masa relativamente baja de los núcleos de silicio, así como el bajo nivel de ruido de lectura del detector, hacen que el CCD sea un instrumento ideal para la identificación de retrocesos nucleares con energías del orden de keV. Anteriormente los CCD no se habían considerado como un detector viable de WIMP debido a su masa relativamente baja ( $\sim 1$  g por detector). Sin embargo, los recientes avances en la tecnología de los CCD (sobre todo debido al incremento de la pureza del silicio), han permitido la fabricación de dispositivos CCD de 1-5 g con niveles excepcionalmente bajos de contaminación radiactiva. Estos instrumentos se han desarrollado y caracterizado exitosamente en los experimentos de astronomía [40], donde su gran superficie y espesor permiten la eficiente detección de la luz del infrarrojo cercano proveniente de los objetos astronómicos.

La primera búsqueda de WIMP con un CCD como blanco se realizó en el salón experimental de MINOS en Fermilab a 106 m bajo tierra, obteniendo los mejores límites de exclusión que se tienen hasta el momento para las WIMP con masas por debajo de los 4  $\text{GeV}/c^2$  [42]. En noviembre de 2012 la colaboración DAMIC desplegó seis CCD de 1 g en el *J-Drift* del laboratorio SNOLAB en Canadá. La cámara de vacío y el blindaje para esta configuración fueron diseñados para albergar hasta 1 kg de detectores de silicio.

Un desarrollo subsecuente para mejorar los CCD se realizó en junio de 2013, para hacer frente a una fuente inesperada de eventos de ruido (o *background*) de uranio en el soporte de los CCD. Otras mejoras realizadas a lo largo del 2014 fueron la modificación a

la configuración de la caja de cobre que contiene a los CCD ya que para esta configuración se colocaron tres nuevas CCD; adicionalmente en julio de 2014 se modificó el escudo de plomo que se tenía alrededor de la cámara del detector, se colocó plomo de mayor pureza y menor radiactividad que fue dado en préstamo por la universidad de Zúrich; así mismo, en diciembre de 2014 se realizó la modificación a la caja de cobre de los CCD (ahora tendrá la capacidad de albergar 18 dispositivos) y un cambio al soporte y recubrimiento de los CCD que serán usadas en DAMIC100. La nueva versión del experimento, llamado DAMIC100 tendrá una masa blanco de 100g y será capaz de explorar la señal de CDMS-Si en un plazo de un año de operación. El desarrollo total de DAMIC100 en SNOLAB con 18 CCD cada una de 5.5 g está programado para finales de 2015.

En este trabajo de tesis se presentarán los resultados de la calibración de dispositivos CCD usando fuentes emisoras de rayos X, así como las mediciones del nivel de eventos de ruido durante el año 2014 del experimento DAMIC en SNOLAB.

La manera en la que se estructura esta tesis es la siguiente: el capítulo 1 aborda el planteamiento de la existencia de la materia oscura, sobre las evidencias astrofísicas y cosmológicas que sustentan su existencia, así como el estatus actual de experimentos que buscan la detección directa de partículas de materia oscura. Por otro lado, en el capítulo 2 se da una breve introducción sobre los dispositivos CCD, su utilidad, funcionamiento e importancia que representan como una posibilidad de ser usados como detectores de partículas. Entrando en más detalle sobre el experimento DAMIC; en el capítulo 3, se presenta un panorama sobre el experimento, su estatus actual y lo que se espera en un futuro próximo. En el capítulo 4 se presentan las herramientas requeridas para realizar el análisis de los datos recabados por el experimento. Algunos de los cálculos del nivel de ruido del experimento, y el proceso de la calibración de la carga a energía haciendo uso de fuentes radiactivas que emiten rayos X, se presentarán en el capítulo 5. En el capítulo 6 se presentan los resultados de la calibración de los dispositivos CCD usando una fuente de  $^{55}\text{Fe}$  y de  $^{241}\text{Am}$ ; así como, los resultados de los distintos niveles de ruido que se obtuvieron durante el año 2014 para el experimento DAMIC en SNOLAB. Y finalmente, el capítulo 7 presenta las conclusiones de este trabajo de tesis.

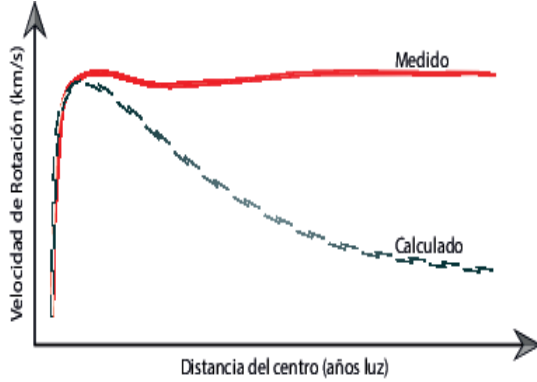
# Capítulo 1

## El problema de la materia oscura

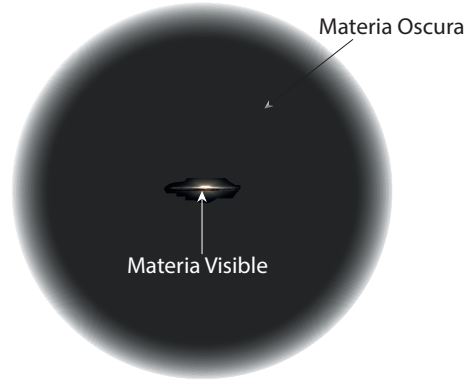
Las observaciones que se realizaron para deducir que una parte significativa de la estructura del Universo está integrada por masa no visible (“materia oscura”, MO) [2] tienen su origen en 1932, cuando el astrónomo Jan H. Oort, quien estudiaba la influencia gravitacional del disco de la Vía Láctea sobre las estrellas que se encuentran próximas a éste, calculó la masa del disco galáctico el cuál resultó ser dos veces la cantidad de materia visible (estrellas y nebulosas). Un año después, el astrónomo suizo Fritz Zwicky analizó las velocidades de ciertos cúmulos de galaxias (aplicó el teorema del virial al cúmulo de galaxias “Coma”), y encontró que muchas galaxias se estaban moviendo a velocidades elevadas. Según estos resultados, el cúmulo debía desintegrarse y todas las galaxias saldrían disparadas al no haber masa suficiente para mantenerlas en órbitas acotadas, pero dichos cúmulos resultaron ser configuraciones estables. Esto llevó a Zwicky a concluir que para mantener confinadas a las galaxias a pesar de su alta dispersión de velocidades, se requiere de mucha más masa en el cúmulo que la visible.

Las evidencias de MO provienen de observaciones de objetos luminosos (estrellas, nubes de gas, cúmulos globulares o galaxias enteras) moviéndose más rápido de lo que uno esperaría si ellos solo sintieran la atracción gravitacional de otros objetos visibles. Un ejemplo importante es la medición de las curvas de rotación galácticas. La velocidad de rotación  $v$  de un objeto en una órbita Kepleriana estable de radio  $r$  al rededor de una galaxia está dada por  $v(r) \propto \sqrt{M(r)/r}$ , donde  $M(r)$  es la masa dentro de la órbita. Si  $r$  se encuentra fuera de la parte visible de la galaxia y la masa se encuentra donde los centros luminosos lo indican, uno esperaría que  $v(r) \propto 1/\sqrt{r}$ . En su lugar, en la mayoría de galaxias uno encuentra que  $v$  llega a ser aproximadamente constante a mayores valores de  $r$ , donde las curvas de rotación pueden ser medidas. En nuestra galaxia  $v \simeq 240$  km/s en la posición del Sistema Solar, cambiando poco hasta el radio más grande observado. Esto implica la existencia de un *halo oscuro*, con densidad de masa aproximada en ciertos radios de  $\rho(r) \propto 1/r^2$  i.e.,  $M(r) \propto r$ . En algún momento  $\rho$  tiene que disminuir más rápido (con el fin de mantener la masa total de la galaxia finita) pero no se sabe a partir de que radio ocurre. Esto lleva a una cota inferior en la

densidad de la masa de MO,  $\Omega_{MO} \geq 0.1$ , donde  $\Omega_X \equiv \rho_X/\rho_{crit}$  y  $\rho_{crit}$  es la densidad crítica de la masa (i.e.,  $\Omega_{tot} = 1$  corresponde a un Universo plano).



(a) Curva de rotación de galaxias



(b) Galaxia con un halo de MO

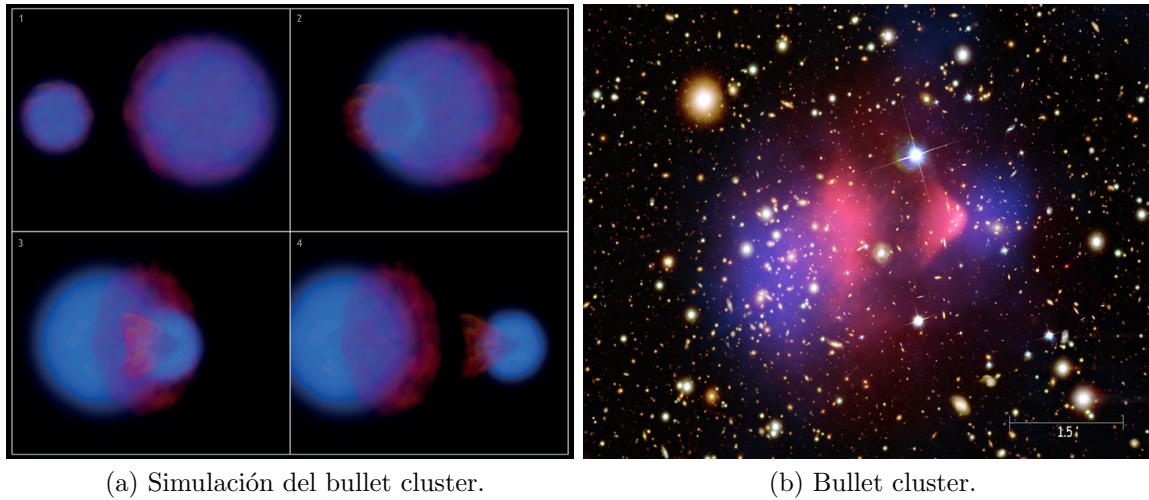
Figura 1.1: a) Curva de rotación de galaxia b) Galaxia con un halo de materia oscura a su alrededor.

Las observaciones en los cúmulos de galaxias suelen dar valores mayores,  $\Omega_{MO} \simeq 0.3$ . Estas observaciones incluyen mediciones de velocidades de galaxias en el cúmulo, las cuales son una medición de su energía potencial si el cúmulo está virializado; mediciones de la temperatura de rayos X del gas caliente en cúmulos, las cuales también se correlacionan con el potencial gravitacional sentido por el gas; y estudios de lentes gravitacionales débiles del fondo de galaxias del cúmulo.

Una evidencia particularmente convincente es el cúmulo de la bala (bullet cluster, 1E0657-558) el cual recientemente (en escalas de tiempo cosmológicas) pasó a través de otro cúmulo, figura 1.2. Como resultado, el gas caliente formado en su mayoría por la masa bariónica de los cúmulos colisionó y se desaceleró, mientras las galaxias en el cúmulo procedieron en trayectorias balísticas. Las lentes muestran que la mayor parte de la masa total también se movió balísticamente, indicando que la interacción de MO es en efecto débil.

Actualmente la determinación de  $\Omega_{MO}$  más exacta viene del ajuste global de los parámetros cosmológicos a una variedad de observaciones (fondo cósmico de radiación de microondas, distribución espacial de galaxias y otras).

La densidad de MO en la vecindad de nuestro Sistema Solar es también de considerable interés. Una primera estimación de esta cantidad fue hecha en 1922 por J.H. Jeans, analizando el movimiento de estrellas cercanas, transversal al plano galáctico [3], concluyendo que en la vecindad de nuestra galaxia, la densidad de "materia no visible" debe de ser aproximadamente igual a la de la materia luminosa (estrellas, gas, polvo). Es interesante notar que las estimaciones más recientes para la densidad local de MO han encontrado un resultado similar al calculado por Jeans, obteniendo un valor de [4]



(a) Simulación del bullet cluster.

(b) Bullet cluster.

Figura 1.2: a) Simulación realizada por la NASA, donde se representa la colisión de dos galaxias donde en rojo se representa el gas visto en rayos X, mientras que lo azul representa a la materia oscura, la cual no colisiona [5] y fue obtenida con estudios de lentes gravitacionales. b) En esta imagen tomada en el espectro de rayos X, se observa el resultado final de la colisión de las dos galaxias que dan origen al bullet cluster.

$$\rho_{MO}^{local} = (0.39 \pm 0.03) \frac{GeV}{cm^3}. \quad (1.1)$$

## 1.1. Candidatos a materia oscura

Análisis sobre la formación de estructura en el Universo indica que la mayor parte de MO debe ser fría, i.e., debería haber sido no relativista al inicio de la formación de la galaxias. Los candidatos para materia oscura no bariónica tienen que satisfacer distintas condiciones: deben ser estables en escalas de tiempo cosmológicas (de otro modo, en este momento ya habrían decaído), no deben interactuar con la radiación electromagnética (de otro modo no se clasificarían como materia oscura) y deben tener la densidad reliquia correcta. Algunos candidatos incluyen a los axiones y a las WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*).

La existencia de los axiones fue postulada inicialmente para resolver el problema fuerte de CP de la QCD; también aparecen naturalmente en teorías de súper cuerdas. Estos son bosones de Nambu-Goldstone asociados con la ruptura espontánea de una nueva simetría global U(1) de "Peccei-Quinn" (PQ), a una escala de energías del orden de  $10^{12}$  GeV. Aunque muy ligeros, los axiones constituirían MO fría, ya que no se producirían térmicamente. A temperaturas muy por encima de la transición de fase de la QCD, los axiones no tienen masa y el campo de axion puede tomar cualquier valor parametrizado

por el “ángulo de desalineamiento”  $\theta_i$ . Para una revisión detallada, ver [1].

Las partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP,  $\chi$ ) son partículas con masas aproximadamente entre 10 GeV y algunos TeV y con secciones eficaces comparables a las de la fuerza débil. En la cosmología estándar, su densidad reliquia actual puede calcularse de manera confiable si las WIMP estaban en equilibrio químico y térmico con la “sopa” caliente de partículas del modelo estándar (SM) después de la inflación. En este caso, su densidad estaría exponencialmente suprimida (Boltzmann) en  $T < m_\chi$ . Por lo tanto, las WIMP se salen del equilibrio térmico, o se “congelan” (*freeze out*) una vez que la tasa de reacciones que cambia partículas del SM en WIMP o vice versa, que es proporcional al producto de la densidad de número de WIMP y la sección eficaz de la aniquilación de un par de WIMP en partículas del SM  $\sigma_A$  por la velocidad, se vuelve menor que la tasa de expansión de Hubble del Universo. Después del congelamiento, la densidad co-móvil de WIMP permanece esencialmente constante; si el Universo evolucionó adiabáticamente después del desacoplamiento de las WIMP, esto implica que el cociente del número de WIMP sobre la entropía es constante. Su densidad reliquia en la actualidad está dada aproximadamente por

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \text{const.} \frac{T_0^3}{M_{Pl}^3 \langle \sigma_A v \rangle} \simeq \frac{1 \times 10^{-37} \text{cm}^2 \cdot c}{\langle \sigma_A v \rangle} \quad (1.2)$$

donde  $h \approx 0.67$  es la constante de Hubble en unidades de  $100 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ ,  $T_0$  es la temperatura actual de CMB,  $M_{Pl}$  es la masa de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz,  $\sigma_A$  es la sección eficaz total de aniquilación de un par de WIMP en partículas del SM,  $v$  es la velocidad relativa entre dos WIMP en su sistema de centro de masa y  $\langle \dots \rangle$  denota el promedio térmico. El congelamiento sucedió a una temperatura  $T_F \simeq m_\chi/20$  casi independientemente de las propiedades de la WIMP. Esto significa que las WIMP ya eran relativistas cuando se desacoplaron del plasma térmico.

El candidato a WIMP que podría parecer más obvio es un neutrino pesado. Sin embargo, un neutrino doblete de SU(2) tendría una densidad reliquia muy pequeña si su masa es superior a  $M_Z/2$ , como es requerido por los datos del LEP. Uno puede disminuir la sección eficaz de aniquilación y por tanto aumentar la densidad reliquia, postulando una mezcla entre un doblete pesado de SU(2) y algún neutrino estéril. Sin embargo, también se requiere de un neutrino estable (no es obvio por qué un neutrino masivo no debería de decaer).

El candidato a WIMP mejor motivado en la actualidad, es la partícula supersimétrica más ligera (LSP, *lightest supersymmetric particle*) en modelos de supersimetría [8]. Búsquedas de isótopos exóticos implican que una LSP estable tiene que ser neutra. Esto deja básicamente dos candidatos entre los compañeros supersimétricos de las partículas ordinarias, un sneutrino y un neutralino. El resultado negativo de varias búsquedas de WIMP descarta sneutrinos “ordinarios” como componente primario del halo de MO de nuestra galaxia. El candidato más estudiado es el neutralino más ligero, el cual, según cálculos detallados, tendría la densidad reliquia térmica deseada. Sin embargo es posible



construir extensiones no supersimétricas del modelo estándar que contienen candidatos viables de WIMP, como por ejemplo los modelos de “Little Higgs” [1] entre otros.

Existen también modelos donde las partículas de MO, las cuales interactúan solo débilmente con la materia ordinaria, tienen interacciones muy fuertes dentro de una extensión de la teoría llamada “sector oscuro” [1]. Estos fueron motivados por las mediciones de los satélites PAMELA, ATIC y FERMI, indicando un exceso en el flujo cósmico de  $e^+$  y/o  $e^-$  en altas energías.

La ausencia de señales en el LHC para física más allá del modelo estándar, así como el descubrimiento de un bosón de Higgs con masa de aproximadamente 126 GeV, restringen muchos modelos de WIMP con motivaciones teóricas robustas.

Existen teorías que proponen MO tibia (*Warm Dark Matter* WDM) y entre sus posibles candidatos figuran los neutrinos “estériles”. Los neutrinos “estériles”, singletes de  $SU(2) \times U(1)_Y$  con masas del orden de keV, podrían aliviar el problema de “núcleo-cúspide” (*core-cusp*) de los modelos de MO fría en las curvas de rotación de galaxias enanas y de disco [7]. Si estos neutrinos no se produjeron térmicamente a través de la mezcla con los neutrinos del modelo estándar, podrían decaer eventualmente en un neutrino estándar y un fotón.

## 1.2. Estatus de búsquedas experimentales

Los esfuerzos para encontrar evidencia experimental de la MO se pueden dividir en dos grupos: i) las búsquedas directas, y ii) las búsquedas indirectas. Entre las búsquedas indirectas se encuentran las observaciones astrofísicas y cosmológicas que se mencionaron anteriormente; así como las de otros experimentos que buscan obtener partículas del Modelo Estándar que provengan de la aniquilación de WIMP y búsquedas de procesos con energía faltante en colisionadores como el LHC. Estas se caracterizan por que la partícula de MO no deposita energía directamente en un detector como resultado de una interacción. Por el contrario, las búsquedas directas intentan observar la colisión de una partícula de MO con un nucleón (del detector) obteniendo de esta forma información sobre la partícula de MO. Esto se realiza al contabilizar eventos en un detector por arriba de un cierto umbral de energía depositada, y por encima de un fondo esperado.

Todos los experimentos que buscan la detección directa de WIMP, generalmente tratan de identificar la pequeña energía depositada en la interacción, lo que corresponde típicamente a un retroceso nuclear de uno de los núcleos del material detector. El número de eventos de WIMP esperados en un detector puede calcularse en función de la masa y de la sección eficaz de interacción de la WIMP con los nucleones (protón y neutrón), haciendo suposiciones sobre su densidad y distribución de velocidades en el halo galáctico.

Cada uno de los distintos experimentos usa técnicas diferentes para medir esa energía depositada, algunas de las técnicas para medir dicha energía se basan en: la luz producida, el aumento de temperatura, la producción de carga por ionización, etc. Varios de estos

métodos requieren que el material detector esté a temperaturas muy bajas. Para poder llevar a cabo el desarrollo de los detectores dedicados a la búsqueda de las WIMP se han utilizado materiales como el Silicio, el Germanio, el yoduro de Sodio, el Tungsteno, algunos gases nobles en su forma líquida como son el Xenón, el Argón, entre otros.

Los experimentos que hacen referencia a la detección directa, al obtener resultados de cierto experimento van delimitando las características que deben cumplir las WIMP. Estas limitantes son curvas que se trazan en gráficas del espacio de parámetros  $\sigma$  vs  $M_\chi$  (sección eficaz contra la masa de las WIMP), dichas curvas indican la sensibilidad con la que obtuvieron los resultados de los experimentos y sirven como comparación de resultados entre los múltiples experimentos. Las curvas de sensibilidad son muy importantes, ya que en ellas cuando un experimento hace la referencia de cierto porcentaje de nivel de confianza (C.L), se refiere a que la WIMP no se encontraría (con dicho porcentaje de probabilidad) por arriba de la curva de sensibilidad. También se encuentran zonas (áreas de color amarillo y azul de la figura 1.3) que delimitan el rango de en donde se podría encontrar materia oscura. Tanto las curvas de sensibilidad como los contornos cerrados son trazados conforme a los resultados obtenidos por el experimento y conforme al modelo del halo galactico. La figura 1.3 presenta una gráfica con curvas de sensibilidad en el espacio de parámetros ( $\sigma$  vs  $M_\chi$ ) de diversos experimentos.

En este trabajo sólo se presentarán experimentos que buscan WIMP con espín independiente; es decir, WIMP que no tendrán un cambio en su sección eficaz cuando éstas interaccionen con los núcleos del que esta hecho el detector. Para conocer más experimentos (con espín dependiente e independiente) referirse a [1]. A continuación se presentan algunos proyectos que se han llevado a cabo en torno a la detección de las WIMP:

### 1.2.1. DAMA

La colaboración DAMA [24, 1] ha realizado búsquedas de WIMP utilizando cristales de yoduro de sodio como blanco, instalando detectores en el laboratorio subterráneo de Gran Sasso, Italia. El experimento DAMA/Nal con 100kg de Nal(Tl) de alta pureza, reportó evidencia de partículas de materia oscura en el halo galáctico con un alto nivel de confianza. Su sucesor DAMA/LIBRA con 250 kg de Nal(Tl) confirmó el resultado anterior. A la fecha la colaboración DAMA ha reportado resultados correspondientes a un total de 6 años de exposición con la fase LIBRA más los 6 años anteriores del experimento DAMA/Nal con una exposición acumulada de 1.17 Ton $\times$ año. La evidencia reportada por la colaboración DAMA consiste en una modulación anual de su señal en el intervalo de energías de 2 a 6 keV<sub>ee</sub> con un periodo de un año alcanzando el máximo el 2 de junio y con una significancia estadística de  $8.9\sigma$ .

Si se interpreta de acuerdo con el modelo del halo galáctico estándar esta observación es consistente con dos posibles escenarios: WIMP con masa de  $m_\chi \sim 50$  GeV y  $\sigma \approx 7 \times 10^{-42}$  cm<sup>2</sup> o  $m_\chi$  de 6 a 10 GeV y  $\sigma \approx 10^{-39}$  cm<sup>2</sup>. La comunidad ha hecho notar

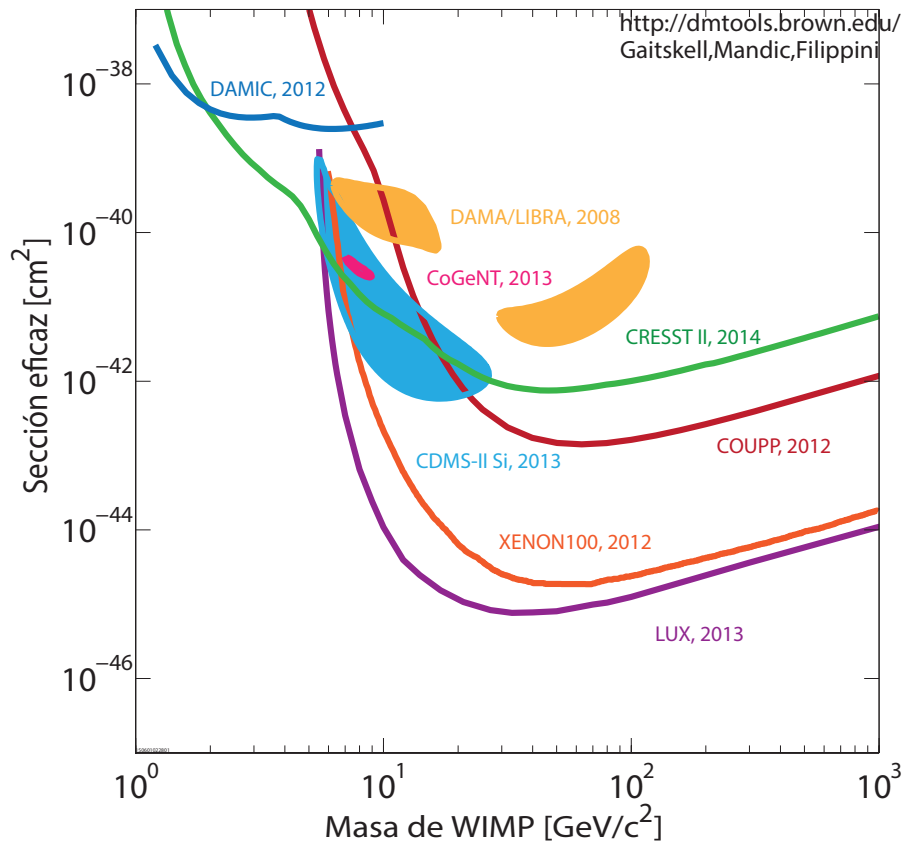


Figura 1.3: Curvas de sensibilidad y contornos cerrados en el espacio de parámetros de  $\sigma$  vs  $M_\chi$  de distintos experimentos.

varias inconsistencias de las observaciones de DAMA en conflicto con esta interpretación, además de que otros experimentos han excluido con alto nivel de confianza las regiones del espacio de parámetros  $\sigma$  vs  $m_\chi$  permitidas por DAMA.

### 1.2.2. CRESST

El experimento CRESST-II [26, 1] (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) utiliza cristales centelladores de  $\text{CaWO}_4$  como blanco para la búsqueda de retrocesos nucleares producidos por WIMP. El experimento mide la energía depositada en la red cristalina (canal de *fonones*) y la luz de centelleo producida (canal *luminoso*) para discriminar los retrocesos nucleares de las abundantes interacciones de electrones y fotones del ambiente. Luego de haber reportado en el 2012 (CRESST-II fase1) un exceso sobre el ruido de fondo como una posible evidencia de WIMP, en 2014 el experimento publicó un análisis basado en un módulo modificado para tener un bajo umbral de energía, el cual es incompatible con el resultado previo, excluyendo al 90 %

de nivel de confianza las regiones previamente permitidas a un nivel de  $2\sigma$ .

### 1.2.3. XENON

La colaboración XENON [28, 1] utiliza detectores de Xe en dos fases (gas y líquido) para la búsqueda de WIMP, los detectores se encuentran instalados en el laboratorio de Gran Sasso. El experimento XENON100 con una masa de 161 kg reportó un resultado basado en 225 días de operación en el que, dentro de una masa fiducial de 34 kg, fueron observados dos eventos en la región de la señal, esperando solo uno evento de ruido. El límite obtenido para los acoplamientos independientes del espín con nucleones, tiene la sección eficaz mínima de  $2.0 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  para una masa de 55 GeV. La comunidad considera que los límites de XENON100 son confiables para masas mayores a 12 GeV. Este mismo conjunto de datos proporciona el mejor límite para los acoplamientos dependientes del espín de WIMP con neutrones. El experimento antecesor, XENON10, usando sólo la señal de ionización, con un rendimiento de ionización de alrededor  $3.5 \text{ e}^-/\text{keV}$  en un umbral de 1.4 keV, estableció un límite más estricto para masas de WIMP por debajo de los 12 GeV, confiable hasta alrededor de 5 GeV. Sin embargo, un reanálisis de los datos mostraron que el límite publicado era demasiado fuerte, lo que ha sido reconocido por los autores. El experimento XENON1t con una masa total de 1 Ton de Xe se encuentra en construcción.

### 1.2.4. CoGeNT

La colaboración CoGeNT [29, 1] (Coherent Germanium Neutrino Technology) utilizó un sólo detector de germanio de 440 g con un umbral efectivo de 400 eV durante 56 días en el laboratorio subterráneo de Soudan en Minnesota a 2100 metros de agua equivalente. Después de aplicar un corte en el tiempo de subida en la forma de los pulsos, el espectro resultante por debajo de 4 keV exhiben un exceso irreducible de eventos con un espectro de energías aproximado a una exponencial, que es compatible con una WIMP ligera con masa en el rango de 7 a 11 GeV y una sección eficaz alrededor de  $10^{-40} \text{ cm}^2$ . Los resultados más recientes indican la presencia de una señal compatible con WIMP en el mismo rango de masas, pero con una sección eficaz central más baja de  $3 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$ .

### 1.2.5. LUX

El detector LUX [27, 1] (Large Underground Xenon experiment) es un detector de Xenón de doble fase que utiliza 370 kg de Xe, localizado a 1480 m bajo tierra en el laboratorio SURF en EE.UU.. La colaboración LUX anunció en 2013 los resultados de una corrida de 85 días con una masa fiducial de 118 kg. Ellos observaron 160 eventos dentro del volumen fiducial, pero realizando cortes de selección no observaron ningún

evento, en la ventana de energía de retroceso nuclear de aproximadamente 4 a 27 keV. El límite obtenido al 90 % C.L. se puede ver en la figura 1.3. Un análisis de máxima verosimilitud muestra que sus datos son consistentes con un fondo de ruido esperado, permitiendo establecer un límite al 90 % C.L., para una dispersión elástica de WIMP-nucleón con un límite superior en la sección eficaz de  $7.6 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$  para una masa de WIMP de 33 GeV.

### 1.2.6. CDMS

La colaboración CDMS [25, 1] (Cryogenic Dark Matter Search) publicó en 2011 resultados utilizando 19 detectores criogénicos de Germanio en la mina de Soudan, Minnesota, abarcando una exposición total de alrededor de 612 kg-día (aproximadamente 300 kg-día fiducial) excluyendo en el canal independiente del espín secciones eficaces WIMP-núcleo mayores a  $3.8 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ , a 90 % CL para una WIMP de 70 GeV.

En Abril de 2013, la colaboración reportó un posible exceso de eventos en los datos obtenidos con detectores de silicio (CDMSII-Si), lo que atrajo una atención particular [21]. En una exposición de 140.2 kg-días se encontraron tres eventos candidatos a WIMP, con un *background* estimado de  $0.41_{-0.28}^{+0.20}(\text{stat.})_{-0.24}^{+0.28}(\text{syst.})$ . Estos resultados corresponden a un valor de  $8.6 \text{ GeV}/c^2$  para la masa de la WIMP y una sección eficaz de interacción de  $1.9 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$ . Las energías de retroceso de los tres candidatos posibles a WIMP son de 8.2 keV, 9.5 keV y 12.3 keV, la señal de ruido de los tres eventos fue de  $6.7 \sigma$ ,  $4.9 \sigma$  y  $5.1 \sigma$  con un threshold de  $4.5 \sigma$ . Los resultados de este experimento son comparables con los resultados obtenidos por los experimentos CoGeNT, pero no con los resultados obtenidos por DAMA-LIBRA.

### 1.2.7. COUPP, PICASSO, PICO

La tecnología de cámaras de burbujas, que cayó en desuso en física de partículas desde los años 70s, retomó utilidad para el experimento COUPP [32, 1] (Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics) el cuál utilizó una cámara de burbujas con 4 kg de  $\text{CF}_3\text{I}$  como detector de WIMP. Este experimento operó a 105 m ( $300 \text{ mwe}^1$ ) en el salón experimental MINOS en el laboratorio Fermilab.

El  $\text{CF}_3\text{I}$  (en su forma de líquido sobrecalentado) es un blanco óptimo para la búsqueda de interacciones de WIMP ya que, por un lado, con el Yodo (I) pueden estudiarse las interacciones independientes del espín, y por otro lado el flúor (F) es un blanco favorable para las interacciones dependientes del espín.

Otro experimento que utilizó las cámaras de burbujas como detector de partículas de MO fue PICASSO [33, 1] (Project In CANada to Search for Supersymmetric Objects) el cuál se instaló en el laboratorio SNOLAB, utilizó un líquido sobrecalentado de  $\text{C}_4\text{F}_{10}$

<sup>1</sup>mwe (*meter water equivalent*) es una medición estandar de atenuación de rayos cósmicos en laboratorios subterráneos. Para roca estandar 1 mwe equivale a 0.35 m.)

como blanco. El detector que se utiliza consiste en 32 módulos individuales, cada uno de los módulos es un contenedor cilíndrico de 4.5 L, por lo que se tiene una masa activa de  $\approx 85$  kg de  $C_4F_{10}$ . En 2012, la colaboración publicó, una tasa del *background* de  $20.0 \pm \begin{matrix} 1.9(\text{estad.}) \\ 1.3(\text{sist.}) \end{matrix}$  cuentas/kg día. El límite que se encontró para la sección eficaz de espín dependiente de WIMP-protón es  $< 3.2 \times 10^{-38}$  cm<sup>2</sup> (al 90 % de nivel de confianza) para una masa de WIMP de 20 GeV.

Las colaboraciones de PICASSO y COUPP se unificaron en una sola colaboración llamada PICO. Recientemente se puso en operación el experimento PICO2L, el cual utiliza una cámara de burbujas con 2 L de  $C_3F_8$ , se tuvo en operación 2.90 kg a 2100 m bajo tierra en el laboratorio SNOLAB. El nivel de *background* se estipuló en 0.008 cuentas/(kg día) [34].

### 1.2.8. DAMIC

La colaboración DAMIC (Dark Matter In CCD) es un proyecto que consiste en la búsqueda de WIMP utilizando CCD (Charge-Coupled Device) como unidades elementales de detección. DAMIC busca WIMP en el orden de bajas masas (1-10 GeV/c<sup>2</sup>). Los dispositivos CCD se encuentran en un blindaje de plomo, éstos se mantienen a una temperatura de 150 °C bajo cero y se conserva un ambiente libre de polvo en un túnel de 2100 m bajo tierra en el laboratorio SNOLAB. Un primer experimento, [23] operó durante 11 meses y acumuló una exposición total de 107 g-día. El resultado obtenido mostró una región permitida al 90 % de confianza para la región de masas por debajo de 4 GeV. En el capítulo 3 se ahondará más sobre este experimento.

Existen diversos experimentos que buscan la detección de MO, éstos utilizan diversos materiales como detectores. Con los resultados obtenidos por estos experimentos se tiene un amplio rango de búsqueda; sin embargo algunos resultados positivos son excluidos por los resultados de otros experimentos que no encontraron ninguna señal en el mismo rango de búsqueda.

## Capítulo 2

# Los CCD como detectores de partículas ionizantes

Los CCD (por sus siglas en inglés *Charge Couple Device*, dispositivo de carga acoplada) fueron inventadas en 1969 por Willard S. Boyle y George E. Smith en los laboratorios Bell. La esencia del diseño fue la capacidad para transferir carga a lo largo de la superficie de un semiconductor a un capacitor de almacenamiento al siguiente [30].

El primer dispositivo experimental consistió en una fila de cuadros de metal muy próximos entre sí, colocados sobre una superficie de silicio accionado eléctricamente por unos enlaces de alambre.

La primera CCD fue fabricada con la tecnología de circuitos integrados, la cual consistía en un registro de desplazamiento de 8 bits. Este dispositivo tenía circuitos de entrada y salida, se utilizó para demostrar su uso como un registro de desplazamiento y como un dispositivo de imagen lineal de ocho píxeles.

El desarrollo de este dispositivo progresó rápidamente, en 1971 investigadores de los laboratorios Bell dirigidos por Michael Tompsett lograron capturar imágenes con dispositivos lineales simples. Al darse cuenta del gran potencial que podría tener este dispositivo se comenzaron a desarrollar comercialmente y en 1974 Fairchild liderado por el investigador Gil Amelio, construyó un dispositivo de 500 elementos lineales y un dispositivo de 2 dimensiones de  $100 \times 100$  píxeles. Posteriormente en 1975 Steven Sasson, un ingeniero eléctrico que trabajaba para la empresa Kodak, inventó la primera cámara digital utilizando un CCD de  $100 \times 100$  píxeles.

En el año 2009 Boyle y Smith fueron galardonados con el Premio Nobel en física por su investigación para la invención de los CCD.

Actualmente los CCD han sido de suma importancia para el desarrollo de la fotografía digital, debido a que se ha ido progresando en la fabricación de dispositivos para que tengan un mayor número de píxeles y con ello una mejor definición al tomar una imagen. El desarrollo de esta tecnología se ha logrado implementar con gran eficiencia en el ámbito de la astronomía, ya que se ha logrado obtener imágenes cada vez más detalladas de la

observaciones que se llevan a cabo en esta área.

El tema de esta tesis es la utilización de los dispositivos CCD como detectores de partículas de materia oscura, por lo que es importante conocer las características por las cuales el uso de estos dispositivos los hace ser un instrumento idóneo para la detección de partículas. En las siguientes secciones se realizará una breve descripción sobre el funcionamiento y la utilidad que se le ha dado a los CCD desde su concepción.

## 2.1. Operación del CCD

Los CCD son dispositivos que se encargan de recolectar la carga generada por procesos de ionización en un arreglo pixelado. Un CCD es una superficie sólida de material semiconductor que está constituida por capacitores acoplados. Para dichos capacitores es comúnmente utilizada la estructura *Metal Oxide Semiconductor* (MOS). Ver Apéndice A.

En el CCD, la información se representa en paquetes de carga (ya sean electrones o huecos). Estas cargas son almacenadas en la región de “depleción” (o agotamiento) de un capacitor MOS, cerca de la barrera de óxido, no conductora. Las cargas se mueven sobre el circuito de los CCD por la colocación de los capacitores MOS muy cerca uno del otro y manipulando los voltajes en las compuertas de los capacitores con el fin de permitir que la carga se vierta de un capacitor al siguiente.

Un amplificador detecta la presencia del paquete de carga, proporcionando un voltaje de salida que puede ser procesado. Los paquetes de carga pueden ser creados mediante la inyección de carga que proviene de un diodo que se encuentra junto a la compuerta del CCD, introduciéndola ópticamente o por ionización en el bulto de Si. El CCD es un dispositivo serial donde los paquetes de carga son leídos uno a la vez.

El CCD más simple es un dispositivo de 3 fases. En este dispositivo las compuertas están acomodadas en paralelo donde cada tercer compuerta esta conectada al mismo controlador de reloj. La celda básica en el CCD, la cual corresponde a un pixel, consiste en un triplete de las compuertas que están en paralelo, cada uno por separado conectado a la fase 1, 2 y 3 de relojes que componen un registro de pixeles. La sección de la imagen formada por el CCD esta cubierta con registros verticales de espacios estrechos. Durante la integración de la carga, dos fases verticales están polarizadas, lo cual resulta en una región que tiene un potencial electrostático mayor que la compuerta vecina polarizada.

La condición de polarización, está bajo las compuertas donde la señal de los electrones se colecta en un pixel cuando el CCD es expuesta a la luz; estas fases son llamadas fases de colección. La fase que se polariza en un potencial inferior, es llamada fase de barrera ya que separa la carga que esta colectada en los pixeles en cada lado de esta fase.

Los registros verticales están separados por barreras de potencial llamadas *channel stops*, que impiden la propagación de la señal de la carga de una columna a otra. Una imagen de un CCD se lee por una sucesión de desplazamientos verticales a través de los



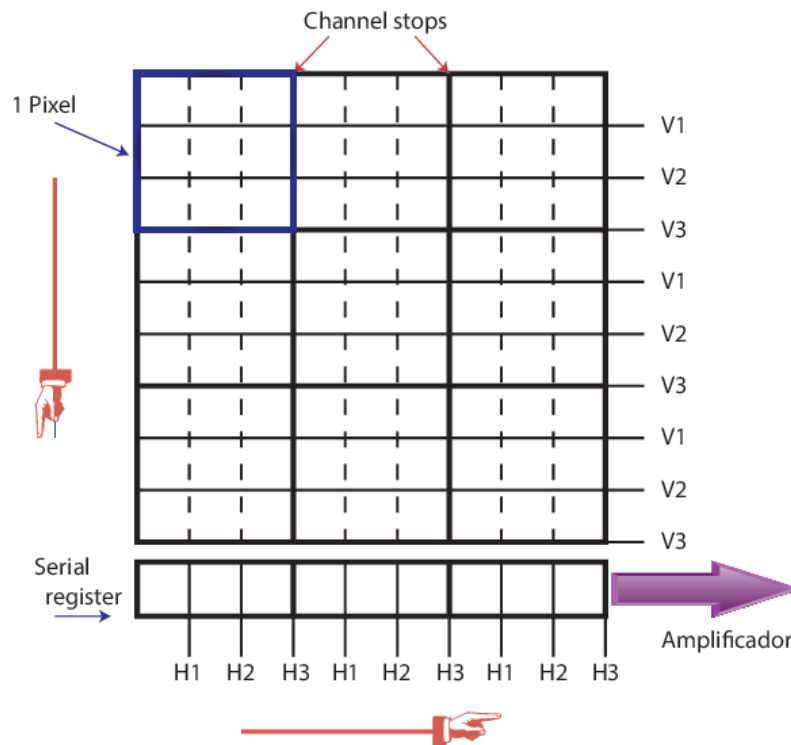


Figura 2.1: Sección del CCD de 3x3 píxeles donde se muestran las barreras de canal (*channel stops*) y su registro horizontal (*serial register*).

registros verticales. Por cada desplazamiento vertical una línea de píxeles es transferida dentro de un registro horizontal (también llamado *serial register*) el cual está orientado en ángulo recto a los registros verticales. Antes de leer la siguiente línea vertical, la carga se mueve en el registro horizontal para posteriormente ser transferida a un amplificador de salida. El amplificador convierte la carga contenida en cada píxel a un voltaje. El dispositivo se lee en serie, línea por línea, píxel por píxel, esto permite representar el lugar de incidencia de las partículas en el dispositivo.

En la figura 2.2, se muestra esquemáticamente como la carga se transfiere en un registro de el CCD de tres fases. En el tiempo  $t_1$ , el potencial de la fase 1 está en alto, formando pozos colectores bajo las compuertas. Los electrones generados en las fases de barrera (fases 2 y 3) pueden difundirse rápidamente dentro de la fase 1 debido a que su potencial es mayor.

En el tiempo  $t_2$  la transferencia de carga comienza, lo cual implica la creación de pozos y barreras de potencial mediante la aplicación de voltajes apropiados a las compuertas en los tiempos de secuencia adecuados. Durante  $t_2$ , el reloj de la fase 2 va arriba, formando el mismo pozo de potencial bajo la fase 2 que existía bajo la fase 1. Ahora, la señal de la carga colectada se separará entre los dos pozos. Existe una barrera de potencial entre los píxeles bajo la fase 3 debido a que ésta se mantiene en un potencial inferior. En el

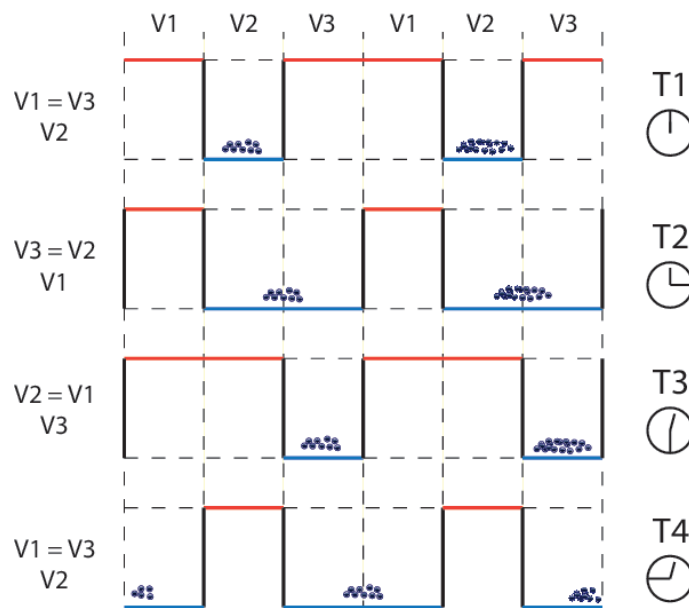
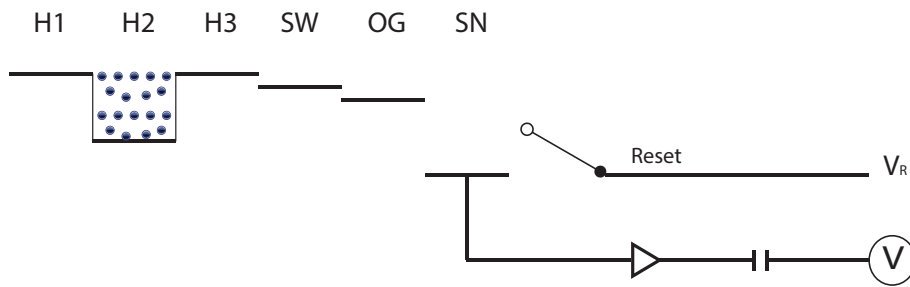


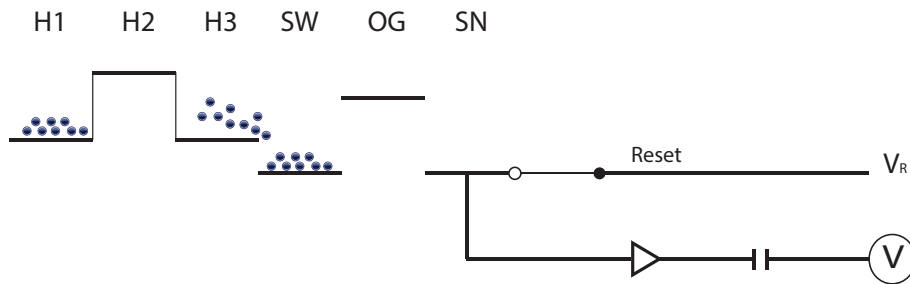
Figura 2.2: Secuencia de cambios en el potencial de cada pixel (voltajes de reloj), para mover la carga de pixel a pixel.

tiempo  $t_3$ , la fase 1 se regresa a tierra, lo cual fuerza a que la carga sea transferida a la fase 2. En el tiempo  $t_4$  de igual manera, la carga es transferida de la fase 2 a la fase 3. Este proceso continua hasta que la carga se haya movido todo un pixel en un ciclo de reloj de tres fases proveniente de izquierda a derecha.

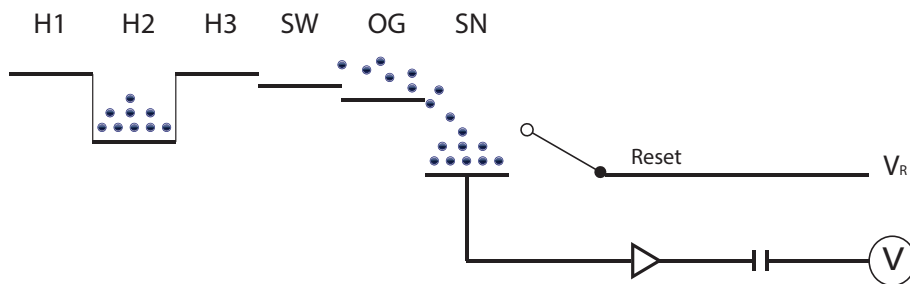
En la figura 2.3 se muestra la manera en la que es transportada la carga del último pixel de el CCD a un amplificador. Por un lado en la figura 2.3a se muestra que mientras la carga que esta siendo transportada por la diferencia de voltaje en el canal horizontal del serial register del último pixel de el CCD, el amplificador aún no tiene nada que leer del SN (*Sending Node*). En la figura 2.3b se observa que la carga es transportada del último pozo de potencial del último pixel de el CCD al SW (*Suming Well*), mientras que el amplificador lee el voltaje de *Reset*. La figura 2.3c muestra la transferencia de carga del SW al OG (*Output Gate*) y este a su vez que transfiere la carga al SN para posteriormente poder ser leída por el amplificador, en este caso el voltaje de reset se encuentra abierto. Finalmente en la figura 2.3d se muestra la repetición del proceso.



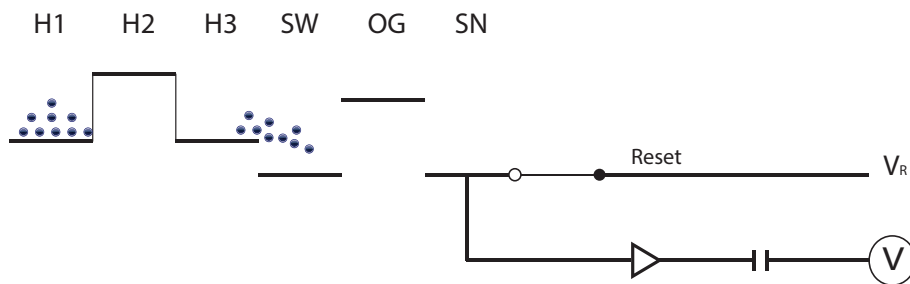
(a) Transferencia de carga en el serial register.



(b) Transferencia de carga al sumingwell y lectura del voltaje de reset.



(c) Transferencia de carga del sumingwell al outputgate y finalmente al SN, donde la carga es leída por el amplificador.



(d) Repetición del proceso

Figura 2.3: La carga es transferida del último pixel del registro horizontal al amplificador para ser leída.

### 2.1.1. Funciones de desempeño

Los CCD deben realizar cuatro funciones principales para lograr obtener una imagen, dichas funciones son:

1. Generación de carga.
2. Recolección de carga.
3. Transferencia de carga.
4. Medición de carga.

A continuación se describirán brevemente cada una de las funciones anteriormente mencionadas:

#### Generación de carga

La generación de carga es la capacidad de el CCD para generar por ionización, una pareja electrón-hueco. La eficiencia para generar carga se describe por una función llamada “*quantum efficiency*” (QE), la cual es la fracción de partículas incidentes que producen una carga útil en el sustrato de silicio. La generación de carga toma lugar en el cuerpo de silicio de el CCD. La QE se mide usualmente usando fotones y depende de su longitud de onda.

Los fotones que llegan a interactuar con suficiente energía pueden excitar un electrón dentro de la banda de conducción, creando un par electrón-agujero. El par electrón-agujero que se creó es libre para moverse y esparcirse por la estructura de silicio.

#### Recolección de carga

Después de haber generado carga, el siguiente paso es la recolección de la carga, el CCD tiene la habilidad de poder producir una imagen a partir de los electrones generados. Hay tres parámetros que describen este proceso: el número de pixeles contenidos en el sustrato, la capacidad de acumular electrones en cada pixel y la capacidad del pixel para coleccionar electrones eficientemente cuando estos son generados.

Idealmente, los electrones son coleccionados por un pedazo de pixel sin esparcirse dentro de los pixeles vecinos. La difusión dentro de otros pixeles, genera una imagen fuera de foco. La confinación de la carga en un pixel individual es un problema de sensibilidad. Los electrones generados lejos de una compuerta y un campo eléctrico débil, tienen una alta probabilidad de difusión dentro de pixeles vecinos. Para la iluminación frontal de el CCD el problema de la difusión es más aparente cuando se toman imágenes en el infrarrojo cercano, ya que los fotones de longitudes de onda largas penetran muy profundo dentro de el CCD. Los dispositivos iluminados por la parte posterior, que por diseño tienen luz cayendo en la superficie del silicio lejos de las compuertas, también experimentan una fuga si no tiene el grosor adecuado.

### Transferencia de carga

La siguiente función es la transferencia de la carga, la cual se efectúa a través de la manipulación de voltajes en una secuencia paralela de compuertas que forman un registro de el CCD. Para mediciones científicas es importante perder la menor cantidad posible de carga durante el proceso de transferencia.

La carga es transferida debido a campos eléctricos entre las fases, la difusión térmica y la corriente inducida. La importancia de cada uno de estos efectos depende de la cantidad de carga que va a ser transferida.

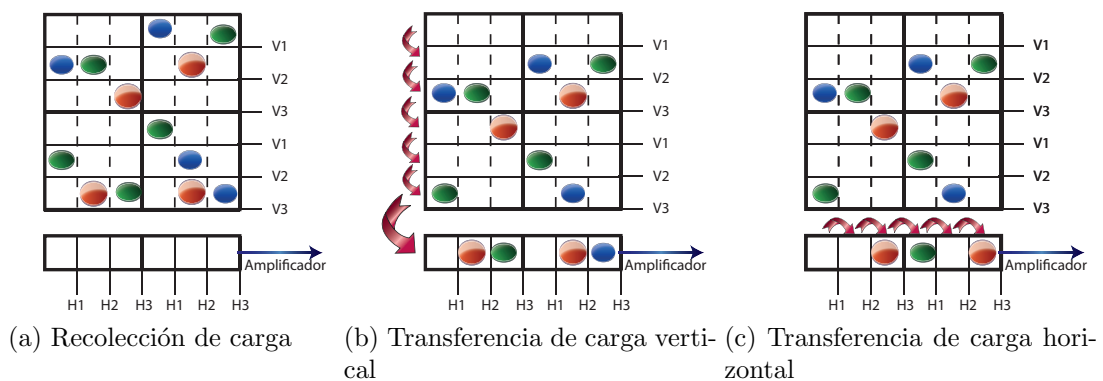


Figura 2.4: Secuencia de la transferencia de carga depositada en los píxeles de el CCD.

### Medición de carga

El último paso que ocurre en el CCD para obtener una imagen es la detección y medición de la carga que se encuentra recolectada en cada uno de los píxeles. Esto se logra vertiendo la carga sobre un capacitor conectado a un amplificador MOSFET de salida. El amplificador MOSFET es el único elemento activo que requiere una fuente de poder. En sí, el arreglo de píxeles en el CCD está fabricado de capacitores MOS. El amplificador de salida genera un voltaje para cada pixel proporcional a la señal de carga transferida.

La única fuente de ruido que no puede ser completamente eliminada proviene del amplificador de salida, este ruido se genera por las fluctuaciones aleatorias en la corriente que fluye a través del transistor.

## 2.2. El pixel de una CCD científica

Como se mencionó en secciones anteriores, los CCD para uso científico han sido utilizadas en el campo de la astronomía, en imágenes de rayos X, entre otras aplicaciones

de detección de partículas. La alta eficiencia de detección, el bajo nivel de ruido, la buena resolución espacial, la baja corriente oscura y la alta eficiencia de transferencia de carga, dan como resultado un excelente rendimiento para la detección de partículas ionizantes.

Los detectores CCD que se empezaron a utilizar para el experimento DAMIC eran las mismas que se utilizaron para el experimento DECam. Estas CCD son fabricadas por el *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) y son caracterizadas en el laboratorio *Fermilab*. Los CCD del experimento DECam tenían  $250\ \mu\text{m}$  de espesor fabricadas en silicio de alta resistividad, eran de 8 millones de píxeles y de  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  cada una. Tenían  $10\ \text{k}\Omega\text{-cm}$  de resistividad correspondiente a una densidad de dopante alrededor de  $10^{11}\ \text{cm}^{-3}$  lo que permite una operación total de agotamiento, para voltajes de polarización de  $\sim 20\text{-}25\ \text{V}$  para dispositivos de  $250\ \mu\text{m}$  de espesor. El efecto del voltaje de polarización es remover los electrones móviles provenientes del pequeño número de átomos de dopante de fósforo en el silicio, creando un campo eléctrico debido a los átomos del dopante que ahora están ionizados y cargados positivamente. El campo se extiende esencialmente a todo el volumen hasta llegar a la parte trasera, con esto se tiene el agotamiento en el volumen del sustrato del CCD. La figura 2.5b muestra el potencial de la distribución del campo en 2 dimensiones en el silicio.

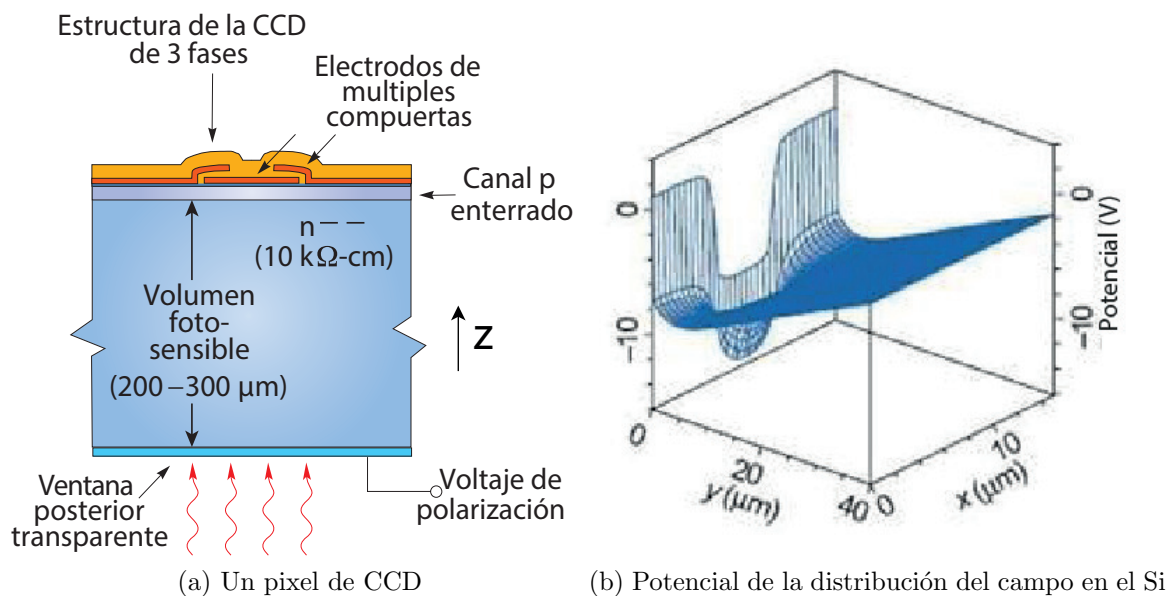


Figura 2.5: Los portadores de carga (huecos) generados por ionización en la región de depección son arrastrados hacia las compuertas y atrapados en el pozo de potencial formado cerca de ellas.

Cuando una partícula ionizante penetra en un pixel del CCD se crea un par electrón-hueco por cada 3.2 eV de energía depositada. Bajo la influencia del campo eléctrico, los huecos que se producen cerca de la superficie posterior, viajarán por todo el espesor

del dispositivo hasta llegar al pozo de potencial cercano a las compuertas. Durante este tránsito dentro de la región de “depleción”, un hueco también puede moverse en la dirección perpendicular a los límites de los pixeles, causando el efecto de difusión de carga. El estudio del tamaño de las trazas de rayos X en un CCD que es iluminado por la parte trasera, proporciona una medición de la difusión lateral. Para dispositivos CCD que son iluminados por la parte trasera, un rayo X de 5.9 keV penetrará sólo 20  $\mu\text{m}$  dentro del volumen de silicio, antes produciendo carga ionizada. La mayor parte de la carga viajará por el espesor del Si antes de que pueda ser almacenado bajo el pozo de potencial para lecturas posteriores. Como resultado de este proceso los rayos X de  $^{55}\text{Fe}$  producirán trazas limitadas por difusión en el detector, correspondiendo al conocimiento de la energía depositada. La medida de la difusión de la carga en estas condiciones es 2  $\mu\text{m}$ .

Partículas más energéticas como muones ( $\mu$ ) o partículas  $\beta$  se pueden distinguir de los fotones, debido a las trazas que producen en la CCD. Cuando una partícula ionizante pesada (muy energética) golpea al detector, crea una columna densa de pares electrón-hueco, los cuales se considerarán como plasma si la longitud de Debye<sup>1</sup> es pequeña comparada con las dimensiones de la columna. Cuando se alcanza la condición de plasma hay tres efectos que debilitan la densidad de carga:

1. Erosión en los bordes de la nube de carga por la presencia del campo externo.
2. Difusión ambipolar de las cargas dentro de la columna, hacia las compuertas.
3. Recombinación de carga dentro de la columna de plasma.

El tamaño lateral de la distribución de carga medida en un detector pixelado dependerá de estos efectos, junto con la difusión de carga.

El campo eléctrico creado por el voltaje externo no puede penetrar en la nube de alta densidad de pares electrón-hueco formado dentro de la columna de plasma y los portadores se difundirán lateralmente hacia las regiones de menor concentración de carga en el silicio. Este proceso contribuye a la difusión de carga lateral aumentando el tamaño de los cúmulos de carga reconstruida.

---

<sup>1</sup>La longitud de Debye es la distancia sobre la cual puede ocurrir una separación significativa entre los portadores de carga móviles que generan un apantallamiento de campos eléctricos en los plasmas u otros conductores.





# Capítulo 3

## El experimento DAMIC

El experimento DAMIC es el primero en utilizar los CCD como detectores para realizar una búsqueda de materia oscura. Un CCD es capaz de detectar energía de ionización depositada en un sólo pixel por debajo de los 50 eV y puede ser calibrada en energías de 0.3 keV a 60 keV. Las CCD son detectores de partículas totalmente funcionales, con una respuesta uniforme en todo el blanco de silicio, tiene una buena resolución (fano<sup>1</sup> 0.16) y una notable respuesta lineal para la energía depositada por electrones. Además tiene la capacidad de localizar la profundidad de las interacciones de las partículas dentro del blanco de silicio. En las secciones posteriores se discutirá el modo de funcionamiento y las capacidades inigualables de los CCD y cómo pueden ser explotadas para caracterizar y disminuir el nivel de eventos de ruido (o *background*) para la búsqueda de materia oscura. En particular el contenido de las secciones 3.1 a 3.4 se han basado en la referencia [31], donde se pueden encontrar más detalles.

### 3.1. Los CCD de DAMIC

Los CCD para el experimento DAMIC están basadas en el diseño realizado por el *Berkeley National Laboratory* (EE.UU) para la cámara del experimento *Dark Energy Survey* (DES) *camera* (DECam) [41], dicho experimento explora el reconocimiento de energía oscura. Éstas están provistas de una compuerta con una estructura de polisilicato de tres fases con un canal-p enterrado. El tamaño de un pixel es de  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$  y la región activa del detector, hecha de silicio tipo-n, tiene una alta resistividad (10-20 k $\Omega$  cm) con cientos de micras ( $\mu\text{m}$ ) de espesor. La alta resistividad del silicio permite donadores de baja densidad en el sustrato ( $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ). Los CCD son típicamente de 8 o 16 millones de pixeles (Mpíxeles) con un área superficial de decenas de  $\text{cm}^2$ . En la

---

<sup>1</sup>El factor de fano es la dispersión de una distribución de probabilidad de una fluctuación de una carga eléctrica obtenida en un detector. Se define como la varianza ( $\sigma^2$ ) entre la media de un proceso aleatorio en una cierta ventana temporal.

figura 3.1 se ilustra la sección transversal de un pixel de un CCD, junto con un esbozo que representa el principio de la detección de una WIMP.

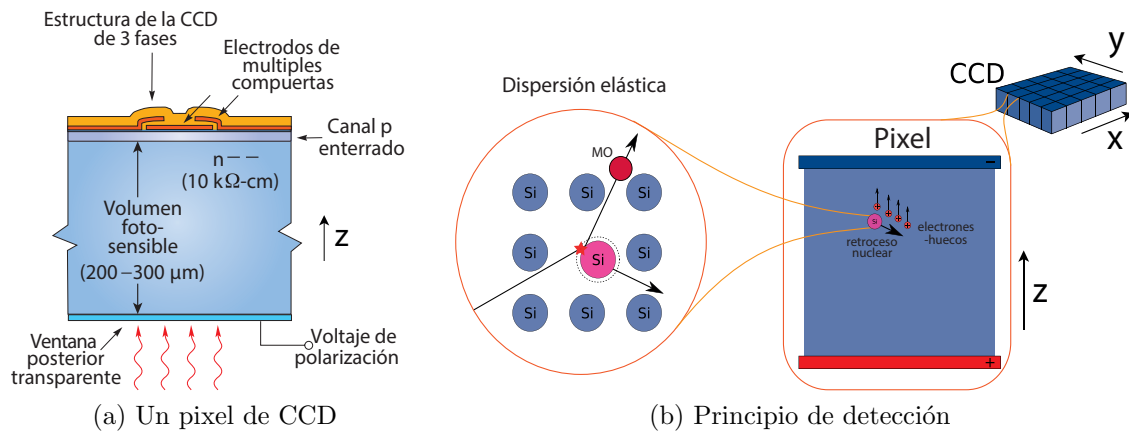


Figura 3.1: a) Diagrama de la sección eficaz de un pixel iluminado por la parte posterior de un CCD [41]. La parte posterior de la ventana incluye un recubrimiento antirreflectante de óxido de estaño y de indio (ITO, *indium-tin-oxide*), el cual contiene un isótopo radiactivo ( $^{115}\text{In}$ ). b) La dispersión de una partícula de materia oscura con un núcleo de Si, lleva a la ionización que se produce en el sustrato de silicio. Los portadores de carga, se encuentran a lo largo de la dirección  $z$  y son colectados en las compuertas del CCD.

Cuando se opera en modo de “depleción” total, la ionización producida en la región activa es transferida a lo largo de la dirección del campo eléctrico (eje  $z$ ). La carga es recolectada y almacenada cerca de la unión p-n, a menos de un micrómetro por debajo de la compuerta. Debido a la movilidad de los portadores de carga, la carga ionizada se difunde lateralmente conforme es desplazada, adquiriendo una varianza espacial que es proporcional al tiempo de tránsito. La carga producida por las interacciones más cercanas a la parte posterior del CCD tendrá tiempos de tránsito más largos, provocando una mayor difusión lateral. A partir de la difusión lateral de la deposición de carga en el plano  $x$ - $y$  del CCD, se puede reconstruir la profundidad de la interacción. La figura 3.2, muestra la difusión de la carga para una partícula puntual que interactuó con el CCD.

## 3.2. Umbral de energía

Debido a que la capacitancia de un pixel del CCD es muy pequeña, es posible medir sólo algunos electrones de la carga recolectada en la compuerta. En DAMIC, el CCD opera al aplicar una polarización al sustrato a través de la región activa y la recolección de la carga ionizada durante unas horas. Posteriormente se realiza la lectura, proceso donde la carga se va desplazando fila por fila y la señal es extraída a través del registro serial en un costado del CCD. Los datos son digitalizados y la carga de cada pixel es

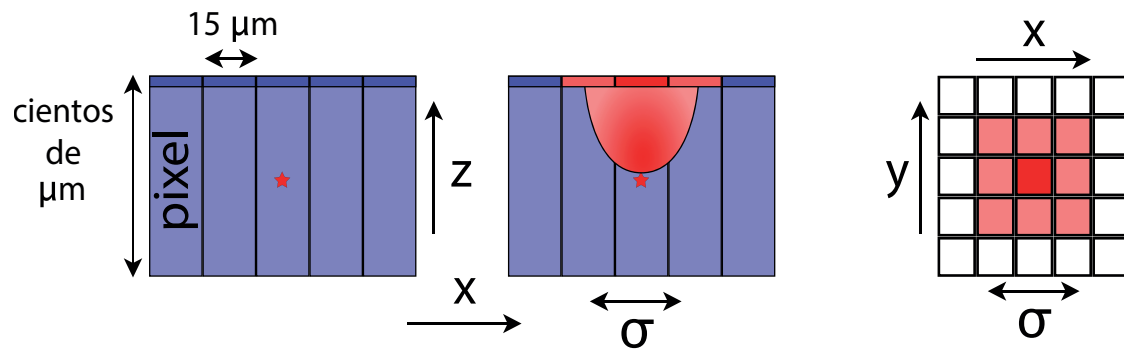


Figura 3.2: Descripción de la interacción de una partícula puntual dentro del volumen del CCD. La carga de la deriva a lo largo del eje  $z$  se difunde a medida que viaja hacia las compuertas. Esto conduce a una distribución de carga en el plano  $x$ - $y$  cuya varianza ( $\sigma^2$ ) es proporcional al tiempo de tránsito de la carga.

medida. La tasa de lectura es de  $\sim 1$  Mpixel por minuto y el RMS en la medición de cada pixel es de  $\sim 2 e^-$ . Considerando que la energía promedio para crear un par electrón-agujero en el silicio es de 3.62 eV, esto corresponde a 7.2 eV. A partir de la carga medida en los pixeles se construye una imagen que contiene todas las energías de ionización que fueron depositadas dentro del CCD durante el tiempo de exposición.

El número de electrones producidos por excitaciones térmicas en el sustrato de silicio (corriente oscura) colectados en cada pixel, introducen ruido de Poisson en su valor y es proporcional al tiempo de exposición. Para un CCD del experimento DAMIC de  $250 \mu\text{m}$  funcionando a 133 K, la corriente oscura es típicamente de  $\sim 1 e^-/\text{pix}/\text{día}$ . La duración de la exposición de una imagen en DAMIC es de pocas horas, por lo que el ruido de lectura es la fuente dominante de ruido.

En la figura 3.3a se presenta un histograma de todos los valores de los pixeles de una imagen después de que el valor de la mediana de los pixeles ha sido sustraído sobre varias imágenes (*master bias subtract image*, ver sección 4.2). La gaussiana centrada en cero de la figura 3.3a representa el ruido de lectura, mientras que la cola lateral a mano derecha, corresponde a los pixeles donde la carga ha sido colectada.

Dado que cada imagen contiene millones de pixeles, para lograr identificar un pixel que haya recolectado alguna carga, se impone la condición de que el valor del pixel sea  $5-6 \sigma$  por encima del nivel de ruido. Esto establece el umbral nominal de DAMIC en  $\sim 40 - 50$  eV. El umbral para un cúmulo de pixeles es variable y depende del número de pixeles en el cúmulo, y debido al efecto de difusión de la carga, de la profundidad de la interacción. Para un algoritmo en el que el "pixel semilla" del cúmulo tiene una carga 3 sigma por encima del ruido, el umbral sería de 21.6 eV.

En la figura 3.3b se pueden observar trazas de distintos tipos de partículas. Los electrones de baja energía y los retrocesos nucleares, cuya longitud física de su traza es  $< 15 \mu\text{m}$ , producen cúmulos limitados por difusión, donde la extensión espacial del

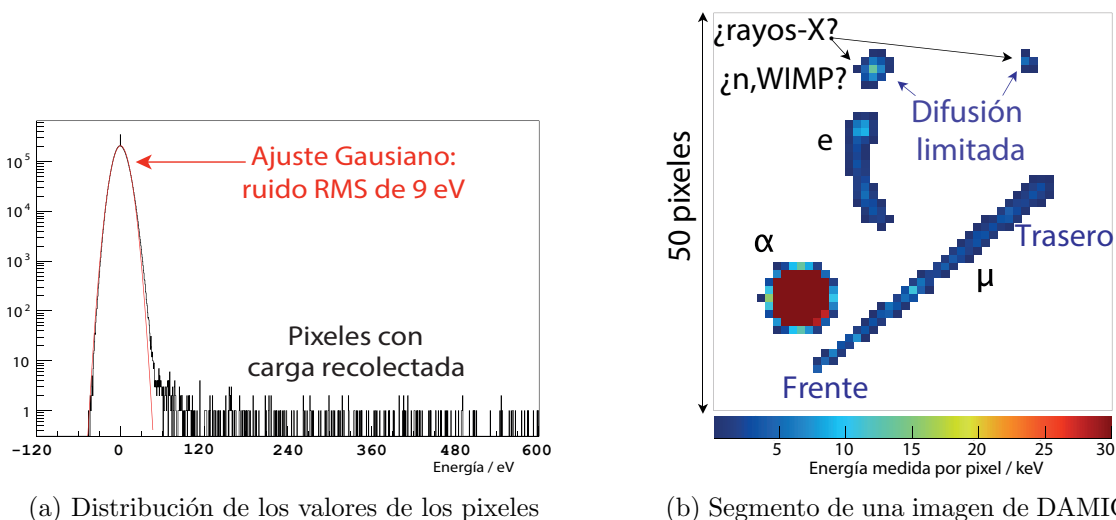


Figura 3.3: a) Histograma de todos los valores de los pixeles en una imagen. El ruido RMS corresponde a  $2.5 e^-$  b) Segmento de una imagen de DAMIC de  $50 \times 50$  pixeles.

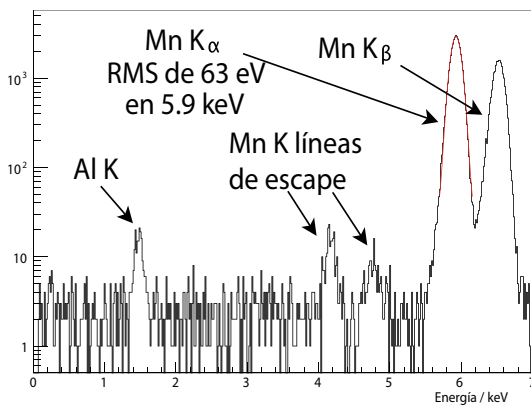
cúmulo está dominada por difusión de carga (figura 3.2). Los electrones de energía más alta (e) provenientes de dispersión Compton o de decaimiento  $\beta$ , conducen a trazas extendidas. Las partículas  $\alpha$  en el volumen o las provenientes de la parte trasera del CCD, producen grandes estructuras redondas debido al efecto de plasma (ver sección 2.3) [43]. Los muones cósmicos ( $\mu$ ) penetran a través del CCD, dejando una traza recta. La orientación de la traza se identifica inmediatamente por su ancho, el lado de la traza que está en la parte posterior del CCD es mucho más amplia que el lado de la parte frontal, debido a la difusión de la carga.

Debido a la manera de operar del CCD, no hay registro del tiempo asociado a cada una de las deposiciones de energía que fueron detectadas. Otra distinción notable es que, a diferencia de otros detectores de partículas, el número de eventos del ruido instrumental en una muestra de eventos, no es proporcional a la duración de la exposición, pero si al número de veces que el CCD ha sido leído.

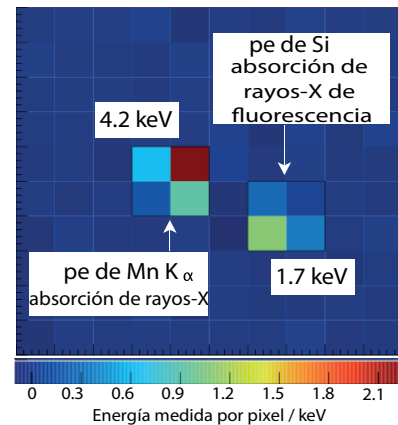
### 3.3. Respuesta a la deposición de energía

La pérdida de carga en un CCD está dominada por la ineficiencia de la transferencia de carga (CTI, *charge transfer inefficiency*) cuando el CCD es leído. Este valor es generalmente  $\sim 1 \times 10^{-6}$  para un CCD de la DECam [41]. De este modo, en un CCD de 8 Mpíxeles los píxeles más lejanos sufren una pérdida  $< 1\%$  en su carga. La capacidad del pozo en un píxel de un CCD es generalmente  $> 10^5$  electrones. Por lo tanto, un píxel puede coleccionar hasta una carga equivalente a  $\sim 360 \text{ keV}_{ee}$ . En la práctica, la energía

máxima que puede ser medida en un pixel está determinada por el rango dinámico del digitalizador utilizado. Este valor es 30 keV en la configuración de lectura estándar de un CCD en DAMIC. Debido a la difusión de carga y a la  $dE/dx$  relativamente baja para los electrones, es poco probable que un electrón ionizado deposite  $>30$  keV en un pixel, por lo que la medición de la energía depositada por un electrón en el CCD no tiene límite. Es más probable que los retrocesos nucleares alcancen este valor máximo, debido a que su  $dE/dx$  es mayor, pero considerando su baja eficiencia de ionización [44], la energía de ionización de los retrocesos nucleares puede ser medida con precisión hasta  $100 \text{ keV}_r$ .



(a) Espectro proveniente de una fuente de  $^{55}\text{Fe}$



(b) Observación de un evento de escape

Figura 3.4: a) Espectro cuando el CCD es iluminada, desde la parte posterior, con una fuente de  $^{55}\text{Fe}$ . b) En varias ocasiones ocurre que la fluorescencia de los rayos X se desplaza lo suficiente dentro del CCD de modo que la energía depositada en los pixeles fuera de la primera interacción de rayos X, conduce a dos cúmulos distinguibles.

La medición del espectro de energía por un CCD de DAMIC de una exposición con una fuente de  $^{55}\text{Fe}$  se muestra en la figura 3.4. También se realizan calibraciones con rayos X de fluorescencia provenientes de un blanco de Kapton expuesto a una fuente de  $^{55}\text{Fe}$  o a las partículas  $\alpha$  provenientes de  $^{241}\text{Am}$ . Es posible la detección de la línea  $K_\alpha$  del carbono de  $0.28 \text{ keV}$  ( $\lambda=0.14 \mu\text{m}$ ) gracias a que la superficie inerte del CCD sólo tiene  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  de espesor. Para estas calibraciones, el CCD fue iluminada por la parte posterior, lo cual, debido a la difusión de carga, conduce a un rango dinámico más amplio y con peor resolución de la energía que si el CCD hubiera sido iluminada desde la parte frontal.

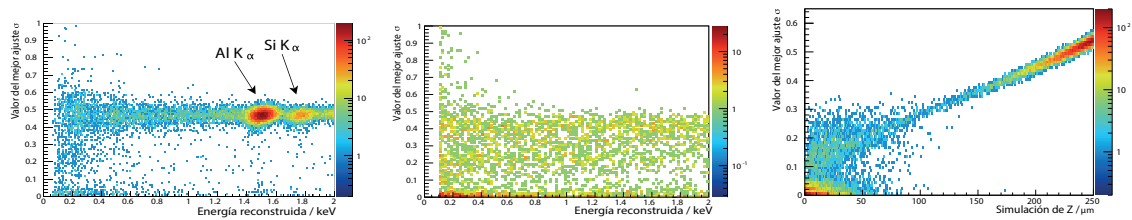
Como el CCD es operada en agotamiento o “depleción” total, no hay regiones libres de campo que puedan conducir a una recolección parcial de la carga. Las formas de línea y los espectros observados para las fuentes de rayos X colocadas en la parte frontal y en la parte posterior de la CCD, son consistentes con la ausencia de cualquier población de

eventos con una pérdida significativa de carga recolectada.

Es bien conocido que la eficiencia de la ionización de los retrocesos nucleares es significativamente diferente que la de los electrones. Se han hecho mediciones anteriormente hasta energías de 3-4 keV<sub>r</sub> [44, 45], produciendo resultados de acuerdo con la teoría de Linhard [46]. De acuerdo a esto, el umbral nominal de DAMIC de 50 eV<sub>ee</sub> es  $\sim 0.5$  keV<sub>r</sub>. Dada la significativa incertidumbre en esta extrapolación y la importancia de una calibración precisa para retrocesos nucleares en las búsquedas de materia oscura, se está planeando una serie de experimentos para medir este valor del umbral.

### 3.4. Reconstrucción de la posición

Debido a la naturaleza pixelada del CCD, la mejor estimación de las coordenadas  $x$  y  $y$  de una interacción puntual, se puede obtener fácilmente a partir de la media, pesada por la carga, de las coordenadas  $x$  y  $y$  de los pixeles con carga recolectada. En el peor de los casos, donde toda la carga es colectada en un pixel, la resolución en los valores de las coordenadas  $x$  y  $y$  es de 15  $\mu\text{m}$ . Para cúmulos donde la carga está distribuida sobre muchos pixeles, la resolución obtenida es menor a 10  $\mu\text{m}$ . Las observaciones de los eventos de escape<sup>2</sup> dentro del CCD (figura 3.4b) es una demostración de su capacidad para resolver deposiciones de energía separadas por decenas de micras.



(a) Rayos X de baja energía (b) Fuente de  $^{252}\text{Cf}$  (uniforme) (c) La  $\sigma$  espacial vs la interacción de fondo ( $z$ ) de  $\text{K}_{\alpha}$  de Mn

Figura 3.5: a) Anchura ajustada  $\sigma$  contra la energía, para cúmulos detectados cuando el CCD es iluminado desde la parte posterior con rayos X fluorescentes de un blanco de Kapton expuesto a una fuente de  $^{55}\text{Fe}$ . b) Anchura ajustada  $\sigma$  contra la energía de electrones equivalentes, para cúmulos detectados cuando el CCD es expuesta a neutrones rápidos provenientes de una fuente de  $^{252}\text{Cf}$ . c) Relación entre la anchura ajustada  $\sigma$  y la profundidad de interacción para un CCD de 250  $\mu\text{m}$ .

Como se discutió anteriormente, la dispersión espacial ( $\sigma$ ) en un cúmulo limitado por difusión, puede utilizarse para reconstruir la profundidad (coordenada  $z$ ) dentro de la región activa donde ocurrió la deposición. Para estimar el mejor valor para  $\sigma$ , se

<sup>2</sup>Emisión de rayos X de la línea capa  $\alpha$  del silicio por excitación con partículas  $\alpha$ , en donde el rayo X deposita su energía a una distancia de varios pixeles del núcleo de silicio que le dio origen.

llevó a cabo un ajuste para todos los pixeles dentro de un radio de cuatro pixeles a partir del pixel en el cúmulo, con el valor más grande, suponiendo una distribución gaussiana en dos dimensiones, con  $\sigma$  y los valores  $x$  y  $y$  de la media como parámetros libres y considerando el ruido de lectura en cada pixel cuando se hace el ajuste. En la figura 3.5c presenta la relación del ajuste de  $\sigma$  y la profundidad a la que tuvo lugar la interacción,  $\sigma$  fue obtenida tras realizar el ajuste en cúmulos simulados, donde la  $\sigma$  simulada se calculó a partir de la profundidad de interacción ( $z$ ). La profundidad de interacción se obtuvo de una simulación Monte Carlo (MCNP) de una fuente de  $^{55}\text{Fe}$  en un blanco de Si con la geometría del CCD. Se recupera la correlación positiva esperada entre  $\sigma$  y  $z$ . Los cúmulos en la parte posterior del CCD pueden ser identificados fácilmente pues  $\sigma$  se obtiene de manera confiable. Para los casos donde la carga esta distribuida sobre muy pocos pixeles,  $\sigma$  no se puede medir con precisión, lo que lleva a un empeoramiento de la determinación de  $\sigma$  en valores pequeños de  $z$ .

La figura 3.5b muestra el mejor ajuste de la distribución  $\sigma$  como función de la energía, para los datos de calibración con rayos X de baja energía que inciden en la parte posterior del CCD y para los eventos de una fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , que se espera se distribuyan uniformemente en el volumen.

### 3.5. Evolución del montaje de DAMIC en SNO-LAB

El experimento DAMIC surgió de la idea de implementar los CCD como detectores de partículas. Se realizó un prototipo del experimento el cual fue puesto en operación en el salón de MINOS (un salón experimental en el laboratorio Fermilab). Posterior a este primer prototipo, se decidió colocar un montaje que fuera capaz de contener hasta 12 dispositivos CCD, en un lugar de gran profundidad.

#### Diciembre de 2012. Instalación de DAMIC en SNOLAB

El experimento DAMIC fue puesto en operación en el laboratorio SNOLAB el 2 de diciembre de 2012. El montaje del experimento, se encuentra localizado a una profundidad de 2100 m en el salón experimental "*J-Drift*". La figura 3.6 muestra la ubicación del experimento DAMIC en el laboratorio SNOLAB.

El montaje del experimento consiste en una caja de cobre que contiene a los CCD (figura 3.7a), la cual está colocada dentro de una cámara de cobre donde se mantiene en un vacío de  $10^{-7}$  torr. El primer prototipo de la caja de cobre era lo suficientemente grande como para acomodar 12 dispositivos CCD (figura 3.8b). Dentro de la cámara (por encima de la caja de CCD), se encuentra un bloque de plomo, que sirve de escudo contra la radiación proveniente de la placa de interface de vacío (VIB, *vacuum-interface board*) que se encuentra inmediatamente arriba de el. Hay un agujero en el escudo, atravesado

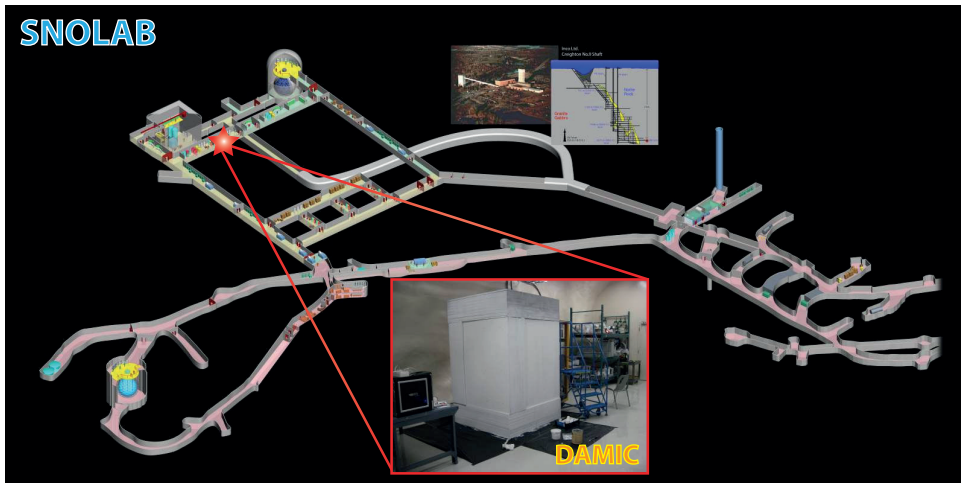


Figura 3.6: Localización del experimento DAMIC en el salón experimental *J-Drift* del laboratorio SNOLAB.

por un dedo frío de cobre, que mantiene a la caja de cobre de los CCD operando a una temperatura de 133 K. La cámara se coloca dentro de un escudo de plomo de 21 cm para detener a los rayos  $\gamma$  externos. Fuera del escudo de plomo hay 42 cm de polietileno de alta densidad para atenuar los neutrones externos. En un lado del escudamiento hay un agujero de unas cuantas pulgadas de diámetro, a través del cual los cables de señal de la placa de VIB van hacia el exterior de la caja de la electrónica (figura 3.7b).

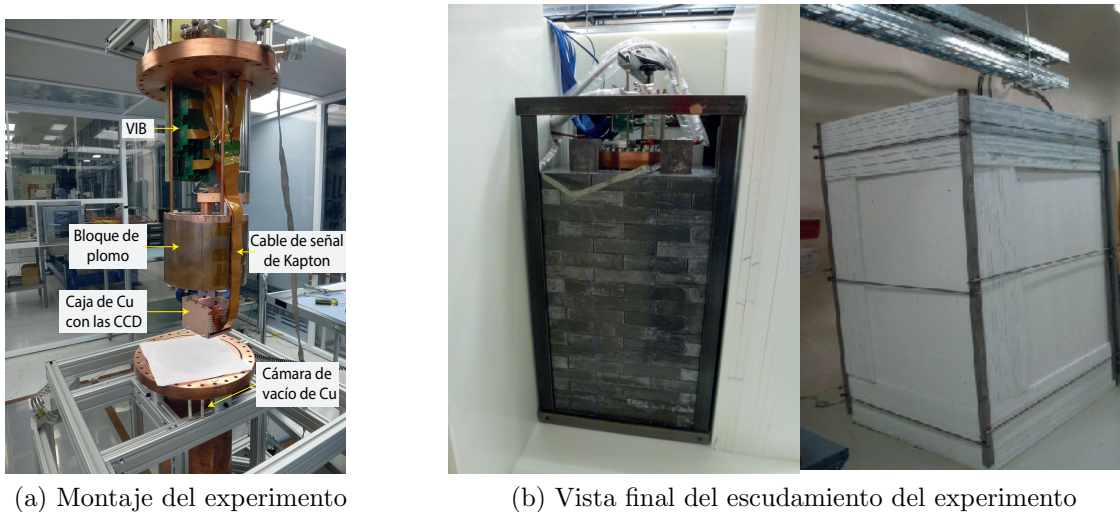
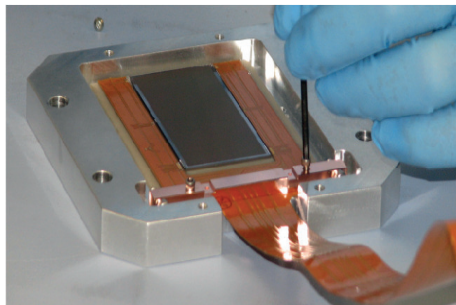


Figura 3.7: a) Montaje que contiene la caja de cobre de los CCD y su electrónica correspondiente. b) Vista final del escudamiento del experimento con plomo y polietileno.

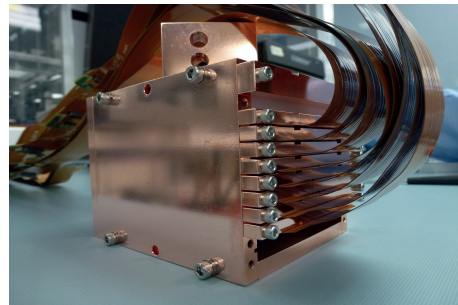
En la primera versión del experimento DAMIC en SNOLAB, se colocaron 8 CCD de



dimensiones  $6\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ , de 8 Mpíxeles (cada píxel es de  $15\text{ }\mu\text{m} \times 15\text{ }\mu\text{m}$ ); 6 de estas CCD tenían  $250\text{ }\mu\text{m}$  de espesor y 2 CCD de  $850\text{ }\mu\text{m}$  de espesor. En la figura 3.8a se muestra un CCD de  $250\text{ }\mu\text{m}$  de espesor, con una masa de 1 g. La temperatura a la que operan los dispositivos CCD es de 133 K. En este primer montaje los CCD estaban asentados en un soporte de nitrato de aluminio (AlN).



(a) CCD de DAMIC



(b) Caja de los CCD

Figura 3.8: a) CCD utilizada en el experimento DAMIC, se encuentra sobre una cerámica AlN. b) Caja de cobre que contiene las primeras 8 CCD que serán utilizadas para una primera corrida del experimento después de su instalación en SNOLAB.

### Junio de 2013. Modificación al soporte de AlN

Posterior al encendido de DAMIC en SNOLAB, se realizaron algunas exposiciones, en estas se observó un *background* de  $5 \times 10^3$  eventos/(keV<sub>ee</sub> kg día) en el rango de bajas energías ( $<10\text{ keV}_{ee}$ ). Tras un análisis más detallado sobre este nivel de ruido, se observaron rayos característicos provenientes de la cadena de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  el cual provenía de la pieza de soporte AlN. En junio de 2013 se realizó un primer intento por disminuir el nivel de contaminación del Uranio, para lo cual el soporte AlN se colocó sobre un marco de plomo, lo cual resultó con un *background* significativamente reducido. Adicionalmente se realizó otra versión del soporte de AlN en la cual la masa del AlN se reduce de 17 g (V1) a 11 g (V2) por haber removido la mayor parte del material del sustrato que se encontraba en contacto con el área activa del CCD, dejando sólo un marco de AlN, esta versión junto con el montaje que se realizó se muestra en la figura 3.9.

### Marzo de 2014. Actualización del paquete de CCD y nuevo soporte de Si

Después de haber realizado algunas exposiciones con las modificaciones efectuadas en el periodo anterior, en marzo de 2014 se llevaron a cabo renovaciones al soporte de los CCD, así como a la configuración de la caja que contiene los CCD <sup>3</sup>.

<sup>3</sup>En la siguiente dirección electrónica se encuentra una tabla con información sobre los datos de las exposiciones realizadas hasta el momento por el experimento DAMIC. [https://cdcvs.fnal.gov/redmine/projects/damic/wiki/Snolab\\_data](https://cdcvs.fnal.gov/redmine/projects/damic/wiki/Snolab_data)

Por un lado, se cambió el soporte de AlN de los CCD a un nuevo soporte de silicio de alta pureza. Con el cual el nivel de *background* disminuyó considerablemente.

En conjunto al cambio que se efectuó sobre el soporte de Si, se realizó una actualización a la configuración del paquete de CCD que se encontrarían en exposición durante este periodo. Para este nuevo arreglo, se colocaron 3 CCD de 8 Mpixeles de aproximadamente 7.2 g de masa activa en la caja de cobre con la siguiente configuración: un CCD en la extensión 4 de 650  $\mu\text{m}$  de espesor y otras 2 CCD en las extensiones 5 y 6 de 500  $\mu\text{m}$  de espesor cada una (ver figura 3.11b). Las dos CCD de 500  $\mu\text{m}$  de espesor eran CCD astronómicas con ITO en la parte posterior (CCD como las del experimento DESI); mientras que el CCD de 650  $\mu\text{m}$  de espesor no contenía ITO, este CCD fue un prototipo para los CCD que serán usadas en DAMIC100.

## Julio 2014. Instalación de Pb de baja radiactividad

A mediados de 2014, la Universidad de Zúrich (que forma parte de la colaboración DAMIC) donó plomo de baja radiactividad para que formara parte del escudo que cubre al montaje del experimento. En la figura 3.11 se muestra la incorporación del plomo de Zúrich, este plomo es el que se observa de color más claro. El arreglo del paquete de CCD permaneció sin modificaciones. Con la implementación del nuevo escudamiento, se logró disminuir aún más el nivel de *background*. La medición del *background* para este periodo (así como del anterior), se encuentra en la sección 6.4 de esta tesis.

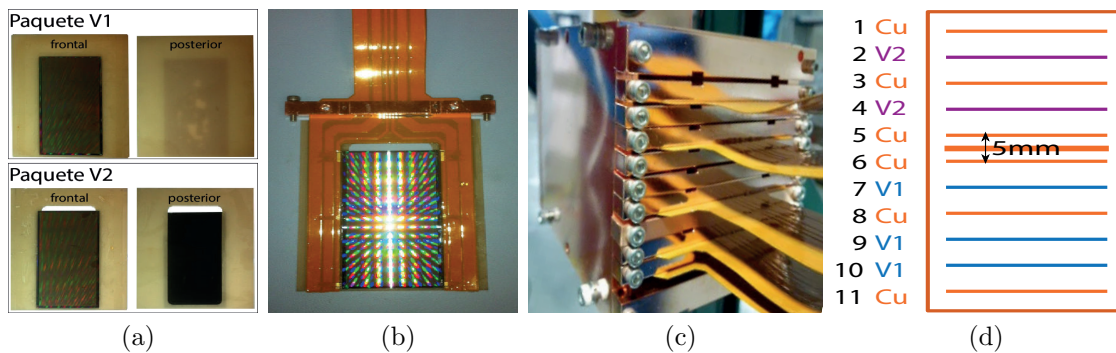


Figura 3.9: a) Versión V1 (parte de arriba) y V2 (parte de abajo) del paquete de CCD desarrolladas para las pruebas en SNOLAB. b) Paquete completo con un cable largo de Kapton, que trae la señal fuera del escudo a la electrónica. c) Pila de cinco detectores CCD dentro de la caja de cobre. d) Ordenamiento de los detectores CCD dentro de la caja de cobre para la segunda corrida en Junio de 2013.

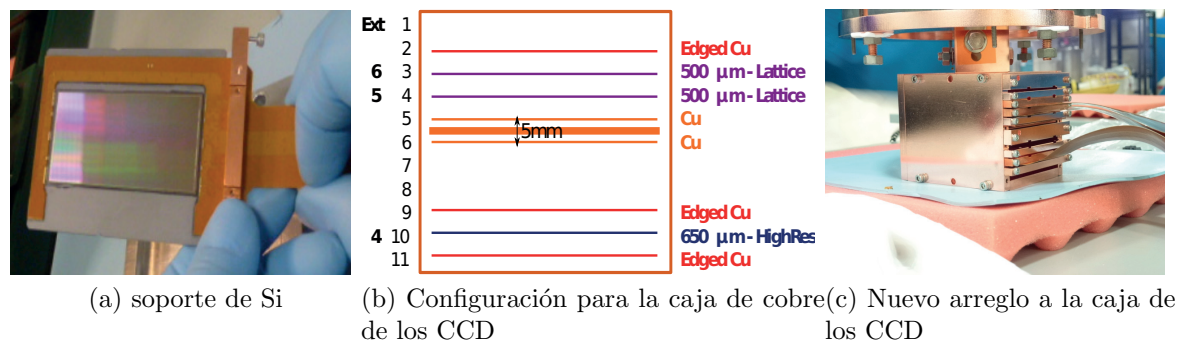


Figura 3.10: a) CCD en un soporte de Si b) Ilustración del arreglo de la caja de los CCD para el nuevo paquete que contiene 3 dispositivos CCD. c) Caja de los CCD con el nuevo paquete con 3 CCD.

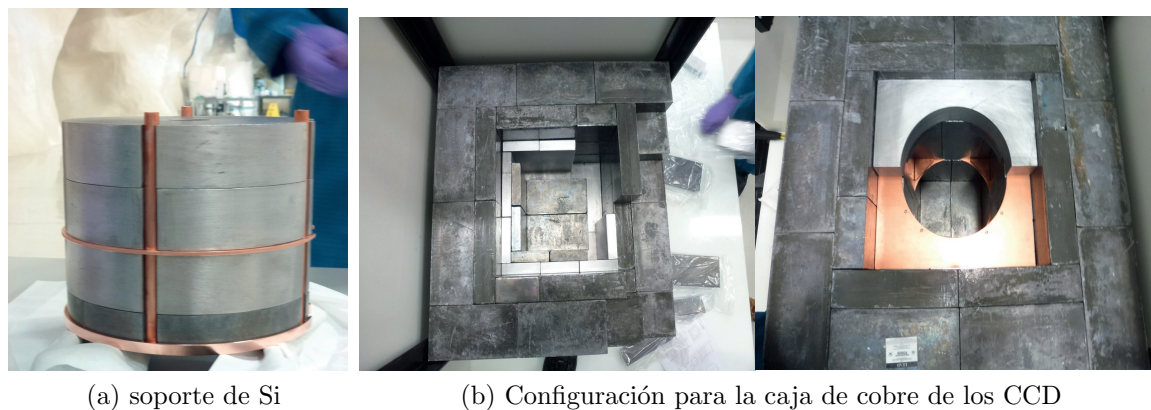


Figura 3.11: Nuevo escudamiento de plomo del experimento DAMIC. a) Escudamiento a a la parte superior de la caja de cobre que contiene los CCD. b) Escudamiento a la cámara de vacío donde se monta el experimento.

## Diciembre de 2014. Actualización del montaje, preparativos para DAMIC100

En diciembre de 2014 se empezó con los preparativos para la instalación de la nueva etapa del experimento (DAMIC100). Para este periodo, las modificaciones que se llevaron a cabo consistieron en cambiar la caja de cobre que contiene a los CCD, por una caja que sea capaz de albergar hasta 18 dispositivos. En la figura 3.12c se muestra la caja de cobre que contendrá a los CCD de DAMIC100.

Para esta nueva etapa de desarrollo del experimento, se realizó una modificación a la configuración que se tendrá en la caja que contiene a los CCD. Para este periodo se colocaron 3 dispositivos CCD de 8 Mpixeles, con 650 μm de espesor y con una masa

activa de 8.5 g en las extensiones 2, 5 y 6. Conforme se vayan realizando pruebas al montaje, se irán colocando nuevos dispositivos hasta completar los 100 g que es el objetivo para DAMIC100.

Adicionalmente al montaje se le colocó una bolsa para disminuir la contaminación radiactiva producida por el radón que se encuentra presente en el ambiente del laboratorio. En la figura 3.13 se muestra una vista del experimento después de las modificaciones realizadas para este periodo.

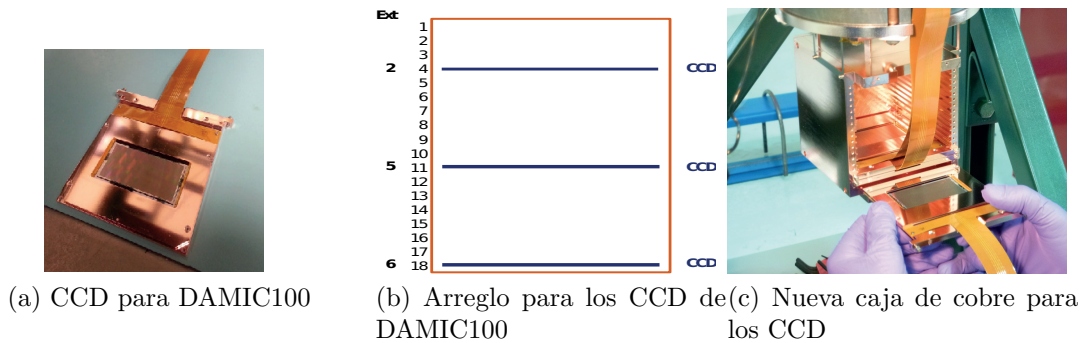


Figura 3.12: a) CCD que serán parte de la nueva etapa del experimento DAMIC100. b) Montaje de la nueva caja de cobre que contendrá a los CCD de DAMIC100.

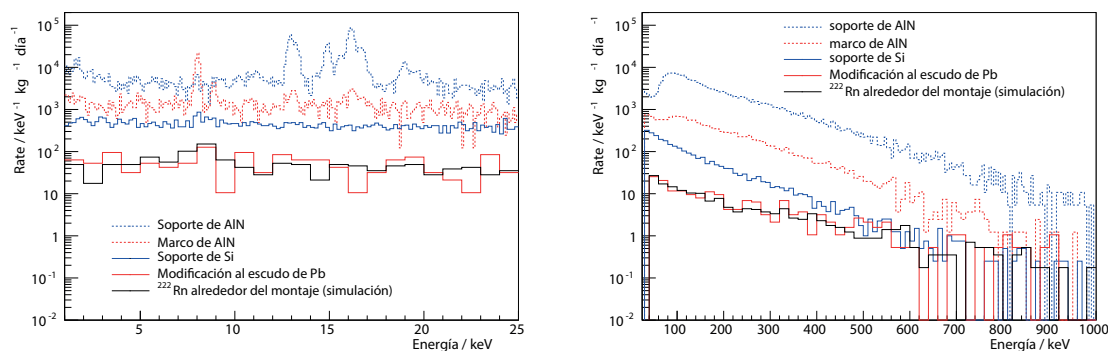


Figura 3.13: a) Vista al interior del escudamiento de plomo para el experimento DAMIC100. b) Escudamiento de plomo para el nuevo montaje del experimento. c) Vista de la instalación final del experimento DAMIC100 en su primer etapa.

En la figura 3.14 se presentan dos graficas en diferentes rangos de energía, donde



se muestra la disminución del nivel de eventos de ruido debido a las modificaciones que se realizaron al montaje del experimento desde su instalación en SNOLAB. Las mejoras realizadas al montaje se ven reflejadas en la disminución del nivel de ruido en más de 2 ordenes de magnitud en el rango de bajas energías.



(a) Espectro en un rango de 0.1 a 25 keV

(b) Espectro en un rango de 40 a 1000 keV

Figura 3.14: Disminución del nivel de eventos de ruido, durante el periodo que lleva en operación el experimento DAMIC en SNOLAB. a) Muestra el espectro de energía en un rango de 0.1 a 25 keV b) Espectro de energía en un rango de 40 a 1000 keV.

## Febrero - Junio de 2015. Inicios de DAMIC100

En el mes de febrero de 2015 se cambió la bolsa de  $\text{N}_2$  por una caja con  $\text{N}_2$  para erradicar la contaminación radiactiva debida al radón. Se limpiaron las piezas de cobre del experimento con un baño químico.

Para marzo de 2015 se agregó un CCD, haciendo un total de 4 CCD (figura 3.15b). También, se colocó un escudo de plomo dentro de la caja de cobre que contiene a los CCD, para contrarrestar el aumento de partículas  $\alpha$  posteriores a la limpieza del cobre.

En el mes de abril se retiró el escudo de plomo que se encontraba dentro de la caja de cobre de los CCD (figura 3.15c), de igual forma se volvió a acomodar los CCD dentro de la caja de cobre. En este periodo dejó de operar el CCD que se encontraba en la extensión 5, al parecer sólo se había desconectado.

Para el mes de mayo de 2015 se colocó un escudo de cobre dentro de la caja que alberga a los CCD (figura 3.15d). Se volvió a conectar el CCD de la extensión 5.

En junio se realizó una limpieza (*“chemically etched”*) a los bloques de cobre que se colocaron en el mes de mayo y a la charola que alberga al CCD de la extensión 2, ver figura 3.15e.

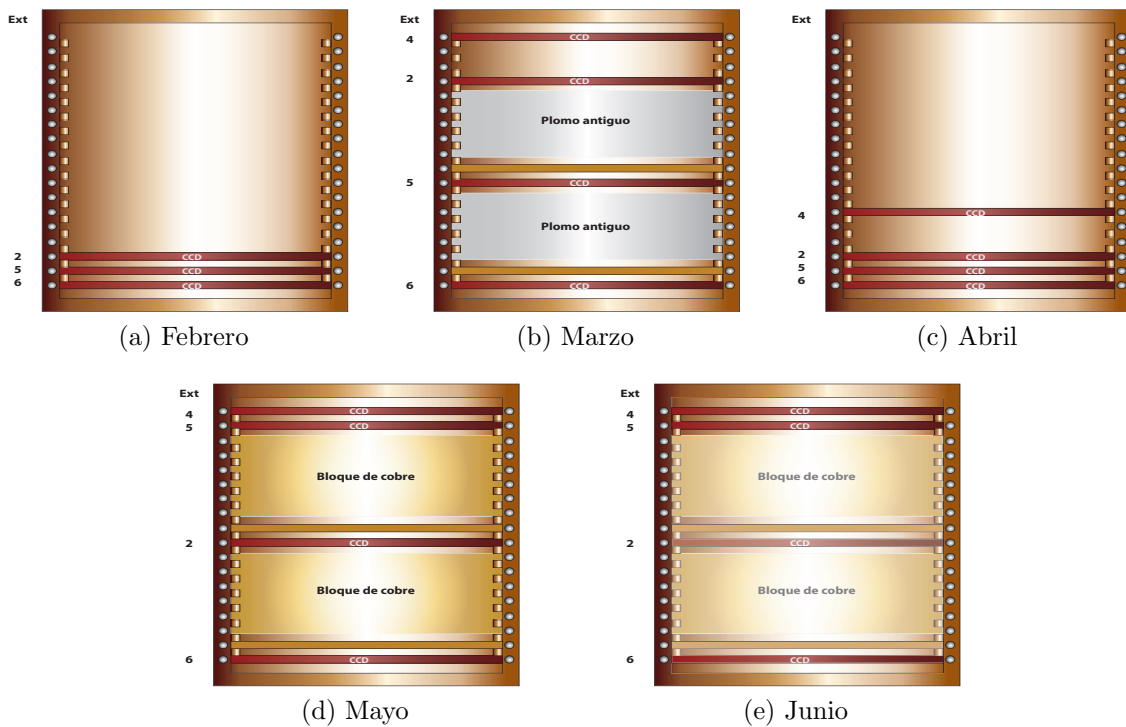


Figura 3.15: Modificaciones al arreglo de los CCD para el periodo de febrero a mayo de 2015.

### 3.6. Análisis de los datos de SNOLAB

Durante el tiempo en el que ha estado en operación el experimento DAMIC en SNOLAB, se han presentado los resultados del análisis de datos en diversas conferencias así como en proceedings [31], donde se presentaron los resultados obtenidos por los datos adquiridos con dos CCD de 1.1 g cada una con el paquete V2, entre el 6 de junio y el 2 de septiembre del 2013 (52 días de tiempo vivo). Los primeros 40 días de tiempo vivo fueron adquiridos en exposiciones de 5000 s, mientras que los últimos 12 días fueron exposiciones de 10000 s. Los análisis se enfocaron en la región de energía  $<10 \text{ keV}_{ee}$ , relevante para la búsqueda de WIMP. Se empezó identificando los pixeles "semilla", cuya carga recolectada es al menos cuatro veces el valor RMS del ruido en la imagen, que corresponde a  $\sim 40 \text{ keV}_{ee}$  de energía de ionización. En el capítulo 4, se presentan las herramientas requeridas para realizar el análisis de los datos del experimento.

### 3.7. Coincidencias espaciales de $\alpha$ y $\beta$

Como parte de los estudios que se llevan a cabo en la colaboración DAMIC, el grupo de la universidad de Chicago ha realizado un estudio sobre el decaimiento de elementos

radiactivos, ya que éstos forman parte de los eventos de ruido del experimento.

Uno de los métodos que han desarrollado es usando las coincidencias espaciales de partículas  $\alpha$ . Por ejemplo el  $^{238}\text{U}$  decae en  $^{234}\text{Th}$  tras la emisión de una partícula  $\alpha$  lo que se ha observado es que las partículas alpha en el CCD tienen una energía característica cuando provienen del decaimiento de algún elemento.

En la figura 3.16 se muestra una partícula  $\alpha$  en los mismos pixeles, pero cada una de estas partículas se observó en tiempos diferentes, con distintas energías, lo que representaría el decaimiento de algún elemento.

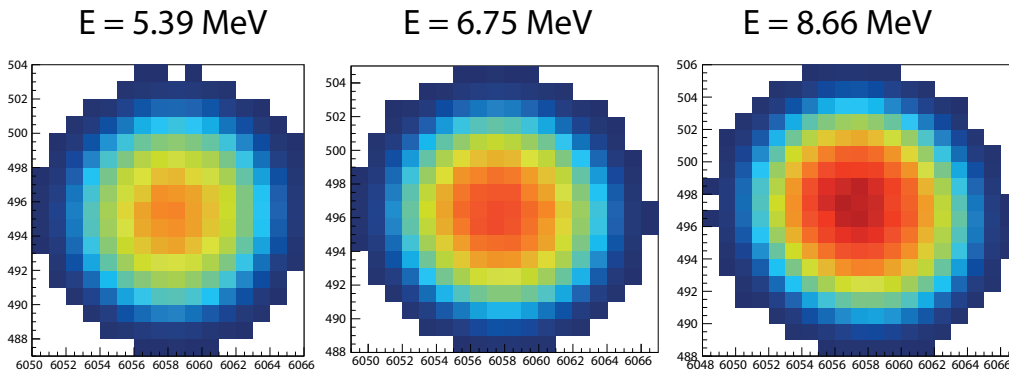


Figura 3.16: Partícula  $\alpha$  obtenida en los mismos pixeles para tres tiempos distintos y con distinta energía.

Otro método que se ha estudiado son las coincidencias espaciales de partículas  $\alpha$ - $\beta$ , en estos casos, como se muestra en la figura 3.17, cuando una partícula  $\alpha$  interacciona con el CCD, depositando su carga, y tiempo después se observa en el mismo lugar una traza de un electrón, esto correspondería al decaimiento de algún elemento por emisión de partículas  $\beta$ .

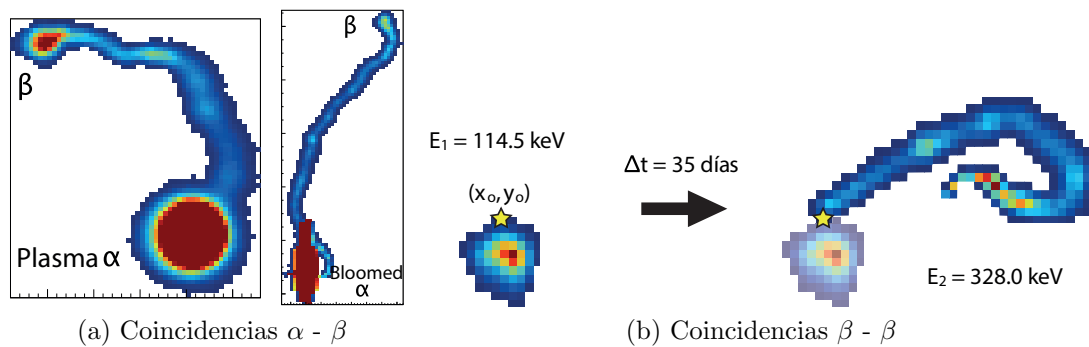


Figura 3.17: a) Coincidencias espaciales de una partícula  $\alpha$ - $\beta$ . Lado izquierdo vista para partículas *plasma*  $\alpha$ . Lado derecho vista para partículas *bloomed*<sup>4</sup>  $\alpha$ . b) Coincidencias espaciales de partículas  $\beta$ - $\beta$ .

### 3.8. Futuro próximo y DAMIC100

DAMIC100 constará de 18 CCD de 8 Mpixeles cada una de  $650 \mu\text{m}$  de espesor, haciendo una masa total de 100 g en la reciente cámara de vacío y escudo en SNOLAB. Estos detectores fueron entregados a Fermilab en mayo de 2014. Como se mencionó en la sección 3.5 estas CCD serán instalados en soportes de silicio de alta pureza, rodeadas por cobre OFHC (figura 3.12a). Se espera que el *background* radiactivo del paquete de CCD sea  $\ll 1$  evento/ $(\text{keV}_{ee} \text{ kg día})$  y la tasa de conteo debe estar dominada por la dispersión Compton de rayos  $\gamma$  externos, a una tasa prevista de 0.5 eventos/ $(\text{keV}_{ee} \text{ kg día})$ . La operación total del experimento se espera que empiece en el verano de 2015. En la figura 3.18 se muestra el límite esperado de DAMIC100 y la magnitud de la posible señal del escenario sugerido por CDMS-Si [38] para WIMP ligeras.

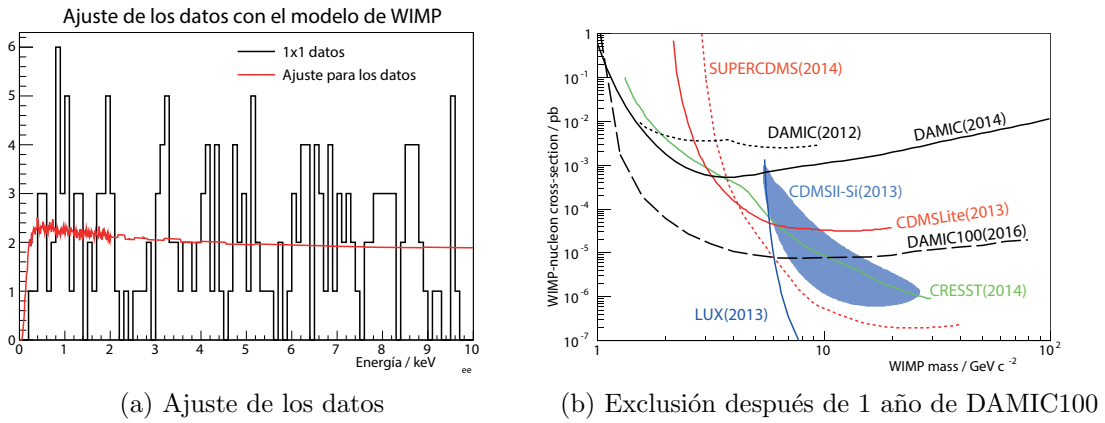


Figura 3.18: a) Ajuste de los datos con el modelo de WIMP b) Gráfica de exclusión del 90 % para las interacciones de espín independiente para DAMIC100 después de un año de exposición (2016)

La figura 3.18a muestra un ajuste del espectro de DAMIC, considerando una WIMP con la masa y sección eficaz de interacción del mejor valor ajustado a la señal de CDMS-Si ( $M_\chi=8.6 \text{ GeV}/c^2$  y  $\sigma_{\chi N}=1.9 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$ ) con los parámetros estándar del halo de MO ( $\rho_\chi=0.3 \text{ GeV}/c^2/\text{cm}^3$ ,  $\nu_0=220 \text{ km/s}$ ,  $\nu_E=232 \text{ km/s}$ ,  $\nu_{esc}=544 \text{ km/s}$ ) y una exposición de  $0.1 \text{ kg} \times \text{año}$ .

Por otro lado en la figura 3.18b se muestra una gráfica de exclusión del 90 % para las interacciones de espín independiente mediante la realización de una prueba de  $\chi^2$  en espectros simulados con el espectro del *background* plano y la simulación de la señal de WIMP para diferentes valores de  $M_\chi$  y  $\sigma_{\chi N}$ . DAMIC100 pondrá el mejor límite en espín independiente de la dispersión elástica de WIMP-nucleón para  $M_\chi < 6 \text{ GeV}/c^2$ .



### 3.9. Dispersión de neutrones rápidos: El experimento ANTONELLA

El objetivo es calibrar la eficiencia de la ionización de retrocesos del silicio, apoyándose en la dispersión elástica de neutrones de un haz de baja energía en un blanco de silicio. El haz pulsado, que tiene un amplio espectro de energía de hasta 200 keV, será producido por protones de 2.3 MeV que colisionan con un blanco de  ${}^7\text{Li}$ , estos protones son procedentes del generador *Tandem Van de Graaf* de la Universidad de Notre Dame (EE.UU). El experimento estará operando en el modo de coincidencia entre un diodo de silicio de 50 mg y detectores de plástico centellador. La información de tiempo de vuelo entre el haz pulsado, las señales en el detector de silicio y las señales en los detectores de centelleo, proporcionará la discriminación de los rayos  $\gamma$  inmediatos del haz y permitirá determinar la energía de los neutrones incidentes. La geometría del montaje de coincidencia determinará de forma única la energía de los retrocesos del silicio observados. Un experimento similar es la utilización de argón líquido para la calibración por retrocesos, este experimento se ha llevado a cabo en colaboración con SCENE [47]. La figura 3.19 muestra una representación del montaje del experimento Antonella.

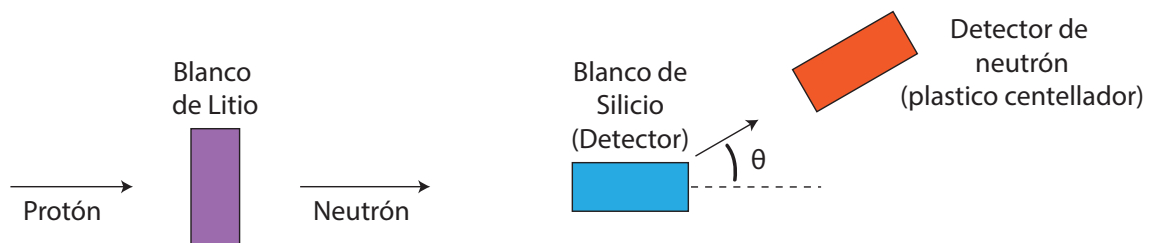


Figura 3.19: Representación del montaje del experimento Antonella.

El objetivo es calibrar la eficiencia de ionización en el silicio hasta 1 keV<sub>r</sub>. Una corrida preliminar con sólo detectores de centelleo se realizó en marzo de 2013. La primera corrida con detectores de silicio se realizó a finales de 2013.



## Capítulo 4

# Herramientas de análisis de datos de DAMIC

Como se mencionó en el capítulo 2, cuando las partículas interactúan con el volumen de silicio, estas depositan una cierta carga en el CCD. A partir del conocimiento de la cantidad de carga que una partícula depositó en el silicio del CCD, al igual que la traza que dejó dicha partícula en el CCD, es posible conocer el tipo de partícula que interactuó con ésta. También es posible conocer la localización exacta en donde se llevó a cabo la interacción de la partícula con el CCD. El objetivo de las herramientas de análisis <sup>1</sup> radica en poder extraer información a través de un archivo que pueda ser leído de forma computarizada (en el caso del experimento DAMIC la información se extrae en un archivo ROOT) dicho archivo debe contener información sobre la carga, la posición y la cantidad de pixeles que componen la traza de las partículas que interactuaron con el volumen de CCD, así como información sobre la cantidad de eventos que se llevaron a cabo en el CCD durante el tiempo de exposición, el estatus de los pixeles que componen los CCD utilizadas (es decir, si los pixeles utilizados se encuentran en buen estado).

La cadena de procesamiento, de una imagen FITS obtenida a partir de haber colocado un CCD a una cierta exposición, genera un archivo ROOT con la información (entre otras cosas) que se mencionó en el párrafo anterior.

Antes de presentar las características de la cadena de procesamiento, cabe mencionar que las imágenes FITS obtenidas de las exposiciones del experimento DAMIC realizadas en SNOLAB, los CCD son leídos con el mismo amplificador y a su vez hay otro amplificador que no está conectado físicamente al CCD, pero va leyendo su propio ruido. Esta forma de leer el CCD y a su vez el ruido debido a su lectura, da como resultado que el lado derecho (R) de la imagen FITS sea el que contiene las cargas reales recolectadas del CCD; mientras que la parte izquierda (L) de la imagen FITS corresponderá al ruido debido a la lectura, esto con el fin de tener una mejor visualización de las fluctuaciones que se pudieran haber generado al momento de leer el CCD. En la figura 4.1 se muestra

---

<sup>1</sup>En esta tesis se usarán las herramientas desarrolladas por Javier Tiffenberg, FNAL

de manera esquemática la obtención de la imagen FITS.

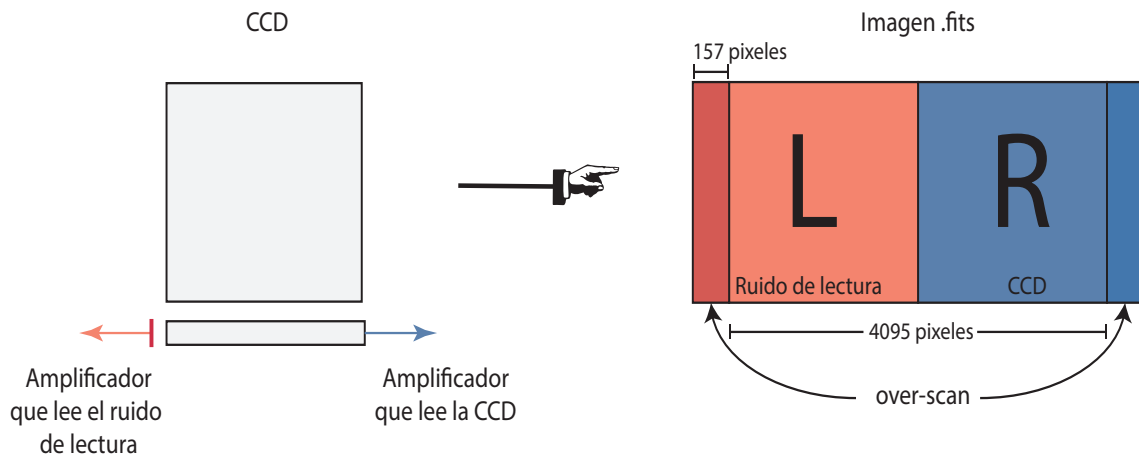


Figura 4.1: Representación de cómo se obtiene una imagen de un CCD en el experimento DAMIC en SNOLAB.

Posterior a lectura del CCD se obtienen imágenes FITS correspondientes a una cierta exposición, con las cuales es posible realizar su procesamiento para substraerles información sobre las interacciones de las partículas que se llevaron a cabo en la CCD. En la figura 4.2 se presenta la cadena de procesamiento de las imágenes FITS.

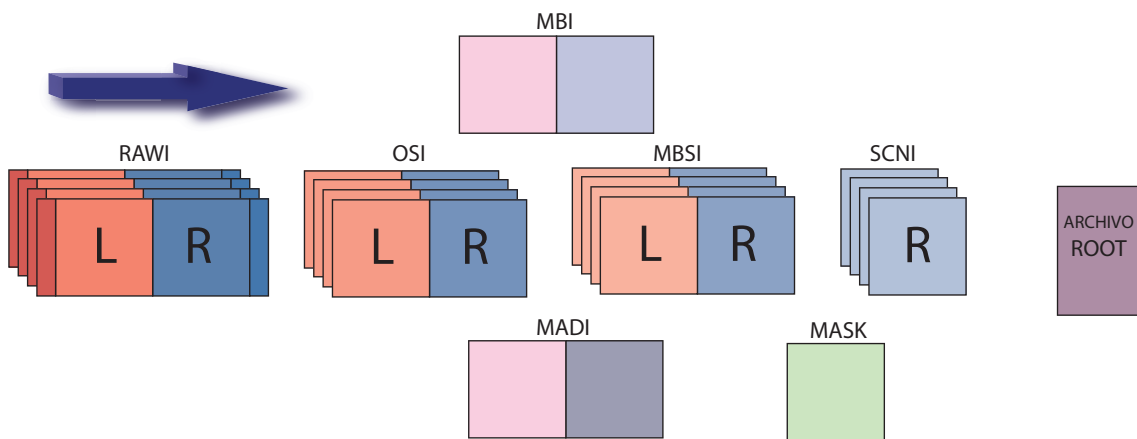


Figura 4.2: Cadena de procesamiento de una imagen FITS.

## 4.1. Substracción del ruido de sobre escaneo (*Subtract over-scan*)

El primer paso de la cadena de procesamiento es la substracción del ruido de sobre-escaneo (*over-scan*) el cual consiste en sobre leer los pixeles que hay en el CCD; es decir, después de haber leído todos los pixeles del CCD que contenían alguna carga, es posible seguir leyendo los mismos pixeles pero que ahora se encuentran vacíos. Cabe señalar que no es necesario volver a leer todo el CCD, basta con volver a leer solo un pedazo de ésta, obteniendo una imagen con sobre-escaneo tanto del lado del ruido (L) como del lado de las cargas reales (R).

Posteriormente, a los pixeles sobre leídos se les calcula la media tanto para el lado R como el lado L, cada una de las medias se le substraerá a cada lado correspondiente de la imagen FITS que se tenía inicialmente (en este trabajo nos referiremos a esta imagen inicial como la imagen *raw*), esto con el fin de homogeneizar la imagen (teniendo un offset). Después de haber substraído la media de los pixeles vacíos a la imagen *raw*, se obtiene una nueva imagen a la cual se le llama *osi* (*over-scan subtract image*).

## 4.2. Substracción del sesgo maestro (*Subtract master bias*)

Del paso anterior, se obtuvo una imagen *osi*, a la cual se le calculará la *Master Bias* (MB). Para lograr construir la MB se necesita de varias imágenes, ya que se va a calcular la mediana de un mismo pixel para varias imágenes, ver figura 4.3.

Ahora, por un lado, con la mediana de cada uno de los pixeles se construye una MB y por otro lado, con el ancho de la distribución Gaussiana se calcula una *median absolute deviation* (MAD). Esta MAD se construye a partir del ancho de la distribución, ya que cuando hay un pixel malo (pixeles saturados, pixeles que no funcionan, etc.) el ancho de la distribución Gaussiana aumenta. Es importante mencionar que la MB se calcula para ambos lados del CCD (izquierda y derecha), mientras que la MAD solo se calcula a partir de la imagen derecha (R). A continuación se sustrae la MB a la imagen *osi* que se tenía, obteniendo así otra imagen *mbs* (*master bias subtracted*); por otro lado, se obtiene una imagen MAD solo para el lado derecho de la imagen, esta MAD se usará posteriormente.

## 4.3. Obtención de la máscara (*Mask*)

A partir de la obtención de la imagen MAD, se va a construir una máscara, la cual contendrá a todos los pixeles malos; es decir aquellos pixeles que están muy saturados, o partes del CCD que no funcionen.

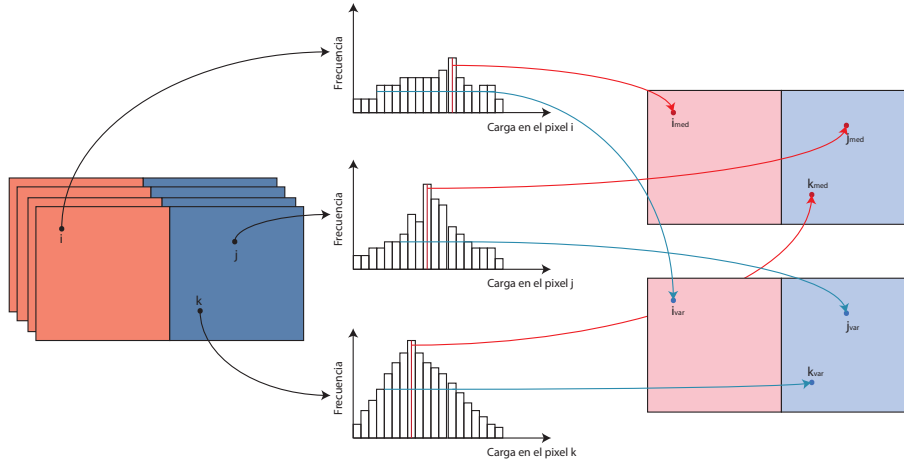


Figura 4.3: Ilustración del proceso de la sustracción del sesgo maestro.

#### 4.4. Substracción del ruido correlacionado (*Subtract correlated noise*)

Considerando que cada pixel de la parte derecha (R) de una imagen FITS está correlacionado con otro pixel de la parte izquierda (L) de la misma imagen como se observa en la figura 4.4. La substracción del ruido correlacionado consiste en la obtención de una imagen  $\hat{R}_i$ , la cual se construirá por la parte  $R_i$  de la imagen FITS  $i$  menos una combinación lineal de las partes  $L_j$  de todas las imágenes FITS que se estén analizando (ver figura 4.5). Los coeficientes  $a_{ij}$  van a ser determinados a partir de la minimización de la varianza de  $\hat{R}_i$ .

##### Cálculo de la Varianza de $\hat{R}_i$

Para la realización del cálculo de la varianza de  $\hat{R}_i$  se considera que  $R_i$  representa el lado derecho de la imagen la cual porta la señal detectada en el CCD, mientras que  $L_j$  representa el lado izquierdo de la imagen la cual porta el ruido.

La varianza de  $\hat{R}_i$  es de la forma:

$$Var(\hat{R}_i) = Var\left(R_i - \sum_j a_{ij}L_j\right) \quad (4.1)$$

donde  $\hat{R}_i = R_i - \sum_j a_{ij}L_j$  (la señal R del CCD menos la suma de una combinación lineal del ruido L de la misma).

Ahora, por definición de varianza se tiene que:

$$Var(b_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [(b_{ik}) - \langle b_i \rangle]^2 \quad (4.2)$$

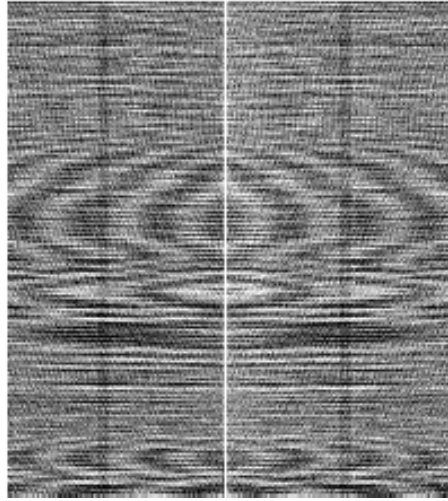


Figura 4.4: Correlación entre los pixeles de la parte derecha con los pixeles de la parte izquierda de una imagen FITS.

Entonces por la ecuación (4.2) tendremos que:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left[ \left( R_{ik} - \sum_j a_{ij} L_{jk} \right) - \left\langle R_i - \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right]^2 \quad (4.3)$$

para este caso la suma se realizará sobre todos los pixeles de la CCD ( $N_p$  es el número de pixeles). Ahora, si se considera que el promedio de una suma es la suma de los promedios, se tendrá:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left[ (R_{ik} - \langle R_i \rangle) - \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right) \right]^2 \quad (4.4)$$

reescribiendo esta última ecuación se tiene que:

$$\begin{aligned} Var(\hat{R}_i) = & \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2 \sum_j a_{ij} \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) (L_{jk} - \langle L_j \rangle) \\ & + \sum_l \sum_r a_{il} a_{ir} \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (L_{lk} - \langle L_l \rangle) (L_{rk} - \langle L_r \rangle) \end{aligned} \quad (4.5)$$

de la ecuación (4.5), el primer término corresponde a la definición de varianza de  $R_i$ , en el segundo término  $\frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) (L_{jk} - \langle L_j \rangle)$  representa la covarianza de  $R_i$  y  $L_j$ , finalmente en el tercer término  $\frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (L_{lk} - \langle L_l \rangle) (L_{rk} - \langle L_r \rangle)$  representa la covarianza de  $L_l$  y  $L_r$ . Así se obtiene:

$$Var(\hat{R}_i) = Var(R_i) - 2 \sum_j a_{ij} Cov(R_i, L_j) + \sum_l \sum_r a_{il} a_{ir} Cov(L_l, L_r) \quad (4.6)$$

Para minimizar la Varianza del ruido correlacionado, se podrá obtener un sistema de ecuaciones con solución analítica haciendo:

$$\begin{aligned}\hat{R}_0 &= R_0 - \left( a_{00} L_0 + a_{01} L_1 + a_{02} L_2 + a_{03} L_3 \right) \\ \hat{R}_1 &= R_1 - \left( a_{10} L_0 + a_{11} L_1 + a_{12} L_2 + a_{13} L_3 \right) \\ \hat{R}_2 &= R_2 - \left( a_{20} L_0 + a_{21} L_1 + a_{22} L_2 + a_{23} L_3 \right) \\ \hat{R}_3 &= R_3 - \left( a_{30} L_0 + a_{31} L_1 + a_{32} L_2 + a_{33} L_3 \right)\end{aligned}$$

Figura 4.5: Ilustración del proceso de la substracción del ruido correlacionado para una colección de 4 imágenes (0-3).

$$\frac{\partial Var(\hat{R}_i)}{\partial a_{im}} = 0 \quad (4.7)$$

El cálculo completo se encuentra en el Apéndice D.

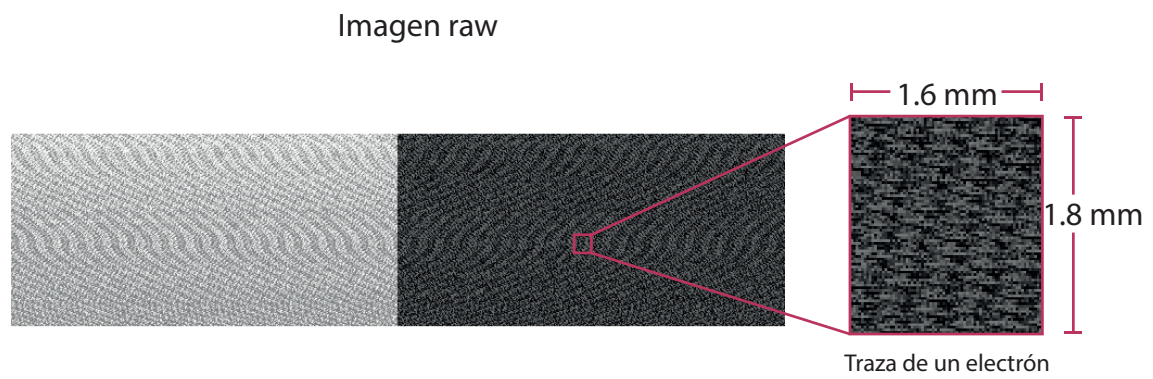
A continuación se presentará un ejemplo de los pasos anteriores aplicados a una imagen FITS que se obtuvo de una exposición del experimento DAMIC en SNOLAB. Las imágenes que se presentan a continuación se obtuvieron al utilizar el programa ds9<sup>2</sup>.

Es importante indicar que las imágenes raw, las imágenes osi y las imágenes mbs, que son como las mostradas en la figura 4.6 se está considerando la imagen FITS completa, es decir la imagen donde el lado derecho (R) de la imagen FITS es el que contiene las cargas reales recolectadas del CCD, mientras que la parte izquierda (L) de la imagen FITS corresponderá al ruido debido a la lectura (véase figura 4.1).

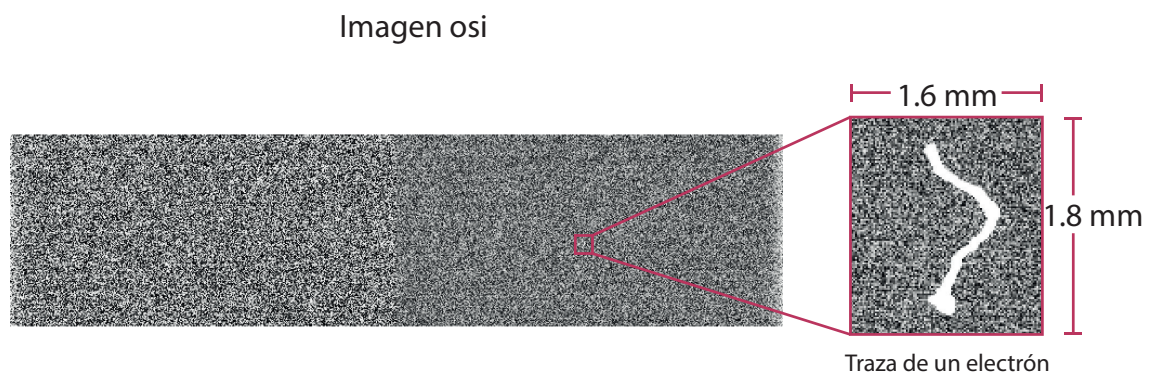
Por otro lado, la imagen correspondiente a la máscara y las imágenes scn (que se muestran en la figura 4.7) corresponden solo al lado que contiene las cargas recolectadas por la CCD (lado derecho de la imagen completa). En este punto del procesamiento de imágenes ya no se considera el lado que contiene al ruido debido a la lectura. Por lo que las imágenes FITS mask y scn son de la mitad de tamaño que las imágenes completas.

<sup>2</sup>Ds9 es una aplicación que se utiliza principalmente para visualizar datos e imágenes astronómicas. Esta aplicación soporta imágenes FITS y tablas binarias

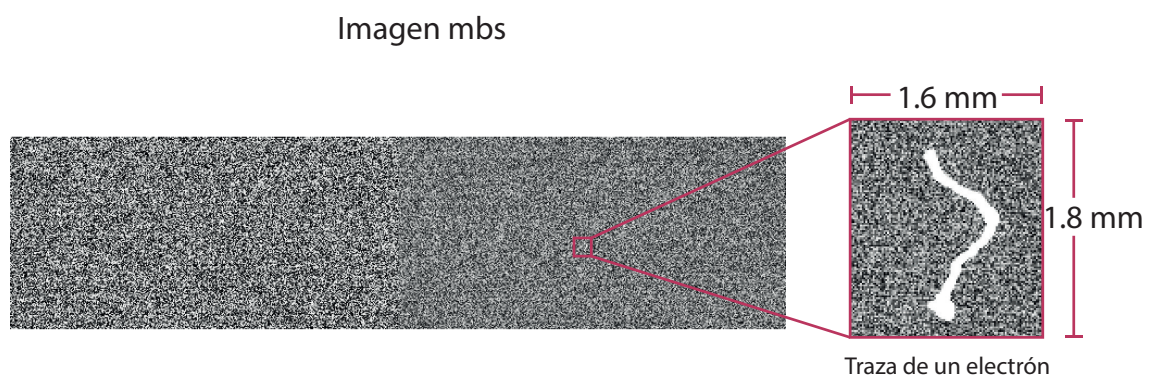




(a) Imagen cruda

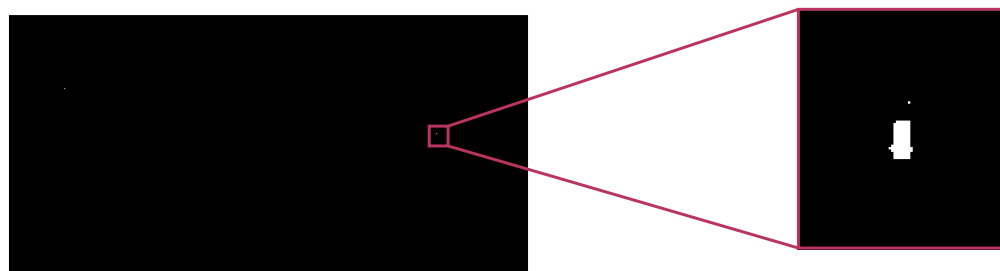


(b) Imagen osi



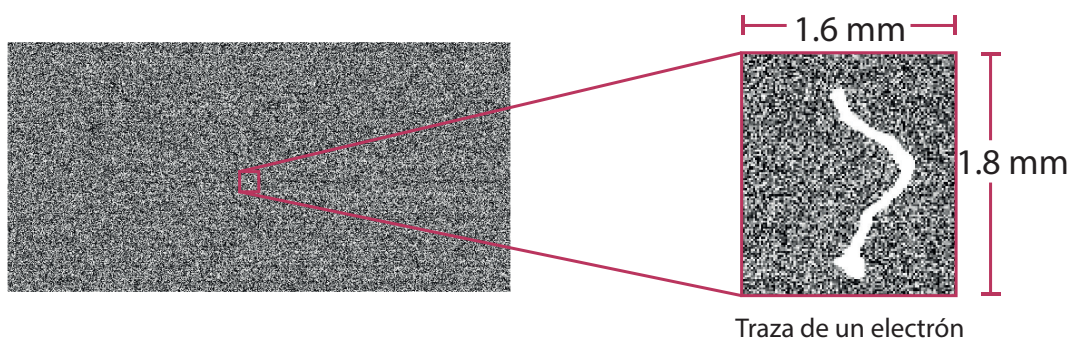
(c) Imagen mbs

Figura 4.6: a) Imagen cruda *raw* b) Imagen después de haber realizado la substracción del Over-scan c) Imagen después de haber realizado la substracción de la master bias.



(a) Obtención de la máscara

Imagen scn



(b) Imagen scn

Figura 4.7: a) Imagen de la máscara con un píxel dañado b) Imagen después de haber realizado la substracción del ruido correlacionado.

## 4.5. Extracción del catálogo (archivo en ROOT)

El resultado final de la cadena de procesamiento, da como resultado la formación de un archivo de ROOT (al cual se le da el nombre de *catalog.root*) que contiene información sobre las trazas o eventos que tuvieron lugar en los dispositivos CCD durante un determinado tiempo de exposición. En la figura 4.8 se muestra un ejemplo de la vista de una traza en una imagen FITS vista con el programa ds9 y posteriormente la misma traza extraída de un archivo *catalog.root*.

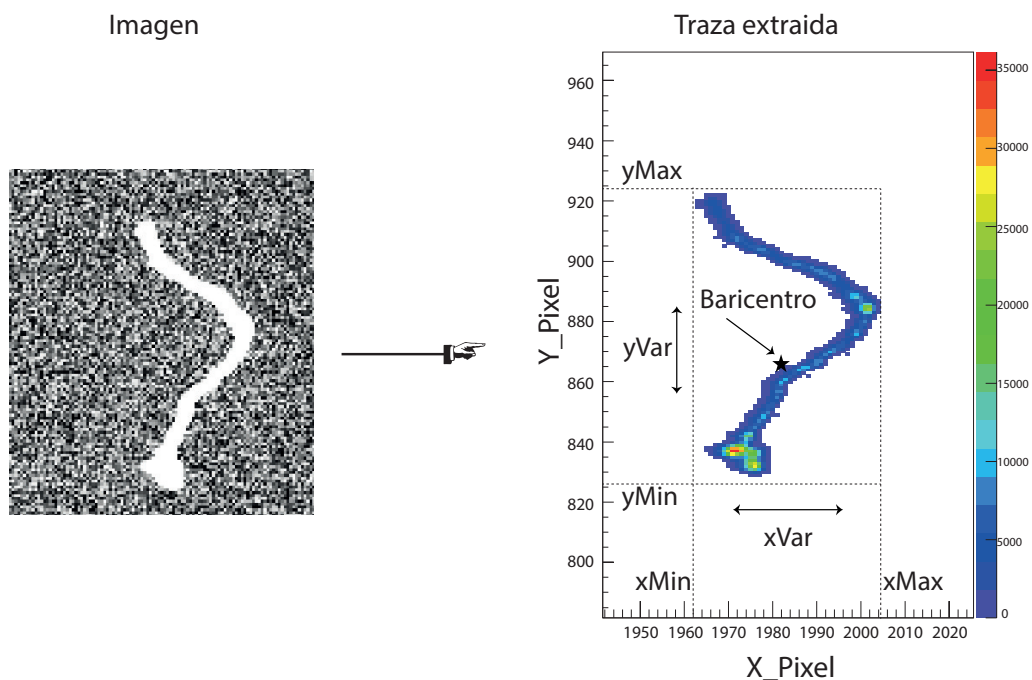


Figura 4.8: A la izquierda imagen FITS de una traza de electrón vista con el programa ds9, a la derecha la misma traza de electrón después de haber sido extraída de un archivo catalog.root

Las variables que se pueden encontrar en el catalog.root se explicarán a continuación. Cabe mencionar que el ejemplo presentado a continuación corresponde a una exposición realizada en el periodo del 12 al 17 de Julio de 2014 con un tiempo total de exposición de 5.208 días en el laboratorio canadiense SNOLAB, se obtuvieron 15 imágenes FITS cada una de 30000 s correspondientes a esta corrida, en dicha exposición el montaje del experimento DAMIC estaba utilizando 3 dispositivos CCD, un CCD de  $650 \mu\text{m}$  y otras dos de  $500 \mu\text{m}$  con una masa total de 7.198 g.

**runID:** es el número de identificación (ID) que se le asigna a cada imagen FITS. En el ejemplo de la figura 4.9a, se observan un total de 15 imágenes FITS, las cuales tienen un ID que va de 639 a 653.

**ohdu:** es la extensión en la cual se encuentran colocadas las CCD en el montaje del experimento DAMIC; es decir corresponde a la HDU de la imagen FITS (ver el apéndice C). El ejemplo de la figura 4.9b se observa que hay 3 ohdu, esto corresponde a las 3 CCD colocadas en el montaje del experimento, el CCD de  $650 \mu\text{m}$  se había colocado en la extensión 4 (corresponde a la oHDU 5), una de las dos CCD de  $500 \mu\text{m}$  se encontraba en la extensión 5 (corresponde a la oHDU 6) y la última CCD también de  $500 \mu\text{m}$ , se encontraba colocada en la extensión 6 (corresponde a la oHDU 7).

**nSat:** esta variable hace referencia al número de píxeles saturados en la traza. En la figura 4.9c se observa que para este ejemplo, la mayor parte de píxeles tienen un valor para nSat igual a cero, esto implica que la mayoría de píxeles no estaban saturados.

**flag:** es la variable que nos indica cuales son los eventos buenos (con los cuales se puede realizar un análisis) y cuales son los eventos malos (eventos con un píxel saturado, que toca algún borde del CCD). Para las trazas buenas *flag* es igual a 0 y es distinto de 0 (incluyendo cantidades negativas) para los eventos malos. En la figura 4.9d se muestra que para este ejemplo la mayoría de eventos tiene *flag* igual a 0.

**xMin:** es la coordenada  $x$  del borde izquierdo de la traza o evento. Figura 4.9g.

**xMax:** es la coordenada  $x$  del borde derecho de la traza o evento. Figura 4.9h.

**yMin:** es la coordenada  $y$  del borde izquierdo de la traza o evento. Figura 4.10a.

**yMax:** es la coordenada  $y$  del borde derecho de la traza o evento. Figura 4.10b.

**expoStart:** esta variable representa el periodo temporal en el cual se realizó la exposición. Esta variable se encuentra en el formato de tiempo Unix<sup>3</sup>. En el ejemplo de la figura 4.9e se muestra esta variable en un formato día/mes el cual representa los días en los cuales se llevó a cabo la exposición.

**nSavedPix:** es el número de píxeles que hay en una traza. Figura 4.9f.

Las siguientes variables tienen una  $n$  la cual puede tomar los valores de 0, 1, 2 y 3, estos valores representan diferentes criterios para definir una traza o evento. A mayor valor de  $n$ , la carga depositada en los píxeles que constituyen un evento debe ser mayor.

**nn:** es el número total de píxeles en la traza. La figura 4.10c muestra  $n_0$ .

**En:** esta variable representa la energía de la traza. En la figura 4.10d se muestra la variable  $E_0$ . Esta variable se encuentra en unidades de keV. Consultar sección 5.2.

**xBary $n$ :** es la coordenada  $x$  de la posición media pesada por la carga de los píxeles en la traza ordenada por la señal (baricentro). En la figura 4.10e se representa la variable  $x_{Bary0}$ .

---

<sup>3</sup>El tiempo UTC (Coordinated Universal Time, POSIX time o Epoch time) es un sistema que se utiliza para representar instantes de tiempo. Está definido como la cantidad de segundos que han transcurrido desde el 1 de enero de 1970.

**yBary $n$** : es la coordenada  $y$  de la posición media pesada por la carga de los pixeles en la traza ordenada por la señal (baricentro). En la figura 4.10f está representada la variable yBary0.

**xVar $n$** : variable que representa la varianza a lo largo de la dirección  $x$  ordenada por la señal de los pixeles en la traza. La figura 4.10g representa la variable xVar0.

**yVar $n$** : variable que representa la varianza a lo largo de la dirección  $y$  ordenada por la señal de los pixeles en la traza. La figura 4.10h representa la variable yVar0.

Las variables que se describen a continuación son arreglos de nSavePix, estos arreglos son descritos para cada pixel que contiene un evento.

**xPix[ $i$ ]**: es la coordenada  $x$  del pixel  $i$  que hay en una traza o evento.

**yPix[ $i$ ]**: es la coordenada  $y$  del pixel  $i$  que hay en una traza o evento.

**ePix[ $i$ ]**: es la carga depositada en el pixel  $i$  que conforma a una traza. Las unidades de la carga son cuentas ADC. Si se hace la suma de todas las cargas de cada pixel que conforman una traza y se multiplica por la constante de calibración (constante que transforma las cuentas ADC a keV) nos da como resultado la energía total depositada por la traza en el CCD.

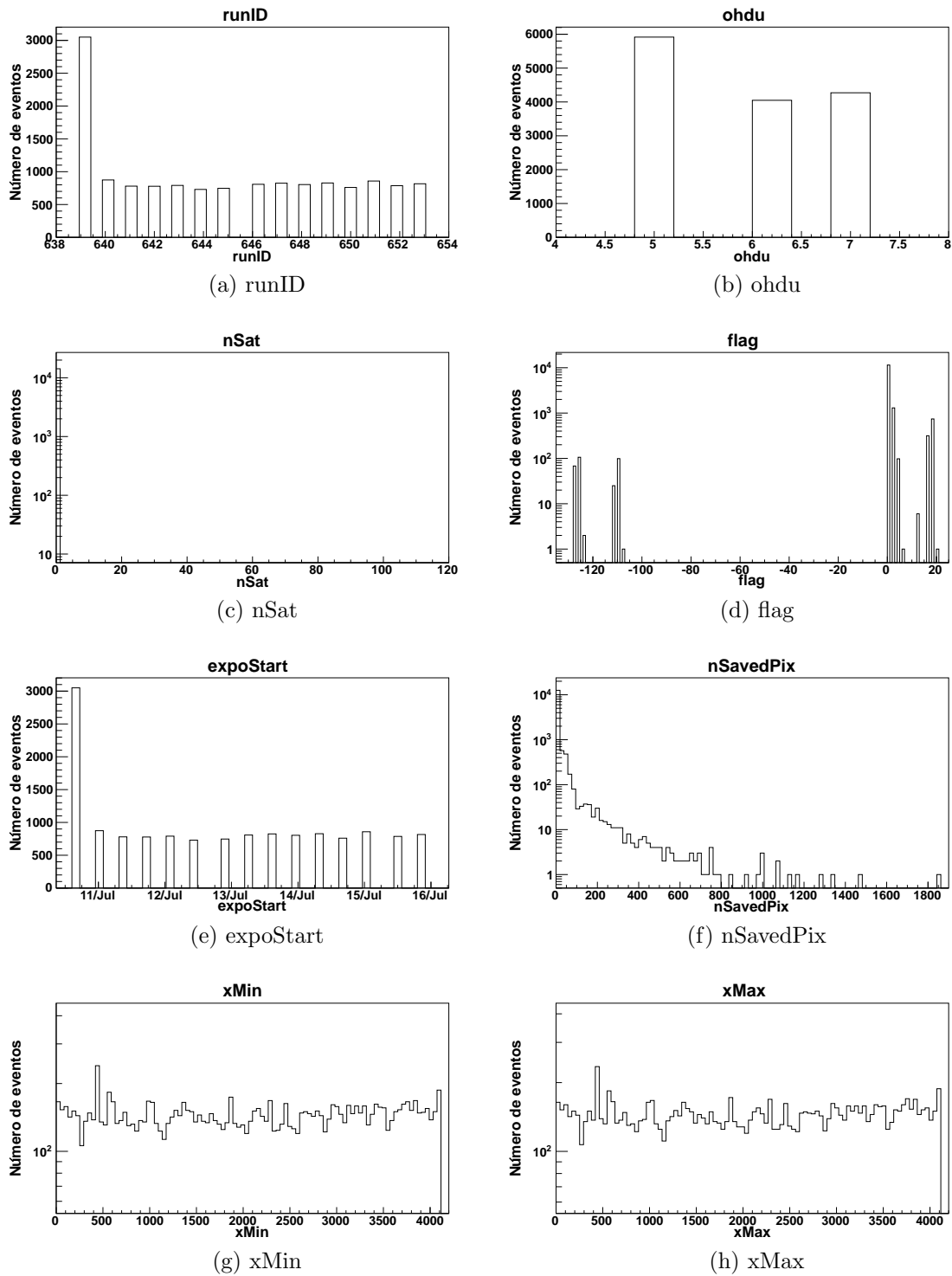


Figura 4.9: Variable a) runID b) ohdu c) nSat d) flag e) expoStart f) nSavedPix g) xMin h) xMax

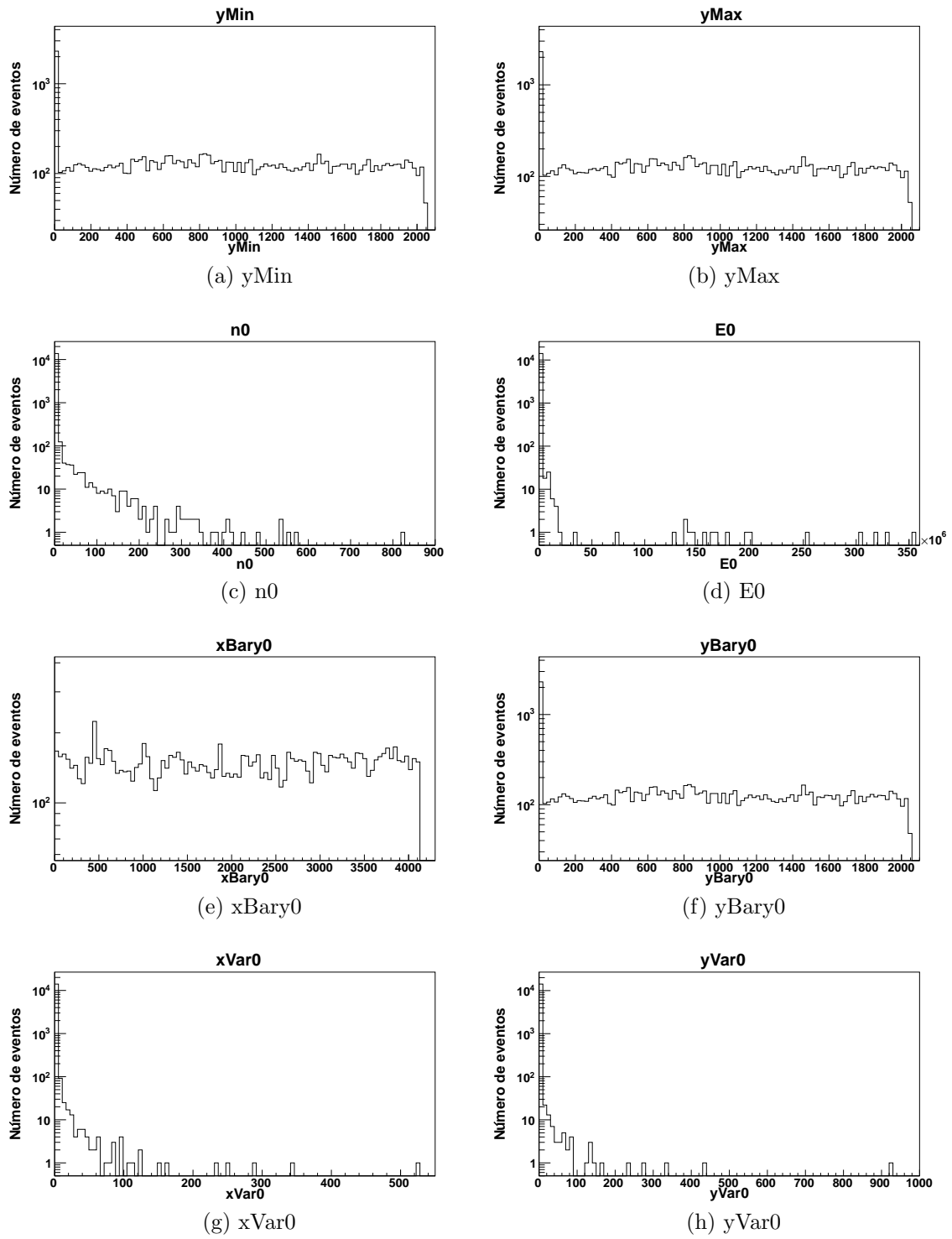


Figura 4.10: Variable a) yMin b) yMax c) n0 d) E0 e) xBary0 f) yBary0 g) xVar0 h) yVar0



## 4.6. Trazas de partículas en los CCD

A partir de la obtención del archivo root (catalogo), es posible realizar un programa que sea capaz de abstraer las trazas de las partículas que interactuaron con el volumen de los CCD. Cada partícula interactuante deja una traza característica en el CCD, para identificar el tipo de partícula que incide se consideran diversos criterios de selección que están relacionados con la energía depositada por la traza, el número de pixeles que ocupa la traza y la forma de ésta. En la figura 4.11 se observan distintas trazas de partículas que hay en una imagen FITS que se obtuvo de una exposición de un CCD, de 16 Mpix que será utilizado para DAMIC100, a una fuente radiactiva de  $^{55}\text{Fe}$ , esta imagen se obtuvo con el programa ds9.

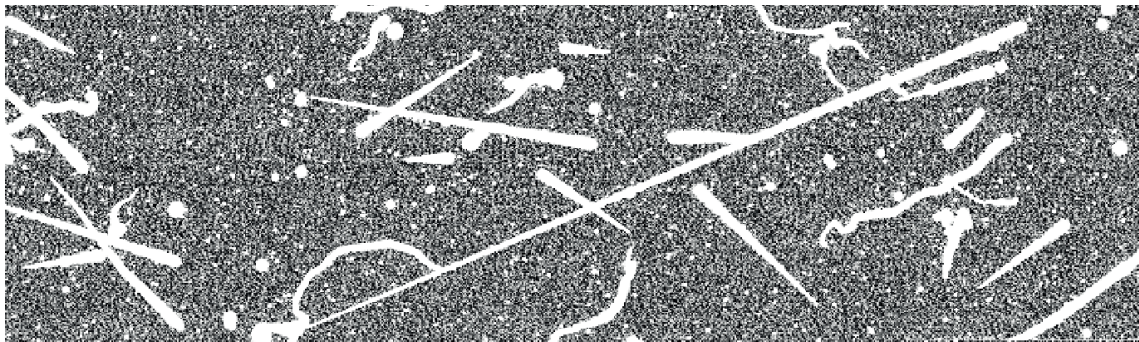
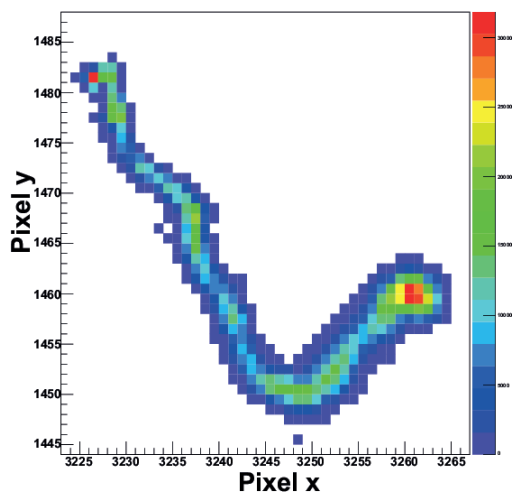


Figura 4.11: Trazas en una imagen FITS que corresponde a una exposición de un CCD, de DAMIC100, a una fuente radiactiva de  $^{55}\text{Fe}$ .

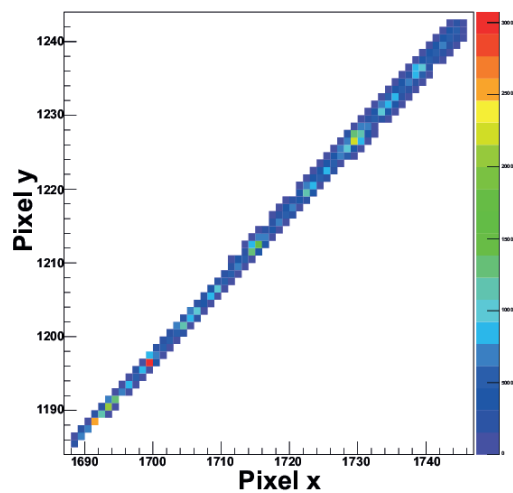
En la figura 4.12 se observan trazas de distintas partículas que interactúan con la CCD. La traza que deja cada partícula es característica, esto se debe a que cada partícula posee una masa típica. Por ejemplo en la figura 4.12a se presenta la traza de un electrón que incidió en el CCD la forma característica de estas partículas es la de un gusano. Por otro lado en la figura 4.12b se muestra la traza de un muón ( $\mu$ ), la forma recta es característica para esta partícula.

En la figura 4.12c se observa la representación de una partícula  $\alpha$  que interactuó con el CCD desde la parte trasera de ésta, la traza característica de estas interacciones es de una bola. Por otro lado, en la figura 4.12d se observa una traza puntual, esta representa la interacción de un neutrón, un rayo X o posiblemente de una WIMP con el volumen de Si del CCD.

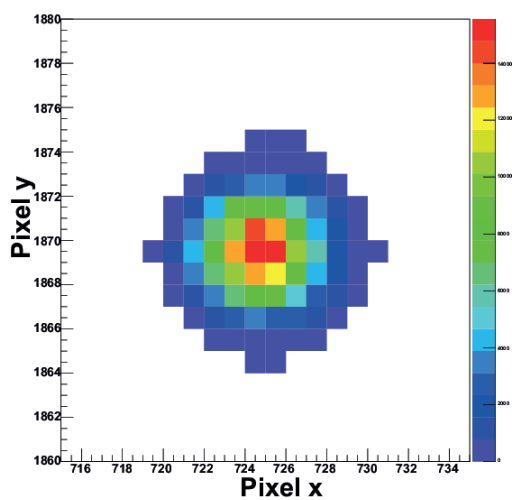
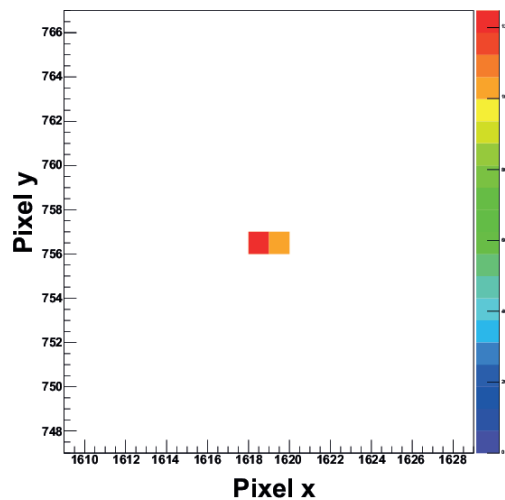




(a) electrón



(b) Muón

(c) Partícula  $\alpha$ 

(d) Neutrón o WIMP

Figura 4.12: a) Imagen de un electrón que incidió en el volumen de silicio del CCD. b) Imagen de un muon que pasó por el CCD c) Imagen que representa a una partícula  $\alpha$  que interaccionó con el CCD. d) Imagen que representa la interacción de un neutrón (o posiblemente de una WIMP) con el CCD.



# Capítulo 5

## Calibración y análisis de los datos obtenidos de los CCD

Este capítulo presenta los métodos que se han venido desarrollando a lo largo del experimento DAMIC, para lograr transformar la carga que se obtiene al final del procesamiento de imágenes, la cual se encuentra en cuentas ADC (*Analog to Digital Converter*), a unidades de energía (keV). Las pruebas que se han llevado a cabo para calibrar y probar la sensibilidad de los dispositivos CCD, han implementado diversos métodos tales como el uso de materiales radiactivos como lo son el  $^{55}\text{Fe}$  y el  $^{241}\text{Am}$  los cuáles emiten rayos X característicos. Los resultados al estudiar su sensibilidad han demostrado que tienen una buena resolución para bajas energías del orden de algunos keV. En las secciones posteriores se presentará la motivación por la cual se han estado utilizando fuentes radiactivas de rayos X para realizar la calibración de los datos del experimento; mientras que en el capítulo 6 se presentarán los resultados de haber realizado la calibración usando fuentes de  $^{55}\text{Fe}$  y  $^{241}\text{Am}$ .

Por otro lado, el presente capítulo presentará un ejemplo del nivel que tienen los eventos de ruido del experimento DAMIC en SNOLAB. Uno de los objetivos principales de conocer el nivel de los eventos de ruido que tiene un experimento es el conocimiento de la sensibilidad con la que se están detectando los eventos que se desean conocer. Como se mencionó en el capítulo 3, durante el desarrollo que se ha tenido en el experimento DAMIC en SNOLAB se ha logrado bajar el nivel de eventos de ruido, en el capítulo 6 se presentarán los resultados sobre la disminución del nivel de eventos de ruido durante el año 2014.

### 5.1. Fuentes radiactivas de rayos X

Como parte de los métodos de calibración que se desarrollan para el experimento DAMIC, se tiene el que convierte la carga depositada en el CCD por las partículas que interactuaron con ella, en unidades de energía. En un principio cuando una partícula

interacciona con el CCD, la carga de la partícula interactuante se mide en unidades de cuentas ADC por el amplificador; por lo cual para conocer la energía con la que la partícula interaccionó con el CCD es necesario realizar una calibración. Uno de los métodos más usado para obtener la calibración de los CCD del experimento DAMIC, es el uso de fuentes radiactivas que emitan rayos X característicos de los cuales es conocida su energía.

Los rayos X se producen cuando los electrones interaccionan con la materia y convierten su energía cinética en radiación electromagnética (fotones). La producción de rayos X característicos consiste en que cada electrón en el átomo del blanco tiene una energía de amarre que depende de la capa en la que se encuentra. (Ver figura 5.1). Cuando la energía de un electrón incidente excede la energía de amarre de un electrón en el átomo del blanco, es energéticamente posible expulsar al electrón e ionizar el átomo. Otro electrón de una órbita superior y con menor energía de amarre ocupará la vacante. En esta transición (de un estado de mayor energía a un estado de menor energía), se emite un rayo X característico con energía igual a la diferencia entre las energías de amarre de las órbitas. Los rayos X emitidos tienen energías discretas y son característicos de cada elemento.

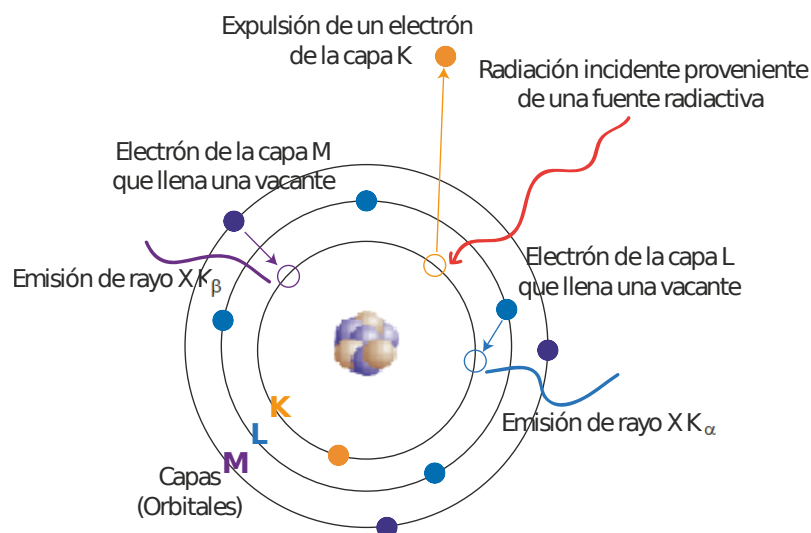


Figura 5.1: Ejemplo de la emisión de rayos X característicos..

Los subíndices  $\alpha$  o  $\beta$  indican la órbita a la que llegó el electrón a llenar la vacante. Si fue de una órbita adyacente igual a  $\alpha$  y si fue de una órbita no adyacente igual a  $\beta$ . Por ejemplo  $K_\alpha$  es igual a la transición de un electrón de la capa L a la capa K y  $K_\beta$  es igual a la transición de un electrón de la capa M, N u O a la capa K.

Cuando un material es radiado con una fuente de rayos X, es posible tener tres efectos: i) que la radiación se disperse sin perder energía (Rayleigh), ii) que la radiación se disperse con pérdida de energía (Compton) y iii) que la radiación expulse un electrón de

alguna capa (efecto fotoeléctrico). En el caso del efecto fotoeléctrico, cuando es ocupada la vacante del electrón, (en un átomo ionizado) por otro electrón de capas superiores, el fotón que es emitido en esta transición corresponde a un fotón característico, en este caso hay producción de fluorescencia dependiendo de la probabilidad de ocurrencia.

Un pico de escape en un espectro de rayos X se identifica debido a que es posible que un fotón de fluorescencia que llegue al detector sea absorbido por la capa del material del mismo dispositivo mediante efecto fotoeléctrico, emitiéndose un fotón característico del material. Debido a esto, la energía depositada en el detector corresponde a la del fotón fluorescente menos la energía del fotón característico del material  $E_{esc} = E_{\gamma fluo.} - E_{\gamma carac.}$ , creándose un pico que aparece a una energía disminuida en  $-E_{esc}$  del pico característico. En el caso del silicio la  $E_{esc} = 1.742$  keV [48].

## 5.2. Calibración del espectro de energía usando fuentes radiactivas de rayos X

Como se mencionó en la sección anterior, en el experimento DAMIC, para realizar la calibración del espectro de cargas a unidades de energía, se efectúa una exposición del CCD ante una fuente radiactiva emisora de rayos X para poder obtener su espectro característico. En este espectro (dependiendo de la fuente radiactiva a la cual se expuso el CCD) se observarán los picos correspondientes a las energías características del elemento de la fuente radiactiva. Una vez identificando los picos y las energías características, se procede realizar la relación de la energía del pico con las cuentas ADC que le corresponden en el espectro, de esta relación se obtiene una recta cuya pendiente es el valor que relaciona a la carga con la energía. Posterior a la relación de la energía en keV con las cuentas en ADC, en la cadena de procesamiento se modifica el archivo correspondiente a la configuración (ver apéndice E) que genera el archivo root de salida (catalogo), de tal manera que el parámetro que corresponde a la calibración se le asigna el valor que se obtuvo de la relación entre la carga en cuantas ADC y la energía en unidades de keV.

La calibración de los dispositivos CCD se ha lleva a cabo tanto en el laboratorio Fermilab como en la Universidad de Chicago, utilizando fuentes emisoras de rayos X y de partículas  $\alpha$ . En la figura 5.2 se muestran dos tipos de arreglos que se utilizan para realizar la exposición de los dispositivos CCD a una fuente radiactiva. El arreglo que se ocupa con más frecuencia es el de la figura 5.2b con una fuente emisora de rayos X.

En la figura 5.3 se muestra el montaje con el cual se realiza la exposición de los CCD a fuentes radiactivas en el laboratorio Fermilab.

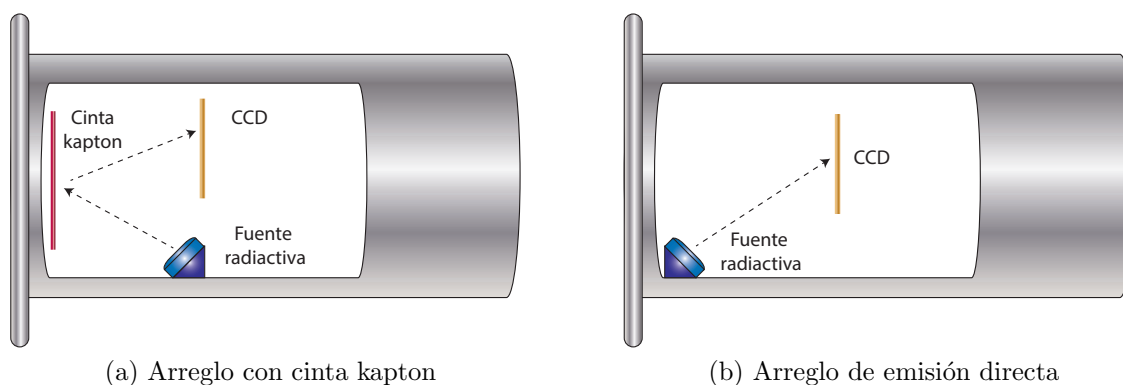


Figura 5.2: Arreglos dentro de una cámara de vacío a) utilizando la cinta de kapton para desviar los rayos de la fuente emisora al CCD y b) enviando directamente los rayos emitidos por la fuente radiactiva al CCD

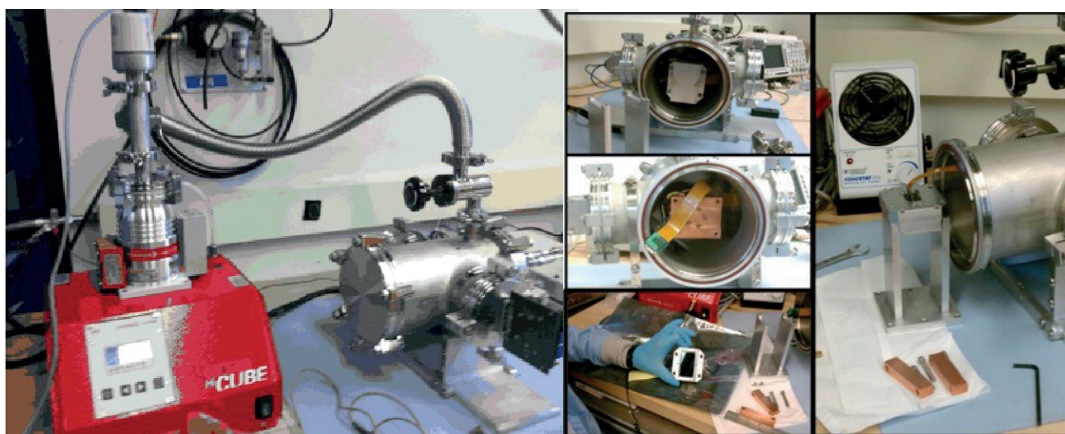


Figura 5.3: Montaje de la cámara de vacío que contiene la CCD que será puesta a exposición de una fuente radiactiva.

### 5.3. Cálculo de eventos de ruido en SNOLAB

Una parte importante para los experimentos que se dedican a la búsqueda de partículas de materia oscura, es la determinación de los eventos de ruido que hay en el experimento. El conocimiento del nivel de eventos de ruido que hay en un experimento permite una discriminación más precisa sobre los eventos que se están buscando y eventos que están siempre presentes en el medio donde se encuentra el experimento.

En la figura 5.4 se presenta el espectro de energía obtenido por el experimento DAMIC en SNOLAB en un intervalo de 0 a 900 keV de una exposición realizada en el mes de Julio de 2014.

Para el experimento DAMIC es de vital importancia el análisis del nivel de ruido que

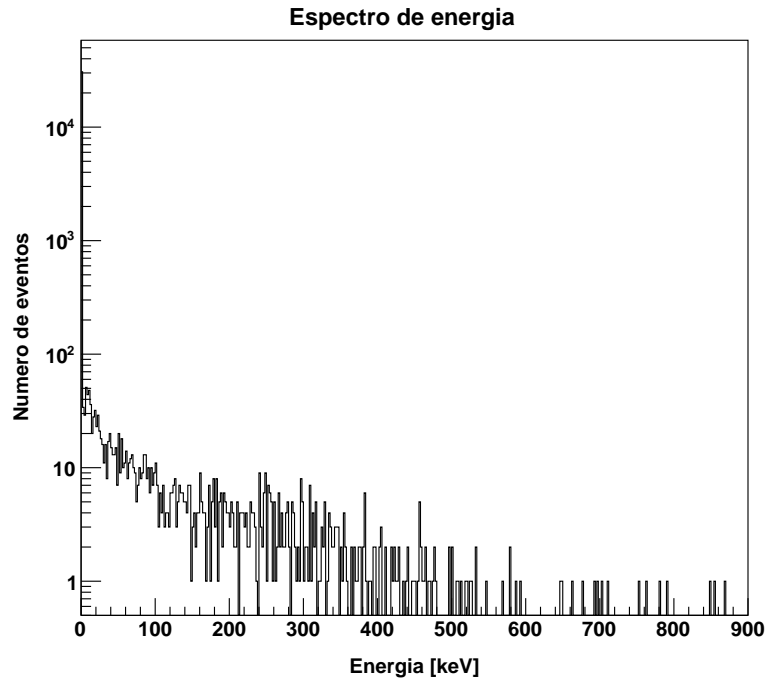


Figura 5.4: Espectro de energía en un intervalo de 0 a 900 keV. La exposición corresponde a la configuración de test4

se tiene en las exposiciones en un intervalo de bajas energías, particularmente en energías menores a los 10 keV. La energía de retroceso que se espera para el experimento esta dada por la ecuación 5.1:

$$Q = \frac{2\mu^2 v^2}{m_{WIMP}} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5.1)$$

donde  $\mu$  es la masa reducida de la interacción WIMP-núcleo ( $\frac{m_{WIMP}M_n}{m_{WIMP}+M_n}$ )  $v$  es la velocidad del Sol alrededor de la galaxia y  $\theta$  es el ángulo de dispersión después de la colisión WIMP-núcleo.

Considerando la masa de una WIMP (que se espera sea de 5 GeV) que viaja a la velocidad del Sol alrededor de la galaxia (220 km/s), la masa del Si es de 26170 MeV y suponiendo que se tiene una colisión elástica donde  $\theta=\pi$ , se tiene que:

$$Q \approx 10 \text{ keV}$$

Para calcular el nivel de los eventos de ruido (*background*) que tienen lugar en el experimento DAMIC en SNOLAB, se realiza un análisis al espectro de energía que se obtiene de un catálogo después de haber realizado una determinada exposición. La ecuación 5.2 muestra la manera en que se calcula el nivel de *background*:

$$Bkgd = \frac{N_{eventos}}{Tiempo \times Masa \times \Delta E} \quad (5.2)$$

Por ejemplo, para el espectro de energía que se muestra en la figura 5.5, que se encuentra en un intervalo de 0.5 keV a 10.5 keV, cuyo tiempo de exposición es de 29.861 días correspondiente al periodo del 18 de Julio al 20 de Agosto de 2014, donde había 3 dispositivos CCD (ver sección 3.5) con una masa activa de 7.198 g y con las restricciones de  $\sqrt{xVar0^2 + yVar0^2} \leq 1$  (varianza que corresponde a eventos de neutrones o los esperados por WIMP) y flag=0 (es decir, considerando pixeles que no estén saturados o que se encuentren en el borde del dispositivo CCD, ver sección 4.5), el cálculo del *background* es el siguiente:

$$Bkgd = \frac{94 \pm \sqrt{94}}{29.861 d \times 7.198 g \times 10 keV} = 0.0437 \pm 0.0045 ev g^{-1} d^{-1} keV^{-1}$$

La incertidumbre en la masa y el tiempo de exposición es mucho menor que el error estadístico en el número de eventos observados y es ignorada en el cálculo.

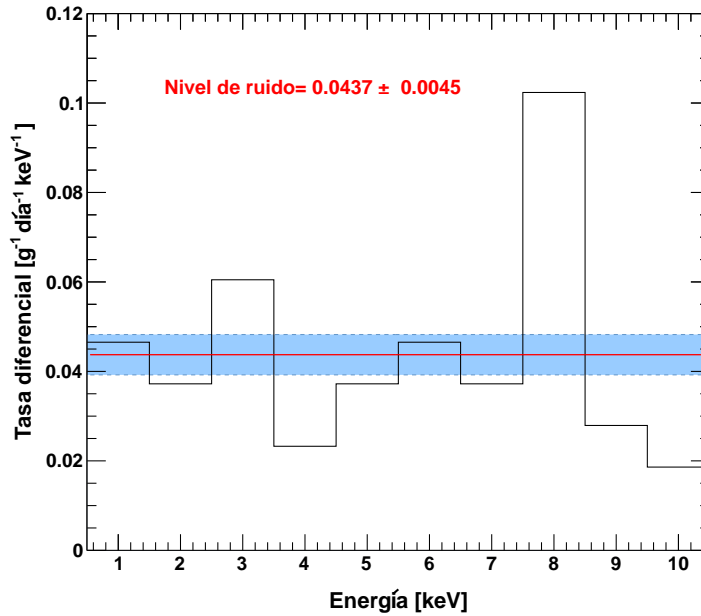


Figura 5.5: Espectro de energía en un intervalo de 0.5 keV a 10.5 keV, donde la línea roja representa el nivel de *background* y la sombra azul representa la incertidumbre para este.

En el capítulo 6 se presentan los análisis parecidos al interior para exposiciones efectuadas durante el 2014, para diferentes configuraciones a lo largo de ese año.



# Capítulo 6

## Resultados

Como se mencionó en el capítulo anterior, uno de los métodos más usados para la calibración de los datos recolectados tras la exposición de un CCD, es el uso de fuentes radiactivas emisoras de rayos X. Como parte de la calibración que se realiza a los dispositivos CCD del experimento DAMIC, el presente capítulo presenta los resultados de dos calibraciones que se llevaron a cabo en el laboratorio Fermilab. Una calibración se realizó con una fuente de  $^{241}\text{Am}$  (para un CCD del primer montaje de DAMIC) y por otro lado, se presenta una calibración usando una fuente radiactiva de  $^{55}\text{Fe}$  para el prototipo de un CCD que será utilizada para el experimento DAMIC100.

Por otra parte, en este capítulo se presentan las mediciones del nivel de eventos de ruido del experimento DAMIC, tras haber analizado múltiples imágenes FITS obtenidas durante el año 2014 en el laboratorio SNOLAB. Como se presentó en la sección 3.5, a lo largo de 2014 se realizaron distintas modificaciones al montaje del experimento con el propósito de disminuir el nivel *background* del experimento, los resultados reflejan estas modificaciones.

### 6.1. Calibración del espectro de energía usando una fuente de $^{55}\text{Fe}$

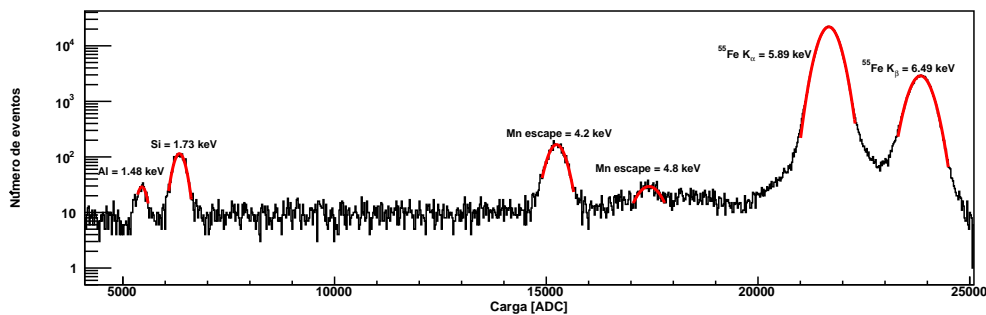
Los resultados de la calibración que se mostrarán a continuación corresponden a datos obtenidos al haber utilizando un CCD de 8 Mpixeles con un espesor de  $650\ \mu\text{m}$  (CCD que pertenece al paquete para el experimento DAMIC100), a una temperatura de 130 K. Los datos analizados fueron recolectados durante 0.833 días formando un total de 20 imágenes FITS, cada una de estas imágenes se obtuvo con un tiempo de exposición de 3600 s y con una ventana de integración de 800 bins. La exposición del CCD se llevó a cabo en el laboratorio Fermilab el 6 de Diciembre de 2014.

En la figura 6.1a se muestra el espectro correspondiente a la carga en cuentas ADC, en este espectro se observan 6 picos que corresponden a la emisión de rayos X del  $^{55}\text{Fe}$ ,

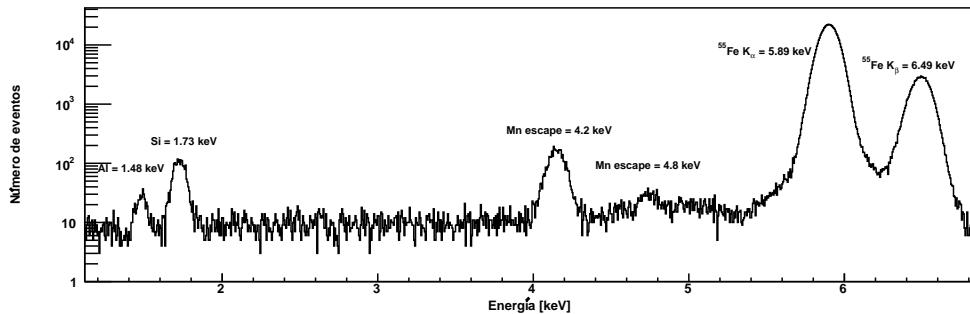
del Al, del Si y dos líneas de escape del Mn. A cada uno de estos picos se les ajustó una función gaussiana más una recta, como se muestra en la ecuación 6.1:

$$f(x) = p_0 e^{-1/2 \left( \frac{x-p_1}{p_2} \right)^2} + 10^{p_3+p_4 x} \quad (6.1)$$

donde  $x$  corresponde al valor de la carga en cuentas ADC, los parámetros  $p_1$  y  $p_2$  de la ecuación 6.1 corresponden a la media y a la sigma (respectivamente) de una función gaussiana. Cada una de las funciones gaussianas se ajusta a los picos de las emisiones de rayos X en el espectro de carga en cuentas ADC, obteniendo de esta forma el valor de la media y de la  $\sigma$  de cada uno de los picos. El valor de las medias de cada uno de los picos se muestran en la tabla 6.1.



(a) Espectro en cuentas ADC



(b) Espectro en unidades de energía (keV)

Figura 6.1: Espectro de energía a) en cuentas ADC, los contornos rojos muestran el ajuste a una función de la forma de la ecuación 6.1 y b) en unidades de energía, después de la calibración.

En la figura 6.2 se presenta el ajuste de la función correspondiente a la ecuación 6.1 a cada uno de los picos que se muestran en color rojo en la figura 6.1a.

Después de haber obtenido los valores correspondientes a los picos del espectro de cargas, se realiza una gráfica que linealiza la correspondencia entre los valores de los

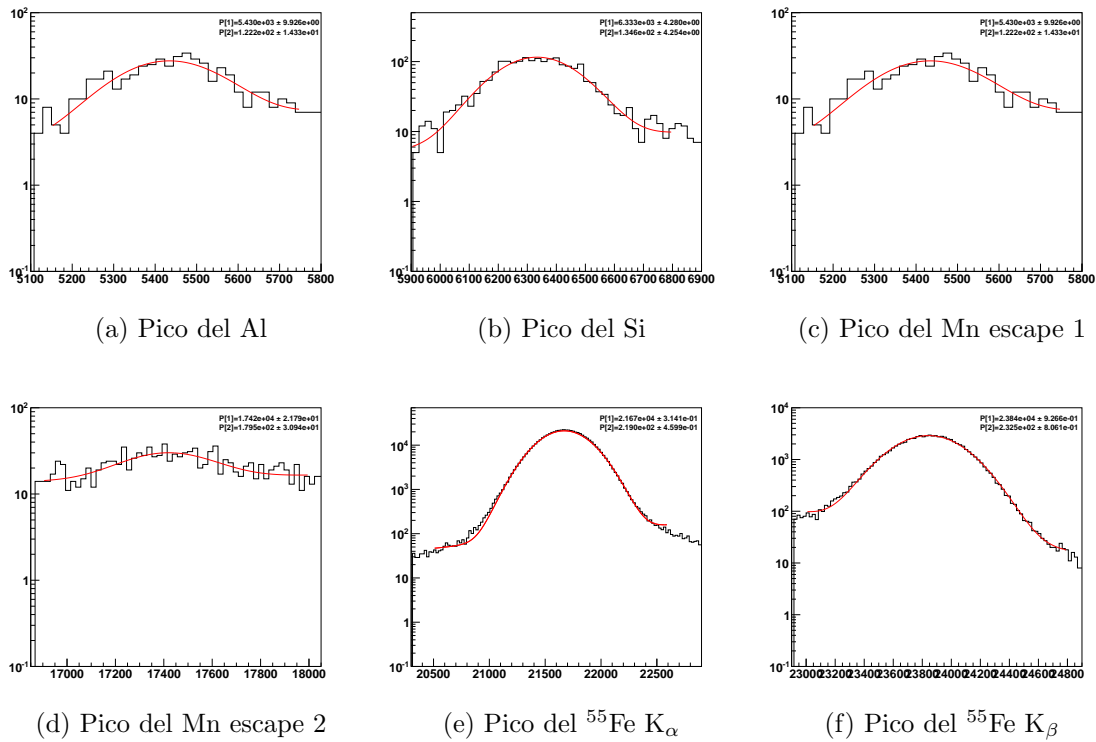


Figura 6.2: Ajuste de la función 6.1 al pico que corresponde al a) Al b) Si c) Mn  $K_\alpha$  escape line d) Mn  $K_\beta$  escape line e)  $^{55}\text{Fe}$   $K_\alpha$  f)  $^{55}\text{Fe}$   $K_\beta$

Calibración de la energía			
Elemento	Carga [ADC] $\pm \delta$	Energía [keV]	Energía reconstruida [keV] $\pm \delta$
Al K	5451.30 $\pm$ 41.66	1.486	1.484 $\pm$ 0.011
Si	6336.34 $\pm$ 22.42	1.739	1.725 $\pm$ 0.006
Mn escape	15242.5 $\pm$ 22.10	4.150	4.149 $\pm$ 0.006
Mn escape	17426.3 $\pm$ 65.61	4.750	4.744 $\pm$ 0.018
$^{55}\text{Fe}$ $K_\alpha$	21672.3 $\pm$ 1.998	5.899	5.899 $\pm$ 0.001
$^{55}\text{Fe}$ $K_\beta$	23840.0 $\pm$ 5.741	6.490	6.489 $\pm$ 0.002

Tabla 6.1: Datos para realizar la calibración del espectro de energías.

picos en unidades de carga (ADC) y los valores de los picos del espectro en unidades de energía (keV). La figura 6.3a muestra la recta que linealiza la carga y la energía, dicha recta tiene una pendiente de  $K_{55\text{Fe}} = 2.72222 \times 10^{-4}$  keV/ADC. Conociendo el valor de la pendiente es posible establecer la correspondencia entre las unidades de la carga (ADC) y las unidades de la energía (keV). Así, como resultado de la calibración se obtiene un espectro de energías, donde ahora las unidades estará en [keV] (energía)

tal como se muestra en la figura 6.1b.

Es posible conocer la precisión con la que se obtuvieron las energías reconstruidas de los picos posterior a la calibración, en la figura 6.3b se muestra la relación de identidad entre la energía verdadera y reconstruida del valor de los picos; adicionalmente, en la tabla 6.1 se muestran los valores de las energías reconstruidas de cada uno de los picos con su correspondiente incertidumbre y el valor de la energía verdadera.

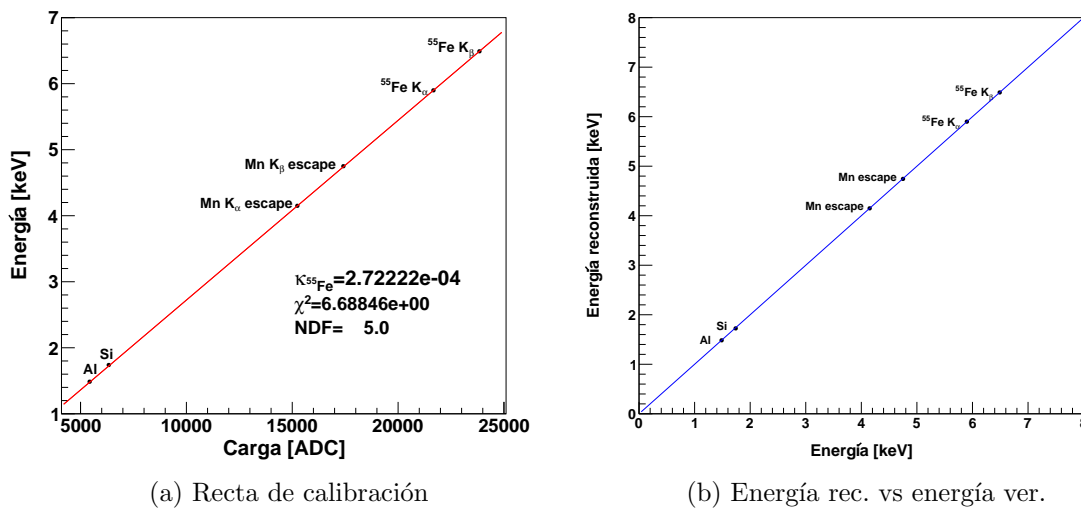


Figura 6.3: Gráfica donde se ajusta una recta a los valores de los picos del espectro de energía en unidades ADC y los valores de los picos en unidades de keV.

Por otro lado, después de haber realizado el ajuste de la función 6.1 a los picos del espectro de energías, como se mencionó anteriormente, el parámetro  $p2$  corresponde a la  $\sigma$  de la función gaussiana ajustada a cada pico. A partir de este valor es posible conocer la relación de la varianza ( $\sigma^2$ ) en función de la energía. Esta relación tiene la forma de la ecuación 6.2:

$$\sigma^2 = (0.16) \times (0.0036 \text{ keV}) \times E \quad (6.2)$$

donde el valor de 0.16 corresponde al factor de fano, mientras que el valor de 0.0036 keV corresponde a la energía necesaria para crear un par electrón-agujero en el Si.

En la figura 6.4a se presenta la gráfica de  $\sigma$  de cada uno de los picos en función de la energía donde la línea azul representa la raíz cuadrada de la ecuación 6.2. Por otro lado en la figura 6.4b se muestra la gráfica correspondiente a la varianza en función de la energía y cuyo comportamiento sigue la recta azul que corresponde a la ecuación 6.2.

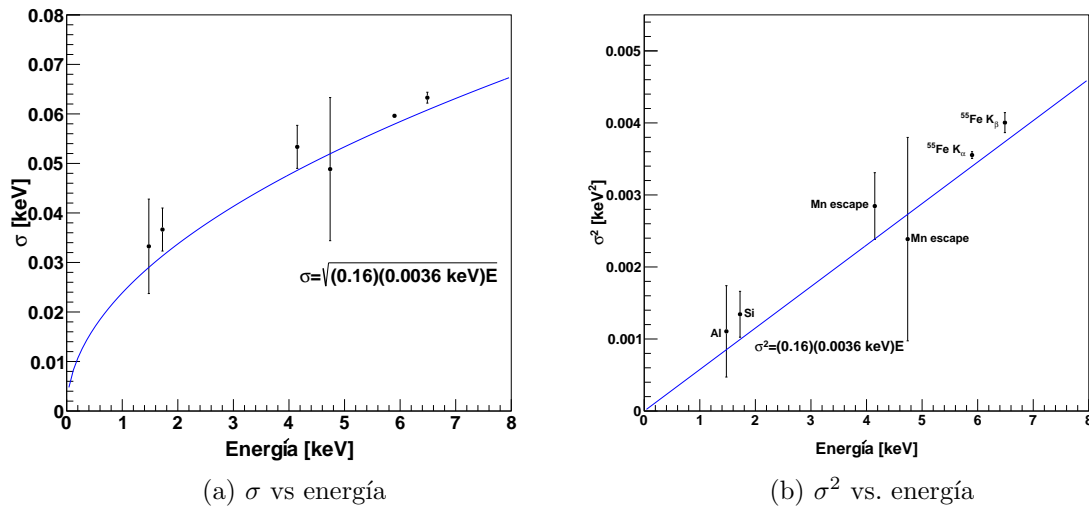


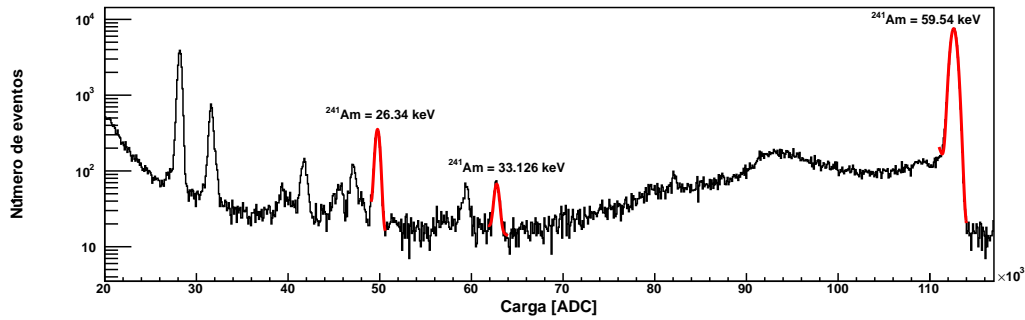
Figura 6.4: a)  $\sigma$  en función de la energía b) Varianza ( $\sigma^2$ ) en función de la energía.

## 6.2. Calibración del espectro de energía usando una fuente de $^{241}\text{Am}$

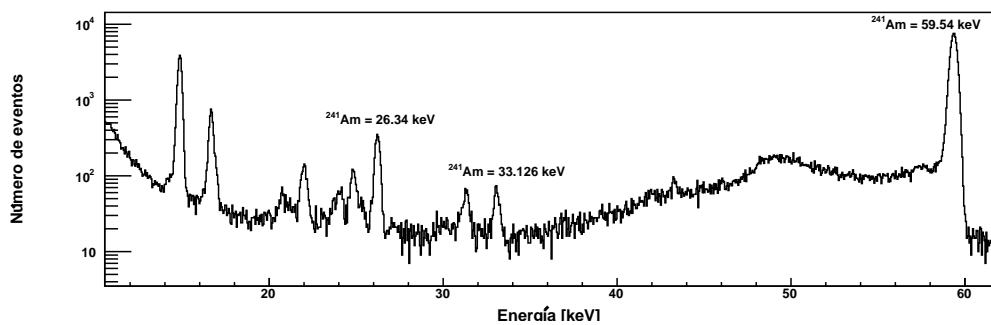
El espectro que se presenta en la figura 6.5a corresponde a un CCD que fue puesto a exposición de una fuente radiactiva de  $^{241}\text{Am}$ . Los datos que se utilizaron para realizar esta calibración fueron tomados el 6 de septiembre de 2013, se utilizó una CCD de  $250\ \mu\text{m}$  de espesor. Para esta exposición se obtuvieron 61 imágenes FITS, cada una de éstas tenía 300 s de exposición, con una ventana de integración de 300 bins y con un voltaje de reloj de 40 V.

Como en el caso anterior, los picos del espectro de cargas fueron ajustados por funciones como las de la ecuación 6.1 (figura 6.6), que se muestran en color rojo en la figura 6.5a, estos picos corresponden a las emisiones de rayos X debido a la fuente radiactiva de  $^{241}\text{Am}$ . En la tabla 6.2 se muestra el valor en cuentas ADC de la media (parámetro p1 de la función 6.1 para cada uno de los picos ajustado). De igual manera se muestra el valor de la energía verdadera [49] de cada uno de los picos.

Después de haber realizado el ajuste de una función como la de la ecuación 6.1 a cada uno de los picos del espectro, se obtiene el parámetro que corresponde a la media de cada gaussiana, este valor es el que se asigna como el valor del pico en cuentas ADC. Como se mencionó anteriormente, las fuentes radiactivas emisoras de rayos X son característicos y se encuentran registrados en tablas, considerando esto se le asigna el valor de la media de cada pico al valor verdadero en unidades de energía que es característico al pico.



(a) Espectro en cuentas ADC



(b) Espectro en unidades de energía (keV)

Figura 6.5: a) Espectro de la carga en cuentas ADC de la exposición de un CCD a una fuente de <sup>241</sup>Am. b) Espectro de energías de la exposición de un CCD ante una fuente de <sup>241</sup>Am.

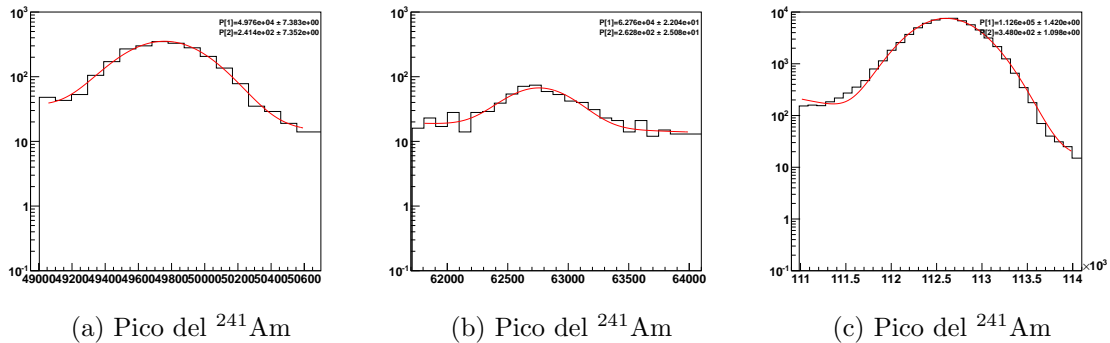


Figura 6.6: a) Ajuste de una gaussiana al <sup>241</sup>Am b) Ajuste al pico del <sup>241</sup>Am c) Ajuste al pico del <sup>241</sup>Am correspondiente a los 59.54 keV

Elemento	Carga [ADC] $\pm \delta$	Energía [keV]	Energía reconstruida [keV] $\pm \delta$
<sup>241</sup> Am	49751.0 $\pm$ 18.37	26.344	26.222 $\pm$ 0.010
<sup>241</sup> Am	62725.0 $\pm$ 39.40	33.126	33.167 $\pm$ 0.021
<sup>241</sup> Am	112606.0 $\pm$ 4.63	59.541	59.353 $\pm$ 0.002

Tabla 6.2: Tabla con la carga en cuentas ADC y la energía correspondiente en keV de una fuente de <sup>241</sup>Am para obtener la calibración del espectro de energías.

En la tabla 6.2 se presentan los valores de los picos en cuentas ADC y su respectiva energía verdadera en unidades de energía, considerando estos valores se ajusta una recta (figura 6.7) cuya pendiente corresponde al valor de la calibración. Esta constante  $\kappa$  es el valor con el que es posible convertir la carga en unidades de cuentas ADC a unidades de energía. El valor de  $\kappa_{^{241}\text{Am}}$  es de  $5.28762 \times 10^{-4} \frac{\text{keV}}{\text{ADC}}$ . La figura 6.5b muestra el mismo espectro de la figura 6.5a pero después de haber vuelto a generar el catalogo (archivo ROOT) considerando que en el archivo de la extracción del catálogo se contempla el valor de la constante de calibración. De esta manera el espectro que se obtiene ahora se encuentra en unidades de energía [keV].

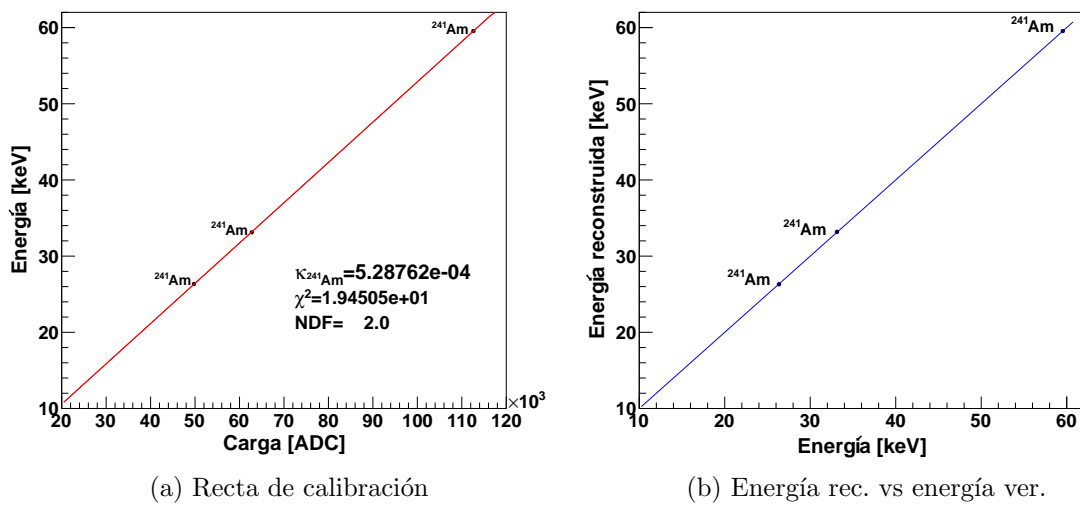


Figura 6.7: a) Recta de calibración que determina el valor correspondiente de la carga en cuentas ADC al valor verdadero de la energía para un conjunto de datos obtenidos tras haber puesto ante la exposición de un CCD a una fuente de  $^{241}\text{Am}$ . b) Recta identidad de la energía reconstruida vs la energía verdadera de los picos del  $^{241}\text{Am}$ .

En la figura 6.7b se representa el valor de la energía verdadera y la energía reconstruida de los picos característicos del  $^{241}\text{Am}$  después de haber realizado la calibración. En esta figura se muestra la relación de identidad entre la energía verdadera y reconstruida, estos valores se pueden consultar en la tabla 6.2.

Como en el caso de la calibración del espectro de energía usando una fuente de  $^{55}\text{Fe}$ , al ajustar la función 6.1 a los picos característicos del  $^{241}\text{Am}$  es posible conocer el parámetro  $\sigma$  para cada uno de los ajustes. Con lo anterior se obtiene la relación de la varianza con la energía. En la figura 6.8a se presenta la  $\sigma$  en función de la energía para cada uno de los picos del espectro del  $^{241}\text{Am}$ , donde la recta azul corresponde a la raíz cuadrada de la ecuación 6.2. Por otro lado en la figura 6.8b se presenta la relación de la varianza en función de la energía donde la recta azul corresponde a la ecuación 6.2.

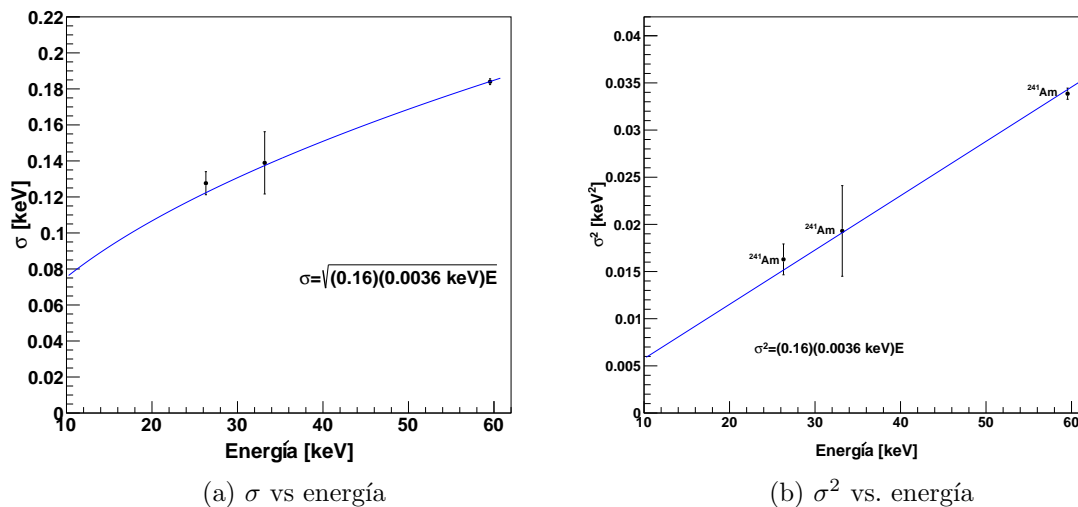


Figura 6.8: a) Relación entre la  $\sigma$  de los picos del espectro y la energía de cada pico. b) Relación de la varianza con la energía reconstruida para los datos obtenidos por la exposición de un CCD a una fuente de  $^{241}\text{Am}$ .

### 6.3. Resultado total de las exposiciones usando fuentes de rayos X de $^{55}\text{Fe}$ y $^{241}\text{Am}$

En las secciones 6.1 y 6.2 se mostró la manera de calibrar los datos que contienen la carga de los pixeles obtenidos por el CCD, en unidades de energía usando una fuente de  $^{55}\text{Fe}$  y de  $^{241}\text{Am}$ , a continuación se presentarán los resultados totales de ambas calibraciones. En la figura 6.9 se presenta la relación de identidad de los valores de la energía reconstruida de los picos del espectro de  $^{55}\text{Fe}$  y de  $^{241}\text{Am}$  en función de su correspondiente energía verdadera.

En la figura 6.10 se muestra la gráfica correspondiente a los valores de la varianza de cada uno de los picos de los espectros de  $^{55}\text{Fe}$  y de  $^{241}\text{Am}$  en función de la energía, la línea azul corresponde a la ecuación 6.2; mientras que la línea punteada roja, corresponde al ajuste de la ecuación 6.3 a los puntos de la gráfica 6.10.

$$\sigma^2(E) = (q0/(1 + q1 * E) + q2) \times (0.0036 \text{ keV}) \times E \quad (6.3)$$

En la ecuación 6.3 el factor de fano corresponde al parámetro q2 el cuál al ser ajustado a los datos adquiere un valor de  $0.157 \pm 0.006$ . Por otro lado en la figura 6.10 se muestra una línea negra punteada cuyo valor es de 20.43 eV, el cual corresponde a una resolución límite a  $3\sigma$ . Este valor es consistente, considerando que el ruido RMS en la medición de cada pixel es de  $\approx 2 \text{ e}^-$ .



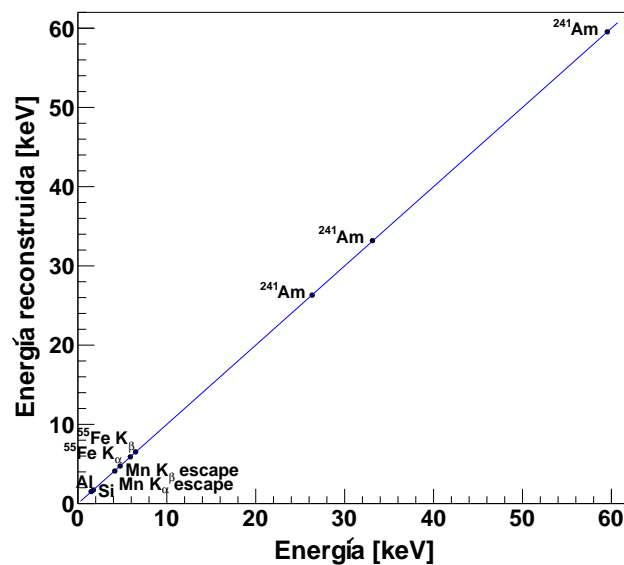


Figura 6.9: Gráfica que muestra la correspondencia en la recta identidad para los valores de la energía reconstruida contra la energía verdadera de los picos de los espectros de  $^{55}\text{Fe}$  y de  $^{241}\text{Am}$ .

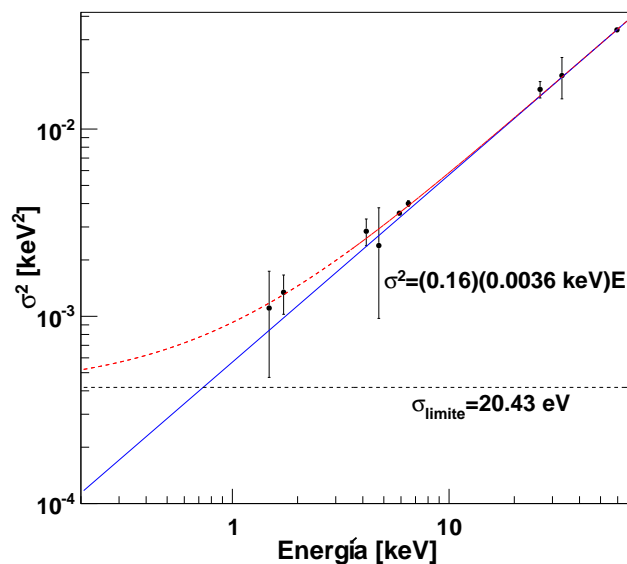


Figura 6.10: Gráfica de la varianza en función de la energía para los picos de los espectros de  $^{55}\text{Fe}$  y de  $^{241}\text{Am}$ . El límite de resolución  $\sigma_{\text{limite}}$  corresponde a un umbral de  $\sim 3 \sigma$  por encima del ruido RMS intrínseco del CCD.

Como parte de los resultados donde se muestra la sensibilidad de los dispositivos CCD como detectores de partículas ionizantes, en la figura 6.11 se muestra la resolución en función de la energía. La resolución se obtuvo con la ecuación 6.4 donde FWHM (*Full width at half maximum*) es  $2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ , donde  $\sigma$  es el ancho de la gaussiana y E es la energía del pico de la gaussiana.

$$Resolucion_{detector} = \frac{FWHM}{E} \times 100\% \quad (6.4)$$

En esta gráfica se observa que estos dispositivos tienen una buena resolución incluso para energías del orden de 1 keV, para las que se tiene una resolución de  $\approx 6\%$ .

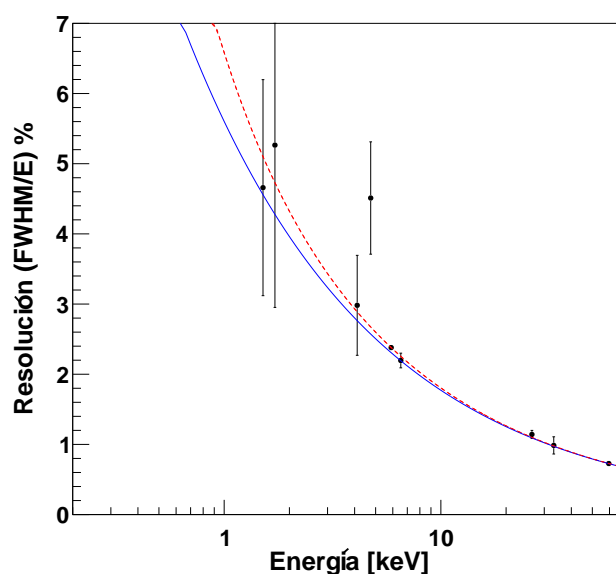


Figura 6.11: Gráfica de la resolución en función de la energía.

## 6.4. Nivel de ruido en el experimento DAMIC

Existen distintos factores que contribuyen en el cálculo del nivel de ruido que se tiene en un experimento, algunos de estos factores provienen de los materiales con los que se construyó el montaje del experimento, otros son los factores ambientales, la radiación natural, etc. En la evolución del experimento DAMIC se han encontrado diversas fuentes contaminantes que provocan considerables niveles de ruido, una gran mayoría de estas fuentes se han erradicado, consiguiendo así una disminución considerable del nivel de ruido que se observa hasta el momento.

A continuación se presentarán los resultados de la medición del nivel de ruido que se obtiene tras haber analizado los datos obtenidos por el experimento DAMIC en SNOLAB

a lo largo del año 2014.

Las características generales que tienen las exposiciones analizadas son las siguientes:

Los CCD fueron leídas por el amplificador derecho mientras que el amplificador izquierdo se usó para medir el ruido correlacionado; es decir, sólo la parte derecha de la imagen contiene los datos reales, mientras que la parte izquierda de las imágenes contiene el ruido debido a la lectura. (Figura 4.1)

Para las exposiciones que se llevaron a cabo de marzo a noviembre del año 2014, se utilizaron 3 CCD que están en un sustrato de silicio, estas CCD son las mismas que se utilizan en el experimento DESI. La configuración del montaje del experimento, constó de un CCD de  $650 \mu\text{m}$  en la extensión 4 y dos CCD de  $500 \mu\text{m}$  uno en la extensión 5 y el otro en la extensión 6. (Figura 3.10). La masa total de los 3 dispositivos CCD es de  $7.198 \text{ g}$

Por otro lado, para las exposiciones que se realizaron en el periodo de diciembre de 2014, se utilizaron 3 CCD de  $650 \mu\text{m}$ , las cuales son parte del paquete que corresponde a DAMIC100. En este caso se modificó la configuración del montaje, los CCD se encuentran en las extensiones 2, 5 y 6. La masa total de los 3 dispositivos CCD es de  $8.506 \text{ g}$

Para realizar el análisis se consideraron imágenes FITS cuya ventana de integración fuera de 800 bins (considerando que 1 bin corresponde a  $50 \text{ ns}$ , 800 bins corresponden a  $4 \mu\text{s}$ ). Conjuntamente, el tiempo de exposición de las imágenes analizadas fue de  $30000 \text{ s}$ .

Las gráficas correspondientes a la medición del nivel de ruido, que se presentan a continuación, se encuentran en un intervalo de energía de  $0.5 \text{ keV}$  a  $10.5 \text{ keV}$  (en este intervalo de energía se realizó la medición del nivel de ruido).

Para cada periodo de exposición realizado, se presentan 2 gráficas que muestran el nivel de ruido en el volumen total de las 3 CCD. Por un lado, se muestra la gráfica del nivel de ruido sólo considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  (eventos que no tengan pixeles saturados, pixeles dañados o pixeles que tocan alguno de los bordes del CCD. Ver sección 4.5); mientras que por otro lado, se muestra la gráfica del nivel de ruido considerando  $\text{flag}=0$  y  $\sqrt{x\text{Var}0^2 + y\text{Var}0^2} \leq 1$  ya que esta última restricción implica que sólo se consideran eventos que tienen una varianza parecida a lo que se espera tenga una WIMP ( $\leq 1$ ).

Por completas al análisis realizado, se presentan las gráficas correspondientes a la medición del nivel de ruido en cada una de las extensiones que contenían una de los CCD. Mostrando que el promedio de cada una de estas mediciones da como resultado la medición obtenida del volumen total.

La figura 6.12 muestra las gráficas del espectro de energía para una exposición realizada del 14 de marzo al 1 de abril de 2014. Durante este periodo se obtuvieron 52 imágenes FITS haciendo un tiempo total de exposición de 18.056 días. Para esta exposición se obtuvo un *background* total de 0.2578 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.3). Esta corrida se realizó usando la configuración *kun1*.

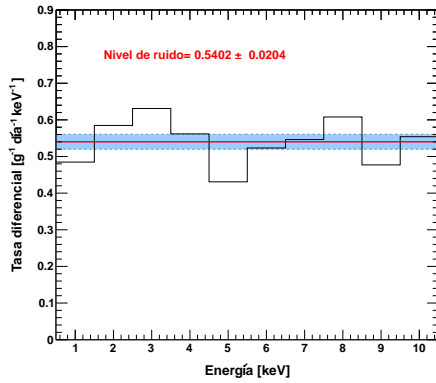
Por otro lado, en la figura 6.14 se presentan las gráficas del espectro de energía, después de haber analizado 20 imágenes FITS, correspondientes a una exposición usando la configuración *kun1*. El periodo en que se realizó la exposición fue del 5 al 12 de abril de 2014, correspondiente a un tiempo de exposición de 6.944 días. El *background* medido es de 0.220 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.4).

Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
4	650	2.835	307	$0.5997 \pm 0.0342$
5	500	2.181	197	$0.5002 \pm 0.0356$
6	500	2.181	198	$0.5028 \pm 0.0357$
Total	-	7.198	702	$0.5402 \pm 0.0204$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	145	$0.2832 \pm 0.0235$
5	500	2.181	41	$0.1041 \pm 0.0163$
6	500	2.181	149	$0.3783 \pm 0.0310$
Total	-	7.198	335	$0.2578 \pm 0.0141$

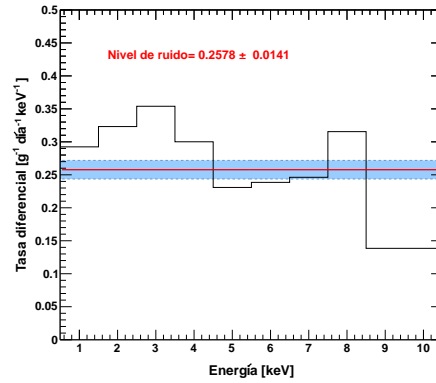
Tabla 6.3: Datos de la exposición realizada del 14 de marzo al 1 de abril de 2014.

Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
4	650	2.835	110	$0.5586 \pm 0.0533$
5	500	2.181	72	$0.4753 \pm 0.0560$
6	500	2.181	76	$0.5018 \pm 0.0576$
Total	-	7.198	258	$0.5162 \pm 0.0321$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	39	$0.1981 \pm 0.0317$
5	500	2.181	15	$0.0990 \pm 0.0256$
6	500	2.181	56	$0.3697 \pm 0.0494$
Total	-	7.198	110	$0.2201 \pm 0.0210$

Tabla 6.4: Datos de la exposición realizada del 5 al 12 de abril de 2014.

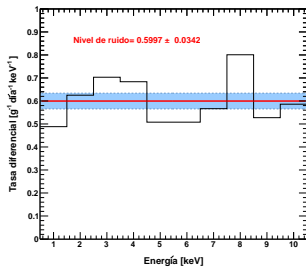


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

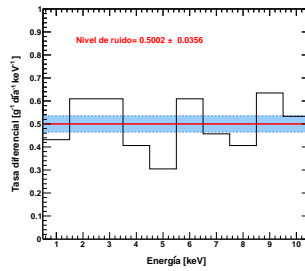


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

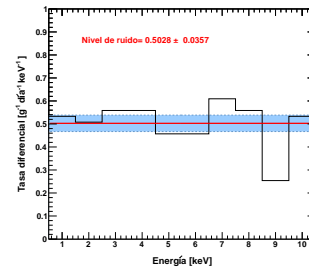
Figura 6.12: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 14 de marzo al 1 de abril de 2014



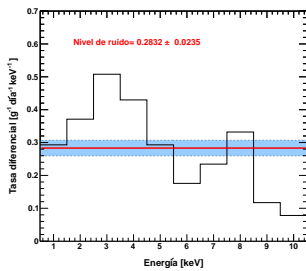
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



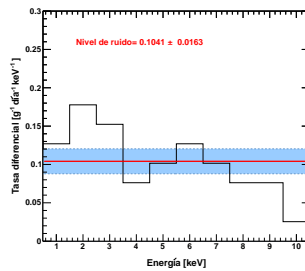
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



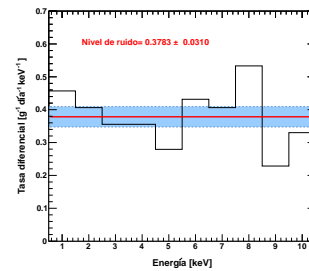
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza

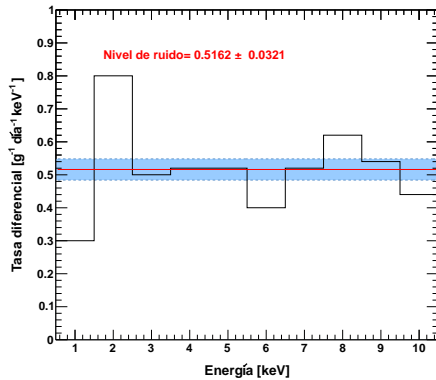


(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza

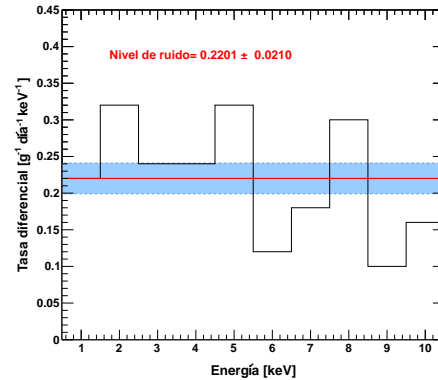


(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.13: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición 14 de marzo al 1 de abril de 2014.

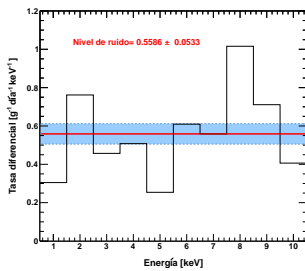


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

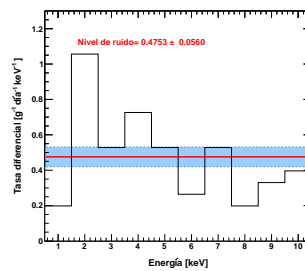


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

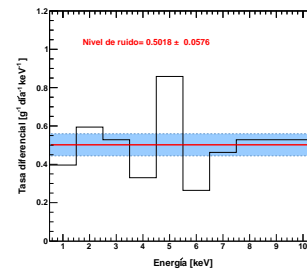
Figura 6.14: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 5 al 12 de abril de 2014.



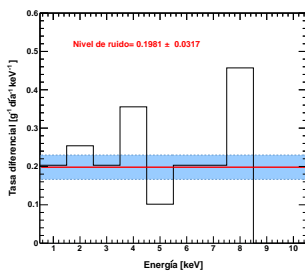
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



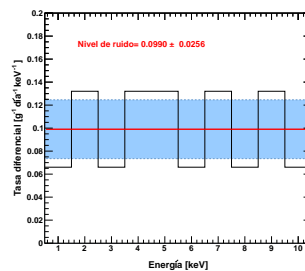
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



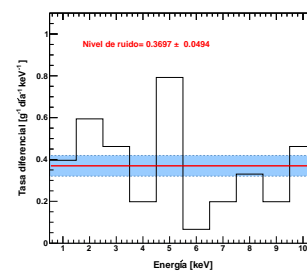
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.15: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 5 al 12 de abril de 2014.

La figura 6.16 muestra las gráficas del espectro de energía, tras haber analizado 24 imágenes FITS correspondiente a una corrida usando la configuración *kun1*. La exposición se realizó del 13 al 21 de abril de 2014. El *background* medido es de 0.258 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.5). Con un tiempo de exposición de 8.333 días.

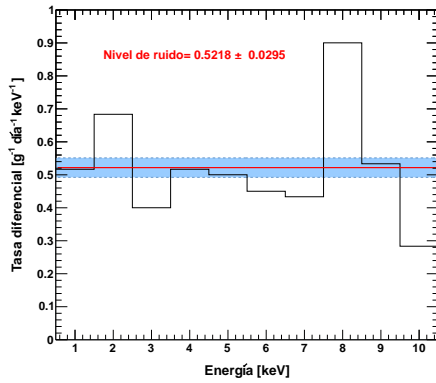
En la figura 6.18 se presentan las gráficas del espectro de energía, para una exposición realizada del 23 al 28 de abril de 2014, en este periodo se generaron 14 imágenes FITS correspondientes a un tiempo de exposición de 4.861 días. El *background* que se obtuvo es de 0.254 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.6). La exposición realizada se obtuvo usando la configuración *kun1*.

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
4	650	2.835	125	$0.5290 \pm 0.0473$
5	500	2.181	87	$0.4786 \pm 0.0513$
6	500	2.181	101	$0.5557 \pm 0.0553$
Total	-	7.198	313	$0.5218 \pm 0.0295$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	62	$0.2624 \pm 0.0333$
5	500	2.181	16	$0.0880 \pm 0.0220$
6	500	2.181	77	$0.4236 \pm 0.0483$
Total	-	7.198	155	$0.2584 \pm 0.0208$

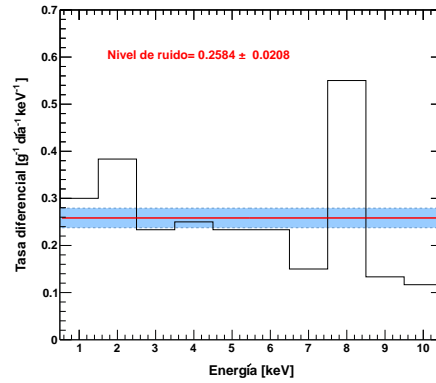
Tabla 6.5: Datos de la exposición realizada del 13 al 21 de abril de 2014

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
4	650	2.835	79	$0.5731 \pm 0.0645$
5	500	2.181	61	$0.5753 \pm 0.0737$
6	500	2.181	58	$0.5470 \pm 0.0718$
Total	-	7.198	198	$0.5659 \pm 0.0402$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	36	$0.2612 \pm 0.0435$
5	500	2.181	15	$0.1415 \pm 0.0365$
6	500	2.181	38	$0.3584 \pm 0.0581$
Total	-	7.198	89	$0.2544 \pm 0.0270$

Tabla 6.6: Datos de la exposición realizada del 23 al 28 de abril de 2014

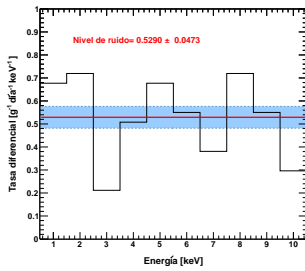


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

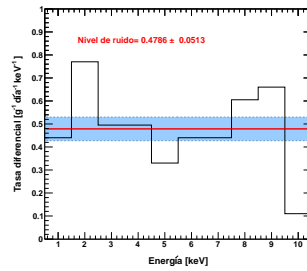


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

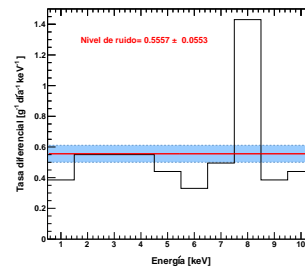
Figura 6.16: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 13 al 21 de abril de 2014.



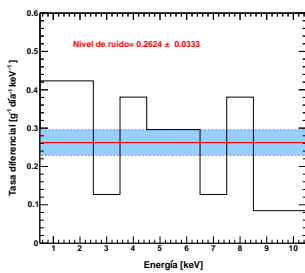
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



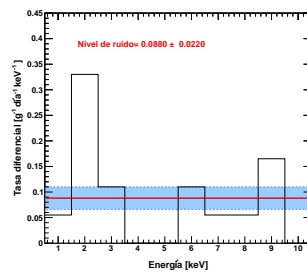
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



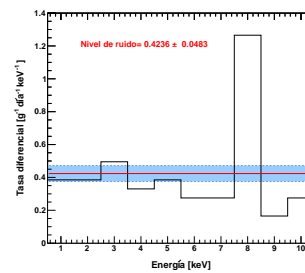
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



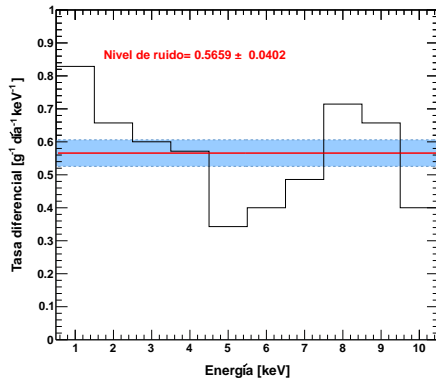
(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



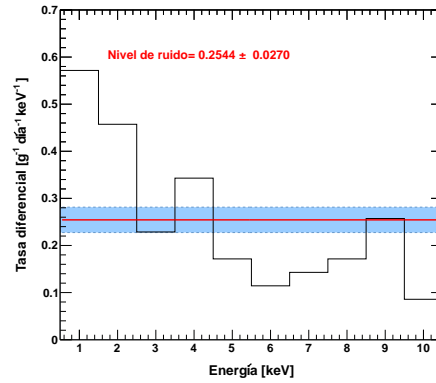
(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.17: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 13 al 21 de abril de 2014.



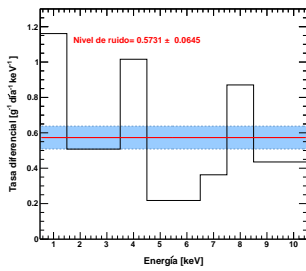


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

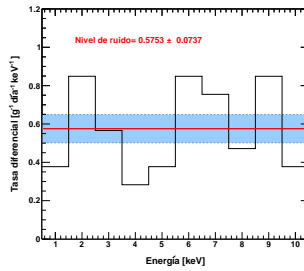


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

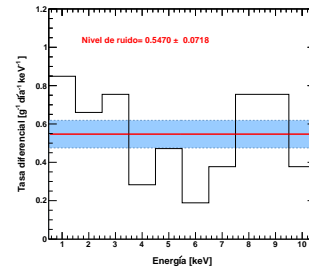
Figura 6.18: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 23 al 28 de abril de 2014



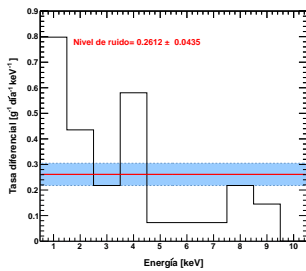
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



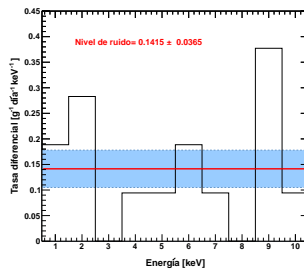
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



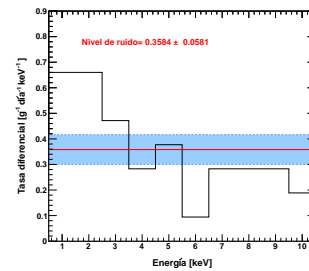
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.19: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 23 al 28 de abril de 2014.

En la figura 6.20 se muestra las gráficas del espectro de energía, después de haber analizado 11 imágenes FITS correspondiente a una exposición realizada con la configuración *test 4*, durante el periodo del 1 al 4 de mayo de 2014 (con un tiempo de exposición de 3.819 días). Se obtuvo un *background* de 0.352 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.7).

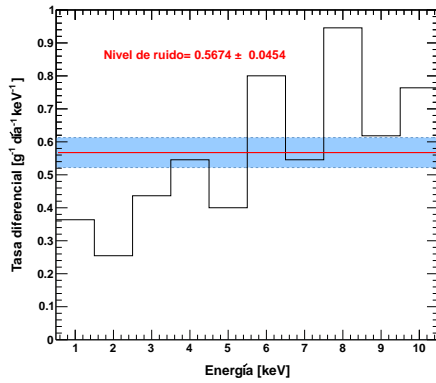
Por otra parte, la figura 6.22 muestra las gráficas del espectro de energía, para una exposición realizada del 5 al 19 de Mayo de 2014. En este periodo se obtuvieron 32 imágenes FITS haciendo un tiempo de exposición de 11.111 días. En esta corrida se usó la configuración *test 4*. El *background* obtenido es de 0.342 eventos/(g día keV)(considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.8) .

Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu m</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
4	650	2.835	59	$0.5448 \pm 0.0709$
5	500	2.181	52	$0.6242 \pm 0.0866$
6	500	2.181	45	$0.5402 \pm 0.0805$
Total	-	7.198	156	$0.5674 \pm 0.0454$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	34	$0.3139 \pm 0.0538$
5	500	2.181	28	$0.3361 \pm 0.0635$
6	500	2.181	35	$0.4201 \pm 0.0710$
Total	-	7.198	97	$0.3528 \pm 0.0358$

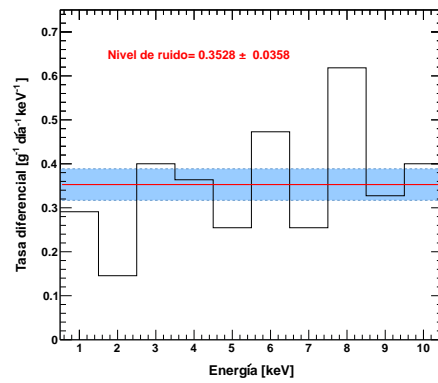
Tabla 6.7: Datos de la exposición realizada del 1 al 4 de mayo de 2014.

Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu m</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
4	650	2.835	180	$0.5713 \pm 0.0426$
5	500	2.181	116	$0.4786 \pm 0.0444$
6	500	2.181	133	$0.5488 \pm 0.0476$
Total	-	7.198	429	$0.5364 \pm 0.0259$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	108	$0.3428 \pm 0.0330$
5	500	2.181	66	$0.2723 \pm 0.0335$
6	500	2.181	100	$0.4126 \pm 0.0413$
Total	-	7.198	274	$0.3426 \pm 0.0207$

Tabla 6.8: Datos de la exposición realizada del 5 al 19 de Mayo de 2014.

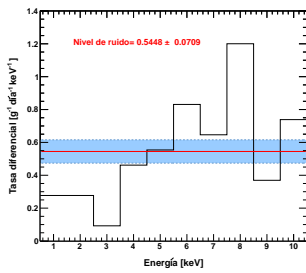


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

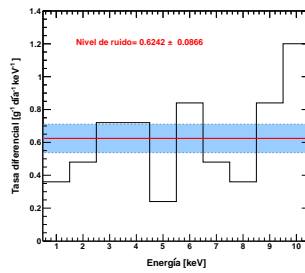


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

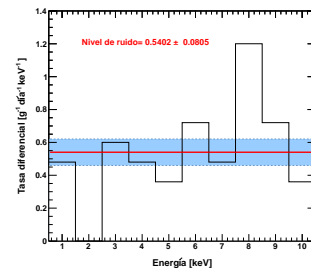
Figura 6.20: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 1 al 4 de mayo de 2014.



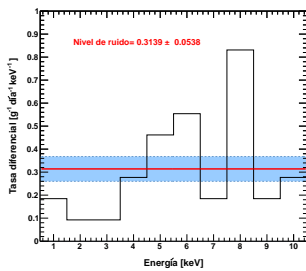
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



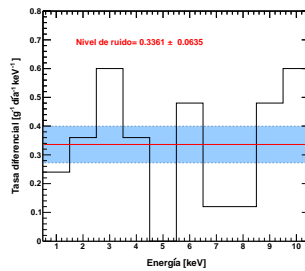
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



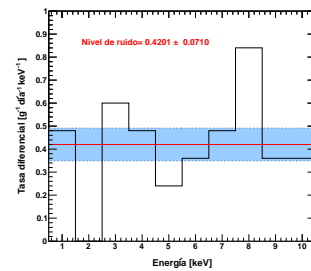
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza

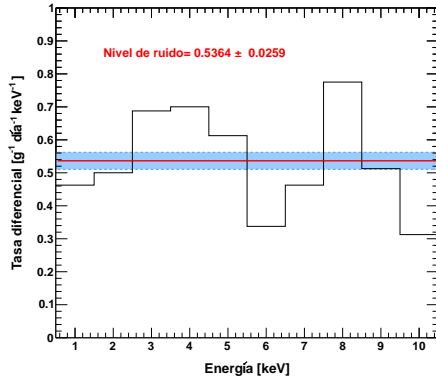


(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza

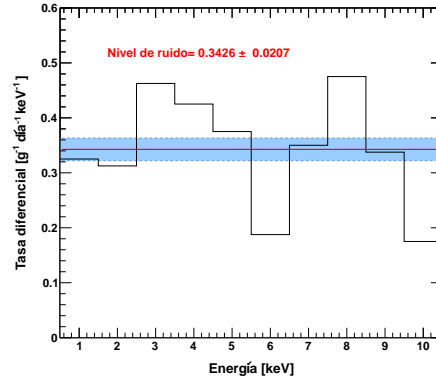


(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.21: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 1 al 4 de mayo de 2014.

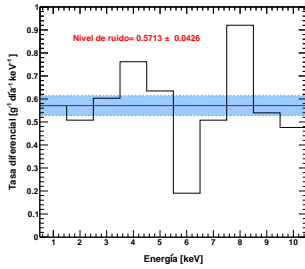


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

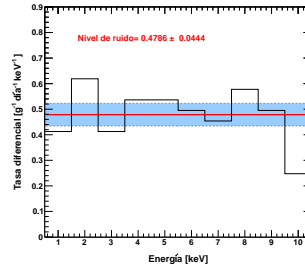


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

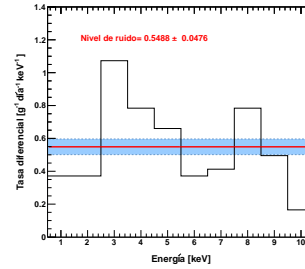
Figura 6.22: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 5 al 19 de Mayo de 2014.



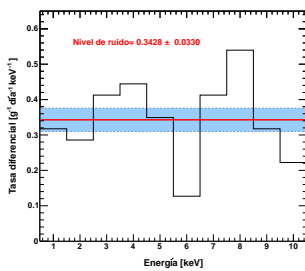
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



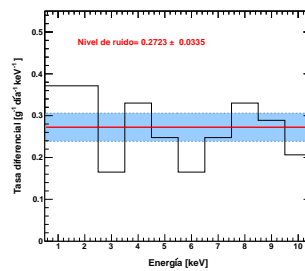
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



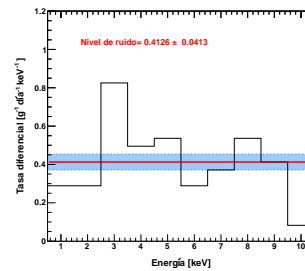
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.23: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 5 al 19 de Mayo de 2014.

En la figura 6.24 se presentan las gráficas del espectro de energía, tras haber analizado 38 imágenes FITS (con un tiempo de exposición de 13.194 días) correspondientes a una exposición usando la configuración *test 4*. El periodo en que se realizó la exposición fue del 22 de mayo al 4 de junio de 2014. El *background* obtenido es de 0.291 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.9).

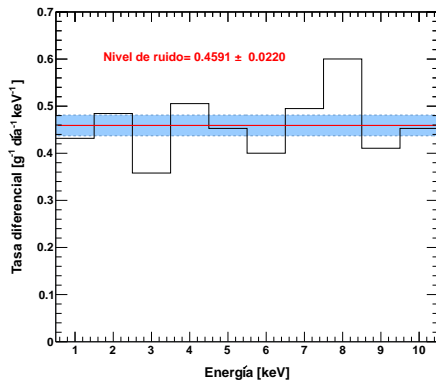
Por otro lado, la figura 6.26 representa los espectros de energía después de haber analizado 15 imágenes FITS correspondiente a una exposición usando la configuración *test 4*. El periodo en que se realizó la corrida fue del 12 al 17 de julio de 2014. Con un tiempo total de exposición de 5.208 días. El *background* calculado es de 0.045 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.10).

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
4	650	2.835	168	$0.4490 \pm 0.0346$
5	500	2.181	134	$0.4656 \pm 0.0402$
6	500	2.181	134	$0.4656 \pm 0.0402$
Total	-	7.198	436	$0.4591 \pm 0.0220$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	99	$0.2646 \pm 0.0266$
5	500	2.181	73	$0.2537 \pm 0.0297$
6	500	2.181	105	$0.3648 \pm 0.0356$
Total	-	7.198	277	$0.2917 \pm 0.0175$

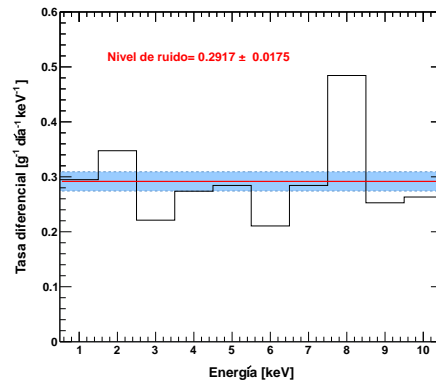
Tabla 6.9: Datos de la exposición realizada del 22 de mayo al 4 de junio de 2014.

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
4	650	2.835	3	$0.0203 \pm 0.0117$
5	500	2.181	12	$0.1056 \pm 0.0305$
6	500	2.181	15	$0.1320 \pm 0.0341$
Total	-	7.198	30	$0.0800 \pm 0.0146$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	2	$0.0135 \pm 0.0096$
5	500	2.181	8	$0.0704 \pm 0.0249$
6	500	2.181	7	$0.0616 \pm 0.0233$
Total	-	7.198	17	$0.0453 \pm 0.0110$

Tabla 6.10: Datos de la exposición realizada del 12 al 17 de julio de 2014.

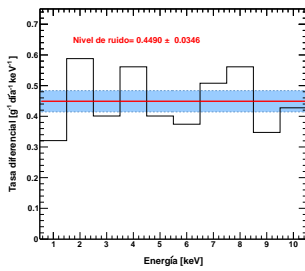


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

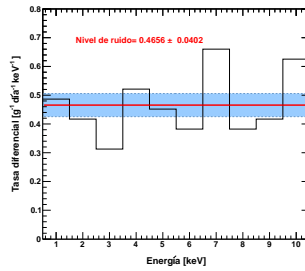


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

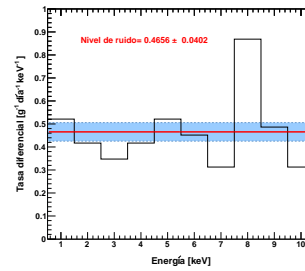
Figura 6.24: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 22 de mayo al 4 de junio de 2014.



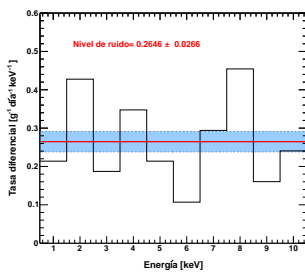
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



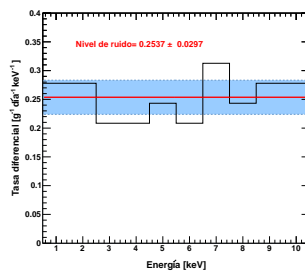
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



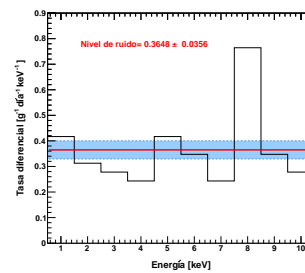
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza

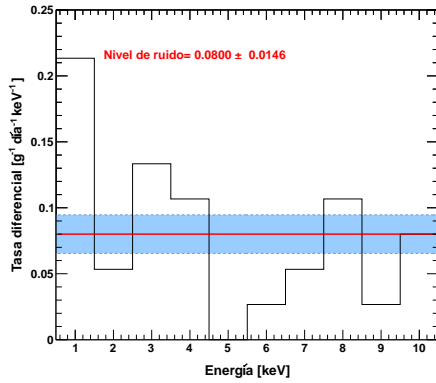


(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza

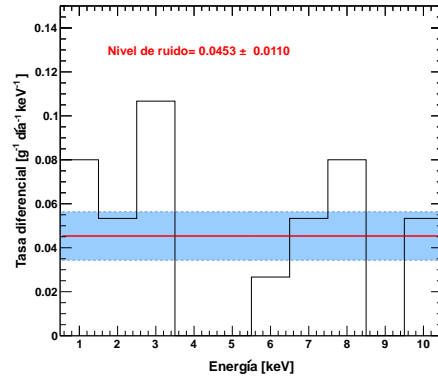


(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.25: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 22 de mayo al 4 de junio de 2014.

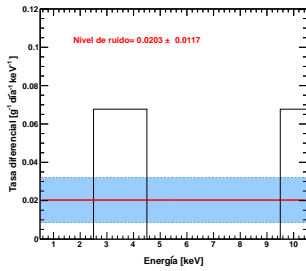


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

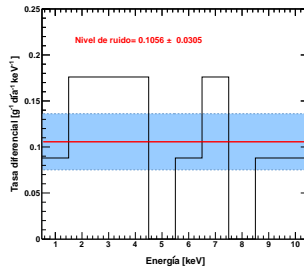


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

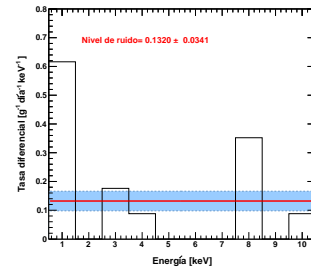
Figura 6.26: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 12 al 17 de julio de 2014.



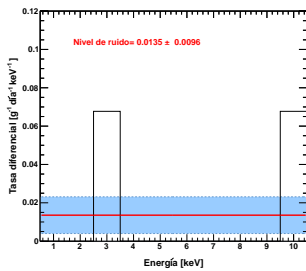
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



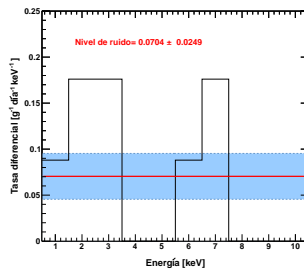
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



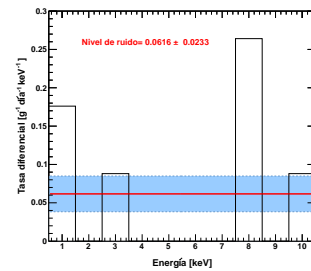
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.27: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 12 al 17 de julio de 2014.

La figura 6.28 muestra los espectros de energía tras haber analizado 86 imágenes FITS usando la configuración *test 1*, el tiempo total de la exposición fue de 29.861 días, esta exposición se llevó a cabo durante el periodo del 18 de julio al 20 de agosto de 2014. El *background* calculado es de 0.044 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ ). Ver tabla 6.11).

La figura 6.30 presenta las gráficas de los espectros de energía después de haber analizado 9 imágenes FITS usando la configuración *test 6*, el tiempo total de la exposición fue de 3.125 días, esta exposición se realizó durante el periodo del 27 al 30 de Agosto de 2014. El *background* calculado es de 0.044 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ ). Ver tabla 6.12).

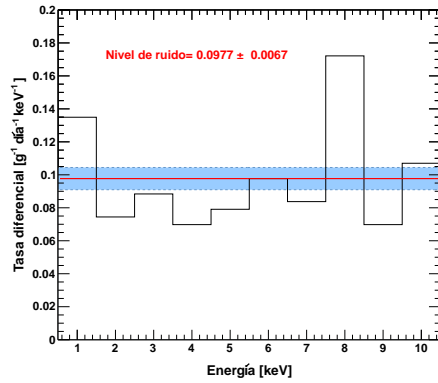
Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu m</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
4	650	2.835	66	$0.0779 \pm 0.0096$
5	500	2.181	68	$0.1044 \pm 0.0127$
6	500	2.181	76	$0.1167 \pm 0.0134$
Total	-	7.198	210	$0.0977 \pm 0.0067$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	31	$0.0366 \pm 0.0066$
5	500	2.181	20	$0.0307 \pm 0.0069$
6	500	2.181	43	$0.0660 \pm 0.0101$
Total	-	7.198	94	$0.0437 \pm 0.0045$

Tabla 6.11: Datos de la exposición realizada del 18 de julio al 20 de agosto de 2014.

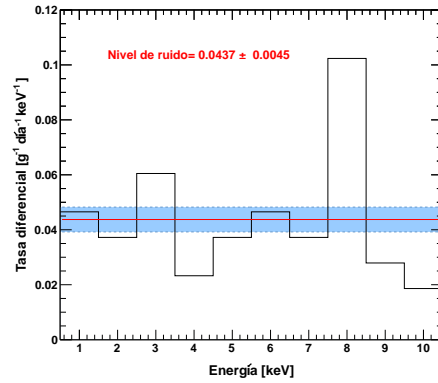
Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu m</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
4	650	2.835	7	$0.0790 \pm 0.0299$
5	500	2.181	4	$0.0587 \pm 0.0293$
6	500	2.181	4	$0.0587 \pm 0.0293$
Total	-	7.198	15	$0.0667 \pm 0.0172$
Datos con corte en la varianza				
4	650	2.835	6	$0.0677 \pm 0.0276$
5	500	2.181	2	$0.0293 \pm 0.0207$
6	500	2.181	2	$0.0293 \pm 0.0207$
Total	-	7.198	10	$0.0445 \pm 0.0141$

Tabla 6.12: Datos de la exposición realizada del 27 al 30 de Agosto de 2014.



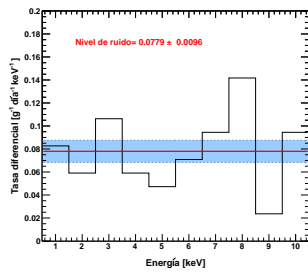


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

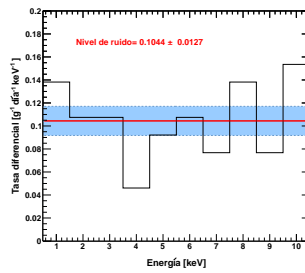


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

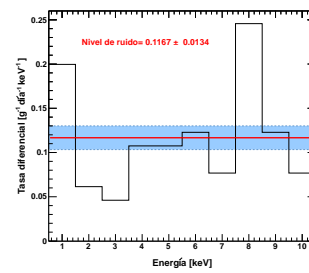
Figura 6.28: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 18 de julio al 20 de agosto de 2014.



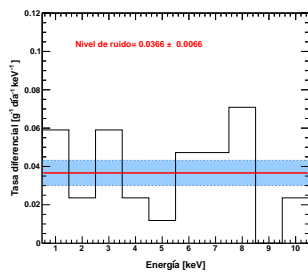
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



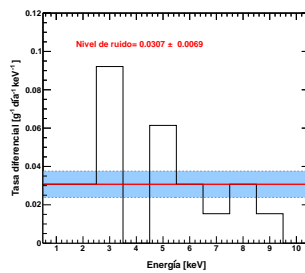
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



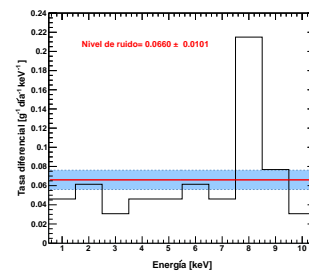
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza

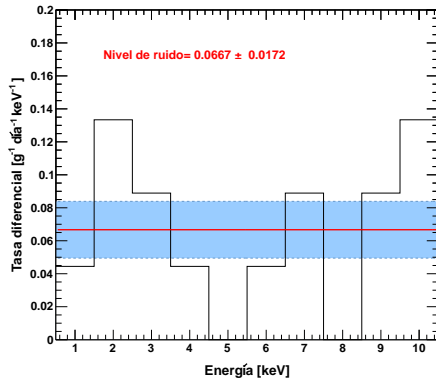


(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza

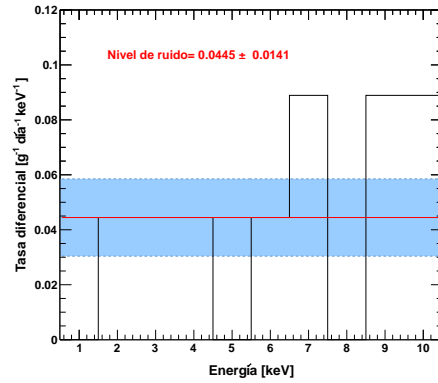


(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.29: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 18 de julio al 20 de agosto de 2014.

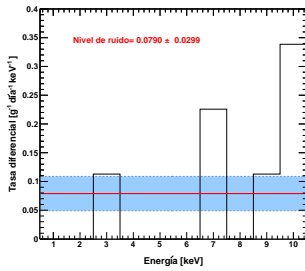


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

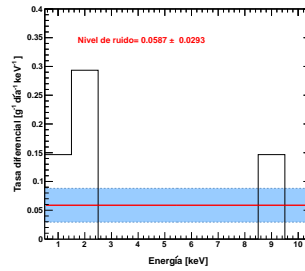


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

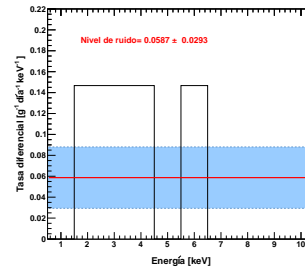
Figura 6.30: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 27 al 30 de Agosto de 2014.



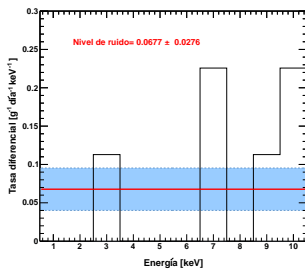
(a) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



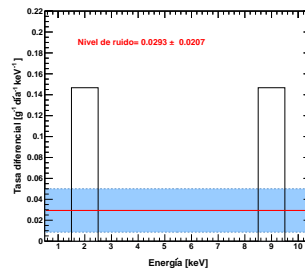
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



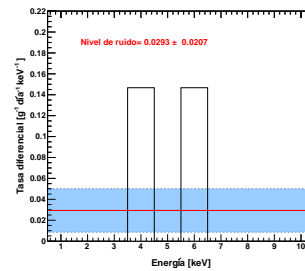
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.31: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 27 al 30 de Agosto de 2014.

En la figura 6.32 se presentan las gráficas con los espectros de energía que se obtuvieron durante el periodo del 12 al 18 de diciembre de 2014, se generaron 17 imágenes FITS usando la configuración *test 9*, el tiempo total de la exposición fue de 5.903 días. El *background* medido es de 0.014 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.13).

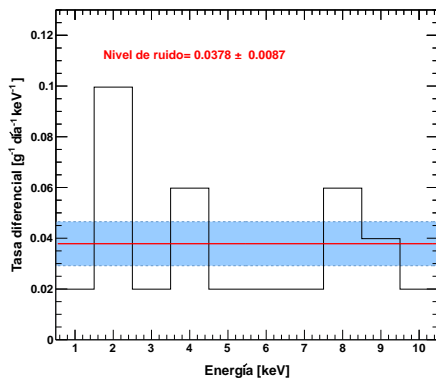
Por otro lado, la figura 6.34 muestra los espectros de energía tras haber analizado 33 imágenes FITS usando la configuración *test 9*, el tiempo total de la exposición fue de 11.458 días, esta exposición se llevó a cabo durante el periodo del 18 al 30 de diciembre de 2014. El *background* obtenido es de 0.025 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.14).

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
2	650	2.835	6	$0.0358 \pm 0.0146$
5	650	2.835	6	$0.0358 \pm 0.0146$
6	650	2.835	7	$0.0418 \pm 0.0158$
Total	-	8.506	19	$0.0378 \pm 0.0087$
Datos con corte en la varianza				
2	650	2.835	2	$0.0119 \pm 0.0084$
5	650	2.835	0	-
6	650	2.835	5	$0.0299 \pm 0.0134$
Total	-	8.506	7	$0.0139 \pm 0.0053$

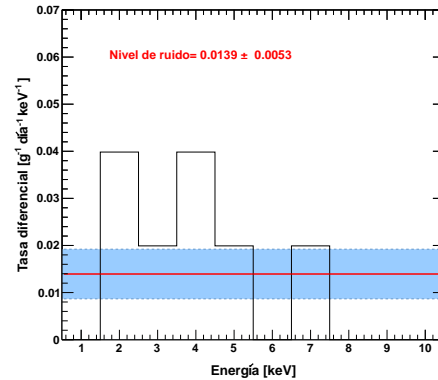
Tabla 6.13: Datos de la exposición realizada del 12 al 18 de diciembre de 2014.

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
2	650	2.835	12	$0.0369 \pm 0.0107$
5	650	2.835	10	$0.0308 \pm 0.0097$
6	650	2.835	11	$0.0339 \pm 0.0102$
Total	-	8.506	33	$0.0339 \pm 0.0059$
Datos con corte en la varianza				
2	650	2.835	7	$0.0215 \pm 0.0081$
5	650	2.835	9	$0.0277 \pm 0.0092$
6	650	2.835	8	$0.0246 \pm 0.0087$
Total	-	8.506	24	$0.0246 \pm 0.0050$

Tabla 6.14: Datos de la exposición realizada del 18 al 30 de diciembre de 2014.

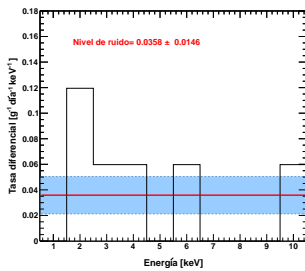


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

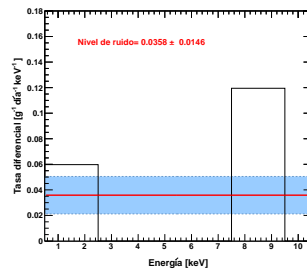


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

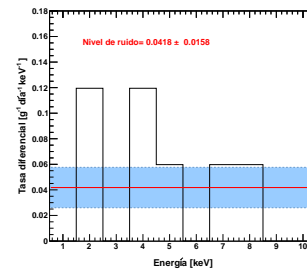
Figura 6.32: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 12 al 18 de diciembre de 2014.



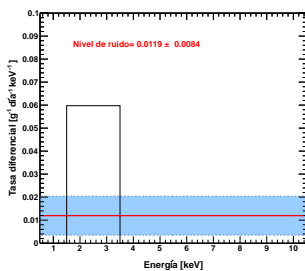
(a) Extensión 2, histograma SIN corte en la varianza



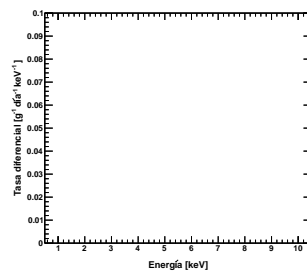
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



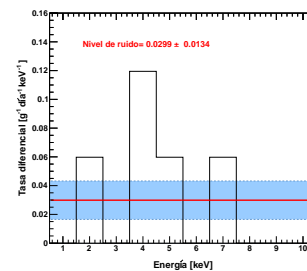
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 2, histograma CON corte en la varianza

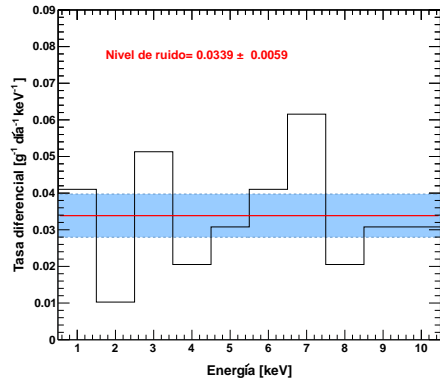


(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza

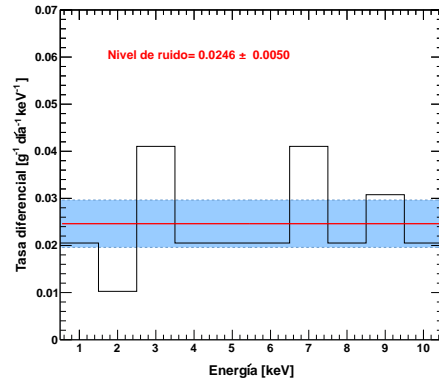


(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.33: Espectros de energía para cada extensión. Los 5 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 12 al 18 de diciembre de 2014.

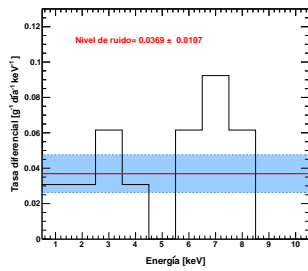


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

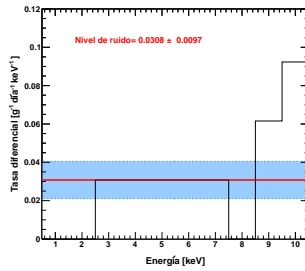


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

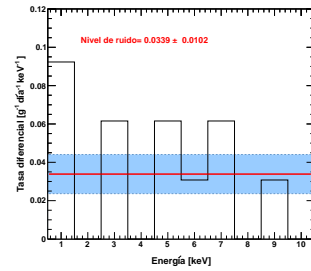
Figura 6.34: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en flag=0 b) considerando la restricción de flag=0 y  $var \leq 1$ . Periodo de exposición 18 al 30 de diciembre de 2014.



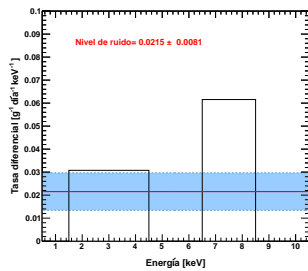
(a) Extensión 2, histograma SIN corte en la varianza



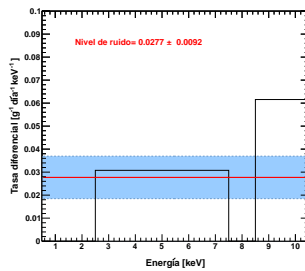
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



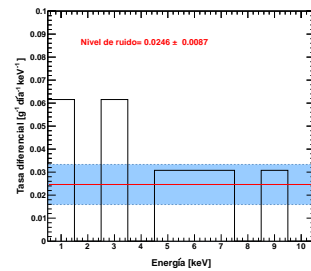
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 2, histograma CON corte en la varianza



(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.35: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de flag=0, además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $var \leq 1$ . Periodo de exposición 18 al 30 de diciembre de 2014.

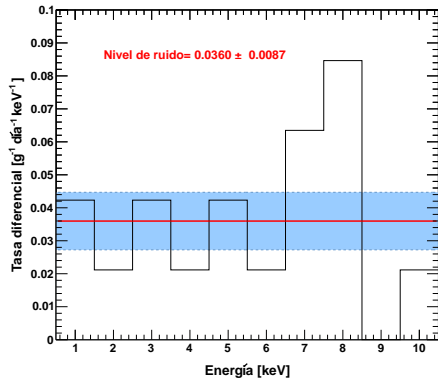
En la figura 6.36 se presentan las gráficas con los espectros de energía que se obtuvieron durante el periodo del 1 al 6 de marzo de 2015, se generaron 16 imágenes FITS, el tiempo total de la exposición fue de 5.555 días. El *background* medido es de 0.027 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.15). Por otro lado, la figura 6.38 muestra los espectros de energía tras haber analizado 11 imágenes FITS, el tiempo total de la exposición fue de 3.819 días, esta exposición se llevó a cabo del 12 al 16 de marzo de 2015. El *background* obtenido es de 0.030 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.16).

Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
2	650	2.835	6	$0.0381 \pm 0.0155$
5	650	2.835	9	$0.0571 \pm 0.0190$
6	650	2.835	2	$0.0127 \pm 0.0090$
Total	-	8.506	17	$0.0360 \pm 0.0087$
Datos con corte en la varianza				
2	650	2.835	4	$0.0254 \pm 0.0127$
5	650	2.835	8	$0.0508 \pm 0.0180$
6	650	2.835	1	$0.0063 \pm 0.0063$
Total	-	8.506	13	$0.0275 \pm 0.0076$

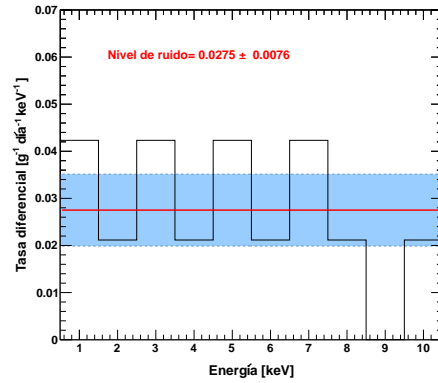
Tabla 6.15: Datos de la exposición realizada del 1 al 6 de marzo de 2015.

Datos sin corte en la varianza				
<i>Exten- sión</i>	<i>Grosor del CCD [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i># Eventos</i>	<i>Background [evento/(g día keV)]</i>
2	650	2.835	2	$0.0185 \pm 0.0131$
4	650	2.835	8	$0.0739 \pm 0.0261$
5	650	2.835	6	$0.0554 \pm 0.0226$
6	650	2.835	2	$0.0185 \pm 0.0131$
Total	-	11.342	18	$0.0416 \pm 0.0098$
Datos con corte en la varianza				
2	650	2.835	1	$0.0092 \pm 0.0092$
4	650	2.835	6	$0.0554 \pm 0.0226$
5	650	2.835	4	$0.0369 \pm 0.0185$
6	650	2.835	2	$0.0185 \pm 0.0131$
Total	-	11.342	13	$0.0300 \pm 0.0083$

Tabla 6.16: Datos de la exposición realizada del 12 al 16 de marzo de 2015.

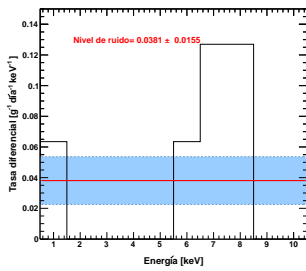


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

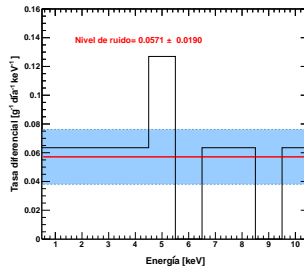


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

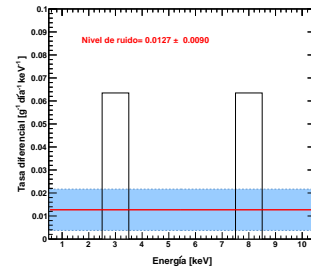
Figura 6.36: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 1 al 6 de marzo de 2015.



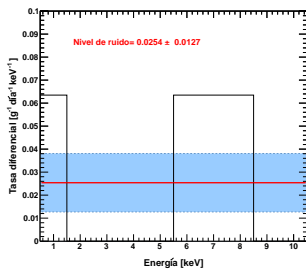
(a) Extensión 2, histograma SIN corte en la varianza



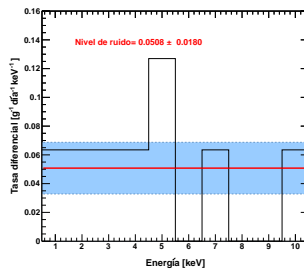
(b) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



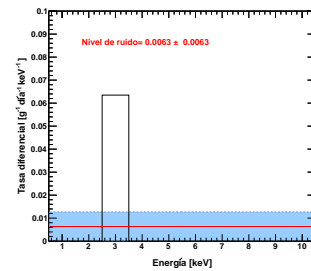
(c) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



(d) Extensión 2, histograma CON corte en la varianza

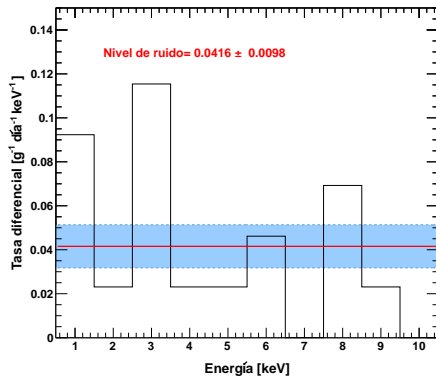


(e) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza

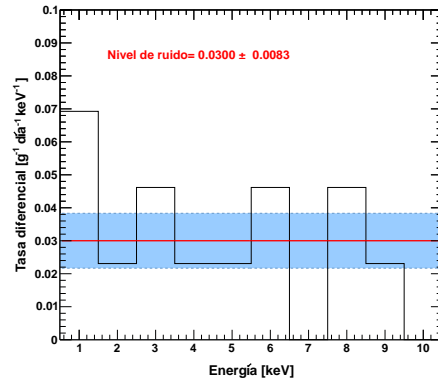


(f) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.37: Espectros de energía para cada extensión. Los 6 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 3 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 1 al 6 de marzo de 2015.

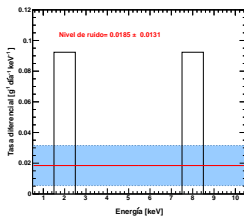


(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza

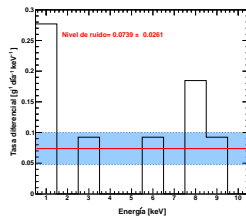


(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

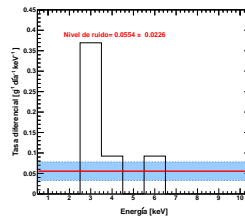
Figura 6.38: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 12 al 16 de marzo de 2015.



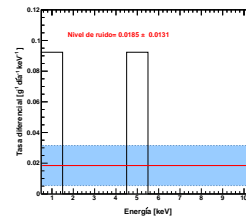
(a) Extensión 2, histograma SIN corte en la varianza



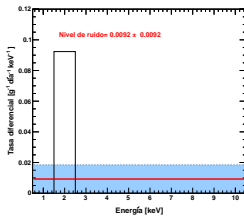
(b) Extensión 4, histograma SIN corte en la varianza



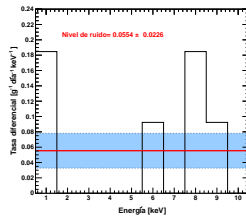
(c) Extensión 5, histograma SIN corte en la varianza



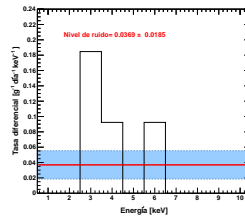
(d) Extensión 6, histograma SIN corte en la varianza



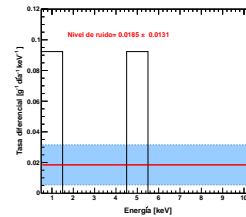
(e) Extensión 2, histograma CON corte en la varianza



(f) Extensión 4, histograma CON corte en la varianza



(g) Extensión 5, histograma CON corte en la varianza



(h) Extensión 6, histograma CON corte en la varianza

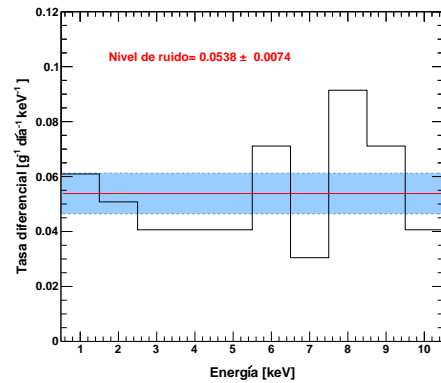
Figura 6.39: Espectros de energía para cada extensión. Los 8 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 4 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 12 al 16 de marzo de 2015.



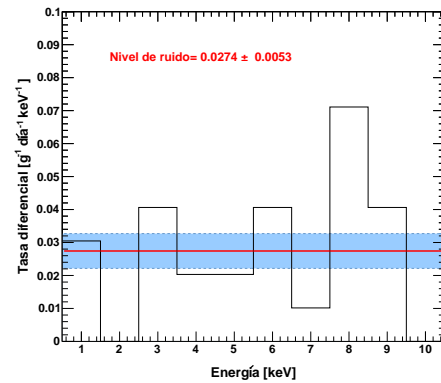
La figura 6.40 muestra los espectros de energía tras haber analizado 25 imágenes FITS usando la configuración *test 9*, el tiempo total de la exposición fue de 8.680 días, esta exposición se llevó a cabo durante el periodo del 18 al 27 de marzo de 2015. El *background* obtenido es de 0.027 eventos/(g día keV) (considerando la varianza  $\leq 1$ . Ver tabla 6.17).

Datos sin corte en la varianza				
<i>Extensión</i>	<i>Grosor del CCD</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>Masa</i> [g]	<i>#</i> <i>Eventos</i>	<i>Background</i> [evento/(g día keV)]
2	650	2.835	12	$0.0488 \pm 0.0141$
4	650	2.835	12	$0.0488 \pm 0.0141$
5	650	2.835	15	$0.0609 \pm 0.0157$
6	650	2.835	14	$0.0569 \pm 0.0152$
Total	-	11.342	53	$0.0538 \pm 0.0074$
Datos con corte en la varianza				
2	650	2.835	5	$0.0203 \pm 0.0091$
4	650	2.835	6	$0.0244 \pm 0.0100$
5	650	2.835	9	$0.0366 \pm 0.0122$
6	650	2.835	7	$0.0284 \pm 0.0107$
Total	-	11.342	27	$0.0274 \pm 0.0053$

Tabla 6.17: Datos de la exposición realizada del 18 al 27 de marzo de 2015.



(a) Volumen total de los CCD, histograma SIN corte en la varianza



(b) Volumen total de los CCD, histograma CON corte en la varianza

Figura 6.40: Espectros de energía correspondientes al volumen total de los CCD a) considerando un corte en  $\text{flag}=0$  b) considerando la restricción de  $\text{flag}=0$  y  $\text{var}\leq 1$ . Periodo de exposición del 18 al 27 de marzo de 2015.

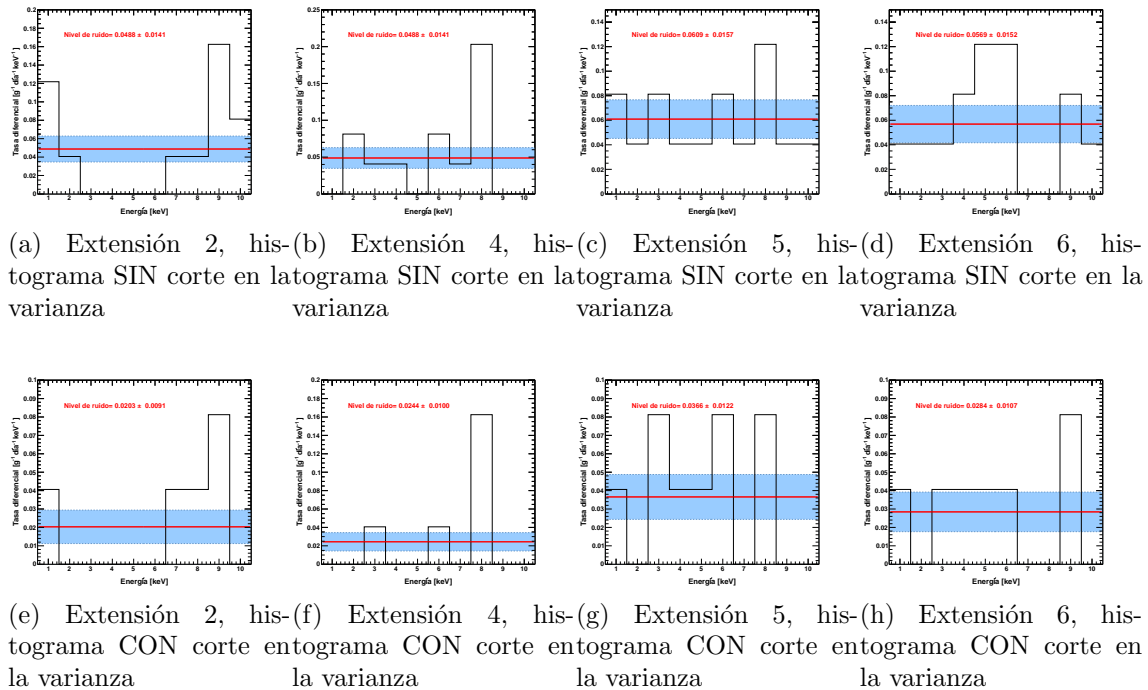


Figura 6.41: Espectros de energía para cada extensión. Los 8 espectros se les aplicó la condición de  $\text{flag}=0$ , además los 4 espectros de la parte inferior se les aplicó un corte en  $\text{var} \leq 1$ . Periodo de exposición del 18 al 27 de marzo de 2015.

La tabla 6.18, muestra los diversos niveles de *background* que se obtuvieron tras haber analizado los archivos con los datos recabados a lo largo del año 2014 y parte de 2015, por el experimento DAMIC en el laboratorio SNOLAB. En la primer columna se encuentran los periodos en los cuales se realizó la exposición, en la segunda columna se reportan los niveles de ruido sin corte en varianza; mientras que en la tercer columna se reportan los niveles de ruido con corte en la varianza ( $\text{var} \leq 1$ ) para considerar eventos similares a los candidatos a WIMP.

En la figura 6.42 se presenta una gráfica donde se muestra la disminución del *background* con respecto a la fecha en que se obtuvieron las corridas que se realizaron en el experimento DAMIC en SNOLAB, durante el año 2014. En esta gráfica las líneas azules corresponden a las mediciones del nivel de *background* sin considerar el corte en la varianza; por otro lado, las líneas rojas corresponden a las mediciones del nivel de eventos de ruido considerando el corte en la varianza.

En la figura 6.43 se presentan las gráficas correspondientes a las variaciones que se tiene en el nivel de *background* por día durante el periodo de julio a diciembre de 2014.

La figura 6.42 muestra que el nivel de background se redujo aproximadamente en un factor de 16, ya que para marzo de 2014 se tenía un nivel de ruido de  $0.5402 \pm 0.0204$

<i>Periodo de exposición</i>	<i>Nivel de ruido sin corte eventos/(g día keV)</i>	<i>Nivel de ruido con corte eventos/(g día keV)</i>
14/03/2014 - 01/04/2014	$0.5402 \pm 0.0204$	$0.2578 \pm 0.0141$
05/04/2014 - 12/04/2014	$0.5162 \pm 0.0321$	$0.2201 \pm 0.0210$
13/04/2014 - 21/04/2014	$0.5218 \pm 0.0295$	$0.2584 \pm 0.0208$
23/04/2014 - 28/04/2014	$0.5659 \pm 0.0402$	$0.2544 \pm 0.0270$
01/05/2014 - 04/05/2014	$0.5674 \pm 0.0454$	$0.3528 \pm 0.0358$
05/05/2014 - 19/05/2014	$0.5364 \pm 0.0259$	$0.3426 \pm 0.0207$
22/05/2014 - 04/06/2014	$0.4591 \pm 0.0220$	$0.2917 \pm 0.0175$
12/07/2014 - 17/07/2014	$0.0800 \pm 0.0146$	$0.0453 \pm 0.0110$
18/07/2014 - 20/08/2014	$0.0977 \pm 0.0067$	$0.0437 \pm 0.0045$
27/08/2014 - 30/08/2014	$0.0667 \pm 0.0172$	$0.0445 \pm 0.0141$
12/12/2014 - 18/12/2014	$0.0378 \pm 0.0087$	$0.0139 \pm 0.0053$
18/12/2014 - 30/12/2014	$0.0339 \pm 0.0059$	$0.0246 \pm 0.0050$
01/03/2015 - 06/03/2015	$0.0360 \pm 0.0087$	$0.0275 \pm 0.0076$
12/03/2015 - 16/03/2015	$0.0416 \pm 0.0098$	$0.0300 \pm 0.0083$
18/03/2015 - 27/03/2015	$0.0538 \pm 0.0074$	$0.0274 \pm 0.0053$

Tabla 6.18: Niveles del *background* durante el periodo de marzo de 2014 a marzo de 2015

eventos/(g día keV) (sin corte en la varianza) y para diciembre de 2014 se midió un nivel de *background* de  $0.0339 \pm 0.0059$  eventos/(g día keV) (sin corte en la varianza). La reducción del *background* considerando el corte en la varianza es de un factor de 10, ya que para marzo de 2014 se tenía un *background* de  $0.2578 \pm 0.0141$  eventos/(g día keV) y para diciembre de 2014 se tenía un *background* de  $0.0246 \pm 0.0050$  eventos/(g día keV).

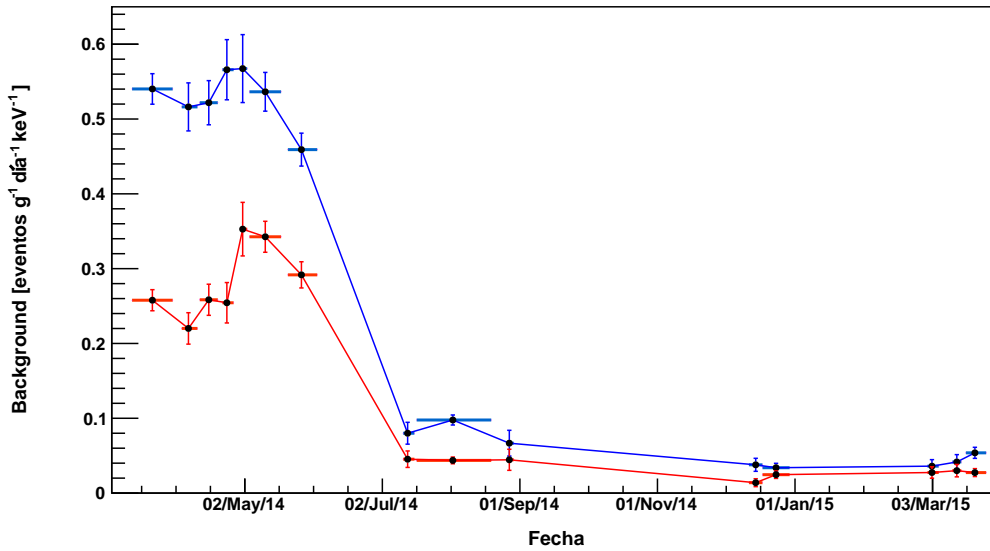
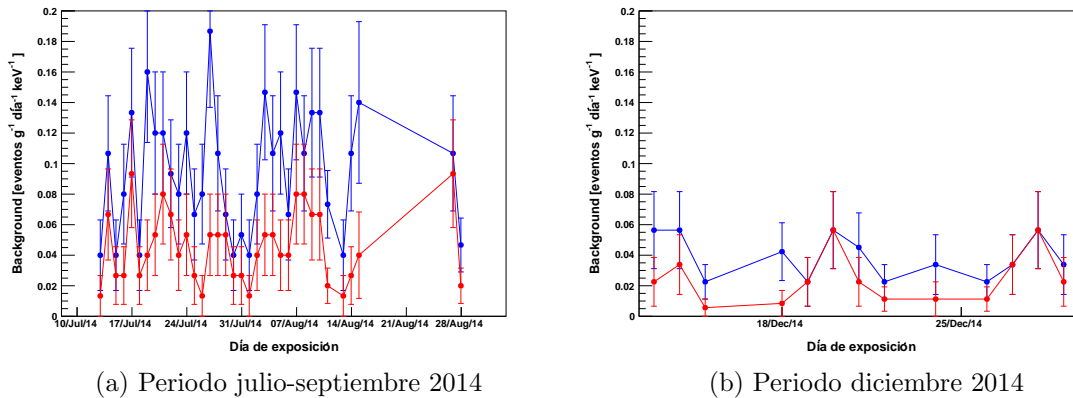


Figura 6.42: Gráficas del *background* contra la fecha en la que fueron realizadas las corridas del experimento DAMIC en SNOLAB durante el periodo de marzo de 2014 a marzo de 2015. Las barras de error muestran los errores estadísticos.



(a) Periodo julio-septiembre 2014

(b) Periodo diciembre 2014

Figura 6.43: Variaciones del nivel de *background* por día durante julio a diciembre de 2014. Las barras de error muestran los errores estadísticos.

Esta reducción de más de un orden de magnitud se logró gracias a las diversas mejoras que se llevaron a cabo a lo largo de este año. La colaboración continúa trabajando en reducir aún más el nivel de ruido para alcanzar el nivel de diseño de  $\sim 0.001$  evento/(g día keV) y lograr una mayor sensibilidad en la búsqueda de materia oscura.

# Capítulo 7

## Conclusiones

El experimento DAMIC que se encuentra instalado en el laboratorio SNOLAB, tiene como propósito la búsqueda directa de partículas de materia oscura (WIMP) en el rango de masas ligeras (menores a  $10 \text{ GeV}/c^2$ ). Este experimento es un pionero en la implementación de dispositivos CCD como detectores de partículas. La colaboración del experimento DAMIC se ha dado a la tarea de realizar estudios detallados sobre la operación y el funcionamiento que desempeñan estos dispositivos para ser utilizados como detectores de partículas de materia oscura. El experimento DAMIC busca detectar WIMP en el rango de masas ligeras (del orden de  $10 \text{ GeV}$ ). Como se mencionó en el primer capítulo de este trabajo, existen varios experimentos que buscan la detección de WIMP en diversas regiones del espacio de parámetros (sección eficaz vs masa de WIMP); en el caso de DAMIC, pretende explorar regiones aún más bajas de las establecidas hasta el momento para la masa de la WIMP. Este objetivo es posible de alcanzar debido al material del que están fabricados los CCD; sin embargo el material utilizado, pierde sensibilidad para masas del orden de  $100$ 's de  $\text{GeV}$ , así como no se tiene información sobre la sección eficaz de espín dependiente de la interacción WIMP-nucleón.

Los CCD se caracterizan por tener un bajo nivel de ruido, por poseer una alta sensibilidad y por poder reproducir con precisión la posición en la que se llevaron a cabo las interacciones de las partículas con el volumen de Si del CCD. Estas características hacen a los CCD un instrumento idóneo para su uso como detectores de partículas. Los CCD que se usan en el experimento DAMIC se han ido modificando conforme se ha desarrollado el experimento, los cambios que se llevaron a cabo consisten en la mejora de la calidad del material con el que fabrican los dispositivos, la manera en que son leídas por los amplificadores, así como el grosor que poseen éstas. Las mejoras efectuadas, han resultado en la fabricación de dispositivos cada vez más sensibles (debido a la pureza del Si con que son fabricadas) y más versátiles para su lectura (es posible leer un CCD con 4 amplificadores, lo cual puede disminuir considerablemente el tiempo de lectura).

Como parte de los estudios que se realizan para la caracterización de los dispositivos CCD, uno de particular importancia, es el que consiste en la exposición de CCD a

fuentes radiactivas emisoras de rayos X para obtener la calibración que convierte la carga depositada en los pixeles del CCD a energía. A partir de esta calibración es posible conocer la energía de los eventos que interactuaron con el volumen de Si del CCD.

Durante el periodo que lleva en funcionamiento el experimento DAMIC en SNOLAB, se han encontrado diversos factores de contaminación que contribuyen a los eventos de ruido, por este motivo el montaje del experimento ha tenido diversas modificaciones, el efecto de las modificaciones efectuadas se ve reflejado en la disminución del nivel de eventos de ruido en más de dos órdenes de magnitud (desde principios de 2013 hasta el momento). El haber logrado la disminución del nivel de eventos de ruido en más de dos órdenes de magnitud, ha permitido mostrar la alta sensibilidad que posee el experimento para la búsqueda de partículas de materia oscura.

El montaje para la nueva etapa del experimento, DAMIC100, se encuentra en proceso de instalación. En diciembre de 2014 se instalaron las primeras CCD que formaran parte del montaje de DAMIC100 el cual consistirá en colocar 18 CCD de 5.5 g cada uno (100 g en total) en SNOLAB, se espera tener el montaje final para finales de 2015. Uno de los objetivos de DAMIC100 es poder comprobar directamente la señal de CDMSII-Si después de 1 año de operación, así como establecer el límite más bajo que se tiene hasta el momento para la búsqueda de WIMP de masas ligeras (del orden de 1 GeV).

Los resultados de la calibración de los CCD usando fuentes radiactivas de rayos X que se presentan en este trabajo, muestran una resolución para bajas energías menor al 6%. Este resultado exhibe la sensibilidad que poseen los CCD para ser utilizadas como detectores de partículas. Como se presentó en este trabajo, el uso de fuentes emisoras de rayos X para realizar la calibración de los datos obtenidos por el CCD, resulta ser un método eficaz para la caracterización de estos dispositivos, ya que con este método es posible reconstruir la energía (que se encontraba en forma de carga) con suficiente precisión. Recientemente se ha propuesto un método para realizar la calibración de los dispositivos CCD, mediante la técnica llamada "*photon transfer curve*", la cual consiste en exponer un CCD a un LED, para obtener una curva característica que depende del tiempo que tarda en efectuarse la exposición. La aplicación de esta técnica aún se encuentra en proceso, por lo que hasta el momento no se tienen resultados sobre su validez. Se espera que en el transcurso de los próximos meses se logre mostrar su efectividad.

Los resultados de la medición del nivel de eventos de ruido que se presentaron en este trabajo, muestran que durante el año 2014 se logró disminuir el nivel de *background* en aproximadamente un orden de magnitud, ya que para marzo de 2014 se tenía un nivel de eventos de ruido de  $0.5402 \pm 0.0204$  eventos/(g día keV) y para diciembre de 2014 se midió un nivel de *background* de  $0.0339 \pm 0.0059$  eventos/(g día keV), sin cortes en la varianza. Esta disminución es el reflejo de las diversas modificaciones que se efectuaron al montaje del experimento a lo largo del año 2014. La medición del nivel de *background* en el periodo de diciembre de 2014, servirá como referencia para la nueva etapa del experimento DAMIC100.

Como parte adicional de las actividades que se efectuaron en el transcurso de la realización de esta tesis, la autora empezó con el estudio de la aparición de eventos anómalos en los datos del experimento. Estos eventos presentan características parecidas a las que se esperarían que tuvieran las partículas de materia oscura, pero al parecer son eventos virtuales creados por el ruido de lectura del CCD. Aún no se ha llegado a un resultado concluyente; en el transcurso de los siguientes meses se continuará con este estudio, esperando obtener resultados definitivos. Por otro lado, en complemento a las actividades que la autora ha estado desempeñando, se introdujo en la utilización de detectores de Ge de alta pureza para identificar posibles contaminantes radiactivos en los materiales que se utilizan en los experimentos DAMIC y CONNIE (ver apéndice F). Actualmente, la autora se encuentra trabajando en la caracterización de un detector que fue dado a préstamo al ICN-UNAM por parte del laboratorio estadounidense Fermilab.

El experimento DAMIC marca un inicio para futuros experimentos que utilicen la tecnología de los dispositivos CCD como detectores de partículas. Así mismo establecerá el límite más bajo que se tiene hasta el momento, en la búsqueda de WIMP de masas ligeras.





# Apéndice A

## Capacitor MOS

Un capacitor MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) [50] consiste en un sustrato semiconductor, una película delgada de aislante (por lo general se utiliza el  $\text{SiO}_2$ ) y un electrodo de metal el cual es la compuerta o gate. La película que se forma de óxido llega a ser tan delgada como de 1.5 nm. El gate generalmente es dopado con silicio policristalino, este material tiene la capacidad de resistir altas temperaturas sin reaccionar con el  $\text{SiO}_2$ .

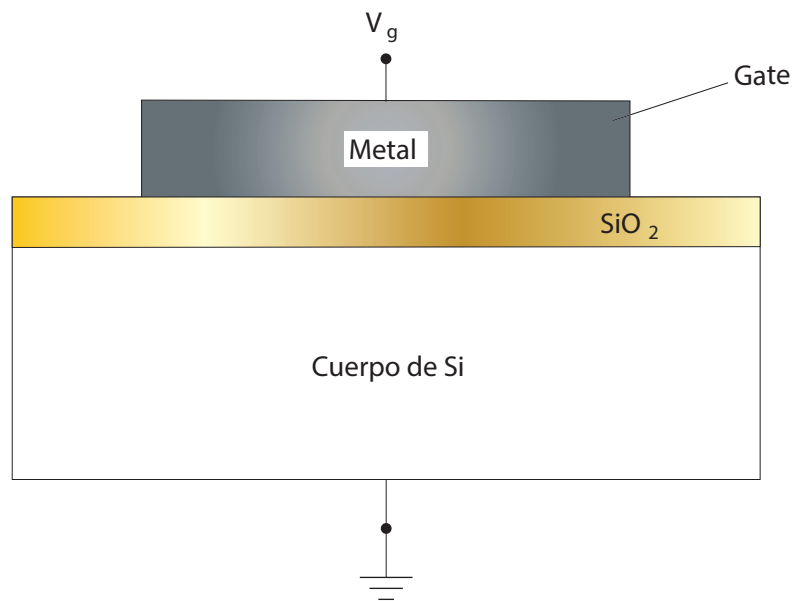


Figura A.1: Capacitor MOS

En un CCD uno de los componentes fundamentales es el capacitor p-MOS, Este capacitor, consiste en un sustrato de Si tipo p (el cual es comúnmente dopado con Boro), una película delgada dieléctrica (que como se mencionó anteriormente, usualmente se

utiliza dióxido de silicio crecido térmicamente de aproximadamente  $100 \text{ \AA}$  de espesor) y una compuerta conductiva (usualmente se utiliza el silicio policristalino dopado). Cuando se le aplica un voltaje negativo a la compuerta, la mayor parte de los portadores de carga (en este caso huecos) se acumulan en la interface de Si y  $\text{SiO}_2$ . Inmediatamente se forma una capa de huecos, la cual representa una capa altamente conductiva en la interface. El potencial a lo largo del estrato de silicio es un potencial de tierra.

Por otro lado, cuando se aplica un potencial positivo a la compuerta, los huecos son repelidos de la superficie, dejando detrás átomos aceptores de boro, descompensados y negativamente cargados. A esta región se le llama región "depleción" debido a que ha sido empobrecida de portadores móviles (huecos, en este caso). El número de huecos repelidos es proporcional al número de cargas positivas en el electrodo de la compuerta.

Los electrones que conforman la señal se acumulan en la interface Si -  $\text{SiO}_2$  cuando un voltaje positivo es aplicado. Para que exista la neutralidad de la carga se requiere que la carga en la compuerta sea igual a la suma de la señal de carga almacenada en un pozo de potencial y la carga neta en la red de aceptores. Para un potencial de compuerta fijo, el número de átomos aceptores cargados decrece mientras se recolectan electrones libres.

## Apéndice B

# Contaminación radiactiva en los CCD

En las corridas de los CCD de DAMIC se observaron cúmulos de pixeles producidos por partículas  $\alpha$  con una amplia variación en su tasa de un CCD al otro, siendo más alta para el CCD que está directamente abajo del soporte de AIN (ranura 10 en la figura 3.9d), probablemente debido a las partículas  $\alpha$  provenientes de los decaimientos de los núcleos de  $^{238}\text{U}$  en el soporte inmediatamente arriba del CCD. Las partículas  $\alpha$  provenientes del soporte AIN debajo del CCD son frenadas por 100  $\mu\text{m}$  de pegamento que hay entre el soporte y el CCD. La menor tasa de partículas  $\alpha$  observadas en las otras CCD son probablemente debido a la contaminación de  $^{210}\text{Pb}$  en la superficie del CCD y en las superficies del cobre por encima y por debajo del CCD. Debido al rango dinámico limitado del conjunto de datos actual, no es posible medir la energía de esas partículas  $\alpha$ . Más tarde, en 2013 se planeó una corrida extensa con un decrecimiento en la ventana de integración de la carga, dando lugar a un aumento sustancial en el rango del digitalizador que permitirá realizar espectroscopía de partículas  $\alpha$ . A pocos meses de ejecución debería permitir determinar un límite en la contaminación del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  en el volumen de CCD  $<100$  ppt. Para el límite de  $^{238}\text{U}$  se considera el número de decaimientos de las partículas  $\alpha$  con energías en el rango de 4.6 MeV-4.9 MeV, correspondiendo a los decaimientos de  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$  y  $^{226}\text{Ra}$ . Para el  $^{232}\text{Th}$  se quería buscar un depósito de  $\sim 19$  MeV de acumulación espacial de la secuencia de decaimientos de partículas  $\alpha$ ,  $^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$ .

Las capacidades de la imagen del CCD también deberían permitir restringir la incierta contaminación de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{32}\text{Si}$  en el silicio, apoyándose en el hecho de que estos decaimientos y los decaimientos de sus respectivos productos  $^{210}\text{Bi}$  y  $^{32}\text{P}$ , debe tener lugar en la misma posición espacial. Se realizará una búsqueda para dos trazas de electrones del decaimiento  $\beta^-$  que comience en el mismo pixel en diferentes imágenes. Teniendo en cuenta que la vida media de  $^{210}\text{Bi}$  y  $^{32}\text{P}$  son mucho más largas que los tiempos de exposición (días vs horas) y que la resolución espacial del CCD suprime en

gran medida las alteraciones, debe ser posible localizar los límites de la tasa de decrecimientos  $< \text{mBq/kg}$ , incluso con modestos niveles de *background*. Esta técnica ofrece una herramienta muy poderosa y única para suprimir el *background* en caso de que alguno de estos dos contaminantes resulte tener una contribución significativa a la cuenta de la tasa en el volumen.

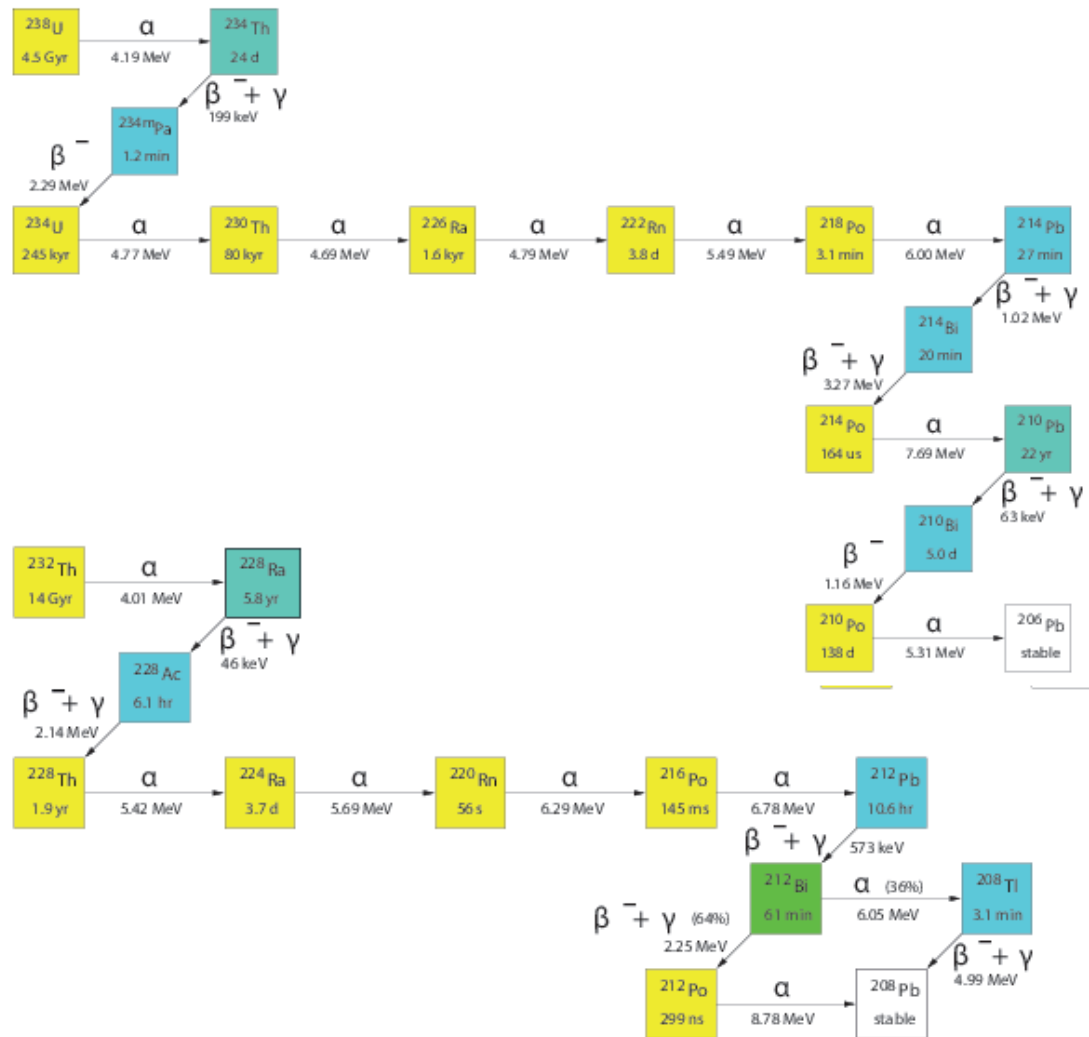


Figura B.1: Cadena de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  y del  $^{232}\text{Th}$

# Apéndice C

## FITS

El sistema de transporte flexible de imágenes (FITS, Flexible Image Transport System) fue inicialmente desarrollado por astrónomos de EE.UU. y Europa a finales de 1970, con el fin de facilitar el intercambio de datos entre los observatorios, fue implementado bajo la protección de la International Astronomical Union (Unión Astronómica Internacional) en 1982. En la actualidad, el FITS aún se encuentra en uso como un formato de intercambio de datos y archivos para los astrónomos.

FITS es un formato de archivo diseñado para almacenar, transmitir y manipular imágenes y datos científicos asociados. Cabe mencionar que el término “imagen” es el nombre estándar que se le da, sin embargo los archivos FITS a menudo contienen datos que no son imágenes ya que los astrónomos ven sus imágenes como datos para ser analizados y no como imágenes visuales.

Cuando FITS es usada para almacenar datos de imágenes sencillas, por lo general es en una de las siguientes dos formas: bidimensional ( $x,y$ ) con los valores individuales en cada punto; o tridimensional ( $x,y,color$ ) con el tercer eje que representa diferentes puntos en un eje espectral, como se mide por la longitud de onda, frecuencia o alguna otra escala apropiada.

Las FITS se utilizan a menudo para almacenar datos de espectros, listas de fotones e incluso datos estructurados tales como bases de datos de multi-tablas. Los FITS incluye muchas provisiones para describir detalles de calibración fotométrica y espaciales, junto con imágenes que originan metadatos.

Una de las características que tiene el formato FITS es que fue diseñado de tal forma que es compatible con cualquier versión de este formato; es decir, es compatible con la versión más antigua hasta con la más actualizada.

Un archivo FITS consiste en una o más *Header Data Unit* (HDU). Cada HDU consiste en una unidad de cabecera de ASCII seguida por una unidad de datos opcional. Cada unidad de cabecera o de datos debe ser un múltiplo exacto de 2880 bytes. El espacio no utilizado al final, se rellena con ceros o espacios en blanco según sea el caso. Las cabeceras, donde la primera HDU es llamada HDU primaria o arreglo primario. La HDU

primaria puede estar vacía o contener un arreglo N-dimensional de pixeles. Cualquier número adicional de HDU siguen a la HDU primaria, dichas HDU adicionales reciben el nombre de extensiones de FITS. Un archivo FITS puede tener una HDU primaria vacía comprender sólo de extensiones.

Hay tres tipos de extensiones estándar:

- I. Extensión de imagen: Un arreglo de pixeles N dimensional, por ejemplo una HDU primaria.
- II. Extensión de tabla ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*): Filas y columnas de datos en formato de caracteres ASCII
- III. Extensión de tabla binaria: Filas y columnas de datos en representación binaria, con los mismos soportes del tipo de datos numérico como para la HDU primaria.

Cada HDU consiste en una unidad de cabecera de ASCII seguida por una unidad de datos opcional. Cada unidad de cabecera o de datos debe ser un múltiplo exacto de 2880 bites. El espacio no utilizado al final se rellena con ceros o espacios en blanco, según corresponda. Cada HDU comienza con una serie de palabras clave requeridas que especifican el tamaño y el formato de la siguiente unidad de datos. Las palabras clave requeridas pueden estar seguidas por otras palabras clave opcionales que describan diversos aspectos de los datos, tales como la fecha y la hora de las observaciones.

## Apéndice D

# Cálculo de la Varianza de $\hat{R}_i$ para la extracción del ruido correlacionado

Para la realización del cálculo de la varianza de  $\hat{R}_i$  se considera que  $R_i$  representa el lado derecho del CCD la cual porta la señal detectada en el CCD, mientras que  $L_j$  representa el lado izquierdo del CCD la cual porta el ruido.

La varianza de  $\hat{R}_i$  es de la forma:

$$Var(\hat{R}_i) = Var\left(R_i - \sum_j a_{ij}L_j\right) \quad (D.1)$$

donde  $\hat{R}_i = R_i - \sum_j a_{ij}L_j$  (la señal R del CCD menos la suma de una combinación lineal del ruido L de la misma).

Ahora, por definición de varianza se tiene que:

$$Var(b_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [(b_{ik}) - \langle b_i \rangle]^2 \quad (D.2)$$

Entonces por la ecuación (2) tendremos que:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p-1} \sum_{k=1}^{N_p} \left[ \left( R_{ik} - \sum_j a_{ij}L_{jk} \right) - \left\langle R_i - \sum_j a_{ij}L_j \right\rangle \right]^2 \quad (D.3)$$

para este caso la suma se realizará sobre todos los pixeles de la CCD ( $N_p$  es el número de pixeles).

Ahora, si se considera que el promedio de una suma es la suma de los promedios, se tendrá:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left[ R_{ik} - \sum_j a_{ij} L_{jk} - \langle R_i \rangle + \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right]^2 \quad (D.4)$$

agrupando términos:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left[ (R_{ik} - \langle R_i \rangle) - \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right) \right]^2 \quad (D.5)$$

desarrollando el binomio al cuadrado:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left[ (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2(R_{ik} - \langle R_i \rangle) \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right) + \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right)^2 \right] \quad (D.6)$$

escribiendo explícitamente cada término:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2 \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right) + \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right)^2 \quad (D.7)$$

de la ecuación (7) se escribe explícitamente la multiplicación del cuadrado del último término y se renombran los índices:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2 \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) \left( \sum_j a_{ij} L_{jk} - \left\langle \sum_j a_{ij} L_j \right\rangle \right) + \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \left( \sum_l a_{il} L_{lk} - \left\langle \sum_l a_{il} L_l \right\rangle \right) \left( \sum_r a_{ir} L_{rk} - \left\langle \sum_r a_{ir} L_r \right\rangle \right) \quad (D.8)$$

de la ecuación (8) si se agrupan los coeficientes  $a_{ij}$  en el segundo y  $a_{il}$ ,  $a_{ir}$  en el tercer término:

$$Var(\hat{R}_i) = \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2 \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) \sum_j a_{ij} (L_{jk} - \langle L_j \rangle)$$



$$+ \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} \sum_l a_{il} (L_{lk} - \langle L_l \rangle) \sum_r a_{ir} (L_{rk} - \langle L_r \rangle) \quad (D.9)$$

de la ecuación (9) se puede intercambiar el orden de las sumas en el segundo y en el tercer término:

$$\begin{aligned} Var(\hat{R}_i) &= \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2 \frac{1}{N_p - 1} \sum_j a_{ij} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) (L_{jk} - \langle L_j \rangle) \\ &\quad + \frac{1}{N_p - 1} \sum_l a_{il} \sum_r a_{ir} \sum_{k=1}^{N_p} (L_{lk} - \langle L_l \rangle) (L_{rk} - \langle L_r \rangle) \end{aligned} \quad (D.10)$$

reescribiendo la ecuación (10) se tendrá que:

$$\begin{aligned} Var(\hat{R}_i) &= \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle)^2 - 2 \sum_j a_{ij} \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) (L_{jk} - \langle L_j \rangle) \\ &\quad + \sum_l \sum_r a_{il} a_{ir} \frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (L_{lk} - \langle L_l \rangle) (L_{rk} - \langle L_r \rangle) \end{aligned} \quad (D.11)$$

de la ecuación (11), el primer término corresponde a la definición de varianza de  $R_i$ , en el segundo término  $\frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (R_{ik} - \langle R_i \rangle) (L_{jk} - \langle L_j \rangle)$  representa la covarianza de  $R_i$  y  $L_j$ , finalmente en el tercer término  $\frac{1}{N_p - 1} \sum_{k=1}^{N_p} (L_{lk} - \langle L_l \rangle) (L_{rk} - \langle L_r \rangle)$  representa la covarianza de  $L_l$  y  $L_r$ . Así se obtiene:

$$Var(\hat{R}_i) = Var(R_i) - 2 \sum_j a_{ij} Cov(R_i, L_j) + \sum_l \sum_r a_{il} a_{ir} Cov(L_l, L_r) \quad (D.12)$$

Para minimizar la Varianza del ruido correlacionado, se podrá obtener un sistema de ecuaciones con solución analítica:

$$\frac{\partial Var(\hat{R}_i)}{\partial a_{im}} = 0 \quad (D.13)$$



# Apéndice E

## Características de un archivo de configuración para la extracción de un archivo ROOT

Dentro de los macros se encuentra un archivo de configuración para extraer los archivos ROOT (catálogos) que contienen las características de los eventos suscitados en el CCD tras haber realizado una exposición. El archivo de configuración lleva el nombre de `extractConfig.xml` el cual contiene los siguientes parámetros:

< sigma

La  $\sigma$  que caracteriza a todas se escribe como:

*default = "31"*

si usted desea tener una  $\sigma$  para cada HDU se debe agregar lo siguiente:

*ext1 = "valor de  $\sigma_{ext1}$ "*

*extN = "valor de  $\sigma_{extN}$ "*

< calibration

Esta es la parte donde se pone la calibración para que la energía se encuentre en unidades de keV:

*default = "energía de calibración"*

< threshold

Dado el pixel semilla se escogen eventos con  $\sigma$  alrededor de este, en este ejemplo son 4 *sigma* a partir del pixel semilla.

*seed = "valor en  $\sigma s$ "*

(sobre el siguiente valor no estoy muy segura que significa)

*add = "valor en  $\sigma s$ "*

El siguiente valor corresponde a la cantidad de “faldas” que tendrá el pixel semilla:  
*skirtsiz*e = “valor en  $\sigma$ s”

< extra

Este parámetro va a guardar los tracks que ocupan más de N pixeles  
*saveTracks* = “N pixeles”

El siguiente parámetro es en el que se indicaran los cortes que se deseen tener en el archivo ROOT de salida. Los cortes se especifican en lenguaje ROOT:

*saveTracksCuts* = “ $n0 > 1$ ”

# Apéndice F

## Detector de Ge de alta pureza

Los detectores de germanio son diodos semiconductores que tiene una estructura p-n en cuya región intrínseca es sensible a la radiación ionizante, principalmente a los rayos-X y los rayos gamma ( $\gamma$ ). Los detectores de Germanio se fabrican por un alto refinamiento del Germanio y del crecimiento dentro de un cristal; dicho cristal debe someterse a una serie de procesamientos para culminar con la fijación de los contactos positivo y negativo que hacen que se convierta en un diodo eléctrico. Bajo polarización inversa, un campo eléctrico se extiende a través de la región intrínseca o de agotamiento. Cuando los fotones interactúan con el material dentro de la región de agotamiento del volumen de un detector, los portadores de carga (huecos y electrones) son producidos y llevados por el campo eléctrico a los electrodos p y n. Esta carga, que es proporcional a la energía depositada en el detector por el fotón entrante, se convierte en un pulso de voltaje por un preamplificador sensible de carga integrada.

Debido a que el germanio tiene una relativamente baja brecha de banda, estos detectores deben ser enfriados con el fin de reducir la generación térmica de portadores de carga (corriente de fuga) a un nivel aceptable. De lo contrario, el ruido inducido por la fuga de corriente destruirá la resolución de energía del detector. El nitrógeno líquido, que tiene una temperatura de 77 K es el medio de refrigeración común para tales detectores. El detector está montado en una cámara de vacío que se inserta en un Dewar de LN<sub>2</sub>. Las sensibles superficies del detector están protegidas de la humedad y los de los contaminantes condensables.

Como parte de las actividades que se realizan para reducir posibles fuentes de ruido para el experimento DAMIC, se tiene planeado la implementación de un detector de Ge para realizar pruebas a los materiales que serán utilizados en los experimentos DAMIC y CONNIE que utilizan la tecnología de los CCD, para descartar posibles fuentes radiactivas.

El detector de Ge de alta pureza que se dará a préstamo al Instituto de Ciencias Nucleares (ICN-UNAM) por parte del laboratorio estadounidense FERMILAB, tiene como propósito la investigación científica para apoyar a las colaboraciones DAMIC y CONNIE.

Este equipo será empleado para medir los niveles de contaminación radiactiva en los componentes de los materiales que serán utilizados en detectores de partículas basados en la tecnología de los CCD.

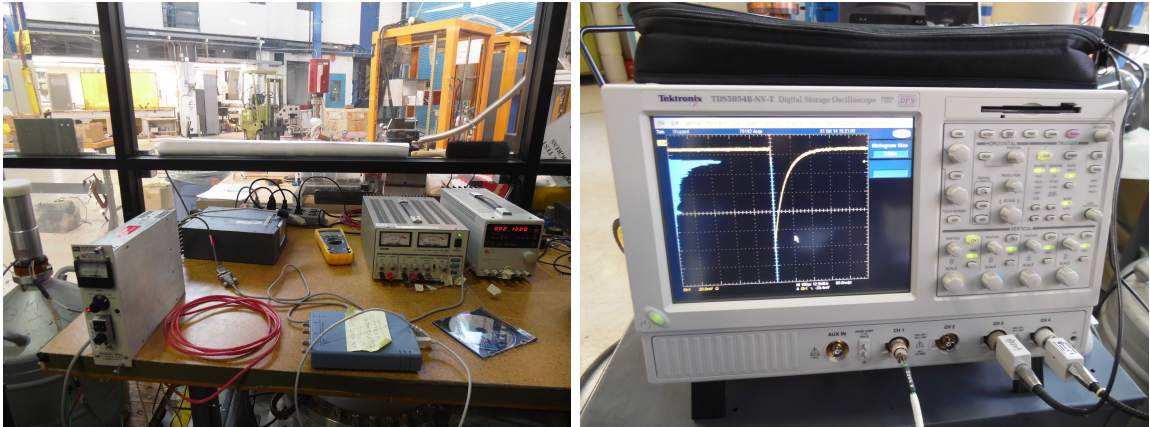
Otra utilidad que se tiene planeada para el equipo es el uso del detector para la enseñanza de cursos de laboratorio en la Facultad de Ciencias y el programa de posgrado de la UNAM.

Las características del detector son las siguientes:

- Marca *EG&G ORTEC*, modelo CNHDS30-16195
- Voltaje de operación de 3200 V con polaridad negativa
- Tiempo aproximado para que se enfríe el detector es de 5 horas.
- El preamplificador opera con  $\pm 12$  V a 5 mA y  $\pm 24$  V a 10 mA



Figura F.1: Detector de Germanio de alta pureza que será dado en préstamo al ICN-UNAM para realizar análisis de posibles fuentes de contaminación radiactiva en materiales para los experimentos DAMIC y CONNIE



(a) A

(b) B

Figura F.2: Montaje del detector de Ge.





# Bibliografía

- [1] Particle Physics Book July 2014, Particle Data Group, pag. 353-360.
- [2] T. Matos, ¿De qué está hecho el Universo?, Fondo de Cultura Económica, México 2004.
- [3] Proceedings of the First International Symposium on Sources of Dark Matter in the Universe, Bel Air, California, 1994.
- [4] R. Catena and P. Ullio, JCAP 1008, 004 (2010).
- [5] <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/more.html>
- [6] K. Kohri, D.H. Lyth, and A. Melchiorri, JCAP 0804, 038 (2008).
- [7] A. Kusenko, Phys. Reports 481, 1 (2009).
- [8] E.W. Kolb and M.E. Turner, The Early Universe, Addison- Wesley (1990)
- [9] How rare is the bullet cluster?, Eric Hayashi and Simon D. M. White
- [10] O. Lahav, A.R. Liddle, THE COSMOLOGICAL PARAMETERS.
- [11] P.A.R. Ade, et al., (Planck Collab. 2013 XVI), arXiv:1303.5076v1.
- [12] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A692(2012), pag. 120–122.
- [13] DAMA/LIBRA results and perspectives, 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 384 012005
- [14] PARTICLE DARK MATTER IN THE GALACTIC HALO:RESULTS FROM DAMA/LIBRA
- [15] PHYSICAL REVIEW D 86, 015023 (2012)
- [16] Evidence for dark matter modulation in CoGeNT?, JCAP03(2012)008
- [17] PHYSICAL REVIEW D 87, 015001 (2013)

- [18] Latest results from the CRESST-II Dark Matter Search, *Journal of Physics: Conference Series* 375 (2012) 012003.
- [19] *Eur. Phys. J. C* (2012) 72:2090
- [20] [http://dx.doi.org/10.3204/DESY-PROC-2011-04/strauss\\_raimund](http://dx.doi.org/10.3204/DESY-PROC-2011-04/strauss_raimund)
- [21] Dark Matter Search Results Using the Silicon Detectors of CDMS II
- [22] Direct search for low mass dark matter particles with CCD
- [23] Direct Search for Low Mass Dark Matter Particles with CCD - DAMIC Collaboration (Barreto, J. et al.) *Phys.Lett. B* 711 (2012) 264-269
- [24] URL <http://people.roma2.infn.it/dama/web/det.html>
- [25] URL <http://cdms.berkeley.edu/>
- [26] URL <http://www.cresst.de/>
- [27] URL <http://luxdarkmatter.org/>
- [28] URL <http://www.physik.uzh.ch/groups/groupbaudis/xenon/>
- [29] URL <http://kicp.uchicago.edu/research/projects/cogent.html>
- [30] Scientific charge-coupled devices, James R. Janesick, (2001)
- [31] A. Chavarria, J. Tiffenberg, A. Aguilar-Arevalo, D. Amidei, X. Bertou, G. Canelo, J. C. D'Olivo and J. Estrada *et al.*, "DAMIC at SNOLAB," *Phys. Procedia* 61, 21 (2015) [arXiv:1407.0347 [physics.ins-det]].
- [32] E. Behnke *et al.* [COUPP Collaboration], "Direct Measurement of the Bubble Nucleation Energy Threshold in a CF<sub>3</sub>I Bubble Chamber," *Phys. Rev. D* 88 (2013) 021101 [arXiv:1304.6001 [physics.ins-det]].
- [33] S. Archambault, E. Behnke, M. Besnier, P. Bhattacharjee, X. Dai, M. Das, A. Davour and F. Debris *et al.*, "Searching for Dark Matter with PICASSO," *Phys. Procedia* 61 (2015) 107.
- [34] C. Amole *et al.* [PICO Collaboration], "Dark Matter Search Results from the PICO-2L C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> Bubble Chamber," arXiv:1503.00008 [astro-ph.CO].
- [35] D. Clowe, M. Bradac, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones, D. Zaritsky, A direct empirical proof of the existence of dark matter, *The Astrophysical Journal Letters* 648 (2) (2006) L109.  
URL <http://stacks.iop.org/1538-4357/648/i=2/a=L109>

- [36] G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu, D. N. Spergel, C. L. Bennett, J. Dunkley, M. R.olta, M. Halpern, R. S. Hill, N. Odegard, L. Page, K. M. Smith, J. L. Weiland, B. Gold, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, E. Wollack, E. L. Wright, Nine-year wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Cosmological parameter results, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 208 (2) (2013) 19.  
URL <http://stacks.iop.org/0067-0049/208/i=2/a=19>
- [37] T. Cohen, D. J. Phalen, A. Pierce, K. M. Zurek, Asymmetric Dark Matter from a GeV Hidden Sector, *Phys.Rev. D*82 (2010) 056001. arXiv:1005.1655, doi:10.1103/PhysRevD.82.056001.
- [38] Silicon detector dark matter results from the final exposure of cdms ii, *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 251301. doi:10.1103/PhysRevLett.111.251301.  
URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.251301>
- [39] R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, V. Caracciolo, S. Castellano, R. Cerulli, C. Dai, A. d'Angelo, S. d'Angelo, A. Marco, H. He, A. Incicchitti, H. Kuang, X. Ma, F. Montecchia, D. Prospero, X. Sheng, R. Wang, Z. Ye, Final model independent result of dama/libra-phase1, *The European Physical Journal C* 73 (12) (2013) 1–11. doi:10.1140/epjc/s10052-013-2648-7.  
URL <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2648-7>
- [40] I. S. Mclean, B. L. Flaugher, T. M. Abbott, R. Angstadt, J. Annis, et al., Status of the Dark Energy Survey Camera (DECam) project, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV* 8446 (2012) 844611–844611–15. doi:10.1117/12.926216.
- [41] S. Holland, D. Groom, N. Palaio, R. Stover, M. Wei, Fully depleted, back-illuminated charge-coupled devices fabricated on high-resistivity silicon, *Electron Devices, IEEE Transactions on* 50 (1) (2003) 225–238. doi:10.1109/TED.2002.806476.
- [42] J. Barreto, H. Cease, H. Diehl, J. Estrada, B. Flaugher, N. Harrison, J. Jones, B. Kilminster, J. Molina, J. Smith, T. Schwarz, A. Sonnenschein, Direct search for low mass dark matter particles with CCDs, *Physics Letters B* 711 (3–4) (2012) 264 – 269. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.04.006>.  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312003887>
- [43] J. Estrada, J. Molina, J. Blostein, G. Fernandez, Plasma effect in silicon charge coupled devices (ccds), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 665 (0) (2011) 90 – 93. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.10.060>.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211020122>

- [44] B. L. Dougherty, Measurements of ionization produced in silicon crystals by low-energy silicon atoms, *Phys. Rev. A* 45 (1992) 2104–2107. doi:10.1103/PhysRevA.45.2104.

URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.45.2104>

- [45] G. Gerbier, E. Lesquoy, J. Rich, M. Spiro, C. Tao, D. Yvon, S. Zylberajch, P. Delbourgo, G. Haouat, C. Humeau, F. Goulding, D. Landis, N. Madden, A. Smith, J. Walton, D. O. Caldwell, B. Magnusson, M. Witherell, B. Sadoulet, A. Da Silva, Measurement of the ionization of slow silicon nuclei in silicon for the calibration of a silicon dark-matter detector, *Phys. Rev. D* 42 (1990) 3211–3214. doi:10.1103/PhysRevD.42.3211.

URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.42.3211>

- [46] J. Ziegler, J. Biersack, U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids, Stopping and Range of Ions in Matter, Vol 1*, Pergamon Press, 1985.

URL <http://books.google.com/books?id=xclwQgAACAAJ>

- [47] T. Alexander, et al., Observation of the Dependence of Scintillation from Nuclear Recoils in Liquid Argon on Drift Field, *Phys.Rev. D* 88 (2013) 092006. arXiv:1306.5675, doi:10.1103/PhysRevD.88.092006.

- [48] [http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie\\_d/DFis130.pdf](http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie_d/DFis130.pdf)

- [49] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/TOI/nuclide.asp?iZA=950241>

- [50] [www.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu\\_ch5.pdf](http://www.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu_ch5.pdf)

- [51] <http://www.nndc.bnl.gov/chart/reCenter.jsp?z=95&n=146>

- [52] [www.canberra.com](http://www.canberra.com)

- [53] Selection of a Germanium Detector, Steve Kerby and Meghan Razimoff, August 15, 2014