



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“MOmentum Neutron DEtector: MONDE”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**F Í S I C O**

**P R E S E N T A:**

**Pedro Humberto Santa Rita Alcibia**



**DIRECTOR DE TESIS:**  
**Dr. Efraín Rafael Chávez Lomelí**

**2016**

**Ciudad Universitaria, CDMX**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Reconocimientos

A mi asesor Efraín Chávez quien ha confiado en mí, me ha dado responsabilidades y me ha ayudado a crecer increíblemente, no sólo intelectualmente, también como persona.

A Arcadio Huerta y Francisco Favela porque me han brindado su amistad, consejos y apoyo, sin ellos este trabajo no sería lo que es.

A los Investigadores Eduardo Andrade, Oscar de Lucio, Corina Solís, que me han brindado su apoyo desde que empecé mi tesis.

A Carlos Canto y Carlos Valencia por las innumerables veces que me ayudaron para poder realizar mis experimentos

A Maru Sánchez que siempre me recibió con una sonrisa en su cara y un “Buenos días, Pedrito”.

## Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la persona que siempre me ha apoyado incondicionalmente en cada paso que he dado, que me ha dado sus palabras de aliento en mis momentos más oscuros, y que sigue animándome a seguir mis sueños, a ti, mamá te agradezco infinitamente todo lo que has hecho por mí.

A mi Abuelo que no tuvo la oportunidad de verme cumplir mi sueño de convertirme en físico, pero me enseñó a que nunca debo de aceptar un “no” sea lo que sea que haga.

A mis hermanos Omar y Tibu por su cariño, sus consejos y los tiempos memorables que hemos pasado juntos.

A mi prima Carmen que me ha cuidado y querido como su hermano pequeño.

A mi prima Karla con quien crecí y sé que estará conmigo en cada parte de mi vida.

A tío Toño que me echo porras en cada paso de la carrera, que siempre supo que decirme cuando me iba mal en la escuela y que desde que tengo memoria siempre ha estado conmigo brindándome su apoyo y cariño.

A mis tías Claudia y Carmen que me han cuidado de pequeño y me quieren como si fuera su hijo.

A mis padrinos Carlos y Sosy que me han demostrado su apoyo y cariño en cada paso que he dado en la vida

A mi tía Esther con quien siempre puedo platicar de un tema interesante

A mi tío Pepe por su confianza y su cariño.

A mis amigos Pablo, Carlos, Nad, David, Angélica, Andrea, Gerardo, Alejandro, con los que he pasado momentos increíbles

## Contenido

Introducción .....	5
1) Radiación Neutra .....	7
1.1) Radiación gamma .....	7
1.2) Producción de Partículas Correlacionadas.....	8
1.3) Interacción Gamma-Materia.....	8
1.3.1) Absorción fotoeléctrica .....	9
1.3.2) Dispersión Compton.....	10
1.3.3) Creación de pares.....	11
1.4) Neutrones .....	13
1.5) Interacción Neutrones - Materia .....	13
1.5.1) Dispersión Elástica.....	14
1.5.2) Dispersión Inelástica .....	15
1.5.3) Captura Radiactiva.....	15
1.6) Similitudes en Detección de Neutrones y Rayos Gamma .....	16
1.7) Radiación de Fondo.....	17
1.7.1) Fuentes de Radiación de Fondo .....	17
2) Detección de Radiación Neutra: Rayos Gamma y Neutrones .....	18
2.1) Materiales Centelladores .....	18
2.2) Fluorescencia y Fosforescencia.....	18
2.3) Centelladores Orgánicos.....	19
2.4) Centelladores Inorgánicos .....	20
2.5) Fotomultiplicadores.....	21
3) Desarrollo Experimental.....	23
3.1) Tubos Fotomultiplicadores .....	23
3.2) MONDE .....	24
3.3) Procesamiento de Señales .....	28
3.3.1) Amplificador Mesytec MDS-8 (Amplificadores).....	28
3.3.2) Discriminador de Fracción Constante ORTEC OCT CF DISCR CF 8000 (CFD) .....	28
3.3.3) Caen Mod 405 (3 Fold Logic Unit).....	29
3.3.4) ORTEC GG 8010 (Gate & Delay).....	29
3.3.5) CANBERRA Amplifier 2022 (Amplificador Externo).....	30
3.4) Adquisición de Datos .....	31
3.4.1) Convertidores de señales analógicas a digitales .....	31
3.4.2) Algoritmo ANGER .....	33
3.4.3) Programa de Procesamiento de Datos.....	33
3.5) Radiación de Fondo V1.....	34
3.7) Neutrones producidos por la Fuente de Am-Be.....	34

3.8) Caracterización de Tubos Fotomultiplicadores.....	35
3.9) Radiación de Fondo V2.....	39
3.10) MONDE & SUGAR.....	39
3.11) Radiación de Fondo V3.....	41
3.12) MONDE & NaI V1 .....	41
3.13) Radiación de Fondo y MONDE & NaI V2 .....	43
4) Resultados y Análisis.....	44
4.1) Radiación de Fondo V1.....	44
4.2) Neutrones producidos por Fuente de Am-Be .....	44
4.3) Caracterización Tubos Fotomultiplicadores.....	45
4.4) Radiación de Fondo V2.....	46
4.5) MONDE & SUGAR .....	47
4.6) Radiación de Fondo V3.....	47
4.7) Monde & NaI V1.....	47
4.8) Radiación de Fondo y Monde & NaI V2 .....	48
4.9) Componente de Radiación de Fondo en los Experimentos con MONDE .....	60
5) Conclusiones .....	61
6) Trabajo a Fututo .....	62
6.1) Corto plazo .....	62
6.2) Mediano Plazo .....	62
6.3) Largo plazo .....	62
7) Reconocimientos .....	63
Apéndice 1: Mapas de Posiciones .....	63
A1.1) Radiación Fondo V1 .....	63
A1.2) Neutrones Producidos por la fuente de Am-Be .....	64
A1.3) Radiación de Fondo V2 .....	65
A1.4) Radiación de Fondo V3 .....	66
A1.5) MONDE & NaI V1 .....	67
A5.1.1) Posición Central.....	67
A5.1.2) Posición Derecha.....	68
A5.1.3) Posición Izquierda.....	69
Bibliografía.....	71
Anexo 1 .....	74

# Introducción

Es de particular interés contar con un detector de neutrones de gran tamaño que sea sensible a la posición, con el fin de estudiar la dispersión de sondas neutrónicas sin los inconvenientes técnicos de mover un detector pequeño, además al ser de gran tamaño la eficiencia de detección aumenta al haber más probabilidad de interacción con dicha sonda. El detector MONDE (MOmentum Neutron Detector) fue una idea que nació en 2009 cuando Efraín Chávez y su grupo de investigación publicaron el artículo “Elastic scattering of neutrons on Pb at forward angles”[1] En dicho trabajo se estudió la dispersión de neutrones causada por un blanco de plomo usando un detector de neutrones y posicionándolo en diferentes ángulos, esto limitó la cantidad de posiciones y por lo tanto el estudio completo de la dispersión angular de neutrones.

Eso llevó al Dr. Efraín Chávez a planear la construcción de un detector que consta de una placa de plástico centellador rodeada por un arreglo de tubos fotomultiplicadores el cual permite determinar la posición de neutrones incidentes sobre la placa, al procesar las señales provenientes de los tubos fotomultiplicadores.

La historia de este detector comenzó en 2009 cuando Quiela Curiel en su trabajo de tesis de licenciatura comienza su construcción. En el artículo “Characterization of a Fast Neutron Detection System With Large Angular Coverage and Granularity for Physics Studies and Applications”[2] se prueba este detector mostrando que en efecto puede ser utilizado como herramienta de investigación. En 2014 la idea es retomada en este trabajo y adquiere el nombre de MONDE(MOmentum Neutron DETector).

El estudio de la dispersión angular de neutrones tiene un gran interés, tanto científico como industrial, entre sus aplicaciones están el estudio de materiales, determinación de la humedad en objetos, el estudio de obras artísticas, estudios médicos que necesiten de la observación de tejidos blandos sin ser intrusivo en los métodos[3][4].

El estudio de la dispersión angular de neutrones también puede dar información de reacciones nucleares que se produzcan en un laboratorio de investigación, estudiar temas como interferometría de neutrones, radiación cósmica de fondo, seguridad radiológica, dispersión por blancos pesados, estudio de estructuras biológicas, etc.

Cuando se trabaja con una sonda hadrónica neutra es necesario tener un instrumento capaz de detectar y estudiar dicha sonda al interactuar con el objeto de interés. Estos instrumentos son llamados detectores de neutrones y existen diferentes tipos de ellos.

Este tipo de detectores son usados alrededor del mundo como en el laboratorio RIKEN con el detector NEBULA donde se detectan neutrones en experimentos de correlación de partículas. [5]

Como objetivo principal en este trabajo se tiene la caracterización e implementación del detector MONDE en una serie de experimentos que determinarán si es posible deducir la posición de partículas incidentes al detector, así como identificarlas usando un método de correlación con un detector externo.

Como objetivos particulares se tienen:

- Caracterizar cada tubo fotomultiplicador en el detector MONDE.
- Escritura de un programa computacional capaz de implementar un algoritmo que permita determinar la posición de partículas incidentes, mediante las señales de los tubos fotomultiplicadores.
- Realizar toma de datos provenientes de radiación cósmica.
- Realizar tomas de datos con neutrones provenientes de una fuente de Am-Be y los producidos en la reacción  $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$  correlacionando los neutrones detectados en MONDE y el  $^{15}\text{O}$  registrado en un detector externo.
- Realizar tomas de datos usando una fuente de  $^{60}\text{Co}$  y correlacionar los eventos de MONDE con un detector externo.

En el capítulo uno se habla de los métodos por los cuales la radiación neutra es producida, se profundiza en las interacciones posibles de los rayos gamma y los neutrones con la materia.

En el capítulo dos se habla de las formas con las que la radiación neutra puede ser detectada, se mencionan los tipos de detectores, ventajas y desventajas, así como los mecanismos que hacen posible su detección

El capítulo tres detalla los experimentos llevados a cabo para cumplir los objetivos de este trabajo.

En el capítulo cuatro se discuten los resultados obtenidos en cada experimento, interpretando los datos para darles un significado físico.

En el capítulo cinco el lector puede encontrar las conclusiones que se obtuvieron en este trabajo.

# 1) Radiación Neutra

*“Over the last century, physicists have used light quanta, electrons, alpha particles, X-rays, gamma-rays, protons, neutrons and exotic sub-nuclear particles for this purpose [scattering experiments]. Much important information about the target atoms or nuclei or their assemblage has been obtained in this way. In witness of this importance one can point to the unusual concentration of scattering enthusiasts among earlier Nobel Laureate physicists. One could say that physicists just love to perform or interpret scattering experiments.”*

- Clifford G. Shull, Nobel Prize in Physics in 1994

La radiación de la que se habla en este trabajo se refiere a la que es creada por procesos atómicos o nucleares, existen dos categorías para este tipo de radiación las que se refiere a partículas cargadas (electrones rápidos y partículas cargadas pesadas) y la radiación sin carga (Neutrones y rayos gamma) esta última es de particular interés debido a que el trabajo descrito en esta tesis gira en torno al desarrollo de un detector de neutrones.

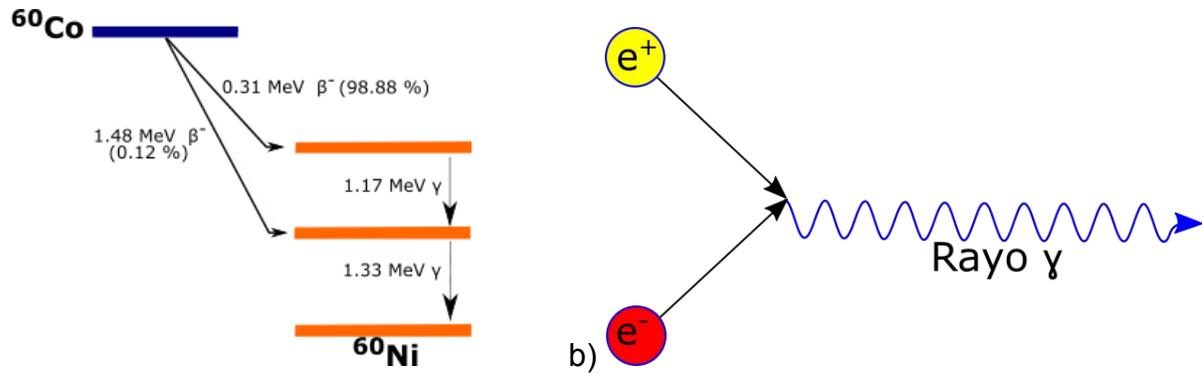
Existen similitudes entre la detección de los tipos radiación neutra, los cuales se discuten a detalle en la sección 1.6. Debido a las similitudes entre estos dos tipos de radiaciones es posible calibrar y probar el funcionamiento de un detector de neutrones usando experimentos involucrando fuentes de rayos gamma.

## 1.1) Radiación gamma

La radiación gamma forma parte del espectro electromagnético, sus fuentes son diversas, incluidas naturales como rayos cósmicos, impactos de rayos en la tierra[6], radioisótopos naturales, y artificiales como fisión nuclear en reactores, decaimiento de piones neutros en experimentos de Física de altas energías y fusión nuclear.

La radiación gamma proveniente de radioisótopos naturales es causada por transiciones entre niveles de energía en el núcleo atómico. Al estar en un estado excitado, un núcleo atómico liberará energía emitiendo radiación electromagnética como rayos gamma, al emitir radiación el núcleo pasará a un estado de menor energía.

Algunos radioisótopos pueden ser utilizados como fuente de rayos gamma, debido a que sufren un proceso llamado decaimiento radiactivo, este proceso ocurre cuando un núcleo en un estado excitado emite radiación (alfa, beta, gamma) y se convierte en un núcleo más estable(Figura 1.1.1 a). La producción de rayos gamma también puede ser causada por la aniquilación electrón-positrón (Figura 1.1.1 b).



a) Fig. 1.1.1) Representación gráfica de; a) la Transición de  $^{60}\text{Co}$  en  $^{60}\text{Ni}$  mediante el proceso de decaimiento radiactivo y b) Diagrama de la emisión gamma de la aniquilación electrón-positrón

## 1.2) Producción de Partículas Correlacionadas

Cuando dos rayos gamma son emitidos por transiciones nucleares en un átomo, la dirección esta generalmente correlacionada debido al proceso involucrado. Cuando un núcleo excitado decae al estado base pasando por estados intermedios, el espín del núcleo afecta la distribución angular de fotones emitidos en cada transición.

La probabilidad relativa que un fotón pueda ser emitido a un ángulo  $\theta$  respecto a un fotón anterior se denota con  $W(\theta)$  y depende del momento angular de cada estado y el orden múltipolar de la radiación emitida.

Por emisión  $\beta^-$  el núcleo de  $^{60}\text{Co}$  decae a un núcleo excitado de  $^{60}\text{Ni}$ . Este estado decae al estado base mediante un estado intermedio con vida media de 0.9 ps. Los dos rayos gamma emitidos en estas transiciones están correlacionados. Existe una expresión analítica para  $W(\theta)$  y está descrita en la ecuación 1.1, donde  $\theta$  es el ángulo relativo entre dos fotones emitidos.[7], [8]

$$W(\theta) = \frac{1}{8} \cos^2(\theta) + \frac{1}{24} \cos^4(\theta) \dots \dots \dots (1.0)$$

## 1.3) Interacción Gamma-Materia

La interacción de la radiación gamma con la materia es debida a 3 procesos principales, la absorción fotoeléctrica, dispersión Compton y la producción de pares, en la absorción fotoeléctrica el fotón gamma pierde toda su energía en una sola interacción, en la dispersión Compton el fotón gamma pierde una parte de su energía en una sola interacción, y en la producción de pares el rayo gamma pierde toda su energía en la creación de un par de partícula y antipartícula. Estos efectos se pueden clasificar según su energía y el numero Z del material absorbente(Figura 1.3.1)

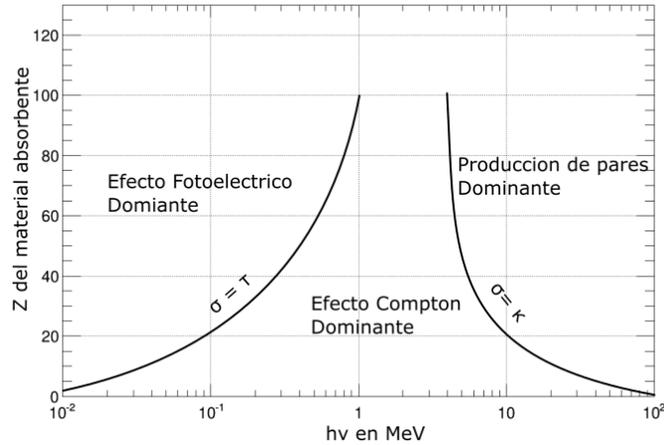


Fig. 1.3.1) Intervalos de interacciones de rayos gamma y materia.[9]

### 1.3.1) Absorción fotoeléctrica

En este tipo de interacción un fotón gamma incidente pierde toda su energía en la interacción con un átomo, en su lugar un fotoelectrón es expulsado de una de las capas de mayor energía de ligadura del átomo, es importante resaltar que esta interacción es con el átomo, es decir que electrones libres no sufrirán de este tipo de interacción.

Para rayos gamma de suficiente energía el origen más probable del fotoelectrón son las capas más cercanas (L ó K ) del átomo. La energía del fotoelectrón está descrita por[9]:

$$E_e = h\nu - E_b \dots \dots \dots (1.1)$$

Dónde  $E_b$  es la energía de ligadura o también es llamada “función de trabajo”, para rayos gamma con energía alrededor de un par de cientos de keV el fotoelectrón se queda con la mayor parte de la energía del fotón gamma absorbido.

Cuando el fotoelectrón es expulsado, el átomo se ioniza y el lugar dejado por el fotoelectrón es ocupado por la captura de un electrón libre o por el re-arreglo de electrones en otras capas atómicas. Este proceso tiene como consecuencia que rayos X característicos sean producidos. En la mayor parte de los casos estos rayos X son reabsorbidos muy cerca del lugar de su emisión, esto produce una doble ionización del átomo. Existe la posibilidad de que un electrón de una capa superior puede llenar el hueco dejado por el electrón emitido, esto causa un exceso de energía que en ciertos casos produce un segundo electrón (Electrón Auger) este proceso depende fuertemente del numero Z del átomo.

La absorción fotoeléctrica es la interacción predominante para rayos gamma de energía relativamente pequeña (Pocos de cientos de keV). Este proceso es amplificado por materiales absorbentes de alto número atómico Z, no existe una expresión analítica para caracterizar la probabilidad de foto-absorción, pero se puede estimar usando[9]:

$$\tau = c \frac{Z^n}{E^{3.5}} \dots \dots \dots (1.2)$$

Dónde el exponente n varía entre 4 y 5 sobre el área de interés y E es la energía del rayo incidente, es evidente entonces que detector con mayor número atómico será más eficiente,

pero en casos como el plomo, actúa como un escudo de radiación [9].

### 1.3.2) Dispersión Compton

En la dispersión Compton el rayo gamma incidente es desviado un ángulo  $\theta$  respecto a su dirección original, el fotón cede parte de su energía al electrón (Que se supone en reposo) este electrón es llamado de retroceso.

Debido a que todos los ángulos de dispersión son posibles la energía cedida por el fotón gamma no es discreta y puede variar desde una pequeña parte hasta la mayor parte de la energía.

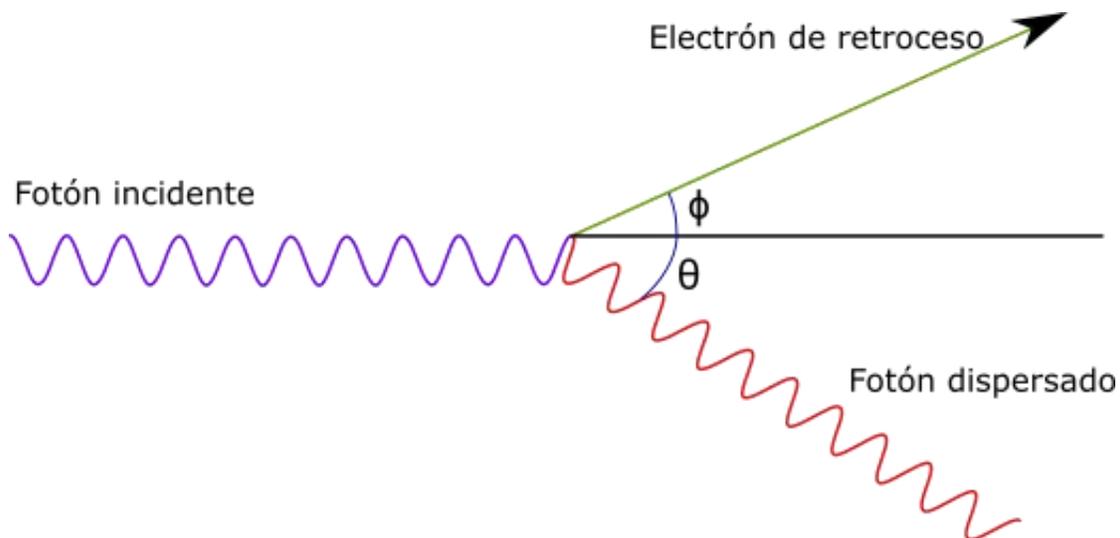


Fig. 1.3.2.1) Esquema de la interacción mediante la dispersión Compton.

Teniendo en mente la imagen (1.3.2.1) se puede probar que la expresión para la energía del electrón de retroceso en la dispersión Compton es:

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2} \cos(\theta)} \dots \dots \dots (1.3)$$

Donde  $m_0c^2$  es la energía en reposo del electrón (0.511 MeV). Es evidente que incluso en el caso extremo donde  $\theta = \pi$  el rayo gamma no cede totalmente su energía, la energía máxima que puede ser transmitida es  $(hv - hv')$  y es para el caso donde  $\theta = 180^\circ$ , este fenómeno da lugar a un corte en el espectro que se conoce como "Hombro Compton".(Figura 1.3.2.2).

Este proceso es dominante para rayos gamma de entre 0.5 y 10 MeV, la probabilidad de interacción por átomo depende del número de electrones disponibles como blancos de dispersión entonces hay una relación lineal entre el número atómico Z.

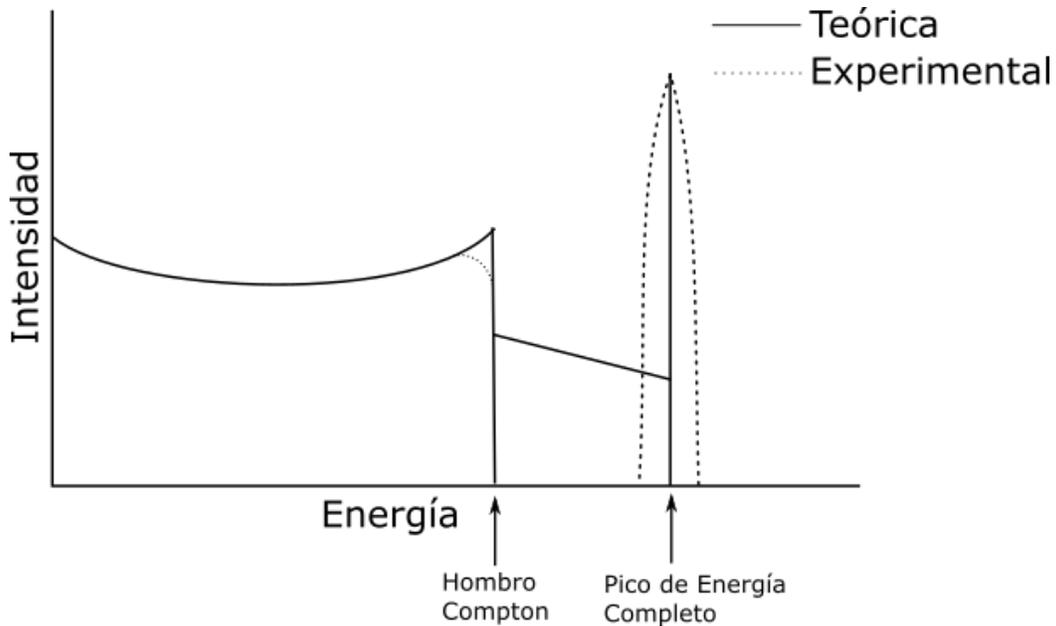


Fig.1.3.2.2) Diagrama usual de dispersión Compton

### 1.3.3) Creación de pares

Este proceso se da únicamente cuando la energía del fotón gamma es igual o mayor a 1.02 MeV (dos veces la energía en reposo del Electrón) estando en la presencia del campo Coulombiano de un núcleo. La radiación gamma es transformada en un par electrón - positrón, en el caso que la energía del rayo gamma sea mayor a 1.02 MeV la energía extra se convierte en energía cinética para el electrón y el positrón (Figura 1.3.3.1). El positrón interactúa de nuevo con los electrones de los átomos del medio mediante dispersiones elásticas, en este proceso el positrón es frenado hasta prácticamente el reposo (alcanzar la energía promedio del medio correspondiente a su temperatura, del orden de 1/40 eV), después es aniquilado mediante la interacción con un electrón esto da lugar a dos rayos gamma, esta radiación se conoce como "radiación de aniquilamiento"

No hay una expresión sencilla que describa la probabilidad de ocurrencia de este proceso pero varía aproximadamente como el cuadrado del número atómico del material. Este proceso es dominante para rayos gamma de altas energías (aproximadamente mayores 10 MeV).

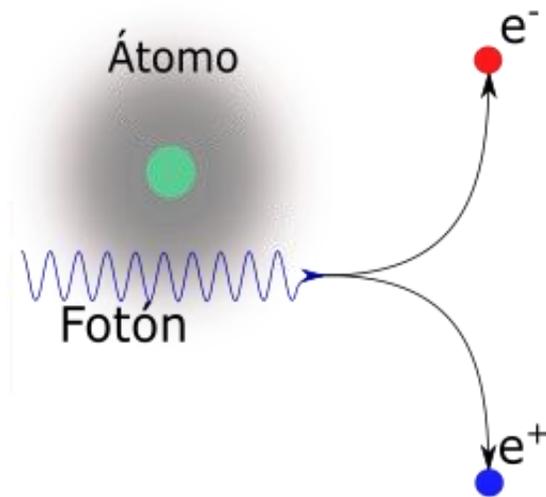


Fig. 1.3.3.1) Esquema de la producción del par electrón - positrón a partir de un fotón gamma

## 1.4) Neutrones

“If the neutron did not exist, it would need to be invented.”

- Bertram Brockhouse, Nobel Prize in Physics in 1994

Los neutrones son Bariones sin carga eléctrica neta, su composición es de 3 quarks (ddu), su masa en reposo es de  $939.6 \text{ MeV}/c^2$ , 1839 veces más que la del electrón, fuera del núcleo atómico es una partícula inestable, su vida media es de  $878.5 \pm 0.8 \text{ s}$  [10] fueron descubiertos por James Chadwick en 1932[11].

Los neutrones se clasifican según su energía en tres grupos:

1. Rápidos: Son neutrones con energías mayores a 100 keV
2. Epitérmicos: El intervalo de energía está entre 100 keV y 0.1 eV
3. Lentos: Tienen energía menor a 0.1 eV. Este grupo se subdivide en cuatro grupos:
  - a. Térmicos: Con energías aproximadamente de 0.025 eV
  - b. Fríos: Energías en el rango de  $5 \times 10^{-5}$  a 0.025 eV
  - c. Muy Fríos: con energías de  $2 \times 10^{-7}$  a  $5 \times 10^{-5}$  eV
  - d. Ultra Fríos: Energías menores a  $2 \times 10^{-7}$  eV.

Si bien no se han encontrado en la naturaleza isótopos que emitan neutrones espontáneamente como para ser utilizados como fuentes de neutrones para uso experimental, es posible crear compuestos que emiten neutrones (AmBe). También se pueden tener fuentes controladas de neutrones en laboratorios con aceleradores de partículas mediante reacciones nucleares y en reactores nucleares dedicados a la investigación.

## 1.5) Interacción Neutrones - Materia

Al no poseer carga eléctrica la interacción con la materia es únicamente con los núcleos atómicos, esto dificulta su detección debido a que en ciertos casos pueden penetrar un material sin interactuar lo cual hace que prácticamente sean “invisibles” a un detector de tamaño pequeño o mediano.

En contraste con la radiación gamma, la radiación resultante de la interacción es por lo general partículas cargadas. Estas partículas son creadas a partir de interacciones de los neutrones con el material o del núcleo absorbente que por producto de la colisión ha adquirido energía. Los principales medios de interacción son dispersión elástica(n,n) e inelástica (n,n') y reacciones nucleares que incluyen absorción en los materiales y activación (n, gamma) (n,alfa), (n,p), (n,fisión), (n,2n), etc. [12][13].

Para neutrones monocromáticos la probabilidad por unidad de longitud de trayectoria es constante para cada una de las posibles interacciones. Es convención expresar esta probabilidad en términos de la sección eficaz  $\sigma$  por núcleo de cada tipo de interacción.

La sección eficaz tiene unidad de área y usualmente se expresa en Barns que se definen como  $10^{-28} \text{ m}^2$  ( $100 \text{ fm}^2$ ). [14], [15]

Cuando multiplicamos el número de núcleos por unidad de volumen la sección eficaz microscópica  $\sigma$  se convierte en la sección eficaz macroscópica “ $\Sigma$ ”.

$$\Sigma = N \sigma \dots \dots \dots (1.4)$$

Que ahora tiene unidades de longitud inversa,  $\Sigma$  se puede interpretar como la probabilidad por unidad de longitud de trayectoria para cada uno de los procesos específicos descrito por la sección eficaz microscópica  $\sigma$ , cuando todos los procesos se toman en cuenta la sección eficaz total se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Sigma_{tot} = \Sigma_{disp.} + \Sigma_{capt.} + \Sigma_{fision} + \dots \dots \dots (1.5)$$

### 1.5.1) Dispersión Elástica

La dispersión elástica es la interacción más dominante en las interacciones de los neutrones con materia[16], en este proceso un neutrón “colisiona” con un núcleo, al hacer esto pierde energía, esta acción es repetida hasta que el neutrón alcanza el equilibrio termodinámico con el material. En ese momento la energía de los neutrones puede ser descrita por la distribución de Maxwell-Boltzman que depende únicamente de la temperatura (T) del medio. El valor más probable de esta distribución es  $kT$  donde  $k$  es la constante de Boltzmann, a esto se le conoce como termalización.

La termalización es un proceso dependiente del número de masa  $A$  del material por el que los neutrones se están propagando, entre más núcleos por unidad de volumen el proceso de termalización será más rápido. Los materiales con altas cantidades de Hidrógeno y con alta densidad son ideales para termalizar neutrones.

Cuando el neutrón “colisiona” con un núcleo le cede parte su energía esto hace que el núcleo con el cual colisionó actúe como un proyectil, a este nuevo proyectil se le conoce como núcleo de retroceso, estos núcleos de retroceso positivamente cargados interactúan electromagnéticamente con los electrones de los átomos del medio hasta perder la energía que les fue cedida en la colisión[13], [17](Figura 1.5.1.1)

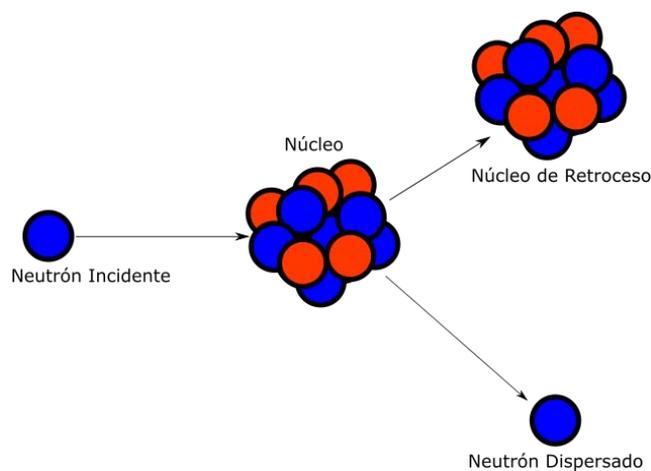


Fig.1.5.1.1) Esquema de la interacción mediante Dispersión Elástica.

### 1.5.2) Dispersión Inelástica

En esta interacción el núcleo blanco absorberá al neutrón incidente, resultando en un nuevo núcleo compuesto. El nuevo núcleo emite un neutrón de más baja energía que dejará al núcleo original en un estado excitado, usualmente el núcleo excitado emite radiación gamma para liberar el exceso de energía hasta alcanzar su estado base.[13], [17](Figura 1.5.2.1)

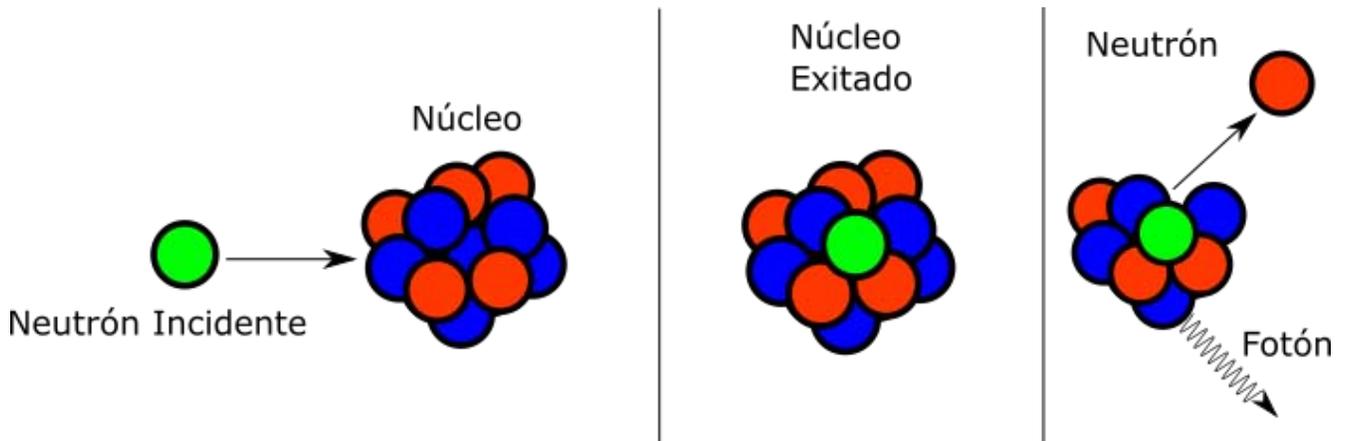


Fig.1.5.2.1) Esquema de la interacción mediante Dispersión Inelástica

### 1.5.3) Captura Radiactiva

En la captura radiactiva el neutrón entra al núcleo blanco formando un núcleo compuesto, el núcleo nuevo decae emitiendo radiación gamma hasta llegar al estado base.[13] Este proceso es un caso particular de la dispersión elástica (Neutrón- Átomo) con la diferencia que el núcleo formado solo decae por la emisión de rayos gammas(Figura 1.5.3.1).

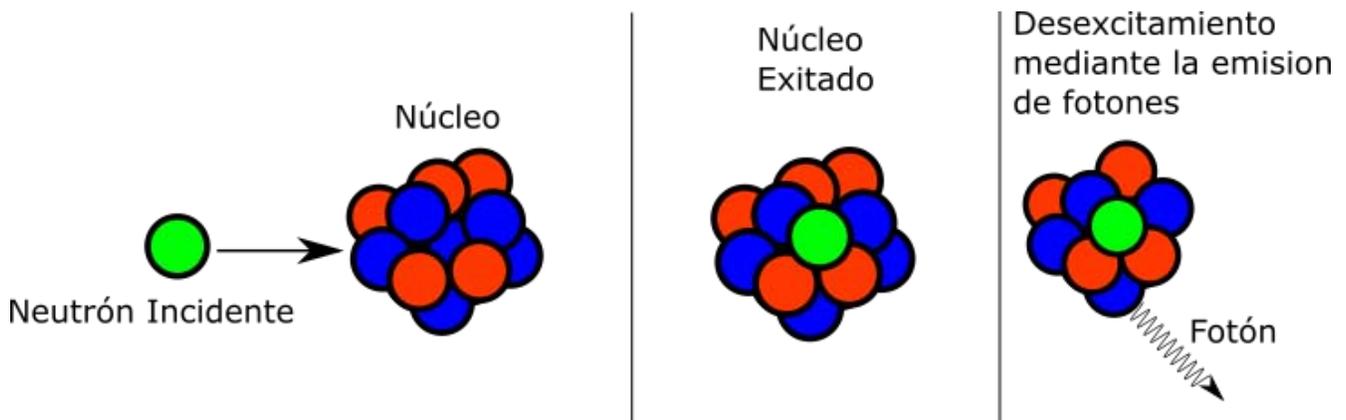


Fig. 1.5.3.1) Esquema de la interacción mediante Captura Radiactiva

## 1.6) Similitudes en Detección de Neutrones y Rayos Gamma

Por motivos de seguridad y disponibilidad las fuentes emisoras de neutrones son complicadas de utilizar, debido a las similitudes entre radiación gamma y neutrones es posible utilizar rayos gamma para calibrar y caracterizar detectores que se expondrán a neutrones.

Ambas son radiaciones neutras, tienen caminos medios grandes respecto a partículas cargadas, su detección se basa en emisiones secundarias, en el caso de gammas, electrones y en el caso de los neutrones, protones.

La radiación secundaria que es producto de las interacciones de los neutrones y rayos gamma producen destellos de luz en un centellador y existe una relación entre la energía de esta radiación secundaria (Protones y electrones) para producir la misma cantidad de luz. No se encontró una expresión analítica para esta relación pero en la figura 1.6.1 se muestran datos experimentales de este fenómeno.

Para centelladores orgánicos la respuesta para electrones por encima de los 125 KeV es lineal lo cual permite que su caracterización entre Energía y emisión de luz sea más fácil.[18], [19]

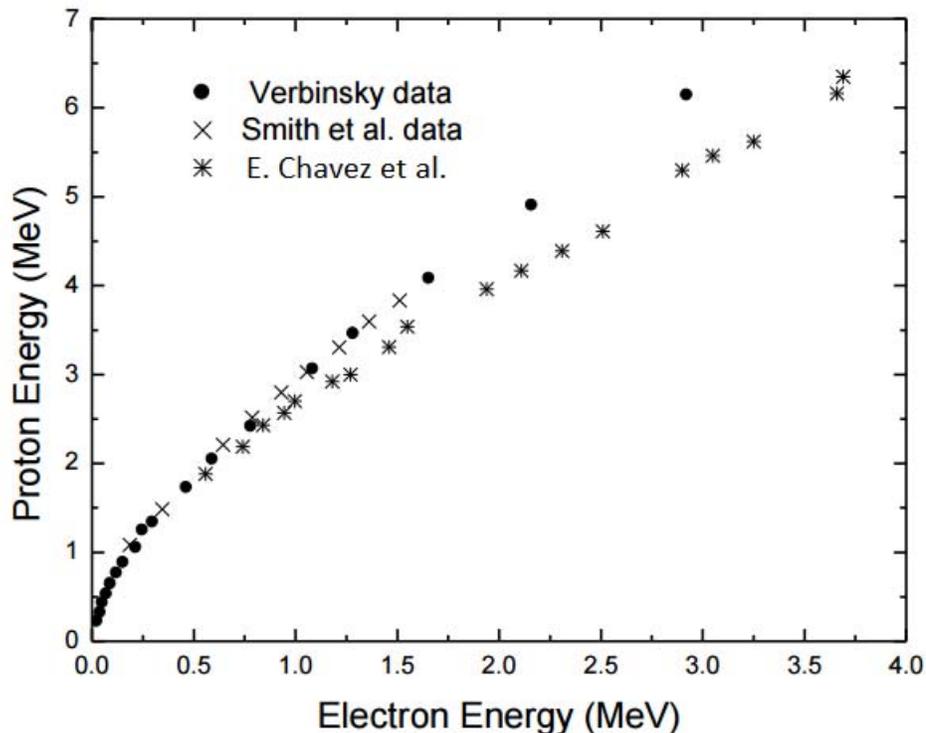


Fig. 1.6.1 Se puede observar la equivalencia en energía para producir la misma cantidad de luz en centellador entre protones(neutrones) y rayos gamma(electrones)[20].

## 1.7) Radiación de Fondo

Debido que la atmosfera es constantemente bombardeada por radiación cósmica y la existencia de radiactividad natural en el ambiente, todos los detectores registran una señal de fondo, la intensidad de la radiación de fondo no es constante y depende del lugar donde se realicen los experimentos así como el tipo de blindaje con el que cuente el detector, el volumen del detector, etc. [9] La radiación de Fondo al estar siempre presente impone un límite a la radiación mínima que se pueda detectar. Existen diferentes tipos de blindajes contra la radiación como blindajes pasivos: placas de plomo o parafina alrededor los detectores o blindajes activos como discriminadores de partículas usando detectores externos.[21] Estos blindajes ayudan a discriminar radiación que no es relevante para el experimento.

### 1.7.1) Fuentes de Radiación de Fondo

La radiación de fondo se clasifica en 5 categorías:

- 1) La radiación natural que presenta en los materiales del detector.
- 2) La radiación de los materiales que rodean al detector, blindajes, soportes, etc.
- 3) Radiación terrestre, materiales de construcción del laboratorio, rocas, estructuras de construcción.
- 4) Radiación proveniente del aire que rodea al detector.
- 5) Radiación cósmica, ya sea primaria (Proveniente del espacio) o secundaria (Radiación resultante de la interacción de la radiación primaria con la atmosfera).

En la figura 1.7.1.1 se puede observar un mapa de la radiación cósmica de rayos gamma, en este tipo de mapas se hace comprensible la importancia de la radiación de fondo al hacer experimentos

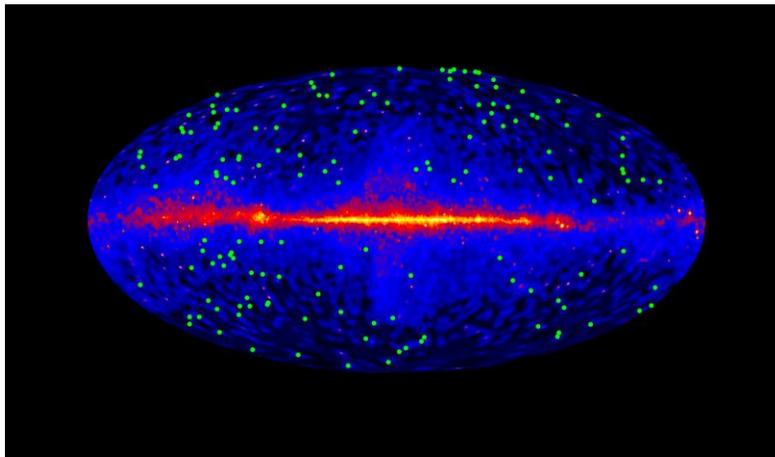


Fig. 1.7.1.1) Mapa de la radiación cósmica de rayos gamma[22]

## 2) Detección de Radiación Neutra: Rayos Gamma y Neutrones

### 2.1) Materiales Centelladores

La detección de radiación ionizante mediante la luz de centelleo en ciertos materiales es una de las técnicas más antiguas. Este tipo de detectores resulta ampliamente útil debido a la gran cantidad de tipos de radiaciones que puede detectar.

Un material centellador idóneo para su utilización como detector tiene las siguientes propiedades:

- Debe de convertir la energía de la partícula incidente en luz con una alta eficiencia.
- Esta conversión debe de ser lineal.
- El medio debe de ser transparente a la longitud de onda que emite para buena recolección de luz.
- El tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida debe de ser corto.
- La manufactura del mismo debe ser versátil de tal manera que se pueda construir del tamaño que se desee.
- El índice de refracción del centellador debe de estar cercano al del vidrio (1.5) para permitir un buen acoplamiento con detectores de luz.

No existe un material que cumpla con todas estas características al mismo tiempo [9] y la elección de un material centellador depende fuertemente del experimento que se quiera realizar.

Existen dos tipos de centelladores los orgánicos e inorgánicos, los inorgánicos tienden a tener una mayor emisión lumínica y linealidad pero suelen tener un tiempo de decaimiento largo. Los orgánicos suelen ser más rápidos, pero con una producción lumínica menor.

Usualmente el número atómico  $Z$  más alto y su mayor densidad hacen de los centelladores inorgánicos los más adecuados para la detección de rayos gamma, mientras que detectores orgánicos favorecen la detección de neutrones rápidos y partículas beta.

### 2.2) Fluorescencia y Fosforescencia

La fluorescencia es la emisión de luz inducida en una sustancia debida a una excitación de algún tipo. La fosforescencia corresponde a la emisión de luz de mayor longitud de onda y con tiempos de respuesta generalmente más lentos. La fluorescencia retardada emite luz en el mismo espectro que la fluorescencia pero con emisiones que duran más tiempo.

Un detector centellador debe de convertir la mayor cantidad de energía de la radiación incidente en emisión de luz por fluorescencia y debe de minimizar la producción de luz por fenómenos de fosforescencia y fluorescencia retardada[23].

## 2.3) Centelladores Orgánicos

Los fluorescencia en los centelladores orgánicos es debida a transiciones en niveles energéticos moleculares, entonces este fenómeno es observado independientemente del estado físico del material, es decir si un centellador orgánico se encuentra en estado sólido, gaseoso o líquido presentara el mismo fenómeno fluorescente, inclusive se presentará fluorescencia si el material centellador es parte en un compuesto. Este comportamiento contrasta con los centelladores cristalinos inorgánicos que requieren una estructura altamente organizada como base del proceso de centelleo. [23]

### 2.3.1) Mecanismo de Centelleo En Detectores Orgánicos

El centelleo de estos materiales se debe a transiciones de electrones en estados orbitales moleculares  $\pi$ . En la figura 2.3.1.1 se muestra un esquema de estas transiciones donde se grafica el estado base  $S_0$ , el estados excitado  $S_1$  y los subestados correspondientes a cada uno. En los materiales de interés para este trabajo el espaciado energético entre el estado base  $S_0$  y el estado  $S_1$  es de aproximadamente de 3 a 4 eV. Los subestados corresponden a los estados vibraciones de la molécula y el espaciado de estos subestados es de aproximadamente 0.15 eV.[9], [23]

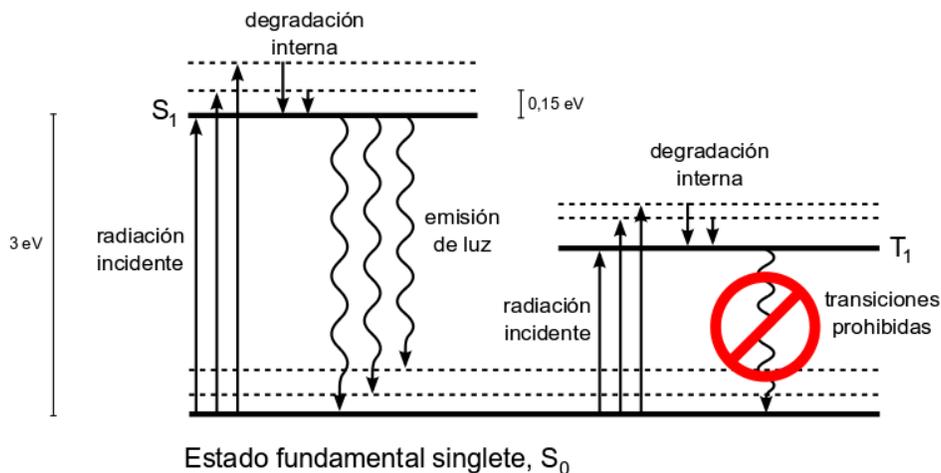


Fig. 2.3.1.1) Esquema de los niveles energéticos en una molécula de un centellador orgánico.[23]

La energía cedida por la radiación incidente hace que los electrones poblen estados electrónicos y estados vibracionales (Flechas rectas Fig. 2.3.1.1 ) En el caso de excitaciones a estados singletes, los modos vibracionales decaen inmediatamente ( $<10$  ps ) al estado  $S_1$  sin emisión de radiación, este proceso es llamado degradación interna. Desde  $S_1$  los electrones decaen tanto al estado base  $S_0$  como a sus subniveles vibracionales, este proceso causa emisión de radiación en el espectro visible o muy cercano a él (flechas ondulatorias en Fig. 2.3.1.1) este proceso suele durar un par de nanosegundos y es justamente el fenómeno de fluorescencia. Se nota que los electrones decaen desde  $S_1$  a estados vibracionales de  $S_0$ , esta transición es de menor energía que la requerida para la transición  $S_0 \rightarrow S_1$ , explicando que los centelladores sean transparentes a su propia radiación.

## 2.4) Centelladores Inorgánicos

Los centelladores inorgánicos son cristales crecidos en hornos de alta temperatura. En general, estos centelladores tienen un tiempo de decaimiento del orden de los 300 ns, lo que los coloca entre 2 y 3 órdenes de magnitud más lentos que los centelladores orgánicos.[23]

Otra desventaja de trabajar con este tipo de detectores es su higroscopicidad, que usualmente hace que se tengan que cubrir de algún material para evitar que la humedad sea absorbida por el cristal.

Una de las ventajas de este tipo de detectores es su mayor poder de frenamiento específico ("*stopping power*") debido a su alta densidad y alto número atómico. Entre los centelladores los inorgánicos poseen la mayor intensidad luminosa por unidad de energía absorbida, esto se traduce en una mejor resolución en energía de la partícula incidente. Este tipo de detectores es adecuado para la detección y espectroscopia de rayos gamma.

En los centelladores inorgánicos el mecanismo de centelleo se basa en su estructura electrónica de bandas, propia de una red cristalina.

La estructura electrónica de bandas describe los rangos de energía que un electrón en una red cristalina puede tener acceso, a estas se les llama bandas permitidas describiendo también aquellos rangos de energía donde el electrón no puede estar. A estas se les llama bandas prohibidas.

Se denomina banda de valencia al rango de energías más alto que se encuentra ocupado por electrones. Los electrones que pueblan esta banda y las de menor energía también se encuentran localizados en la red. Por otro lado, los electrones que pueblan la banda de conducción, están deslocalizados en la red, es decir pueden moverse libremente por el cristal. Estas dos bandas pueden estar superpuestas y pobladas como en los metales.

En el caso donde estas dos bandas están separadas por una banda prohibida se tienen semiconductores y aislantes.

### 2.4.1) Mecanismo de Centelleo en detectores Inorgánicos

En los centelladores inorgánicos, si un electrón absorbe la energía y logra ser promovido a la banda de conducción deja un hueco en el lugar que ocupaba en la banda de valencia. Si el electrón se desexcita se integra de nuevo a la banda de valencia, este fenómeno en un cristal puro lo hace emitiendo un fotón en un proceso ineficiente, al agregar impurezas que se denominan activadores se generan sitios en la red donde la estructura de bandas es modificada, esto crea estados energéticos accesibles en la banda prohibida por los cuales el electrón puede desexcitarse hasta llegar a la banda de valencia. Al elegir un material activador adecuado estas transiciones pueden lograr el desexcitamiento mediante fotones que sean visibles.

Como la energía de los fotones emitidos no es suficiente para volver a excitar a los electrones el centellador es invisible a su propia radiación.

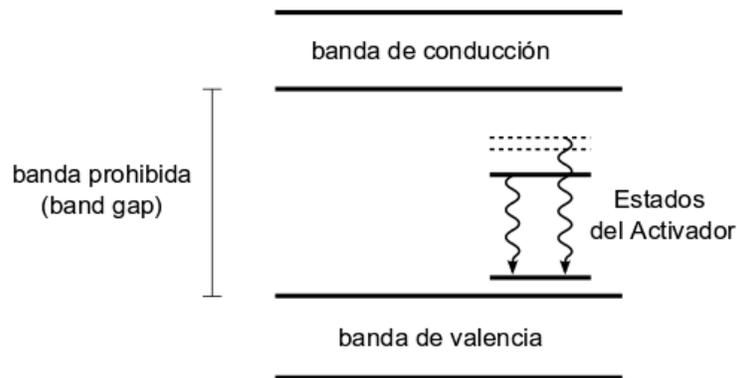


Fig. 2.4.1.1) Esquema de las bandas energéticas en un cristal inorgánico centellador[23]

Cuando una partícula ionizante interactúa con el centellador promueve una gran cantidad de electrones de la banda de valencia a la de conducción. Los electrones y el hueco creado pueden moverse libremente por el cristal (De forma independiente o en un estado combinado electrón-hueco llamado excitón), cuando un átomo del material activador captura sucesivamente un excitón, forma configuraciones excitadas donde el hueco toma su estado fundamental y el electrón algún nivel energético excitado (líneas punteadas en la Fig. 2.4.1.1). Si el estado formado posee transiciones al estado fundamental permitidas estas ocurrirán de 50 a 500 ns, liberando un fotón en el espectro visible, este proceso de migración de electrones y huecos es más corto que la desexcitación del activador.

## 2.5) Fotomultiplicadores

Los tubos fotomultiplicadores son detectores miembros de la clase de tubos de vacío. Son extremadamente sensibles a la luz ultravioleta, visible e infrarrojo cercano, su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico para convertir un fotón incidente en un electrón y en un “efecto avalancha” causado por los dinodos para amplificar la señal de salida. Cuando un fotón llega al fotocátodo (Generalmente se usan mezclas de materiales con una función de trabajo relativamente pequeña) un electrón es desprendido del fotocátodo debido al efecto fotoeléctrico, un electrodo enfoca este electrón al primer primer dinodo. Debido a la diferencia de potencial causada por una fuente de alto voltaje a la que el tubo fotomultiplicador está conectado, esto provoca que haya emisiones secundarias de electrones amplificando en factores del orden de millones la cantidad de electrones que forman la avalancha, hasta llegar al ánodo colector donde se obtiene la señal de salida negativa.

Una analogía de los dinodos es que pueden verse como una pared con pegamento y cubiertas de perdigones, cuando un perdigón es lo suficientemente rápido y colisiona con la pared arrancará perdigones de ella, ahora estos perdigones sueltos colisionan con la siguiente pared (El siguiente dinodo) y producirán más perdigones sueltos que colisionan con la siguiente pared y así consecutivamente, produciendo un “efecto avalancha”. Este fenómeno se puede apreciar en el diagrama presentado en la figura 2.5.1 junto con un diagrama de la electrónica involucrada.

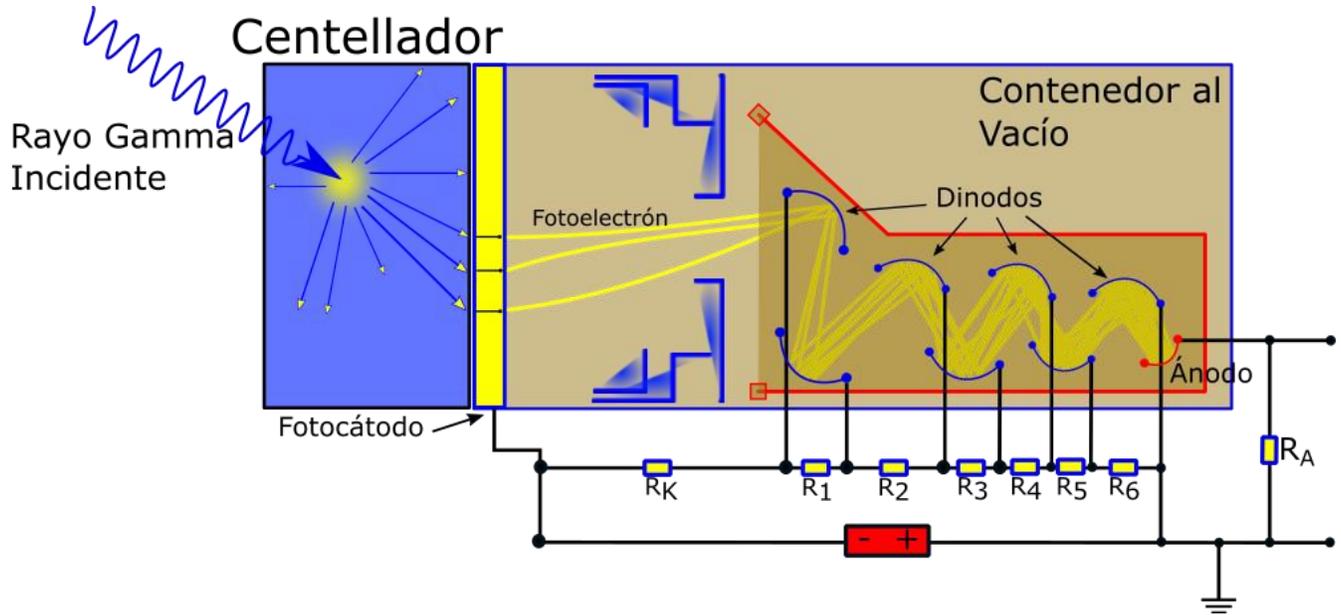


Fig. 2.5.1) Esquema del funcionamiento de un Tubo Fotomultiplicador.

## 3) Desarrollo Experimental

“Physics is like sex. Sure, it may give some practical results, but that's not why we do it.”

- Richard Feynman, Nobel Prize in Physics 1965

El desarrollo experimental es la parte principal de este trabajo, en esta sección se describen los detalles técnicos de los instrumentos usados empezando con los fotomultiplicadores que se utilizaron siguiendo con los módulos procesadores de señales y la metodología experimental que se siguió en cada experimento. Además se describen las dificultades técnicas que se tuvieron en cada experimento así como las soluciones que se encontraron.

### 3.1) Tubos Fotomultiplicadores

Los tubos fotomultiplicadores que se utilizaron en este trabajo fueron manufacturados por Thorn EMI Gencom inc., utilizan una ventana de borosilicato que sirve como acoplamiento con cristales centelladores, cuentan con un fotocátodo bialcalino (RbCsSb) que se produce haciendo reaccionar una capa de antimonio con Rubidio y Cesio [24] y 10 dinodos de BeCu[25] (Se usa por ser una aleación de cobre no magnética y que no produce chispas[26]) que producen una amplificación lineal de hasta 5,000,000 veces[25].

El fotocátodo tiene máxima eficiencia aproximadamente a 450 nm [24]. Se caracteriza por tener una función de trabajo pequeña aproximadamente de 2 eV[27].

En la figura 3.1.1 se muestra una gráfica con la eficiencia cuántica de los fotomultiplicadores y en la figura 3.2.4 se muestra en comparación con la distribución de longitudes de onda producidas en el centellador.

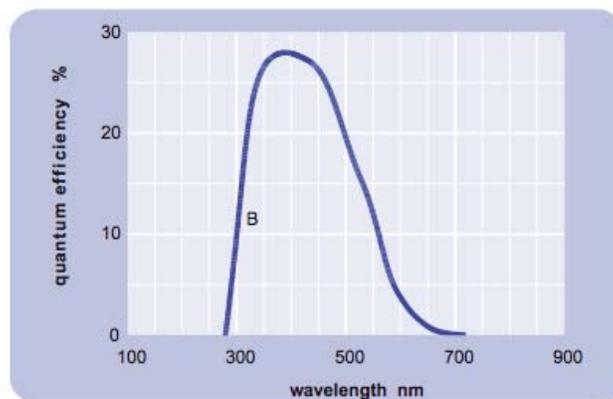


Fig. 3.1.1) Gráfica de la eficiencia del Tubo Fotomultiplicador 9903B en función de la longitud de onda incidente[25]

Para el funcionamiento de los tubos fotomultiplicadores es necesario aplicar alto voltaje vía

una fuente externa, los tubos fotomultiplicadores que se usan en este trabajo tienen un intervalo de voltaje de funcionamiento de -2000 a -900 V. Más adelante se discute a fondo la elección del voltaje de funcionamiento de cada fotomultiplicador.

Estos fotomultiplicadores tienen 3 salidas, 2 ánodos de señal negativa y un dinodo con señal positiva, las 3 salidas tienen conexión Lemo miniature 01.(Figura 3.1.2)



Fig. 3.1.2) Fotografías de los tubos fotomultiplicadores individuales.

## 3.2) MONDE

MONDE ( **MO**mentum **Neutron** **DE**tector)(Figura 3.2.1) es un arreglo de 16 tubos fotomultiplicadores(Figura 3.2.3) acoplados con guías ópticas fabricadas por Q. Curiel en su trabajo de tesis de licenciatura (2009) [28] que rodean una placa de plástico centellador (BC-408) de  $160 \times 70 \times 5 \text{ cm}^3$  con base de polyvinyl tolueno con Antraceno como material centellador que presenta fluorescencia en el intervalo de los 400 a 500 nm [29] con máxima eficiencia de emisión en 425 nm[30].(Figura 3.2.1)(Figura 3.2.4)

La placa de plástico centellador está rodeada por un marco de aluminio que funciona como soporte para los 16 tubos fotomultiplicadores, además está forrado con un plástico reflejante que lo aísla de perturbaciones lumínicas externas.

MONDE es capaz de desplazarse gracias a un sistema de transporte el cual permite un libre movimiento del arreglo, este sistema de transporte permite también ajustes de altura.

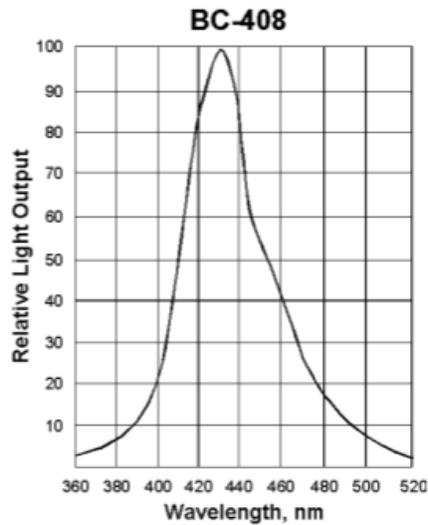


Fig. 3.2.1) Gráfica de la distribución de longitudes de onda de emisión del plástico centellador BC-408 [30]

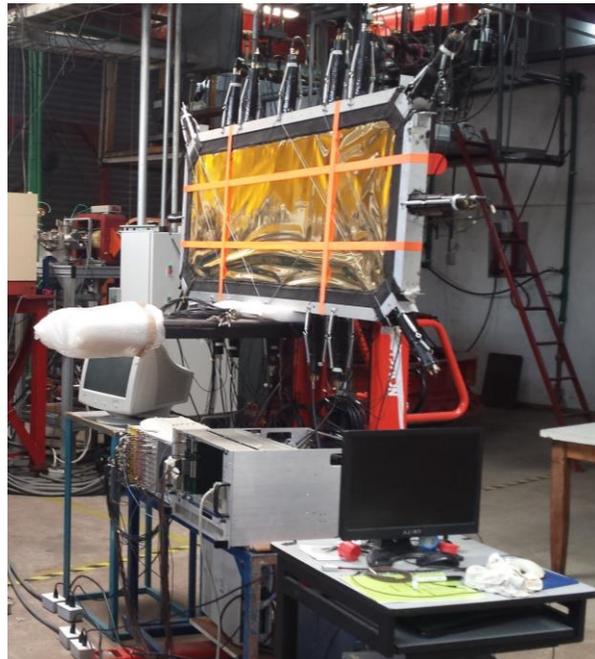


Fig. 3.2.1) Fotografía de MONDE

Para suministrar el alto voltaje necesario para el funcionamiento de los tubos fotomultiplicadores se usa una fuente de alto voltaje LeCroy 1451 que controla dos módulos de 10 canales individuales LeCroy 1461N (Figura 3.2.2). La fuente es controlada por computadora usando software especializado incluido por el fabricante que permite variar de manera muy precisa el voltaje que es aplicado a cada tubo fotomultiplicador individualmente mediante un puerto serial.

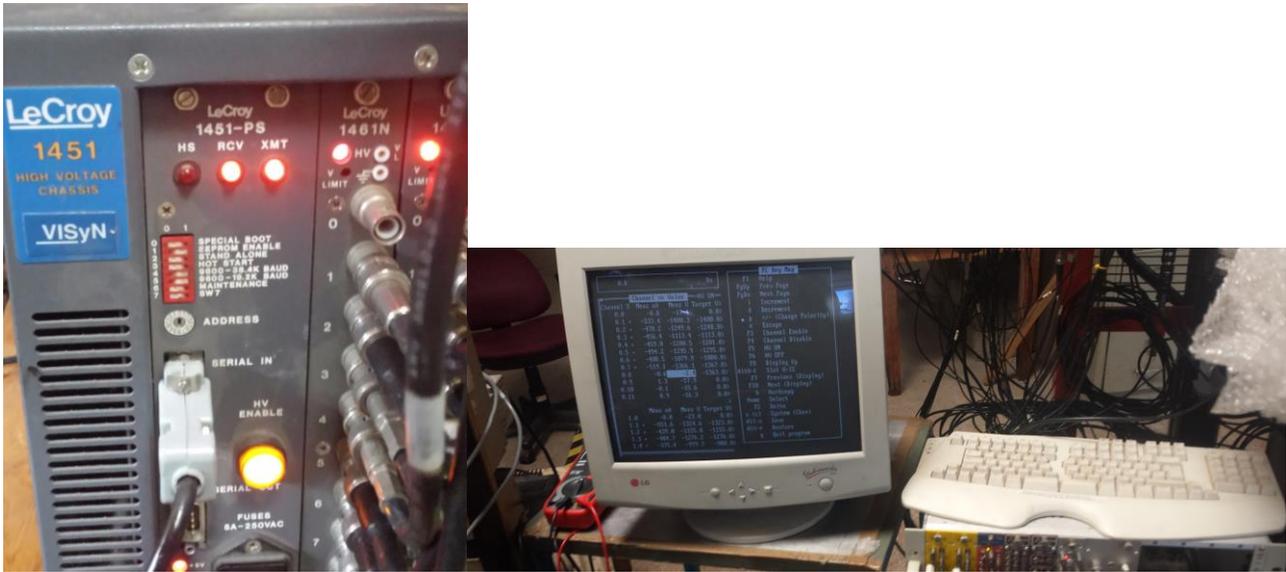


Fig. 3.2.2) Fotografía de la Fuente de Alto Voltaje (Izquierda). Computadora corriendo el software de control de la fuente de alto voltaje (Derecha).

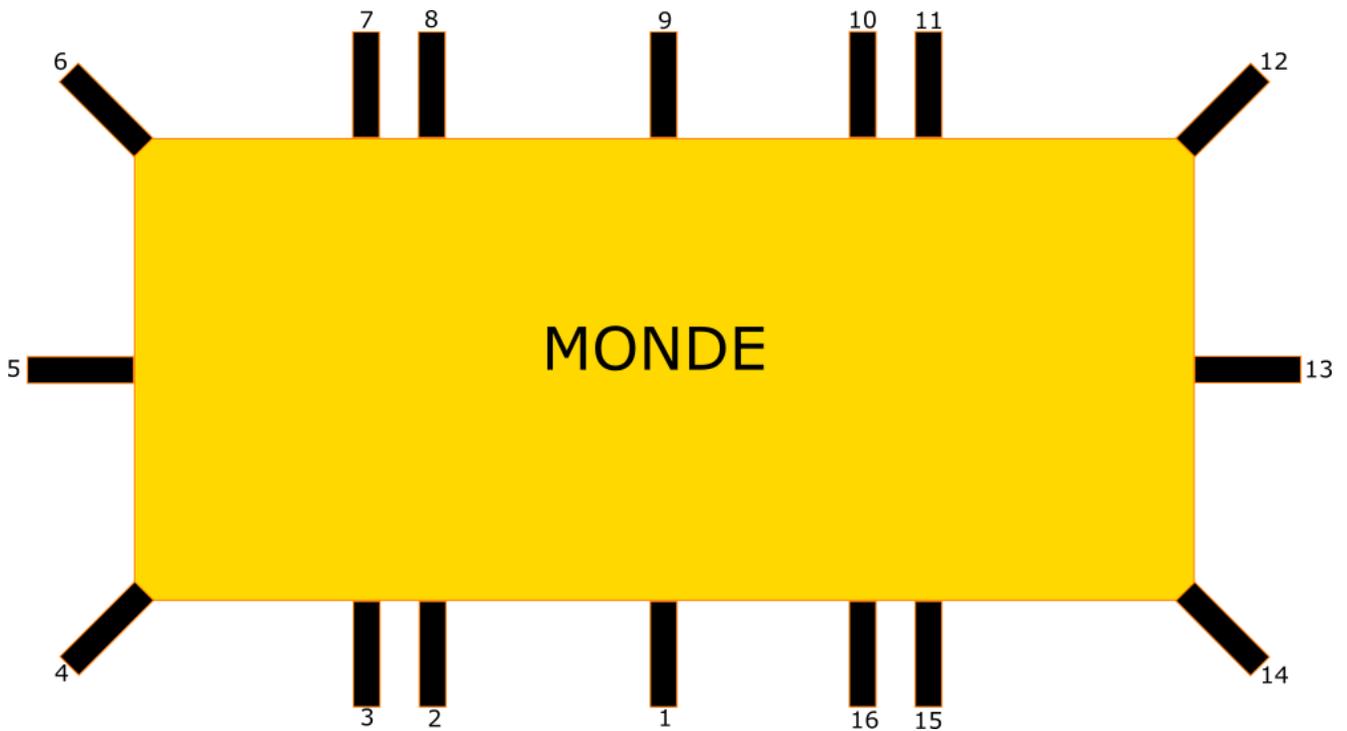


Fig. 3.2.3) Esquema de MONDE y numeración de los tubos fotomultiplicadores.

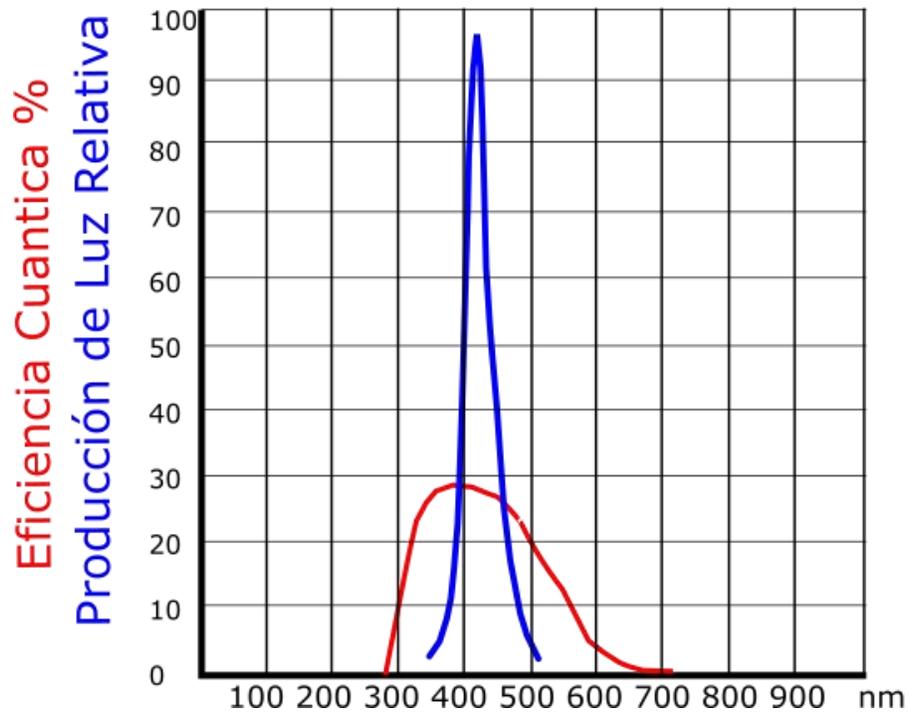


Figura 3.2.4) Comparación entre la distribución de longitudes de onda de salida relativa en el centellador BC 408 y la eficiencia cuántica de los tubos fotomultiplicadores 9903B

### 3.3) Procesamiento de Señales

La señal proveniente de los tubos fotomultiplicadores necesita ser procesada para poder ser adquirida, esto es, se necesita amplificar, retrasar, modificar la forma, sincronizar, etc. Para esto se utiliza electrónica modular nuclear (NIM, "Nuclear Instrumentation Modules") montados en un "anaquel" (Comúnmente se usa la palabra "Rack" tomada del inglés) ORTEC Model 2100.

#### 3.3.1) Amplificador Mesytec MDS-8 (Amplificadores)

La señal proveniente de los 16 tubos fotomultiplicadores es amplificada por dos módulos MDS-8 cada uno de 8 canales. Estos amplificadores permiten invertir la señal de entrada. Los módulos cuentan con dos salidas (E y t) que son el promedio de todas las señales entrantes, estas dos salidas son sumamente importantes ya que con ellas es posible generar una señal de disparo para la adquisición de datos.

La señal puede ser amplificada de 1 a 200 veces, la ganancia es ajustable con un potenciómetro individual para cada canal, tiene 3 opciones para la forma del pulso de salida ("Shaping time") para cada canal[31], en todos los experimentos realizados se utilizó 1  $\mu$ s de "shaping time" y una amplificación de 20 para todos los canales, esto para asegurar el funcionamiento idéntico para cada canal. Las señales después de ser amplificadas son conectadas al PADC o al QDC.[31]

#### 3.3.2) Discriminador de Fracción Constante ORTEC OCT CF DISCR CF 8000 (CFD)

Para generar una señal de disparo que inicie la adquisición de datos es necesario tener un pulso lógico (negativo y cuadrado, de acuerdo al estándar NIM), ningún pulso proveniente de los tubos fotomultiplicadores tiene este atributo, pero al tomar las señales de las salidas "t" de los amplificadores MDS-8 y pasarlos por este módulo es posible tener un pulso que cumpla este cometido, el modulo es lo suficientemente rápido como para generar el disparo, es decir la señal de disparo se genera antes que las señales amplificadas y así puede ser utilizado como disparo.

Los módulos de Discriminadores por Fracción Constante (DFC) funcionan imponiendo un umbral en amplitudes de señales, esto elimina señales con amplitud pequeña que usualmente corresponden a ruido electrónico.

Los DFC imitan la operación matemática de encontrar el máximo de un pulso al encontrar cuando su pendiente es cero, esto es que un DFC generará un pulso cuadrado cuando la pendiente del pulso tenga un valor definido y no cuando el pulso tenga cierta altura.(Figura 3.3.2.2)

Esto lo hace al dividir la señal entrante en dos partes un parte es atenuada una fracción de la amplitud original y la otra es retrasada e invertida, más adelante estas señales son sumadas para formar una señal de tiempo de fracción constante.

La elección del valor de discriminación se detalla en cada sección.

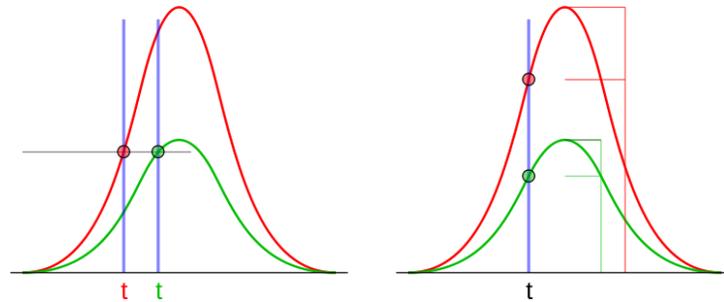


Fig. 3.3.2.2) Esquema de la diferencia entre la generación de un pulso cuadrado mediante un valor de amplitud (Izquierda) vs. Generación de un pulso cuadrado mediante un valor fijo para la pendiente (DFC)(Derecha)[20].

### 3.3.3) Caen Mod 405 (3 Fold Logic Unit)

Las señales provenientes de los DFC correspondientes a cada una de las señales “t” de los amplificadores MDS-8, son independientes una de la otra. Para generar un disparo común es necesario hacer pasar estas dos señales por este módulo. Esta unidad permite generar un disparo a partir de las dos señales, imitando la operación lógica OR, esto es cuando al módulo llega la señal de alguno de los dos canales de entrada, generará un pulso cuadrado y negativo. Se puede apreciar un esquema de esta operación en la figura 3.3.3.2.

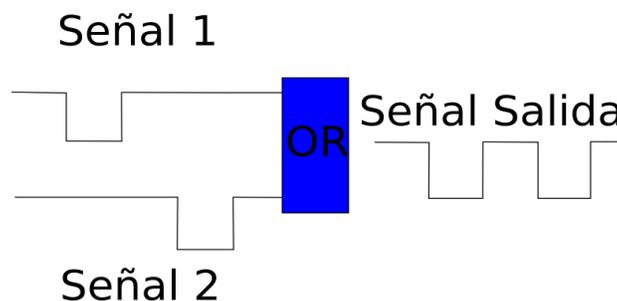


Fig. 3.3.3.2) Representación gráfica de la operación realizada por Caen Mod 405 3 Fold Logic Unit

### 3.3.4) ORTEC GG 8010 (Gate & Delay)

La señal proveniente del módulo Caen Mod 405 3 Fold Logic Unit ahora es pasada por un módulo generador de ventanas lógicas (que se conoce como “Gate & Delay”). Este módulo ofrece control sobre la duración del pulso lógico y su retraso. La señal entregada por este módulo es pasada a la entrada GATE de los módulos PADC o QDC montados en el CAMAC y le indica al sistema cuando iniciar la adquisición de datos. Se puede apreciar un esquema de

esta operación en la figura 3.3.4.2.

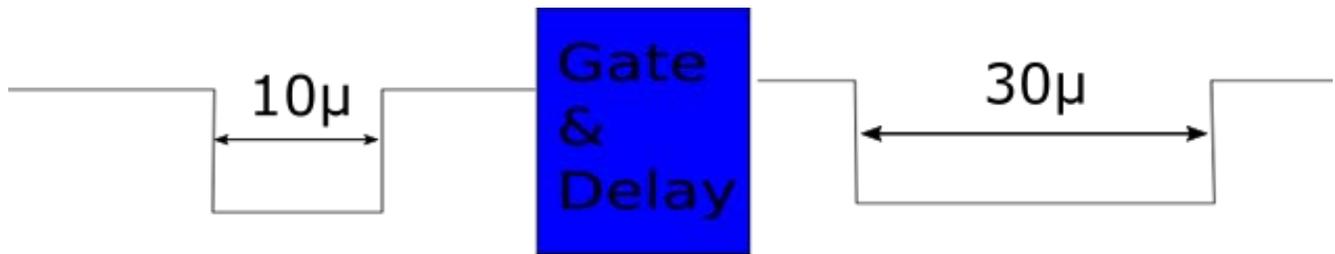


Fig. 3.3.4.2) Representación gráfica de la acción de agrandar el tiempo de la señal de disparo, por el Gate & Delay

### 3.3.5) CANBERRA Amplifier 2022 (Amplificador Externo)

Este módulo amplificador fue requerido para el detector externo (NaI) en los experimentos de correlación gamma-gamma descritos en las secciones 3.12 y 3.13, con una ganancia de 300x y “shaping time” de 1  $\mu$ s.

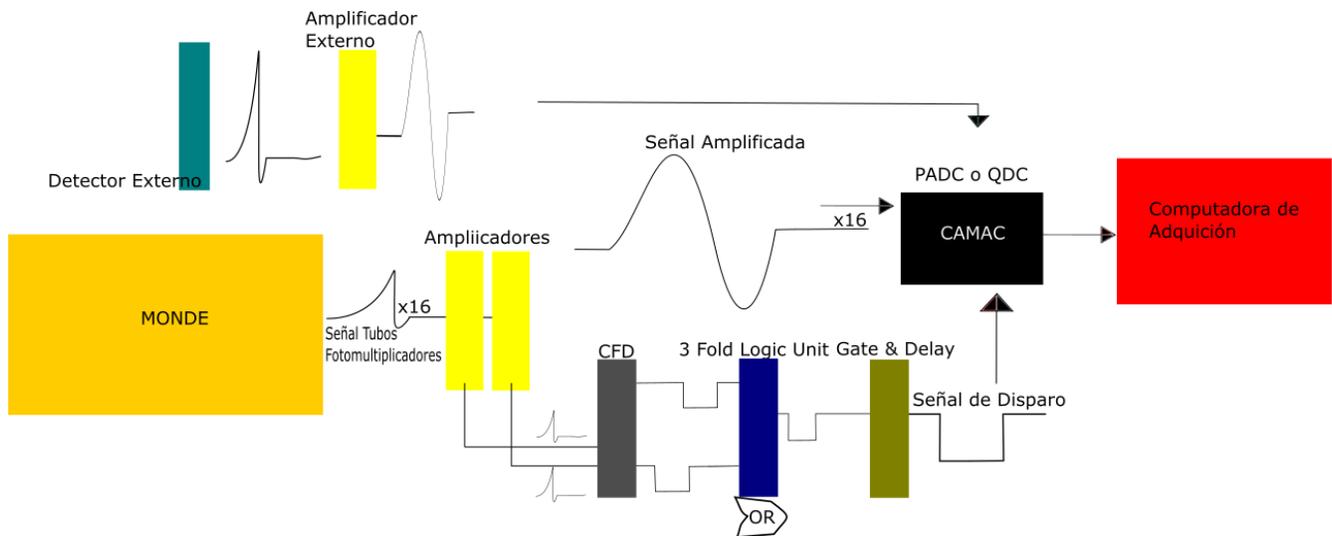


Fig. 3.3.1) Diagrama General de los experimentos realizados en este trabajo, En cada sección se especifica que módulos fueron usados en específico.

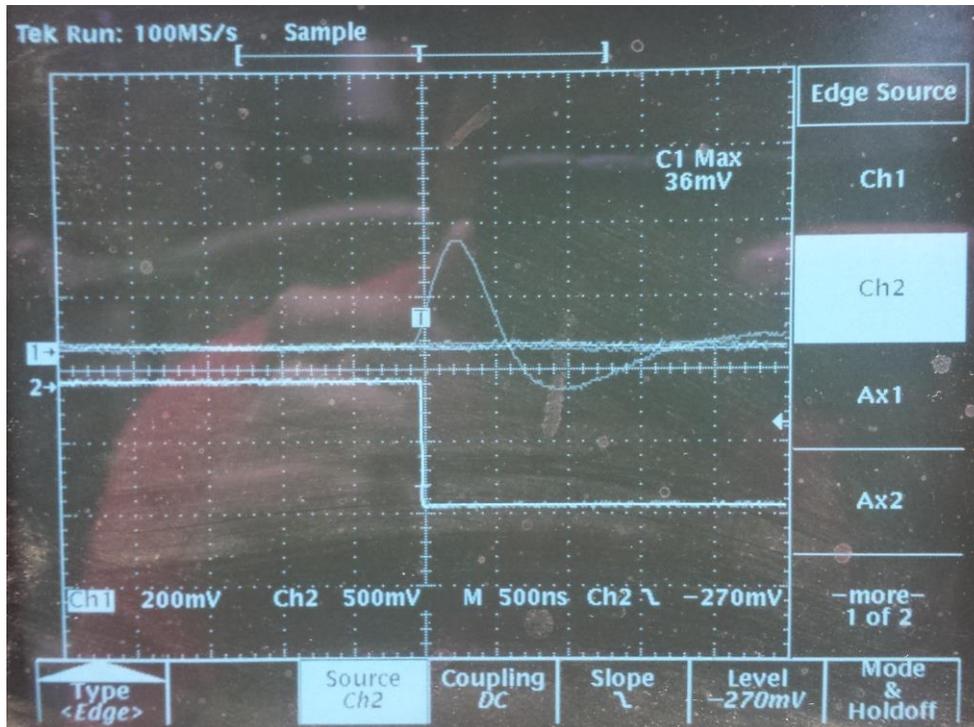


Fig. 3.3.2) fotografía del osciloscopio, comparando las señales de 1 tubo fotomultiplicador con la señal de disparo generada por los 16 tubos fotomultiplicadores.

Es apreciable en la figura 3.3.2, que la señal de disparo (Cuadrada) se genera antes que las señales amplificadas, esto hace posible que el pulso cuadrado sea ideal para iniciar la adquisición de datos.

## 3.4) Adquisición de Datos

### 3.4.1) Convertidores de señales analógicas a digitales

Para poder analizar y estudiar las señales de los múltiples detectores es necesario un sistema de adquisición de datos capaz de procesar las señales analógicas y convertirlas en señales digitales. A este proceso se le conoce como conversión Analógica a Digital. La idea es extraer del pulso entrante un número que represente fielmente la información que contiene. Existen módulos electrónicos especializados llamados “Analog to Digital converters (ADCs)”, estos módulos requieren una señal de disparo que indica al sistema sobre qué intervalo de tiempo realizará la conversión de los pulsos entrantes.

Los Peak ADCs buscan el máximo voltaje del pulso entrante durante una ventana temporal y lo convierten en un número. Los QDC (Charge to Digital Converter) integran la señal durante una ventana temporal, lo cual resulta en una relación entre el dato obtenido y la carga eléctrica total transportada por el pulso.

Estos módulos necesitan una interfaz de comunicación con una computadora recolectora de

datos, esto se hace con un dispositivo llamado “**Computer Aided Measurement And Control**” CAMAC por sus siglas en inglés.

En este trabajo se utilizó un CAMAC WEINER CC32, para todos los experimentos excepto la caracterización de los tubos fotomultiplicadores (Sección 3.8).

En este trabajo fueron usados dos tipos módulos ADC (Analog to Digital Converter), en las secciones 3.6, 3.7, 3.9, 3.11, Fue usado un QDC Phillips 7166 y en las secciones 3.10, 3.12 y 3.13 fue usado un PADC Phillips 7164. Ambos cuentan con 16 canales de entrada y dos entradas GATE que son las entradas de señales de disparo. Estos módulos permiten conectar el disparo en serie lo cual permite iniciar la adquisición de datos en varios módulos a la vez con una sola señal de disparo.

Esta característica resultó particularmente útil en las secciones 3.12 y 3.13 donde un detector externo es usado.

El CAMAC es controlado mediante una tarjeta PCI (Peripheral Component Interconnect) en una computadora externa la cual permite la comunicación entre el CAMAC y la computadora es decir establece comunicación entre ambos lo cual permite que la computadora recolecte los datos en el momento indicado. Esta comunicación es gobernada por un programa escrito en LabView por el Físico Arcadio Huerta. Es posible tener múltiples tarjetas de adquisición y acomodar los datos obtenidos en archivos de texto llano los cuales pueden ser analizados usando otro programa. En la figura 3.4.4.1 se muestra una captura de pantalla del programa.

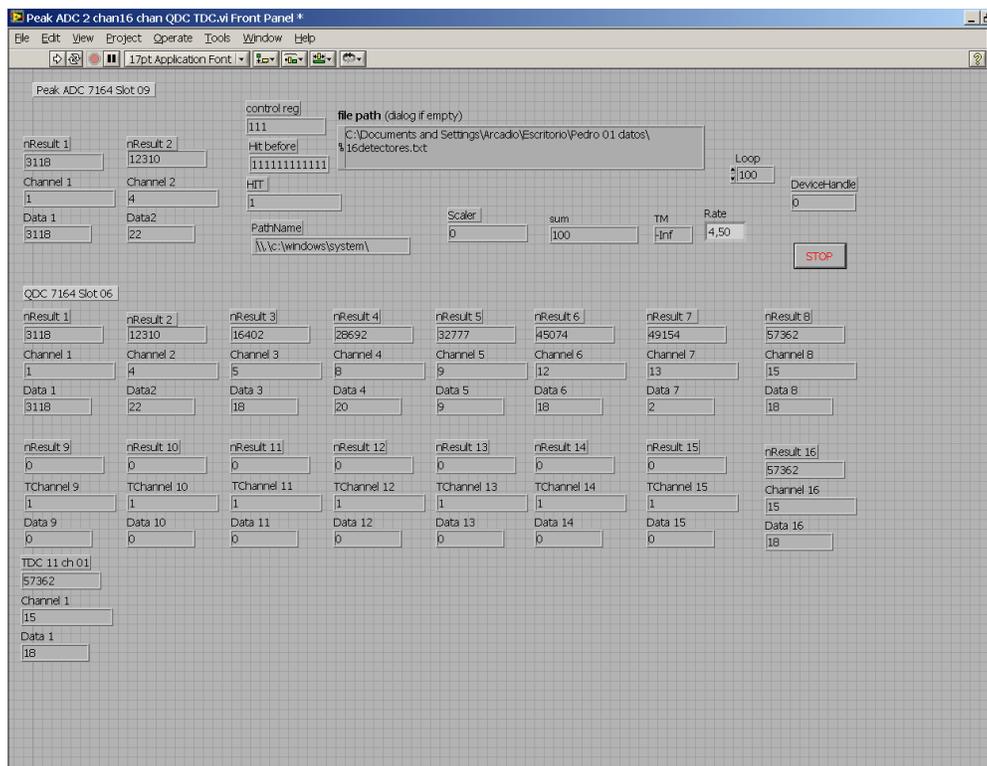


Fig. 3.4.1.1) Captura de pantalla del programa de adquisición de datos

### 3.4.2) Algoritmo ANGER

El algoritmo de posición ANGER o el método de centro de masa es utilizado en cámaras ANGER [4], [25] para imagenología en áreas médicas. La idea es encontrar la posición de un evento lumínico en la placa centelladora de MONDE a partir de la intensidad de la señal obtenida en cada detector, este proceso es completamente análogo a encontrar el centro de masa a partir de las masas en un arreglo de cuerpos.

$$x = \frac{\sum_i^n x_i I_i}{\sum_i^n I_i} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$y = \frac{\sum_i^n y_i I_i}{\sum_i^n I_i} \dots\dots\dots (3.2)$$

Para obtener las coordenadas (x,y) del lugar en que ocurrió el destello se utilizan las expresiones 3.1 y 3.2, donde  $x_i$  y  $y_i$  son las posiciones del i-ésimo fotomultiplicador e  $I_i$  señal digitalizada del pulso del i-ésimo fotomultiplicador.

### 3.4.3) Programa de Procesamiento de Datos

Para poder determinar la posición de un evento en la placa de plástico de MONDE es necesario procesar y analizar las señales provenientes del sistema de adquisición, para esto se desarrolló un programa escrito en C++ e interpretado por el paquete de análisis de datos CERN ROOT.

Este programa lee el archivo de datos generado por la computadora de adquisición y guarda los datos en estructuras llamadas "Branches", eso permite acceder a los datos de manera sencilla. Los branches son guardados en archivos con terminación .root, que puede ser leído por el paquete CERN ROOT en diversos sistemas operativos (Windows, Mac OS, Ubuntu, etc.).

El programa además de leer y guardar los datos, también implementa el algoritmo de ANGER y guarda las posiciones en Branches.

El programa también genera histogramas de los datos obtenidos para facilitar su análisis además de poder presentarlos de una manera visualmente agradable.

Para generar los histogramas es necesario generar una cuadrícula en la cual las posiciones sean acomodadas y poder visualizarlas.

En el caso de las posiciones en 2 dimensiones se utilizó una malla correspondiente a cuadricular la placa de plástico centellador de monde en cuadros de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ , mientras que en los mapas unidimensionales se utilizaron canales de 1 mm, pero se notó que esta cuadrícula era demasiado pequeña, estas condiciones se utilizaron en los datos analizados en las secciones 4.1, 4.2, 4.4, 4.6, pero se notó que esta cuadrícula era conveniente debido a las dimensiones de MONDE por lo cual en los datos obtenidos en la sección 4.8 se cuadrícularon los mapas en 2 dimensiones con cuadros de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  y para los mapas unidimensionales se utilizó 1 cm por canal.

El programa es capaz de controlar la cantidad de fotomultiplicadores involucrados en un evento lo cual permite discriminar señales asociadas a ruido electrónico o eventos indeseados,

imponiendo en el escaneo de datos discriminando señales en canales superiores a 4095 que corresponden a canales saturados o canales muy bajos que corresponden a ruido electrónico.

Para la creación de este programa se utilizó como base un programa escrito en C++ por el Maestro en Ciencias Físicas Francisco Favela, quien ayudó en todo momento con el desarrollo del mismo. Véase Anexo 1.

### **3.5) Radiación de Fondo V1**

El primer experimento realizado para caracterizar MONDE fue una toma de datos de radiación de fondo. La motivación de esto fue tener un espectro comparativo con los datos que se planeaban tomar en la sección 3.7, además de asegurar el correcto funcionamiento de todos los tubos fotomultiplicadores del arreglo. (Figura 3.7.1)

Los tubos fotomultiplicadores fueron suministrados con -1400 V, se conectaron las señales de los dinodos de los tubos fotomultiplicadores en los módulos amplificadores de tal manera que la señal fuera invertida, y pudiera ser registrada por el QDC Phillips 7166.

La señal de disparo se generó con un "or" entre la salida t de los módulos amplificadores por el módulo Caen Mod 405 3 Fold Logic Unit. Por último, para sincronizar el disparo lógico con las señales analógicas se utilizó el módulo Gate & Delay. En nuestro caso el retraso se fijó en 2  $\mu$ s. La toma de datos tuvo una duración de 2 hrs con una tasa de conteo de 250 a 300 cuentas por segundo. Fig. 3.7.1

### **3.7) Neutrones producidos por la Fuente de Am-Be**

Una vez que se realizó una toma de datos con radiación de fondo, se colocó una fuente de Am-Be dentro de un blindaje de parafina que también actuaba como colimador, de tal manera que el orificio del blindaje coincidiera con la línea horizontal central de MONDE. (Figura 3.7.1)

Se realizaron 3 mediciones correspondientes a diferentes posiciones sobre la línea horizontal central, la primera en el centro, la segunda 40 cm a la derecha del centro y por último 40 cm a la izquierda del centro. La configuración de los módulos electrónicos fue la misma que en el experimento de la sección 3.6, cada prueba tuvo una duración de aproximadamente 20 minutos, con una tasa de conteo variante de 300 a 500 eventos por segundo. Fig. 3.7.1

En los experimentos descritos en la sección 3.6 y 3.7, se pudo notar que las señales amplificadas de los tubos fotomultiplicadores no estaban empatadas, esto debido a la fuerte relación entre voltaje administrado y ganancia de cada tubo fotomultiplicador, si bien los tubos fotomultiplicadores son manufacturados de manera similar existen procesos que pueden hacer que su comportamiento sea diferente con el mismo voltaje administrado. Para solucionar esto en la sección 3.8 se caracterizan los tubos fotomultiplicadores.



Fig. 3.7.1) Montaje Experimental de los experimentos 3.6 y 3.7, en el experimento 3.7 se colocó una fuente de Am-Be en el blindaje.

### 3.8) Caracterización de Tubos Fotomultiplicadores

La ganancia de cada tubo fotomultiplicador depende fuertemente del voltaje que le es administrado. Para cualquier algoritmo de cálculo de la posición a partir de las amplitudes de las señales en los fotomultiplicadores, es esencial que la respuesta de cada uno de ellos sea idéntica, o al menos lo más parecida posible. Para empatar la ganancia (o amplificación) de cada tubo iniciamos por elegir uno arbitrariamente, al cual se le llamó: Detector estrella. Este tubo fotomultiplicador sirvió como punto referencia para aumentar o reducir las ganancias de los demás hasta empatarlas con éste.

Todos los fotomultiplicadores de MONDE fueron desmontados y agrupados con otros idénticos con los que se contaba en el inventario del Laboratorio de radiaciones, los cuales servirían como repuestos o reemplazos en caso de algún daño.

Para probar cada uno de los tubos fotomultiplicadores se hizo una estructura que los sostuviera dentro de una caja de herramientas, con dos finalidades: la primera que las pruebas de cada detector fueran consistentes y con condiciones repetibles respecto a la posición de la fuente de  $^{60}\text{Co}$  y la segunda para asegurar la menor perturbación en la señal debida a fuentes de luz externas, esta caja de herramientas también fungía como jaula de Faraday aislando los tubos fotomultiplicadores de radiaciones eléctricas extra, se tomó la precaución de hacer las pruebas en el cuarto oscuro del Laboratorio de Radiaciones. (Figura 3.8.2)

Las pruebas de los tubos fotomultiplicadores fueron llevadas a cabo usando una fuente de  $^{60}\text{Co}$ , se eligió esta fuente debido al conocimiento previo que se tenía del espectro que se debería de obtener en cada prueba. Un espectro típico de  $^{60}\text{Co}$  detectado por NaI se puede

observar en la figura 3.8.1.

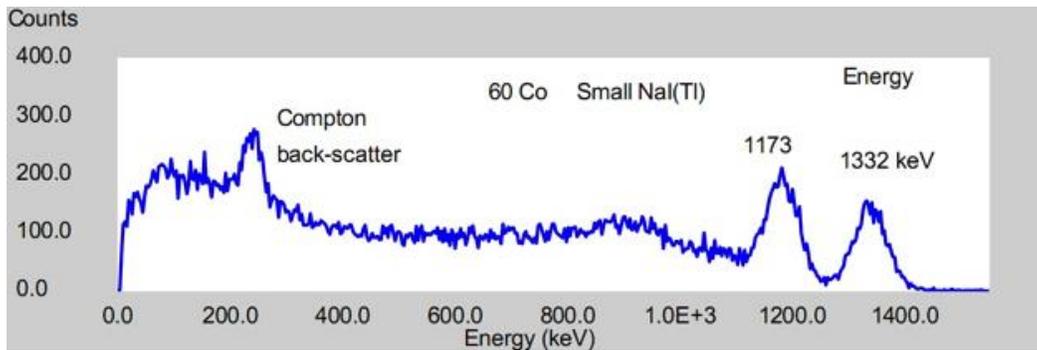


Fig. 3.8.1) Espectro Experimental de una fuente de  $^{60}\text{Co}$  interaccionando con un cristal NaI.[34]

Para que los tubos fotomultiplicadores sean capaces de detectar radiación ionizante es necesario acoplar un cristal de NaI el cual actúa como centellador.

La fuente de  $^{60}\text{Co}$  se colocó sobre la cara del cristal de NaI, esto para asegurar la mayor tasa de conteo y reducir tanto el tiempo de adquisición de datos como la importancia relativa de la radiación de fondo.



Fig. 3.8.2) Derecha: tubo fotomultiplicador con el cristal NaI dentro de la caja de herramientas. Izquierda: Caja de herramientas dentro del cuarto oscuro del Laboratorio de Radiaciones, esta caja funge también como una caja de Faraday aislando los fotomultiplicadores de radiaciones que pudieran afectar su funcionamiento.

Los tubos fotomultiplicadores tienen un intervalo de voltajes de funcionamiento entre -2000 a -900 V), para el detector estrella se eligió -1400 V.

Antes de cada toma de datos, se observaba la señal de salida en un osciloscopio. (Figura 3.8.3)

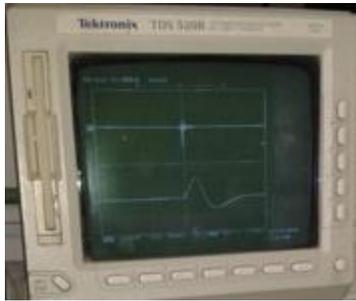


Fig. 3.8.3) Señal del Dinodo (Señal de abajo) observada en un osciloscopio indicando que el tubo fotomultiplicador funciona.

Para adquirir datos es necesario contar con un ADC, aquí utilizamos un SPECTECH Universal Computer Spectrometer UCS30 (Figura 3.8.4) junto con el software USX USB. Se utilizó la señal de salida positiva (Dinodo) del tubo fotomultiplicador y se configuró el UCS30 en 2048 canales con una ganancia de 4x.

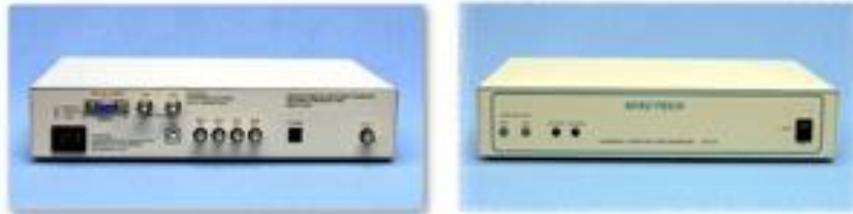


Fig. 3.8.4) Imágenes frontales y traseras del UCS 30.[35]

Para suministrar el alto voltaje se utilizó la misma fuente de alto voltaje TENNELEC C952 para todos los tubos que se caracterizaron uno por uno.

En este trabajo fueron caracterizados 18 tubos fotomultiplicador.

Para cada fotomultiplicador, se adquirió un espectro de amplitud de pulso durante 300 segundos, que se comparaba con el obtenido para el detector de referencia (Estrella). En esta comparación, la posición (número de canal) de los fotopicos correspondientes a los decaimientos del  $^{60}\text{Co}$  constituyeron una referencia esencial. (Figura 3.8.7)

En las pruebas se suministró un voltaje de partida de -1400V se tomaron datos durante 50s y se analizaba el espectro. Si los fotopicos del  $^{60}\text{Co}$  se encontraban en canales menores respecto al espectro del detector estrella, el voltaje era incrementado, análogamente si los fotopicos se encontraban en canales más altos que los del detector estrella el voltaje era disminuido. Este proceso era repetido para cada tubo fotomultiplicador hasta encontrar un espectro coincidente con el espectro del detector estrella. (Figura 3.8.6)



Fig. 3.8.6) Montaje del sistema de adquisición de datos y fuente de alto voltaje para las pruebas de los tubos fotomultiplicadores.

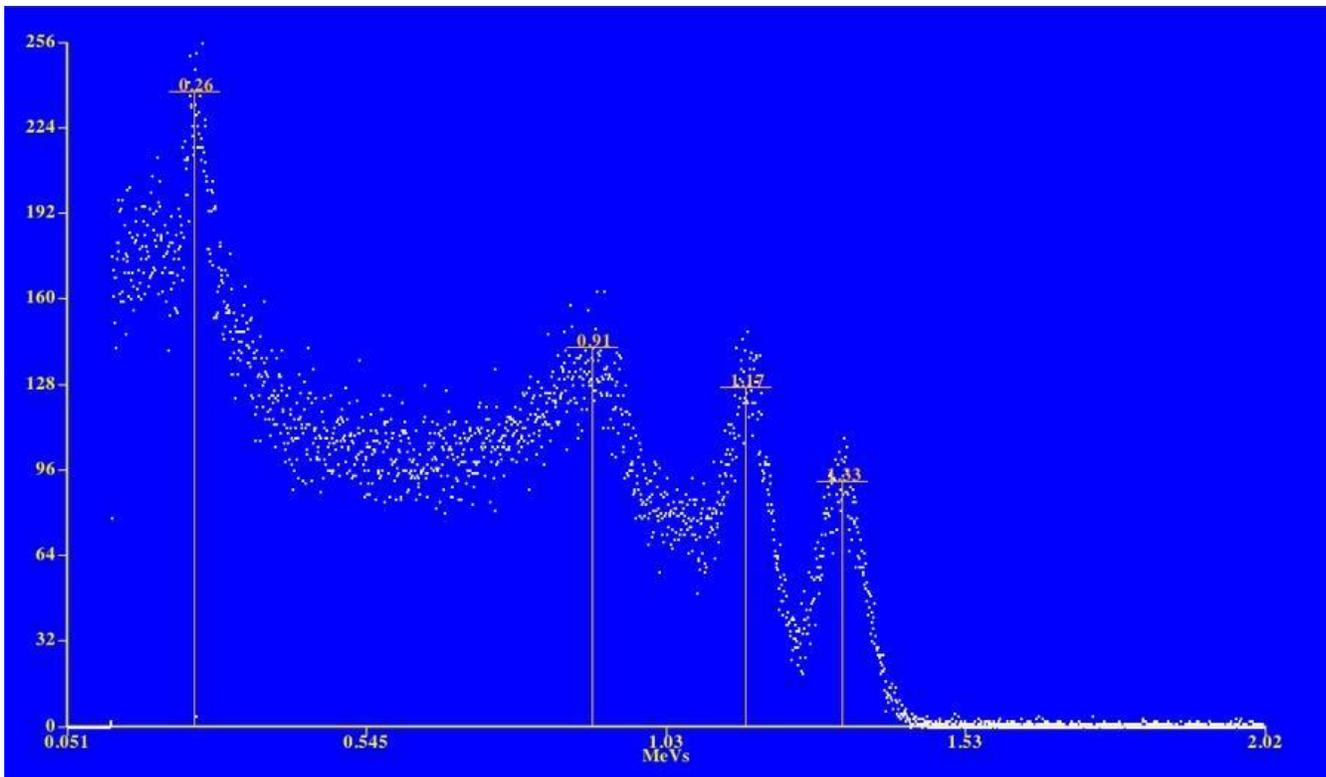


Fig. 3.8.7) Espectro obtenido por el detector Estrella, En el eje horizontal se tiene Energía, en el vertical, cuentas por canal.

Una vez que se encontraba que los fotopicos coincidían dentro de un intervalo razonable, se realizaba una toma de datos de 300s.

Una vez caracterizados los tubos fotomultiplicadores fueron montados de nuevo en MONDE.

### 3.9) Radiación de Fondo V2

Con los tubos fotomultiplicadores ya montados, se realizó una toma de datos de radiación de fondo durante 24 horas, con la intención de tener un espectro comparativo con los datos que se planeaban obtener en la sección 3.10.

La tasa de conteo en esta serie de datos fue de 200 a 300 cuentas por segundo, para este experimento se tomó la señal “t” de los amplificadores y se hizo pasar por un discriminador de fracción constante con offset de 50 mV, después se pasó por el módulo Caen Mod 405 3 Fold Logic Unit y por último al módulo Gate & Delay, el tiempo del intervalo de integración fue de 1  $\mu$ s.

### 3.10) MONDE & SUGAR

SUGAR (**S**Upersonic **G**as jet **tA**Rget) es un dispositivo experimental que hace uso de un sistema de vacío diferencial para producir un flujo laminar supersónico de diversos gases para poder usar blancos gaseosos en experimentos de Física nuclear [36][37].

En experimento que vamos a describir, se bombardeó un blanco supersónico de Nitrógeno con haces de Deuterio a diversas energías para inducir la reacción nuclear  $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ . Los neutrones producidos serían detectados con MONDE mientras los núcleos residuales de  $^{15}\text{O}$  asociados eran detectados en un arreglo telescópico de detectores montados dentro de la cámara de reacción.

MONDE se posicionó a 2.17 m de distancia del punto en el que ocurren las reacciones nucleares con la finalidad de cubrir un ángulo de aproximadamente  $\pm 40^\circ$  en el plano horizontal, esto con la intención de detectar los neutrones producidos en la reacción nuclear en cada energía sin tener que mover el detector MONDE (Figura 3.10.1). Para este experimento el disparo electrónico para la adquisición de datos se tomó del detector de transmisión ( $\Delta E$ ) en el arreglo telescópico de silicio para el  $^{15}\text{O}$  que se encontraba a  $35^\circ$  dentro de la cámara, los experimentos se realizaron en el intervalo de energías de 2.20 MeV a 3.36 MeV. Dado lo peligroso de permanecer dentro del laboratorio durante el experimento fue imposible determinar si la señal de disparo externo estaba sincronizada con las señales provenientes de MONDE. En la figura 3.10.2 se puede ver una fotografía del montaje de instrumentos para este experimento

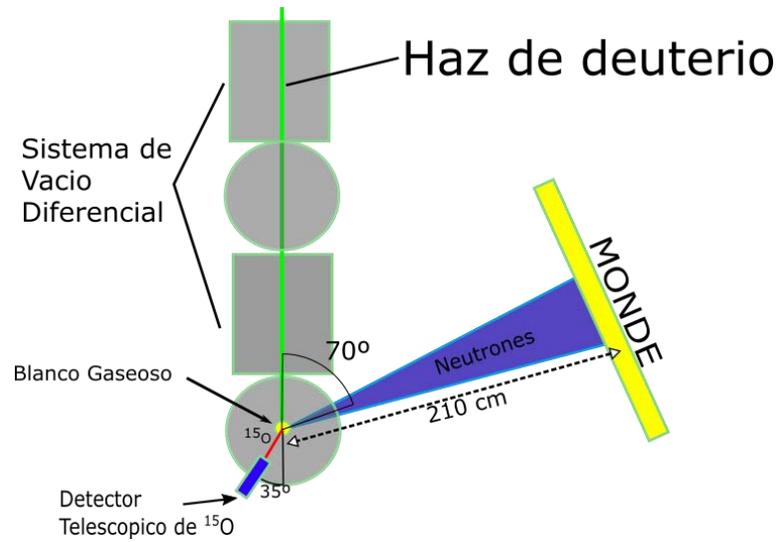


Fig. 3.10.1) Esquema del arreglo experimental con SUGAR y MONDE



Fig. 3.10.2) Montaje Experimental de las secciones 3.9 y 3.10. SUGAR en la izquierda y MONDE en la derecha.

### 3.11) Radiación de Fondo V3

Los datos obtenidos en la sección 3.10 no permitieron determinar si los neutrones detectados en MONDE estaban en coincidencia con las partículas detectadas en el arreglo telescópico lo cual fue atribuido a la elección de la señal de disparo que no estaba en sincronía, lo cual llevó al reconsiderar la estrategia tomar datos con MONDE cuando el disparo electrónico se toma de un detector externo.

Las señales de los dinodos de los tubos fotomultiplicadores fueron amplificadas por los módulos MDS-8, con la diferencia que esta vez la señal no era invertida debido que los PADC funcionan con señales positivas. La amplificación fue de 20 veces con un shapping time de 1  $\mu$ s.

Al cambiar el módulo de conversión analógico-digital fue requerido tomar un nuevo espectro de fondo, con dos intenciones, la primera asegurar el buen funcionamiento del módulo PADC y tener un espectro comparativo con los experimentos planteados en las secciones 3.12 y 3.13. Se tomaron datos de radiación de fondo durante aproximadamente 2 horas con una tasa de conteo de 150 a 200 cuentas por segundo. En la figura 3.11.1 se muestra una fotografía del montaje experimental.



Fig. 3.11.1) MONDE con la nueva tarjeta PADC realizando toma de datos de radiación de fondo.

### 3.12) MONDE & NaI V1

Para determinar en qué condiciones es posible tener partículas detectadas en coincidencia con un detector externo y MONDE, se planteó un experimento donde las partículas en coincidencia eran las producidas en los decaimientos de un estado excitado del  $^{60}\text{Ni}$  al estado base. Ese estado excitado es poblado por el decaimiento  $\beta$  del  $^{60}\text{Co}$ .

El dispositivo experimental consistió en poner una fuente de  $^{60}\text{Co}$  entre MONDE y un

detector de NaI de 3"x3" (Figura 3.12.1). Se eligieron 3 posiciones todas en la línea horizontal que divide a MONDE a la mitad, las posiciones fueron: centro, 40 cm a la izquierda del centro y 40 cm a la derecha del centro. La toma de datos en los tres casos fue de 40 min. Con una tasa de conteo de 250 a 300 cuentas por segundo. Para sostener el detector externo se construyó un andamio capaz de colocar el detector en cualquier posición perpendicular a la placa de MONDE. (Figura 3.12.2)

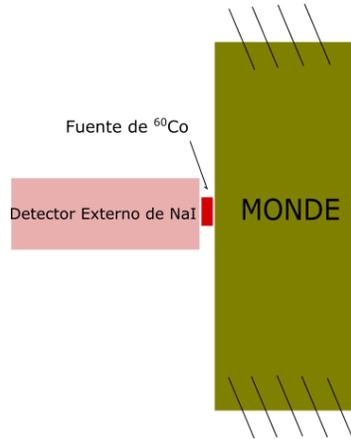


Fig. 3.12.1) Esquema del posicionamiento del detector externo, la fuente de  $^{60}\text{Co}$  y la placa de MONDE.



Fig. 3.12.2) MONDE con el andén que sostiene al detector externo en la posición de 40 cm a la izquierda del centro.

### 3.13) Radiación de Fondo y MONDE & NaI V2

No fue posible determinar la posición de los rayos gamma producidos por la muestra de  $^{60}\text{Co}$  en el experimento descrito en la sección 3.12, esto fue debido a que el voltaje suministrado a los tubos fotomultiplicadores no era suficiente para generar señales con la información de los eventos lumínicos producidos en la placa centelladora de MONDE por los rayos gamma generados por la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

Para solucionar esto se colocó la fuente de  $^{60}\text{Co}$  en la placa de MONDE en las cercanías del detector numerado 15, se observó la tasa de conteo en el programa de adquisición, se subió el voltaje en 10% y no se observaron cambios drásticos en la tasa de conteo, se subió en un 25% del voltaje original y se observó que la tasa de conteo se duplicó, al mover la fuente de  $^{60}\text{Co}$  sobre la placa alejándolo del detector 15, se notó que la tasa de conteo disminuyó, lo cual indicó que las señales que estaban siendo procesadas correspondían a los rayos gammas emitidos por la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

Todos los detectores sufrieron un incremento del 25% en el voltaje suministrado.

Se tomaron datos con la fuente en 4 posiciones, en las cercanías de los detectores 2 y 15, y dos posiciones más correspondientes a desplazamientos a la derecha y a la izquierda de 40 cm aproximadamente sobre la línea horizontal que divide la placa de MONDE en dos.

Se tomaron datos de fondo también al terminar estos experimentos.

En todos los casos la toma de datos fue de aproximadamente 30 minutos, se notó que cuando la fuente estaba cerca de los tubos fotomultiplicadores la tasa de conteo era de 1700 a 2000 cuentas por segundo, cuando la fuente estaba en las posiciones izquierda y derecha la tasa de conteo variaba de 1600 a 1900 y la tasa de conteo cuando sólo se tenía radiación cósmica era de 700 a 900 cuentas por segundo, indicando fuertemente que la fuente que los rayos gamma emitidos por la fuente de  $^{60}\text{Co}$  eran detectados más eficientemente.

El detector externo de NaI fue montado de la misma manera que en la sección 3.12.

## 4) Resultados y Análisis

Para poder visualizar e interpretar los datos obtenidos se utilizó el programa mencionado en la sección 3.4.3, para generar los mapas que se presentan en esta sección. Los mapas de las secciones 4.1, 4.2, 4.4, 4.6, 4.7 se encuentran en el apéndice 1.

### 4.1) Radiación de Fondo V1

Los mapas generados en esta sección, sirvieron como punto comparativo para los resultados obtenidos en la sección 3.7.

Las posiciones generadas tuvieron como condición que por lo menos 4 tubos fotomultiplicadores estuvieran involucrados.

No es posible apreciar una estructura definida o simétrica esto es debido a que los fotomultiplicadores no estaban caracterizados. Esto se corrige en las secciones a continuación.

### 4.2) Neutrones producidos por Fuente de Am-Be

En estos resultados se impuso como condición que 4 o más fotomultiplicadores estuvieran involucrados en el cálculo de la posición, es apreciable que no se pudo determinar la posición de la fuente de neutrones, esto se le atribuye a que los fotomultiplicadores presentaban ganancias diferentes, es decir que para un evento lumínico de la misma intensidad, diferentes fotomultiplicadores generaban señales diferentes. Para solucionar esto se planteó caracterizar individualmente los fotomultiplicadores, estos datos se presentan a continuación en la sección 4.3.

Otra cosa que es notable es que hay menos eventos en estos resultados a comparación de los resultados de la sección 4.1, esto es debido a que la toma de datos tuvo una duración muy corta a comparación de la toma de datos de radiación de fondo.

### 4.3) Caracterización Tubos Fotomultiplicadores

El programa de adquisición UCS30 tiene una opción que permite encontrar picos en espectros obtenidos, esta característica se utilizó para encontrar los picos correspondientes a las dos energías de emisión del  $^{60}\text{Co}$  y poder comparar los espectros de una manera cualitativa

Detector	Voltaje(-Volts)	Corriente( $\mu\text{A}$ )	Primer Pico(1.17MeV)	Segundo Pico(1.33MeV)	Diferencia con el D-ESTRELLA(1.17)	Diferencia con el D-ESTRELLA(1.33MeV)
4	1400	534	1159	1322	0	0
1	1295	489	1158	1322	1	0
5	1163	452	1167	1332	-8	-10
6	1165	439	1155	1309	4	13
8	1227	463	1167	1327	-8	-5
9	1201	459	1168	1331	-9	-9
10	1276	481	1173	1326	-14	-4
11	1323	534	1159	1332	0	-10
12	1155	436	1164	1325	-5	-3
13	1363	514	1165	1322	-6	0
14	1248	475	1162	1320	-3	2
16	1187	447	1165	1318	-6	4
17	1218	501	1168	1335	-9	-13
20	1080	405	1159	1326	0	-4
23	1167	516	1168	1328	-9	-6
29	1113	452	1168	1331	-9	-9
10	1276	481	1159	1322	0	0

Tabla 1. Tabla comparativa entre los foto-picos encontrados por el UCS 30 después de la optimización de los tubos fotomultiplicadores.

Se encontró que la mayor diferencia entre foto pico y foto pico de cada tubo fotomultiplicador en comparación con el detector estrella es de 18 canales, esta diferencia es minúscula comparándola con los 2048 canales con los que se hicieron estas pruebas, haciendo que se pueda asegurar que los detectores trabajan de una manera casi idéntica.

Es apreciable en la figura 4.3.1 que las ganancias de los tubos fotomultiplicadores está correctamente empatada, sin embargo se nota una diferencia entre el número de cuentas, esto debido a que la eficiencia de cada fotomultiplicador es diferente debido a que los tubos fotomultiplicadores son extremadamente sensibles a cambios en la presión dentro del tubo, cambios de temperatura, golpes, movimientos súbitos, etc.

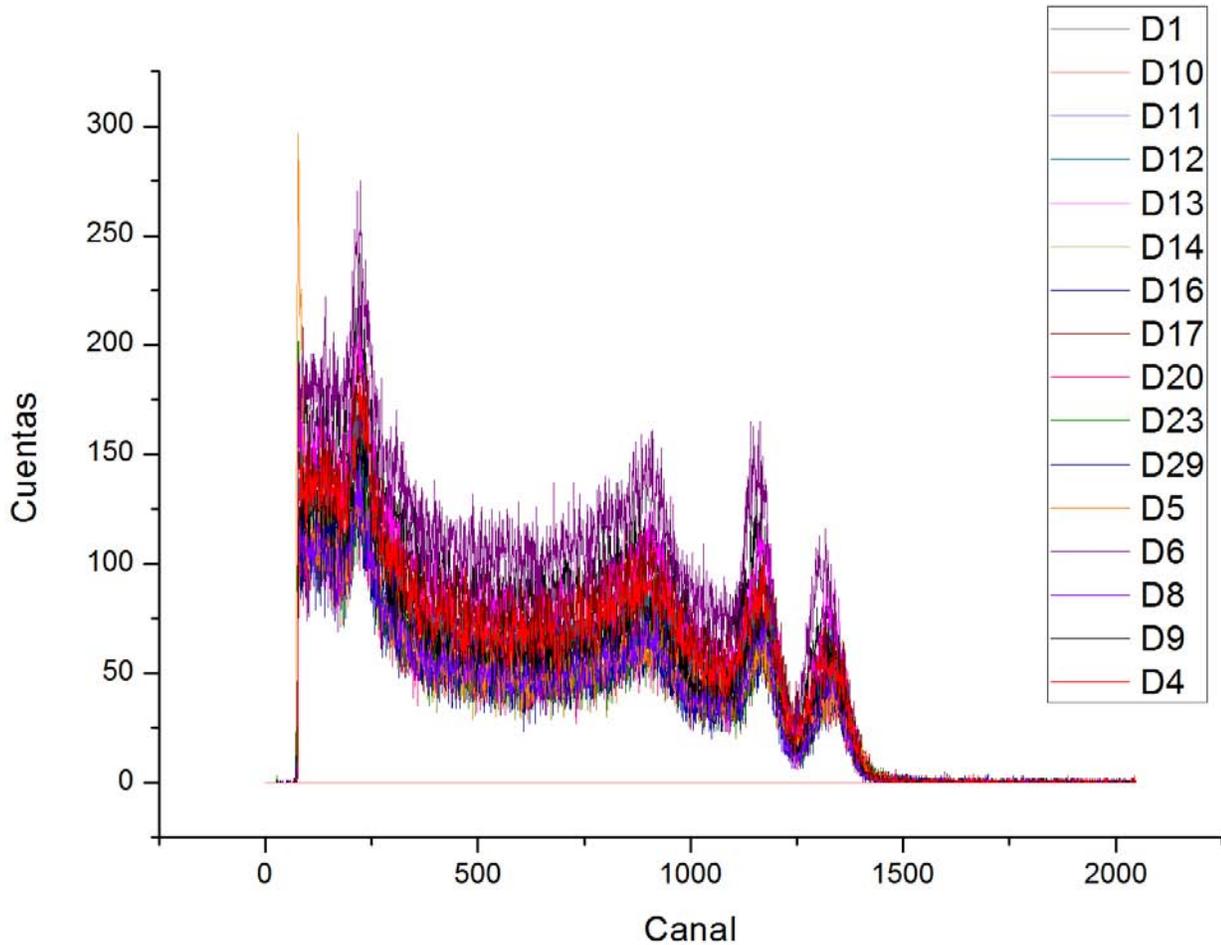


Fig. 4.3.1) Espectros de los TFM sobrepuestos.

## 4.4) Radiación de Fondo V2

Una vez que los tubos fotomultiplicadores fueron caracterizados se colocaron de nuevo alrededor de la placa centelladora de MONDE y se tomaron datos de radiación de fondo, para tener un punto de comparación entre la radiación de fondo y la radiación que sería producida en los experimentos de la sección 3.10.

Es notable que la estructura de los mapas bidimensional y unidimensionales, tiene estructuras más definidas y simétricas, esto es debido a que los fotomultiplicadores funcionan de manera idéntica, en estos resultados se impuso como condición que cuatro o más tubos fotomultiplicadores estuvieran involucrados en el cálculo de cada posición.

## 4.5) MONDE & SUGAR

Debido al riesgo radiológico presente en estos experimentos fue imposible determinar si la señal de disparo para la adquisición de datos y las señales provenientes de los fotomultiplicadores tuvieron algún tipo de sincronía, esto hizo imposible tener una certeza de que los eventos registrados correspondían a los neutrones producidos.

Las posiciones de estos eventos no corresponden a neutrones producidos en la reacción que se pretendía estudiar, haciendo que no se pueda asegurar la respetabilidad del experimento bajo estas condiciones.

Para determinar si era posible usar a MONDE en experimentos donde se desee estudiar partículas correlacionadas se plantearon los experimentos descritos en las secciones 3.12 y 3.13.

## 4.6) Radiación de Fondo V3

Una mejora importante al sistema fue la adquisición de módulos PADC. Esto presentó una ventaja técnica para el sistema de adquisición debido a la naturaleza de conversión de datos de un PADC.

De los mapas es posible notar que en el eje X hay una estructura simétrica respecto a la mitad de detector exceptuando un gran número de cuentas alrededor de la posición correspondiente a 130 cm, esto es debido a los módulos amplificadores, se puede notar que en todos los experimentos se tiene este mismo comportamiento, estos amplificadores se configuraron de tal manera que los potenciómetros que controlan la amplificación estuvieran en la misma posición, se tiene en mente corregir esto como trabajo a futuro.

## 4.7) Monde & NaI V1

Para determinar si MONDE pudiera ser utilizado en experimentos en donde sea de interés estudiar partículas correlacionadas el Físico Rafael Policronidades Rueda propuso el experimento de la sección 3.12, donde se utiliza el hecho que una fuente de  $^{60}\text{Co}$  produce rayos gamma en correlación angular.

Los datos obtenidos por el detector externo fueron adquiridos usando la señal de disparo generada por MONDE, es apreciable en las tres imágenes en el anexo A1.5 que el espectro obtenido presenta similitudes en los tres casos, esto indica que las partículas que están disparado el sistema de adquisición en MONDE están en coincidencia con las partículas incidentes en el detector externo.

Es posible notar que los espectros no sólo tienen la misma estructura sino que también los foto picos asociados al  $^{60}\text{Co}$  coinciden respecto al canal en cada histograma.

Para el cálculo de las posiciones de estos experimentos se impusieron dos condiciones, que el cálculo de la posición involucrara cuatro o más fotomultiplicadores y que fueran eventos en correlación con cualquiera de las dos fotos picos en los espectros correspondientes en cada caso. Se representa la posición de la fuente de  $^{60}\text{Co}$  con un punto negro en cada mapa.

Es posible notar que la cantidad de eventos en estos tres casos es diminuta, esto llevo a plantear que los fotomultiplicadores no estaban registrando las señales de manera eficiente, es decir que las señales provenientes de MONDE eran muy poco intensas, confundiéndolas con ruido estas señales eran discriminadas en su mayoría, debido a que se tenían dos condiciones presentes en el programa de análisis de datos.

## 4.8) Radiación de Fondo y Monde & NaI V2

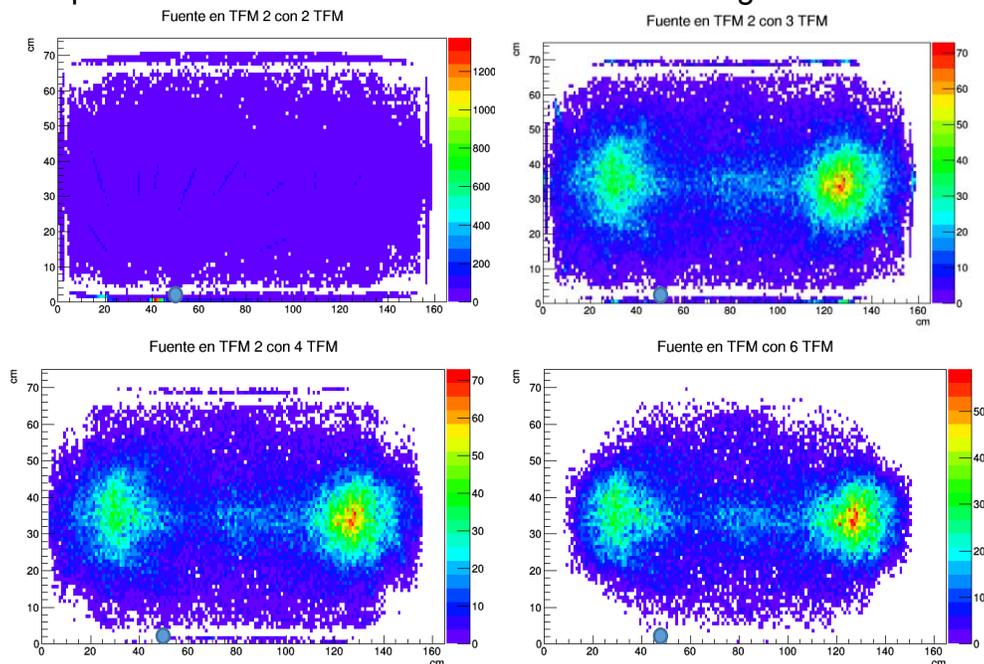
Una vez que los fotomultiplicadores fueron suministrados con el nuevo voltaje, se tomaron una serie de datos y se analizaron con el programa descrito en la sección 3.4.3.

Como parte de las mejoras implementadas al sistema se planteó buscar la cantidad de fotomultiplicadores involucrados en el cálculo de la posición de un evento.

Para este propósito se tomaron los datos tomados en la sección 3.13 y se analizaron en el programa descrito en la sección 3.4.2, para determinar la cantidad ideal de fotomultiplicadores involucrados en el cálculo de la posición de un evento se utilizaron dos tomas de datos, cuando la fuente de  $^{60}\text{Co}$  estaba en las cercanías del fotomultiplicador 2 y en las cercanías del fotomultiplicador 15.

Se ejecutó el programa 5 veces para cada toma de datos, cambiando el número mínimo de fotomultiplicadores involucrados en cada evento, en cada ejecución.

La fuente está representada como un círculo azulado en las imágenes a continuación.



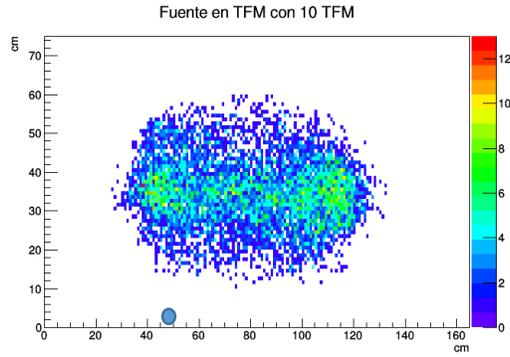
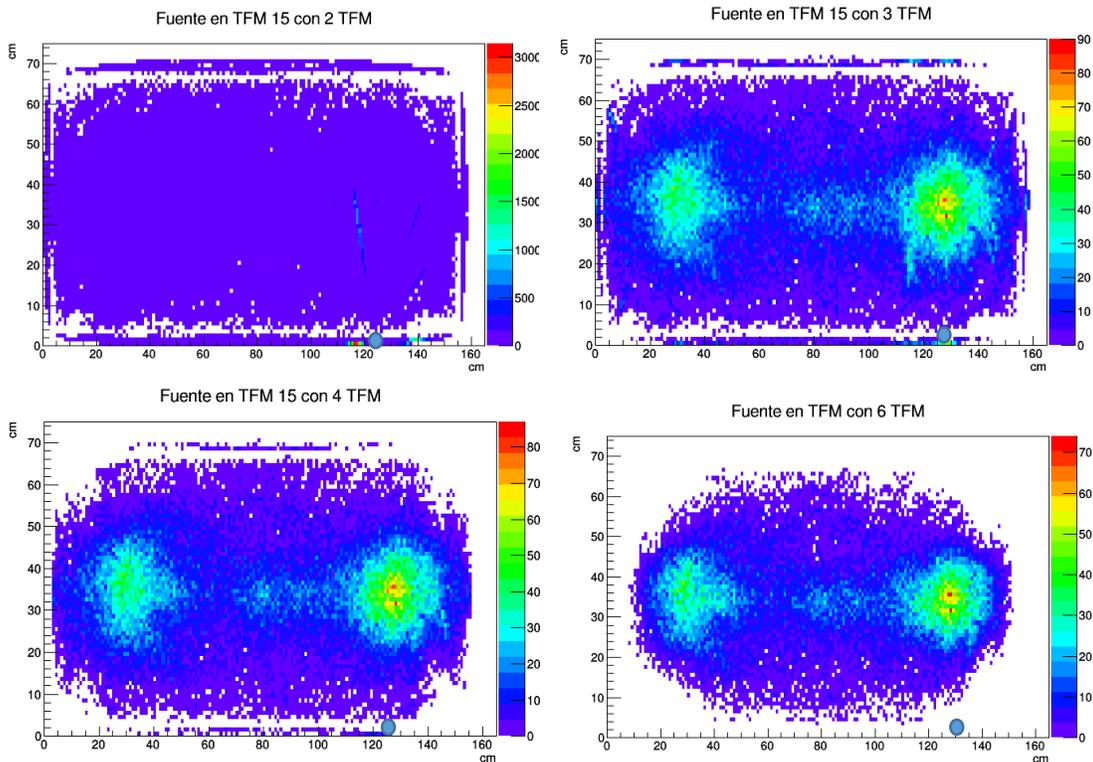


Fig. 4.7.1) Mapas bidimensionales de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER usando diferentes condiciones de número mínimo de tubos fotomultiplicadores. Con la fuente de  $^{60}\text{Co}$  en las cercanías del tubo fotomultiplicador 2.

Se puede notar que entre más fotomultiplicadores estén involucrados en el cálculo de la posición, el mapa formado se compacta hacia el centro, este fenómeno es debido a las limitaciones del algoritmo ANGER, podemos notar también que cuando se utilizan dos o más fotomultiplicadores la posición de la fuente es representada en el lugar que fue colocada.

Para corroborar la reproductibilidad de estos resultados se colocó la fuente en las cercanías del detector 15 y se ejecutó el programa de análisis de datos en las mismas condiciones anteriores.



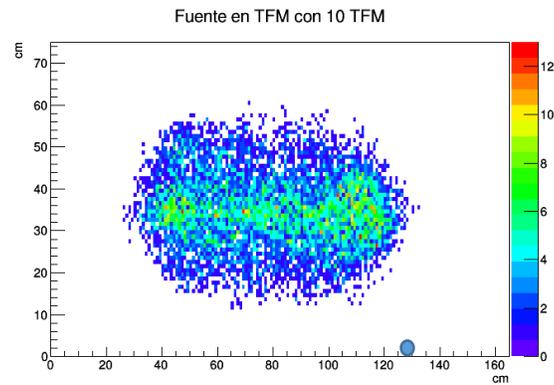


Fig. 4.7.2) Mapas bidimensionales de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER usando diferentes condiciones de número mínimo de tubos fotomultiplicadores. Con la fuente de  $^{60}\text{Co}$  en las cercanías del tubo fotomultiplicador 15.

En las figuras 4.7.1 y 4.7.2 Se puede notar el mismo comportamiento, notando que el patrón se compacta en el centro a medida que la cantidad de fotomultiplicadores involucrados en el cálculo de la posición aumenta.

Para tener un punto de comparación con los resultados con los datos fuente de  $^{60}\text{Co}$  y la radiación de fondo, fue necesario realizar una toma de datos de radiación de fondo. Estos datos fueron procesados por el programa de análisis de datos con la condición de que por lo menos dos tubos fotomultiplicadores estuvieran involucrados en el cálculo de la posición.

## Mapa XY de Radiacion de Fondo

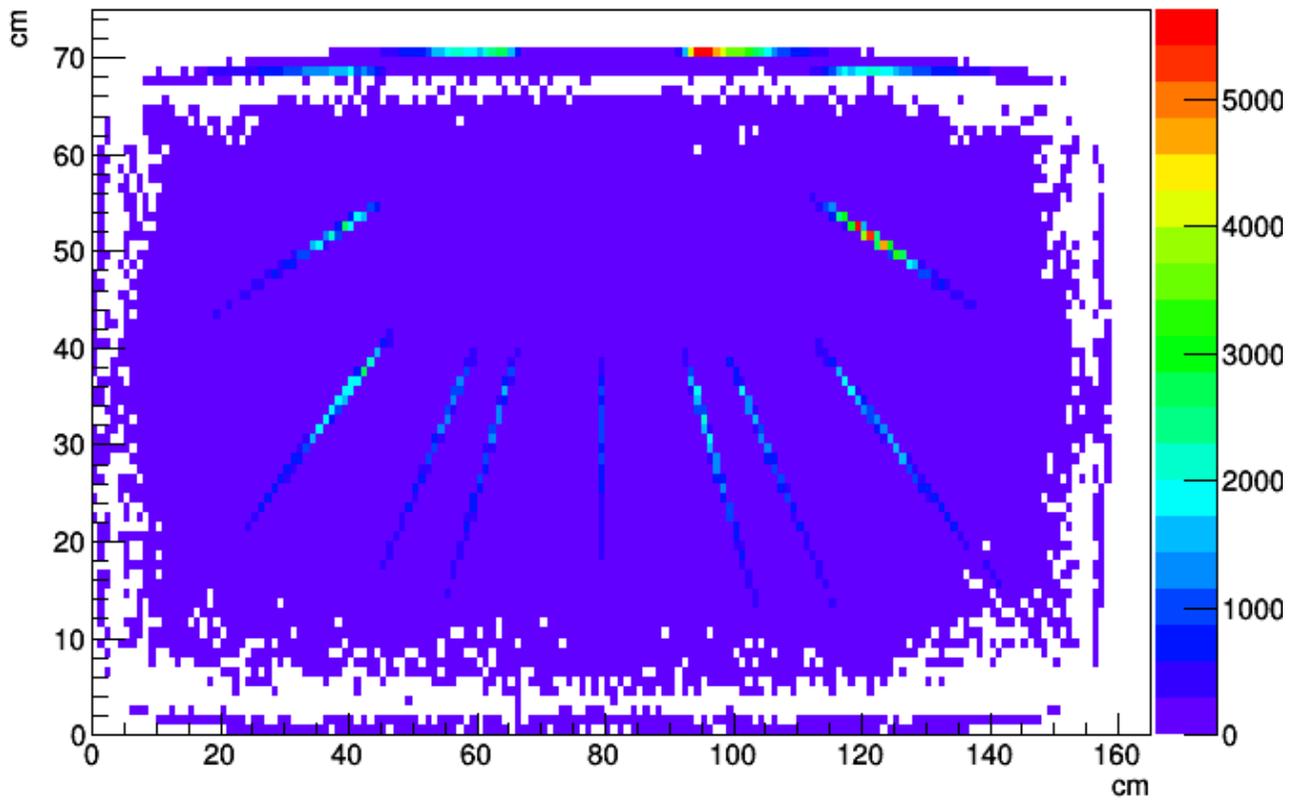


Fig. 4.7.3) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER, usando por lo menos dos tubos fotomultiplicadores para cada evento

En las figuras 4.7.3 y 4.7.4 se puede notar que hay líneas donde hay acumulaciones de eventos, en la parte superior derecha del mapa se puede apreciar este fenómeno, esto es debido a que los canales de los módulos amplificadores correspondientes a esas posiciones amplifican las señales con mayor magnitud que los demás, esto hace que se presenten este tipo de fenómenos.

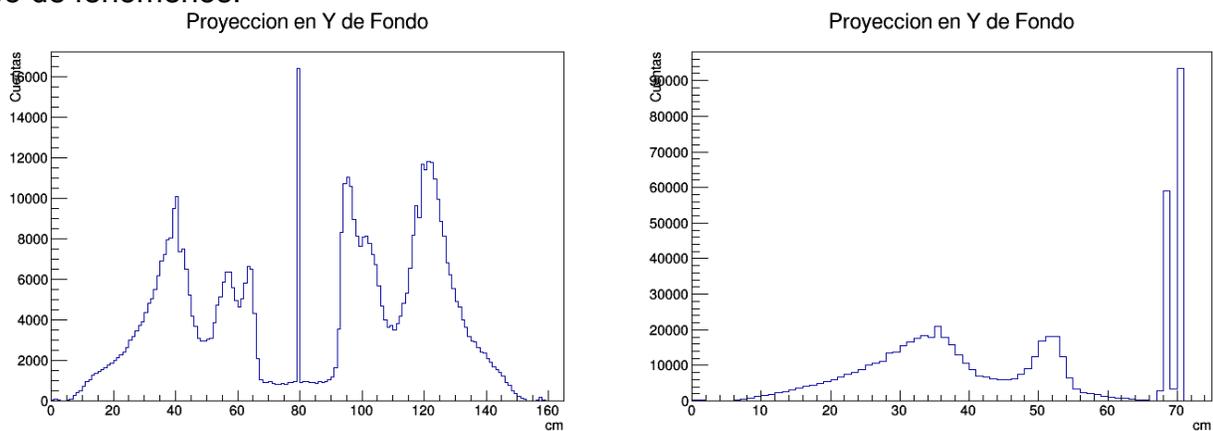


Fig. 4.7.4) Proyecciones en los ejes X y Y del mapa bidimensional de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER, usando por lo menos dos tubos fotomultiplicadores para cada evento

En la proyección X del mapa de posiciones de datos de radiación de fondo es apreciable una estructura que pareciera tener simetría respecto a la posición de 80 cm, esto coincide con el trabajo de simulación de datos de fondo de Antonio Ramos [38].

En la proyección en Y es posible apreciar un cúmulo considerable de cuentas y comparándolo con el mapa bidimensional coincide con el tubo fotomultiplicador 10, este fenómeno puede ser atribuido al problema antes mencionado de las amplificaciones más grandes correspondientes a los tubos fotomultiplicadores del 9 al 16.

Se analizaron los datos de la sección 3.13, se presentan a continuación los mapas bidimensionales, proyecciones en el eje X y en el eje Y, además de los espectros obtenidos en el detector de NaI, después se presentan los mapas de posiciones en MONDE en correlación a los eventos asociados a los fotopicos.

La posición de la fuente es representada con un círculo azul.

El orden de presentación es:

Fuente de  $^{60}\text{Co}$  en las cercanías del tubo fotomultiplicador 2 (Figuras 7.4.5, 7.4.6, 7.4.7).

Fuente de  $^{60}\text{Co}$  en las cercanías del tubo fotomultiplicador 15 (Figuras 7.4.8, 7.4.9, 7.4.10).

Fuente de  $^{60}\text{Co}$  desplazado a 40 cm a la derecha del centro (Figuras 7.4.11, 7.4.12, 7.4.13).

Fuente de  $^{60}\text{Co}$  desplazado a 40 cm a la izquierda del centro (Figuras 7.4.14, 7.4.15, 7.4.16).

## Fuente en TFM 2

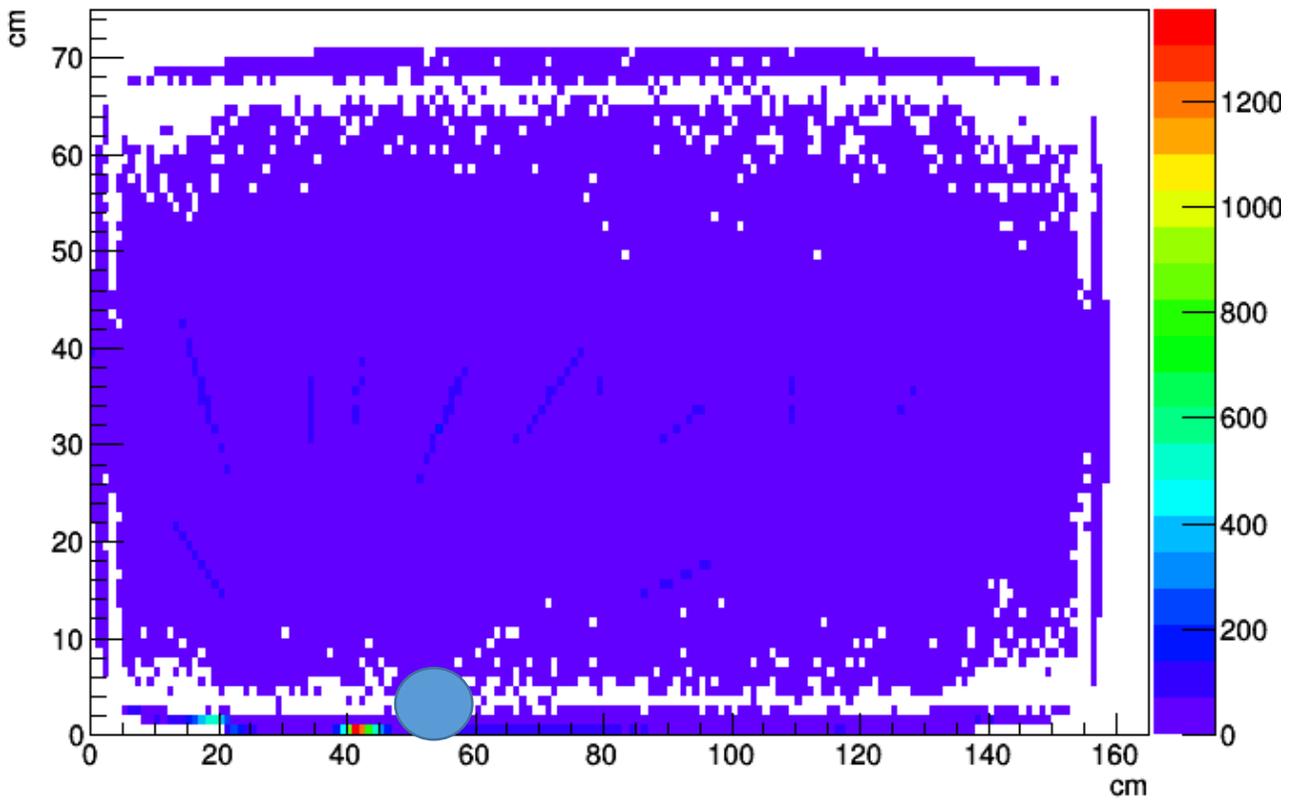


Fig. 7.4.5) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER cuando la fuente estaba en las cercanías del tubo fotomultiplicador 2.

## NaI en fuente2

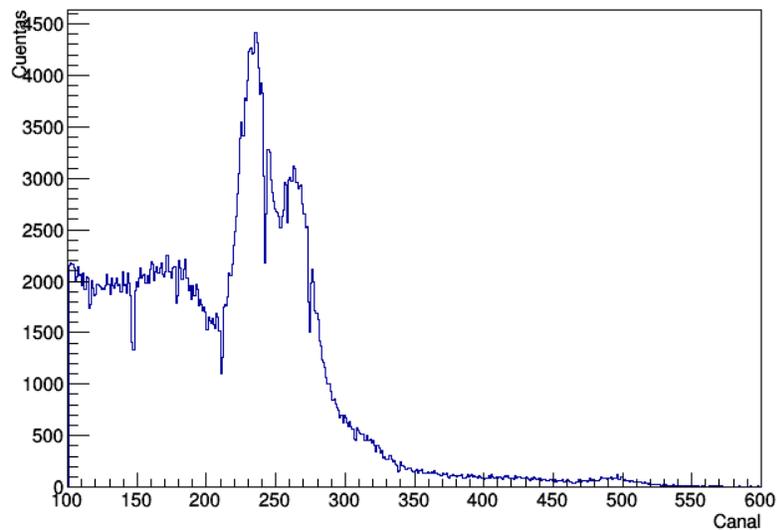


Fig. 7.4.6) Espectro de energías tomado por el detector de NaI externo cuando la fuente se encontraba en las cercanías del tubo fotomultiplicador 2

## Fuente en TFM 2 Picos

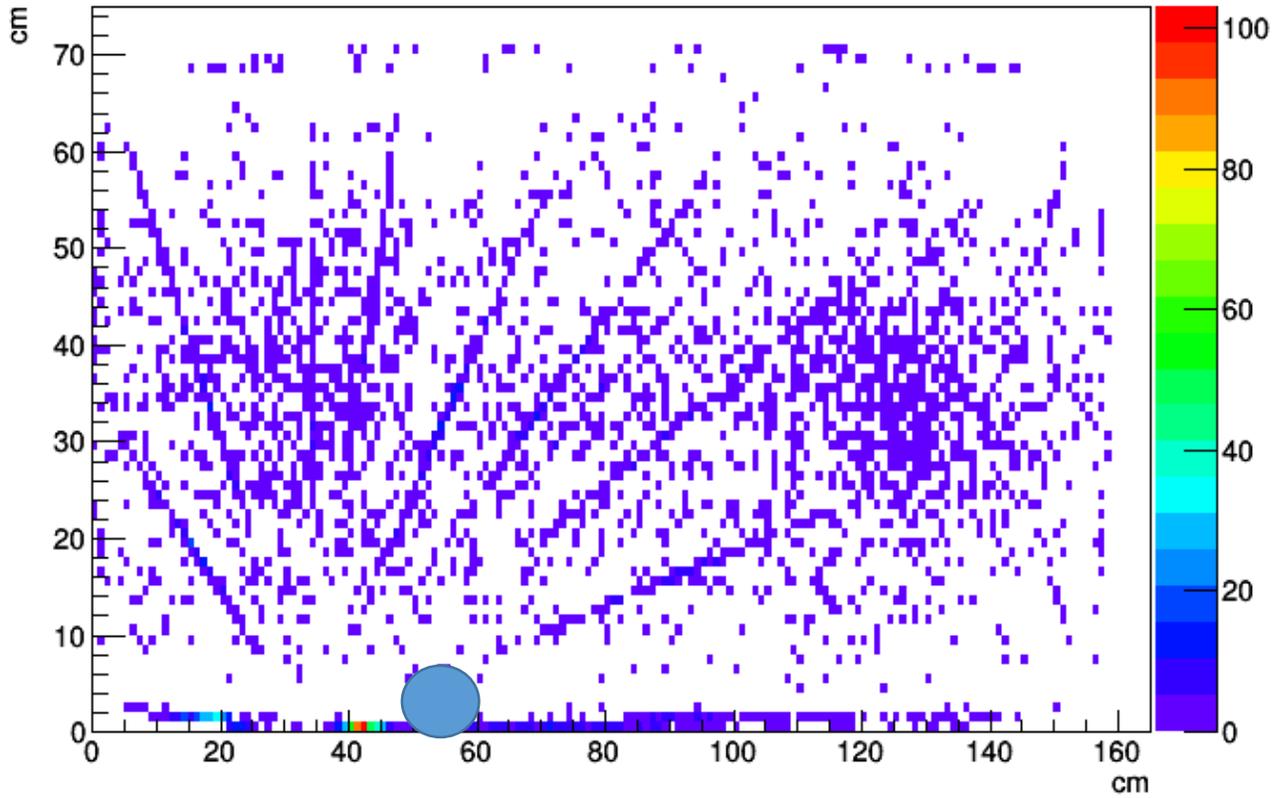


Fig. 7.4.7) Eventos en la placa de MONDE correlacionados con los foto picos vistos en el detector externo de NaI, es posible determinar la posición aproximada de la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

## Fuente en TFM 15

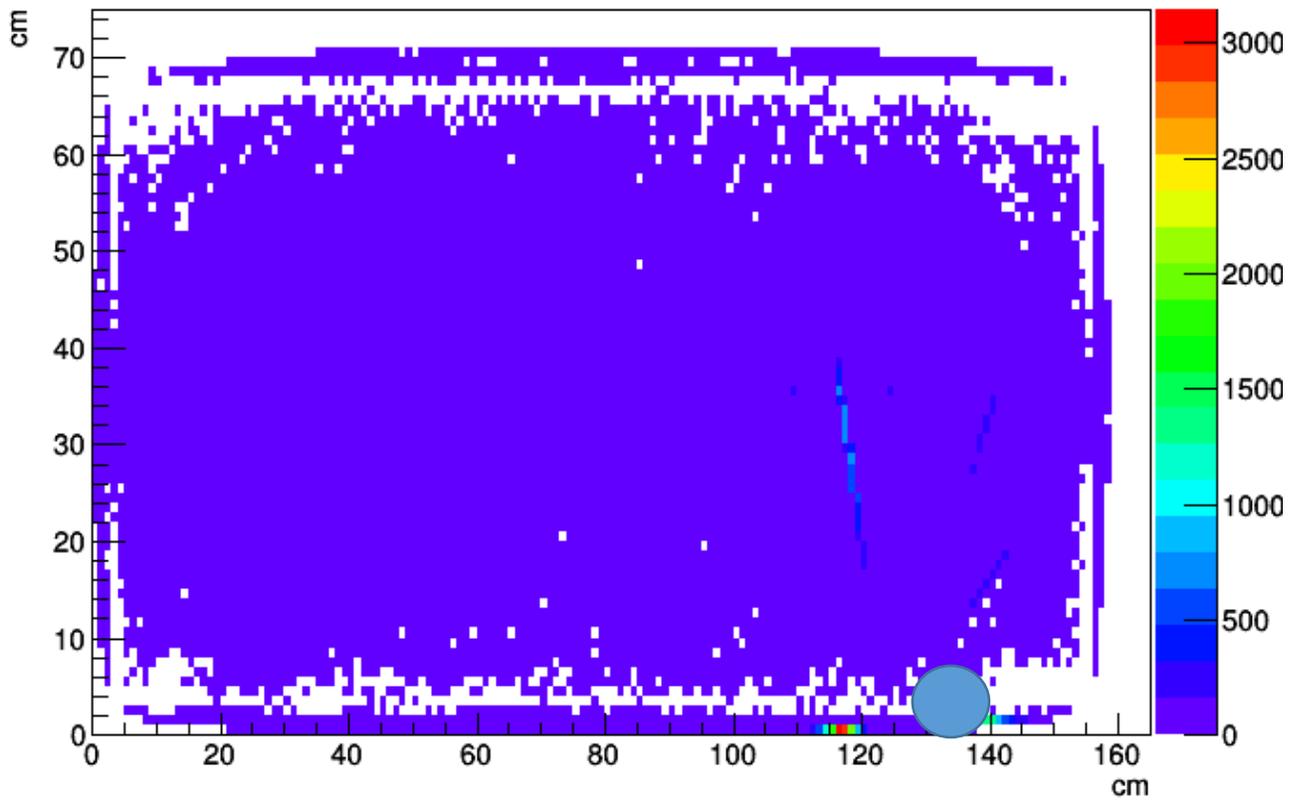


Fig. 7.4.8) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER cuando la fuente estaba en las cercanías del tubo fotomultiplicador 15.

## NaI en fuente15

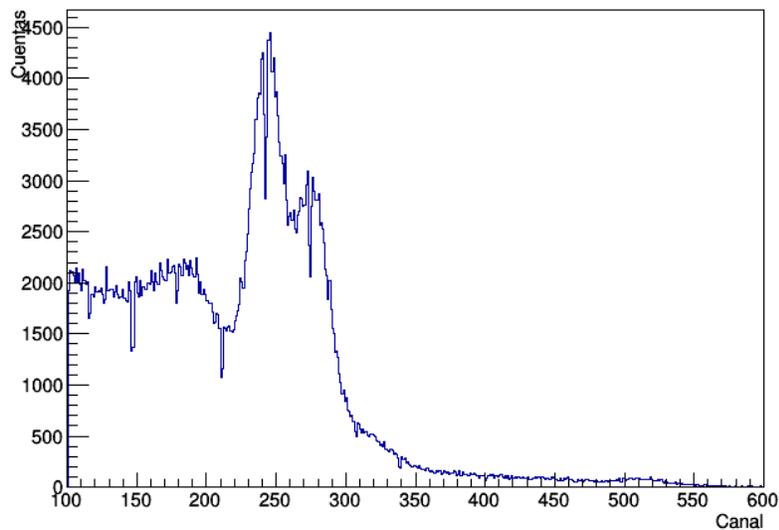


Fig. 7.4.9) Espectro de energías tomado por el detector de NaI externo cuando la fuente se encontraba en las cercanías del tubo fotomultiplicador 15.

## Fuente en TFM 15 Picos

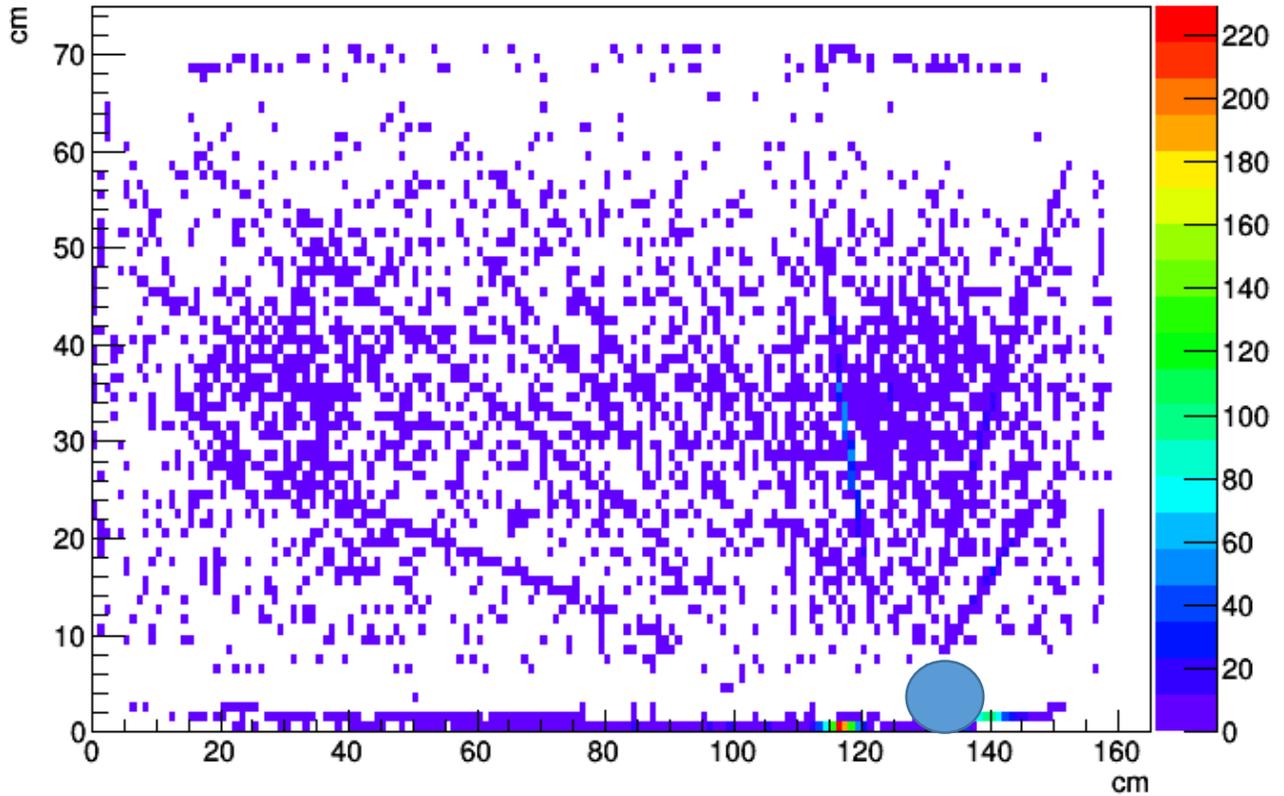


Fig. 7.4.10) Eventos en la placa de MONDE correlacionados con los foto picos vistos en el detector externo de NaI, es posible determinar la posición aproximada de la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

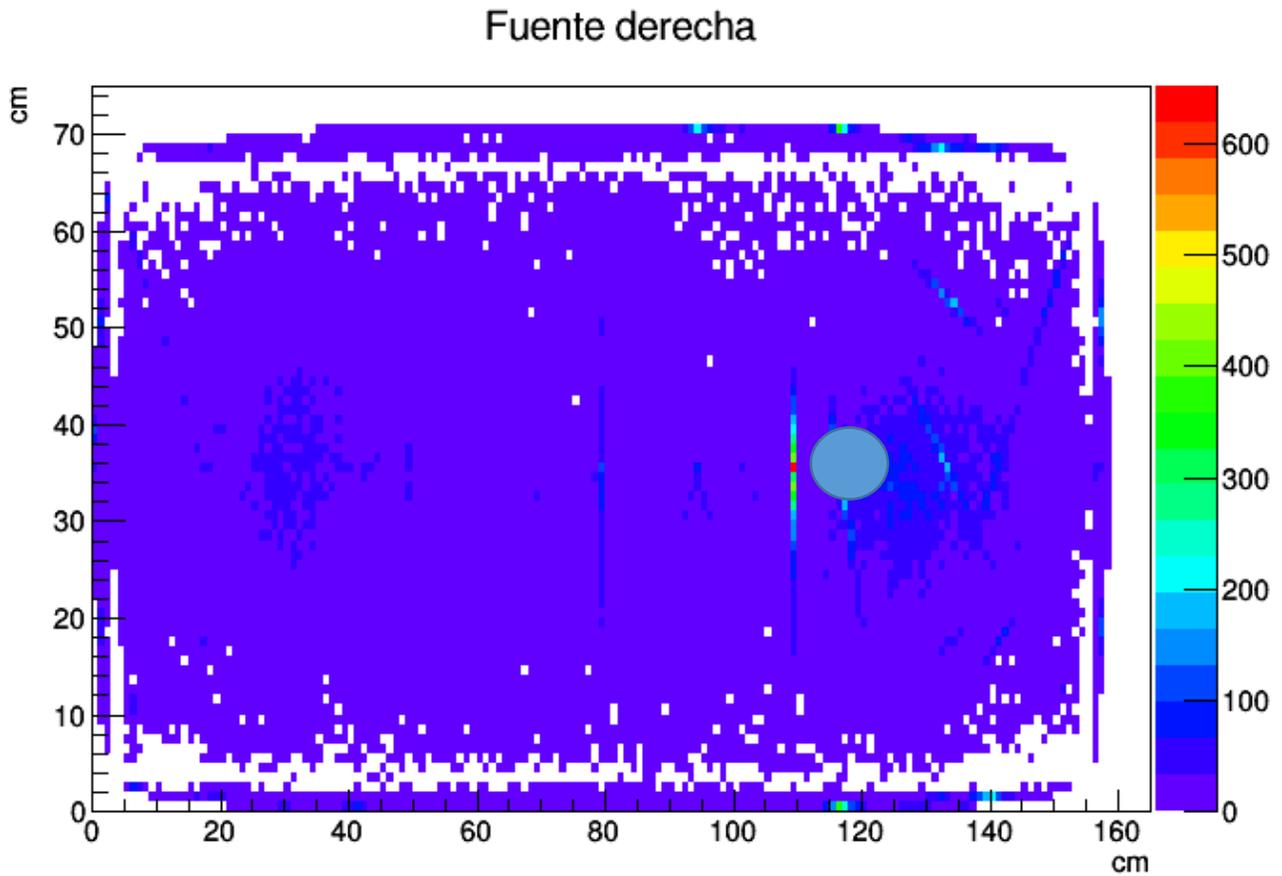


Fig. 7.4.11) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER cuando la fuente se encontraba desplazado 40 cm a la derecha del centro.

NaI en derecha

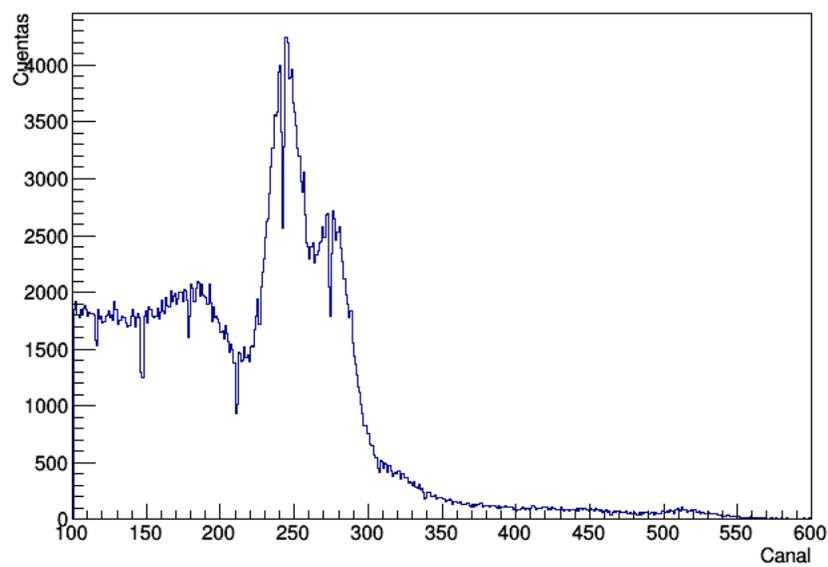


Fig. 7.4.12) Espectro de energías tomado por el detector de NaI externo cuando la fuente se encontraba desplazado 40 cm a la derecha del centro.

## Fuente en la Derecha

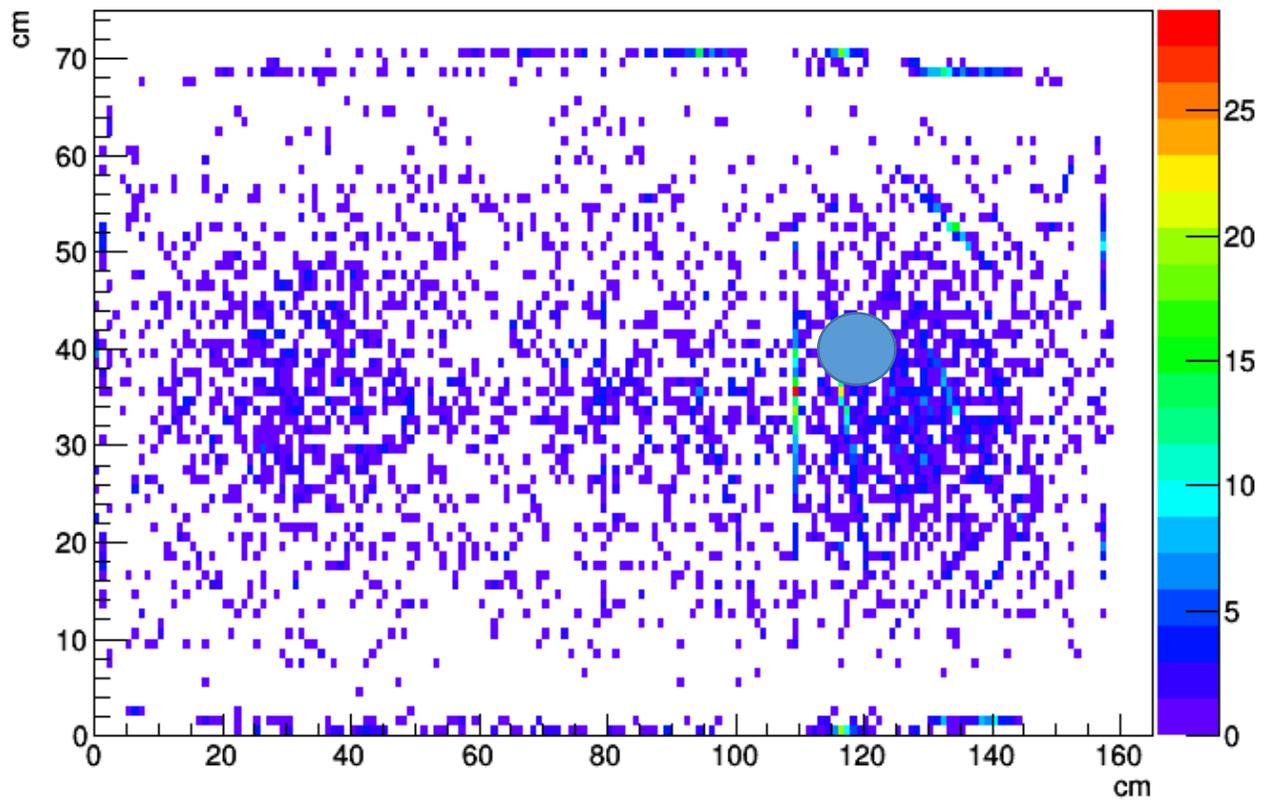


Fig. 7.4.13) Eventos en la placa de MONDE correlacionados con los foto picos vistos en el detector externo de NaI cuando la fuente se encontraba desplazada 40 cm a la derecha del centro, es posible determinar la posición aproximada de la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

## Fuente en Izquierda

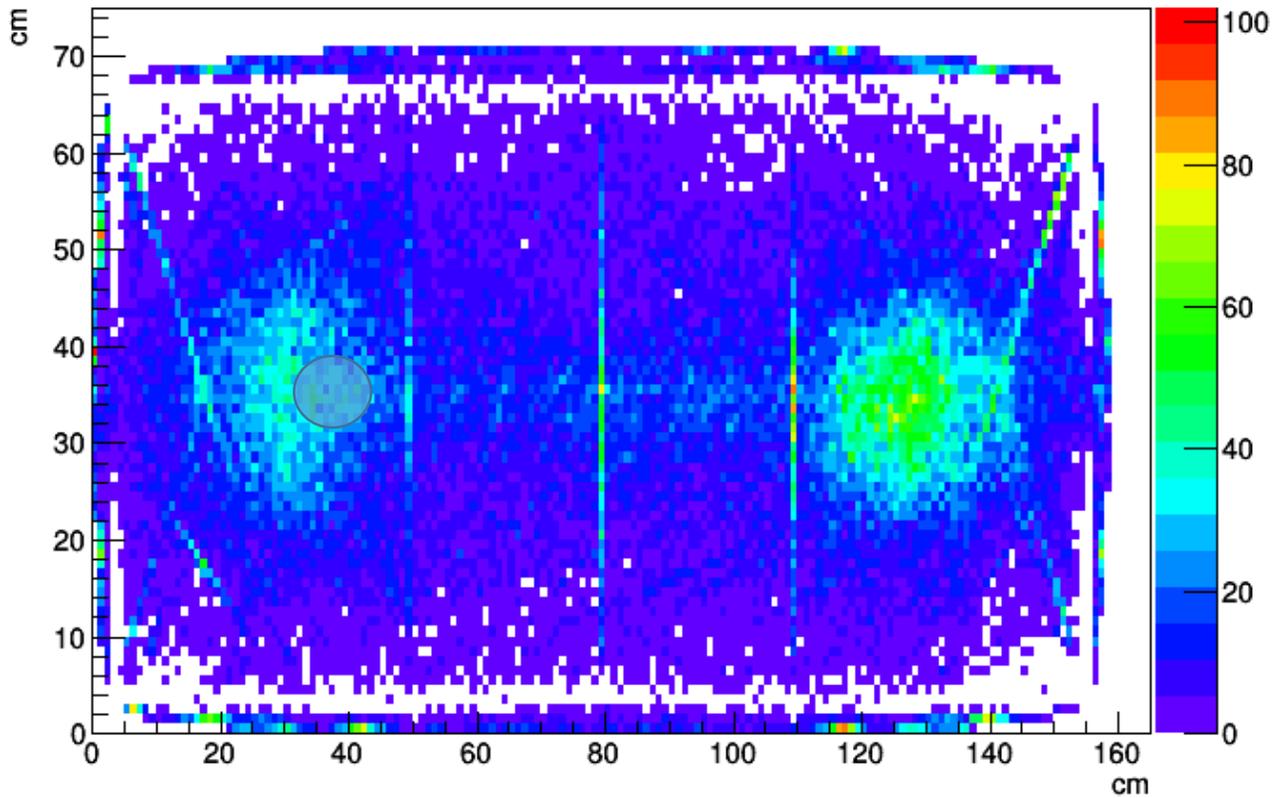


Fig. 7.4.14) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas usando el algoritmo ANGER cuando la fuente se encontraba desplazado 40 cm a la izquierda del centro.

## NaI en izquierda

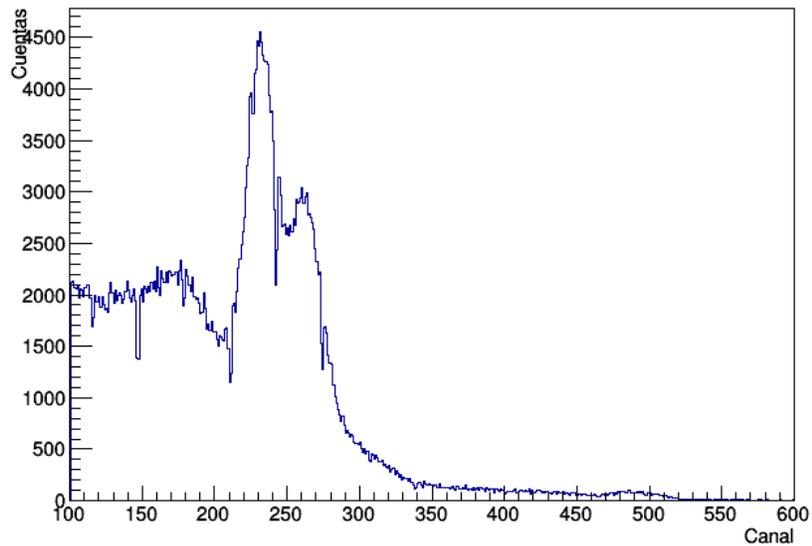


Fig. 7.4.13) Espectro de energías tomado por el detector de NaI externo cuando la fuente se encontraba desplazado 40 cm a la izquierda del centro.

## Fuente en la Izquierda

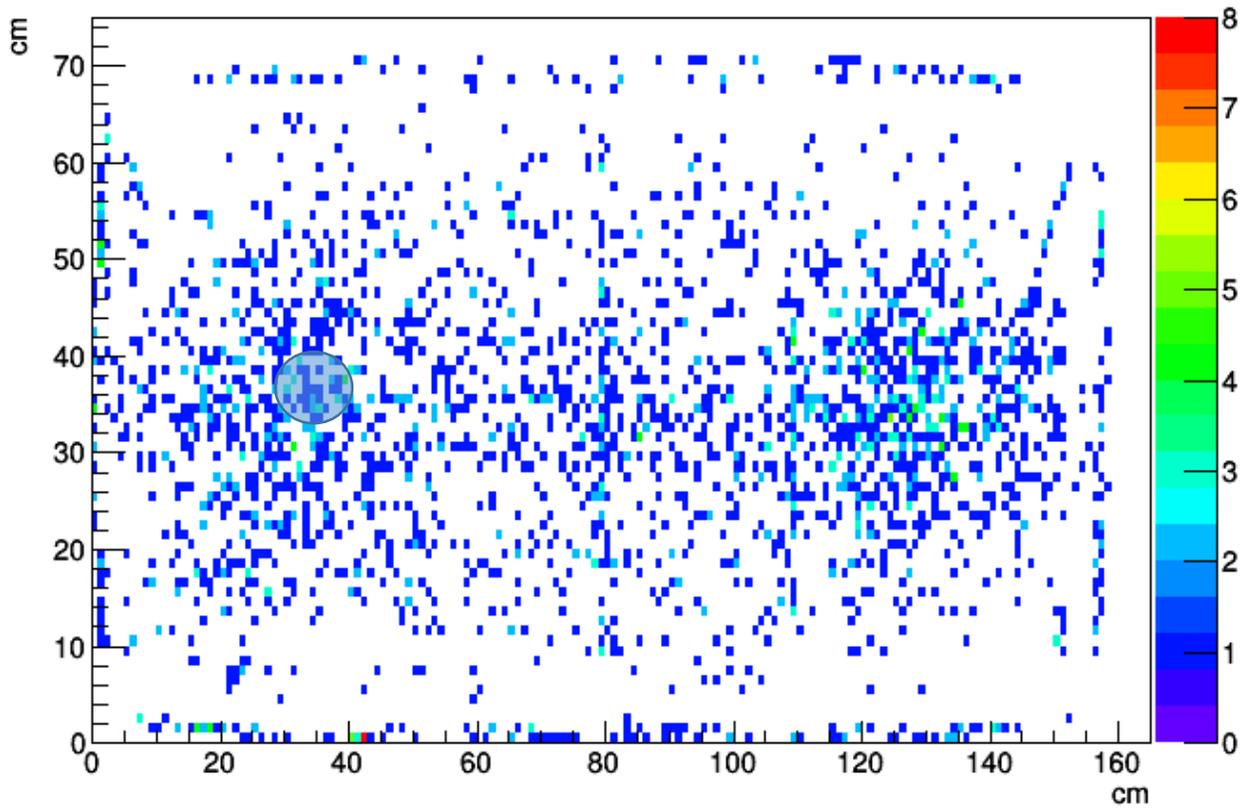


Fig. 7.4.14) Eventos en la placa de MONDE correlacionados con los foto picos vistos en el detector externo de NaI cuando la fuente se encontraba desplazada 40 cm a la izquierda del centro, es posible determinar la posición aproximada de la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

Se puede notar que cuando la fuente se encuentra 40 cm a la izquierda no es posible determinar con precisión la posición de la fuente, esto puede ser debido a que en esa zona la señal de los tubos fotomultiplicadores no es lo suficientemente intensa aun amplificadas, esto hace que señales provenientes de eventos causados por la fuente de  $^{60}\text{Co}$  sean confundidos en el análisis por eventos de radiación de fondo

## 4.9) Componente de Radiación de Fondo en los Experimentos con MONDE

Como se discutió en la sección 1.7 la radiación cósmica de fondo está presente en todos los experimentos que realicen y al ser MONDE un detector de gran tamaño la presencia de la radiación de fondo es importante, en todos los experimentos se notó que la tasa de conteo sin fuentes externas variaba de 600 a 650 cuentas por segundo y con las fuentes de radiación (Neutrones y Rayos gamma) la tasa de conteo variaba de 2000 a 2200 cuentas por segundo sin embargo cuando la fuente se encontraba en una posición lejana a cualquier

TFM se encontró que los eventos eran indistinguibles, esto puede ser debido a varias razones, incluyendo la amplificación de las señales y el algoritmo que se utilizó para el cálculo de la posición.

## 5) Conclusiones

Los experimentos de radiación de fondo V1 y con la fuente de Am-Be, permitieron identificar el estado del sistema, hicieron notar que los tubos fotomultiplicadores necesitaban ser caracterizados antes de ser empleados en otros experimentos.

La caracterización de los tubos fotomultiplicadores se centró en empatar sus ganancias, la caracterización de la eficiencia de detección se propone como trabajo a futuro.

En el experimento involucrando la línea de SUGAR se hizo notar que la sincronización entre las señales del MONDE y cualquier detector externo no puede hacerse “en línea”, es decir en las condiciones mismas en las que se va a realizar el experimento, dada la imposibilidad de trabajar con la electrónica en presencia de campos de neutrones. Para resolver este problema se recurrió a una fuente de  $^{60}\text{Co}$  que emite dos gammas correlacionados prácticamente simultáneos. Utilizando como detector externo un centellador inorgánico (NaI). En estos experimentos se demostró que las señales provenientes de MONDE siempre llegan antes que la de cualquier sistema externo en coincidencia. Por lo que a partir de este momento supimos que los experimentos en coincidencia, dadas nuestras limitaciones en la electrónica de manejo de pulsos, tendrían que efectuarse con un “OR” lógico entre MONDE y el detector externo, dejando el estudio de coincidencias para realizarse en el análisis fuera de línea. Para lo que se desarrolló un programa en “C” que corre en el entorno de ROOT.

También se notó que la tarjeta de conversión analógica a digital QDC resulta menos conveniente para trabajar que una tarjeta PADC, por esta razón se reemplazó.

En los experimentos MONDE & NaI V1 también hicieron notar la falta de amplificación de los tubos fotomultiplicadores debida a que el voltaje suministrado no era suficiente para distinguir señales causadas por la fuente de  $^{60}\text{Co}$  y señales que no fueran de interés.

Los experimentos de Radiación de Fondo y MONDE & NaI V2, permitieron determinar en qué condiciones el programa que implementa el algoritmo de ANGER funciona, encontrando que son necesarios por lo menos dos señales de los tubos fotomultiplicadores para determinar las posiciones de la fuente de  $^{60}\text{Co}$ . Se identificó que el módulo amplificador MDS-8 que corresponde a los primeros 8 canales de los fotomultiplicadores de MONDE amplifica en menor magnitud que su módulo gemelo. Este fenómeno causa que la mitad izquierda de MONDE no tenga la misma resolución que su contraparte derecha, este problema se planea arreglar como trabajo futuro.

Estos experimentos también permitieron corroborar la hipótesis de que MONDE puede ser utilizado en experimentos donde se quiere estudiar correlación de partículas. Al encontrar eventos en MONDE correlacionados con los foto-picos en el detector externo de NaI. Mostrando que las posiciones reconstruidas por el algoritmo coincidían con las posiciones

esperadas dada la ubicación de la fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

Este tipo de experimentos son importantes para el desarrollo de la ciencia en México este detector es un avance en la detección de neutrones para los laboratorios del IFUNAM.

## 6) Trabajo a Fututo

### 6.1) Corto plazo

Ajustar el potenciómetro del pole-zero de los módulos amplificadores debido a que se encontró que un módulo amplificador estaba generando señales menos intensas que su módulo gemelo, esto puede ser atribuido a un fenómeno llamado “under shooting” de la señal, dando información errónea sobre el pulso real.

Caracterizar la eficiencia de cada tubo fotomultiplicador, mediante pruebas sistemáticas que optimen el funcionamiento de cada uno.

Escribir un programa usando el algoritmo PRADA propuesto en el artículo “Characterization of a Fast Neutron Detection System With Large Angular Coverage and Granularity for Physics Studies and Applications”[2]

### 6.2) Mediano Plazo

Agregar fotomultiplicadores al arreglo, generar una simulación Monte-Carlo para determinar la posición óptima de los detectores usando el paquete GEANT4

Adquisición de electrónica con mejor precisión además de automatización de toma de datos.

Repetir el experimento  $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$  utilizando los conocimientos adquiridos en este trabajo.

Construir mejores acoplamientos entre el plástico centellador de MONDE y los tubos fotomultiplicadores que mejoren la captación de luz.

### 6.3) Largo plazo

Generar imágenes reconstruidas de objetos usando una sonda neutrónica.

## 7) Reconocimientos

Este trabajo fue posible gracias a la ayuda de los proyectos: CONACYT 51600, 82692, 123655 and DGAPAUNAM IN- 118310, IN-112609, IN-105510, IN-115213, TA-100213, IN-103312.

## Apéndice 1: Mapas de Posiciones

### A1.1) Radiación Fondo V1

Posicion XY Fondo QDC no Caracterizado

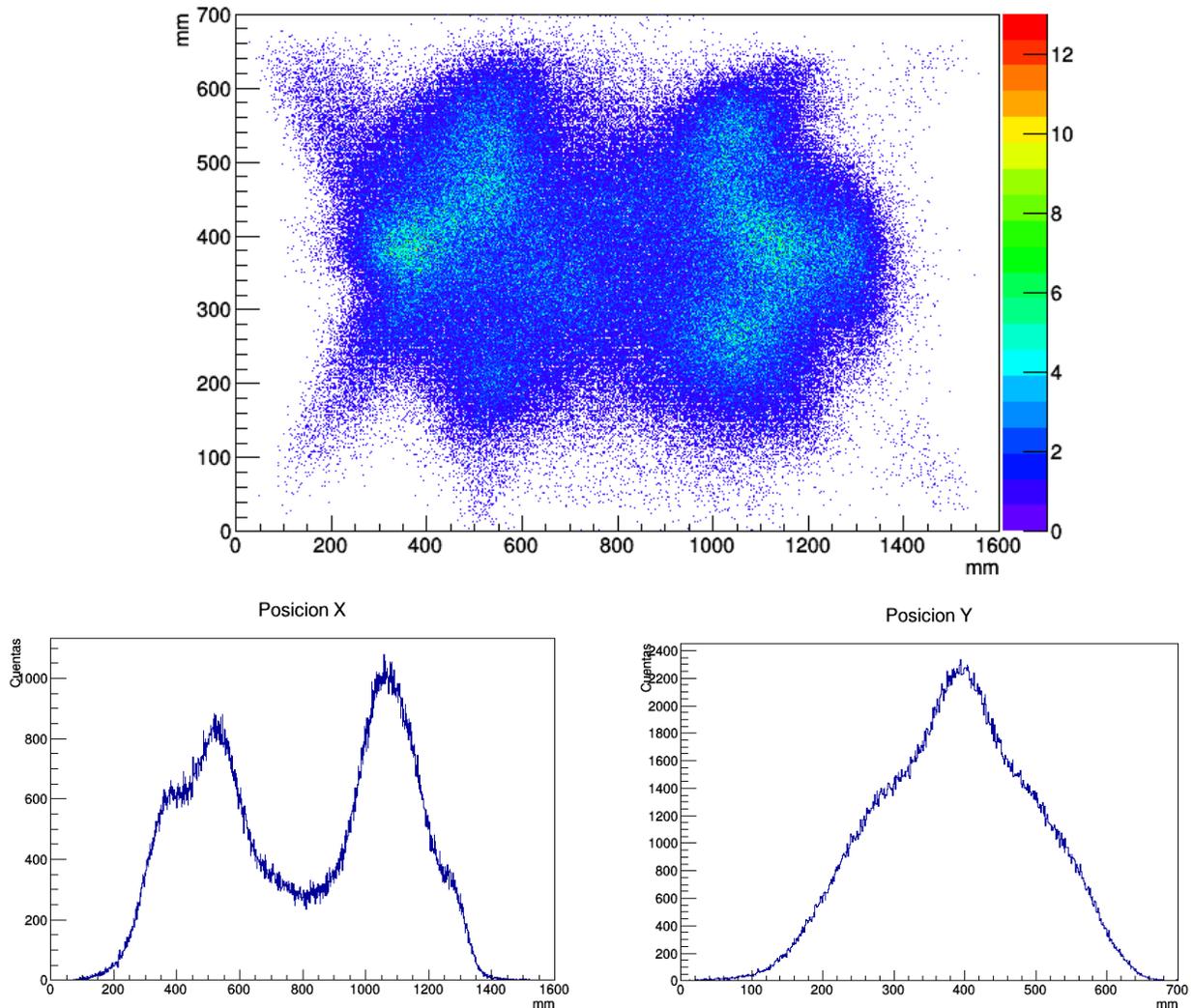


Fig. A1.1.1) (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa. (Izquierda) Proyección en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) proyección en el eje Y de las posiciones del mapa bidimensional.

## A1.2) Neutrones Producidos por la fuente de Am-Be

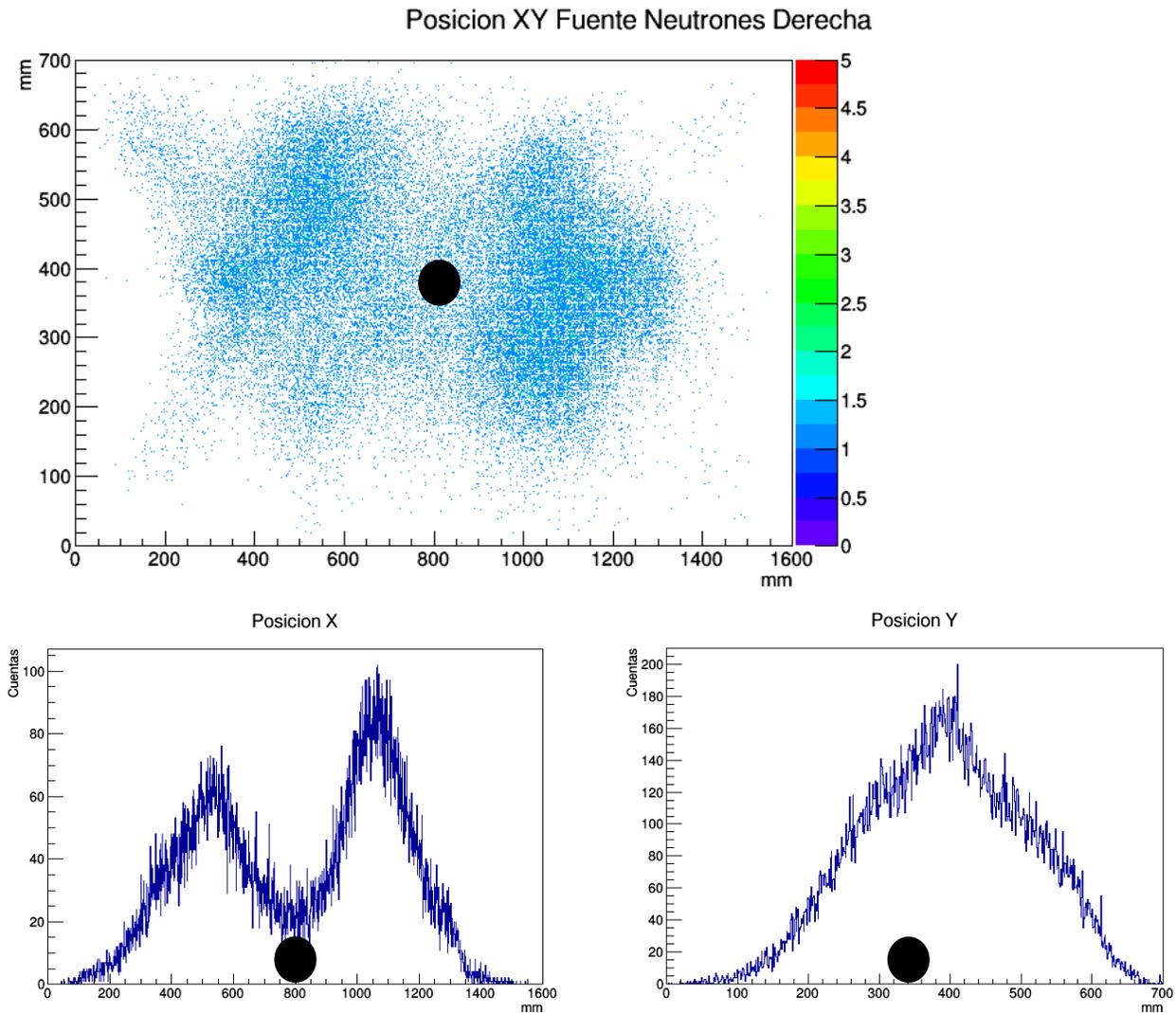


Fig. A2.1.1) (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa (Izquierda) Proyección de las posiciones en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) Proyección de las posiciones en el eje Y del mapa bidimensional. La fuente de neutrones es representada como un círculo negro en los mapas bidimensional y unidimensionales.

## A1.3) Radiación de Fondo V2

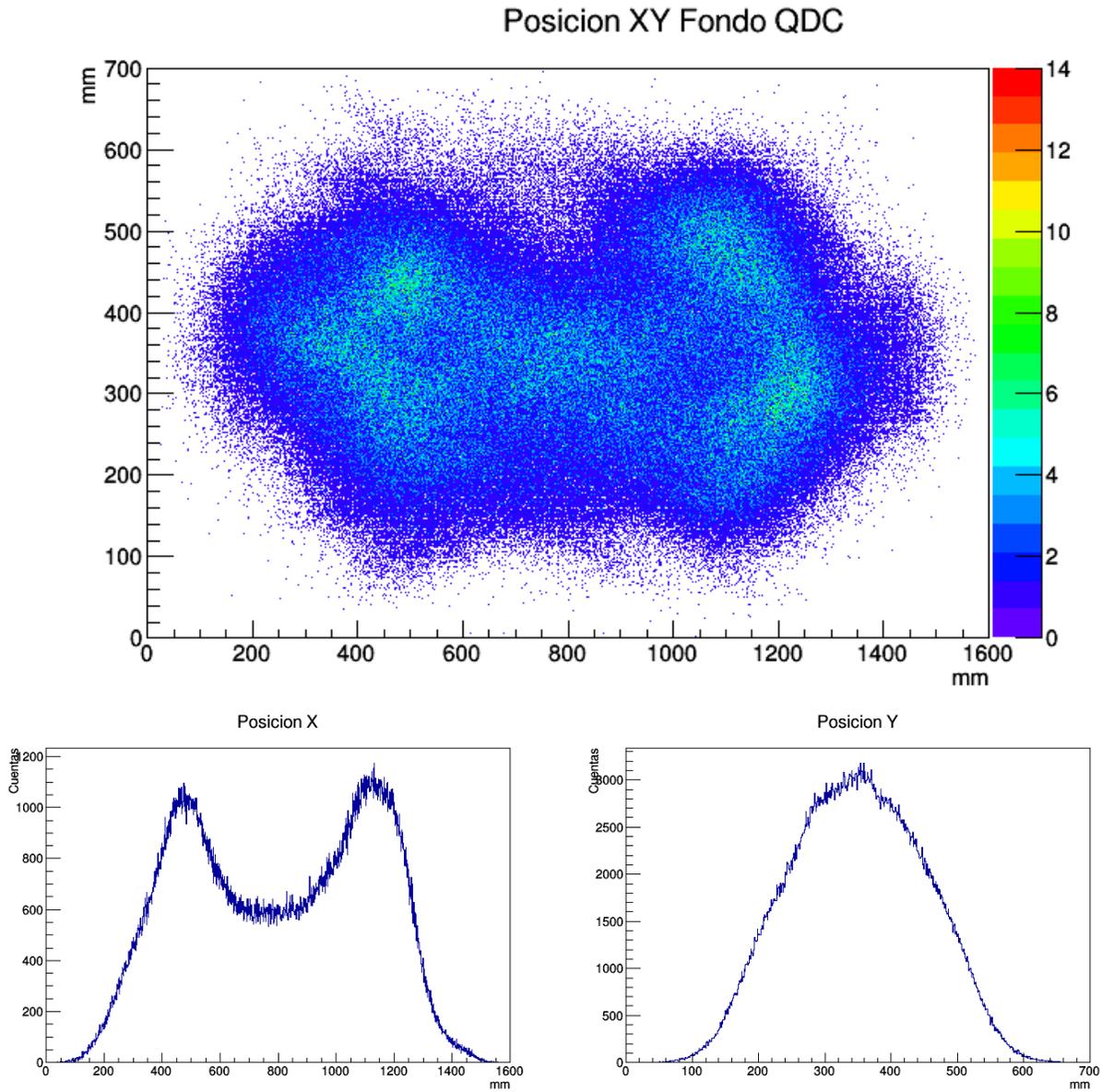


Fig. A3.1.1) (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa (Izquierda) Proyección de las posiciones en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) Proyección de las posiciones en el eje Y del mapa bidimensional.

## A1.4) Radiación de Fondo V3

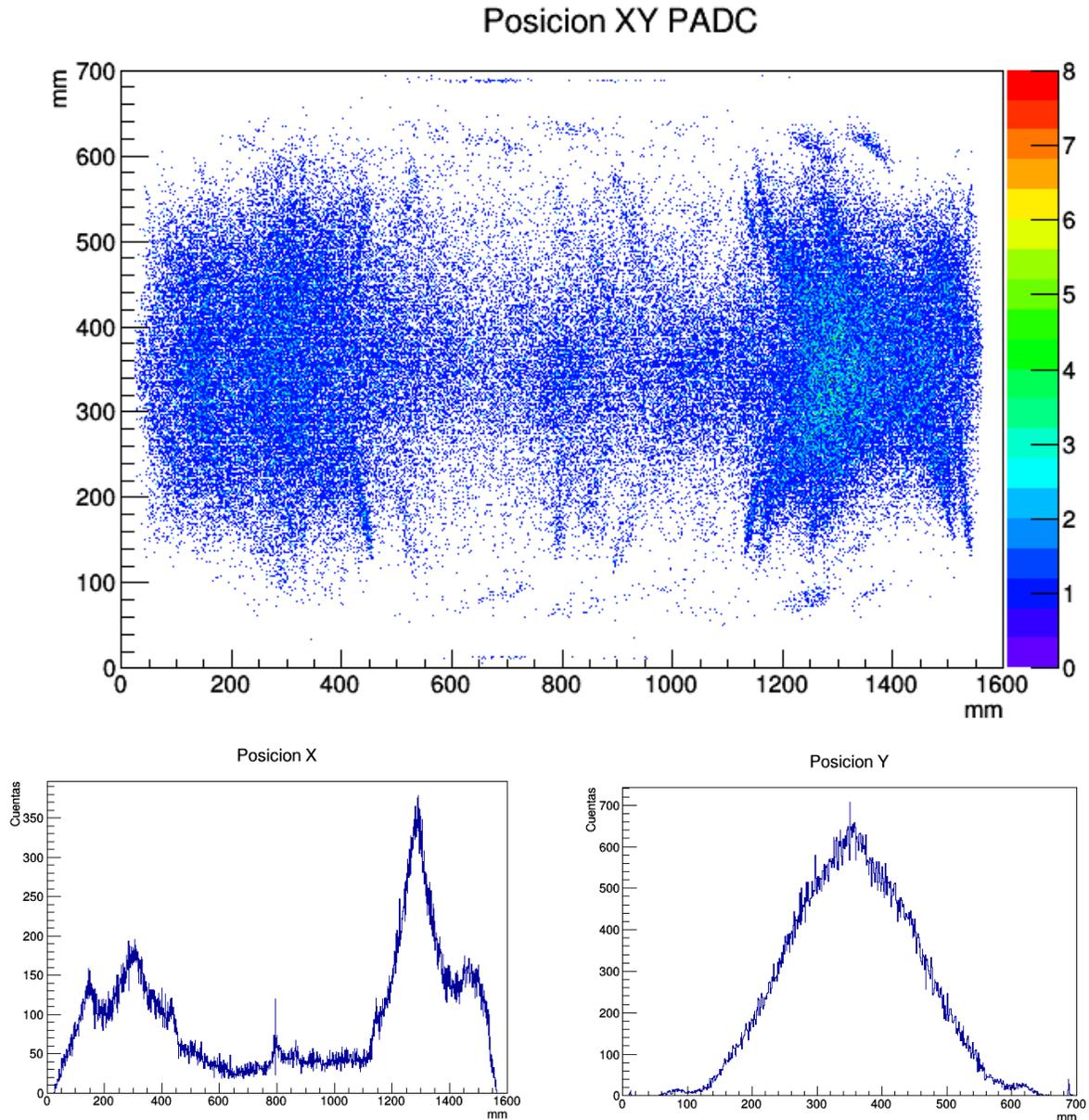


Fig. A4.1.1) (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa (Izquierda) Proyección de las posiciones en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) Proyección de las posiciones en el eje Y del mapa bidimensional.

## A1.5) MONDE & NaI V1

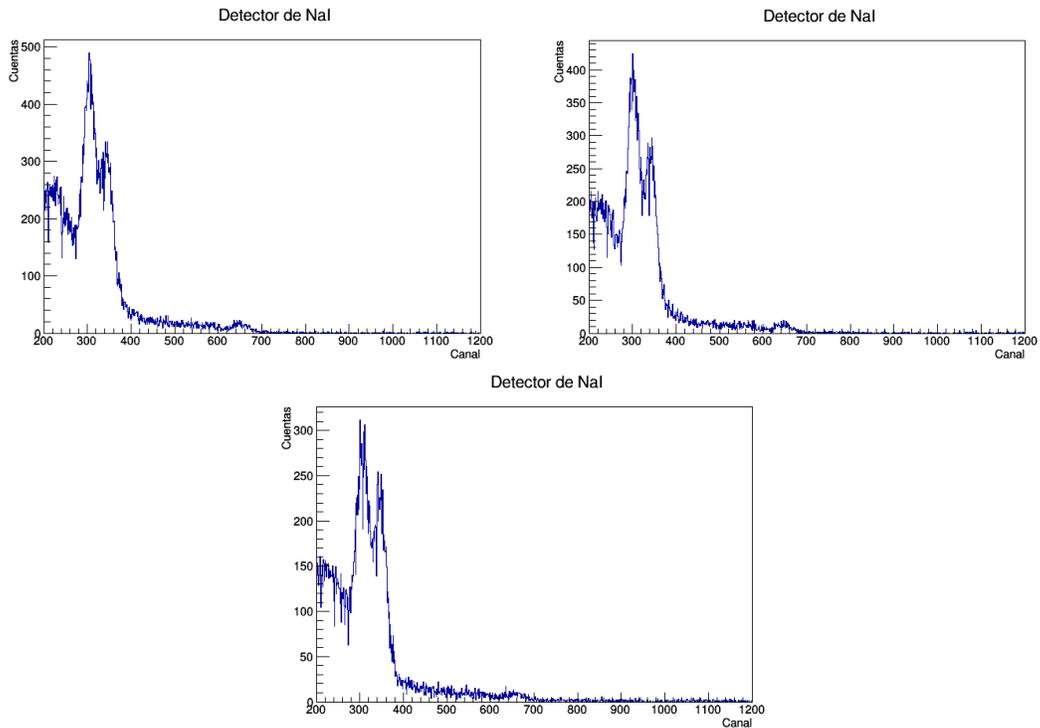
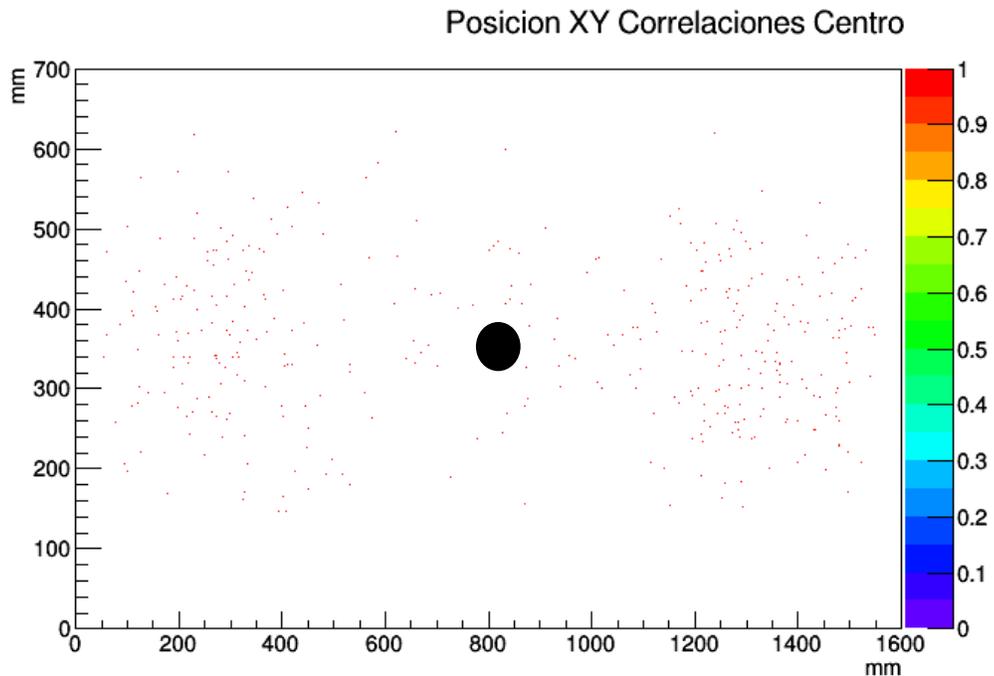


Fig. 4.6.1) (Izquierda) Espectro obtenido en el detector externo de NaI cuando la fuente se encontraba a 40 cm del centro a la izquierda. (Derecha) Espectro obtenido en el detector externo de NaI cuando la fuente se encontraba a 40 cm del centro a la derecha. (Abajo) Espectro obtenido en el detector externo de NaI cuando la fuente se encontraba a 40 cm del centro

### A5.1.1) Posición Central



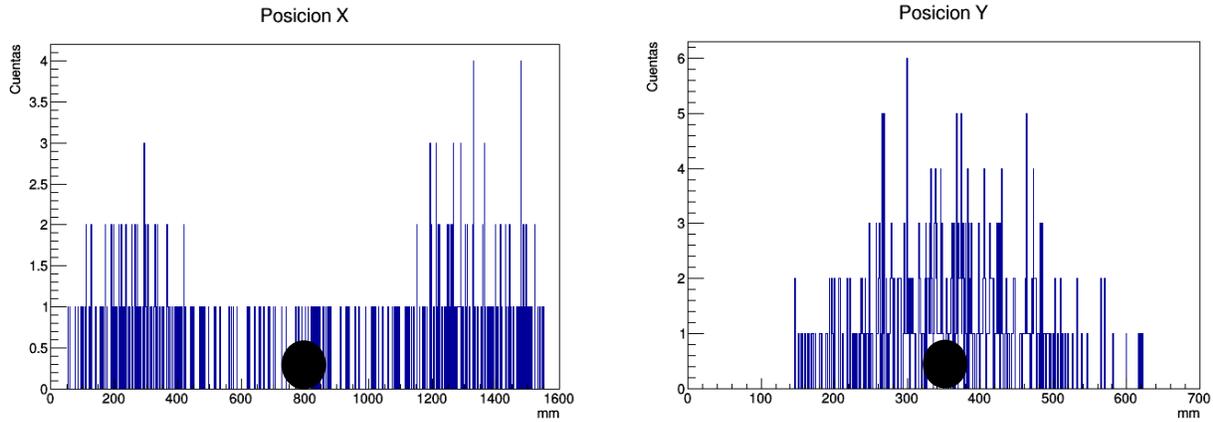
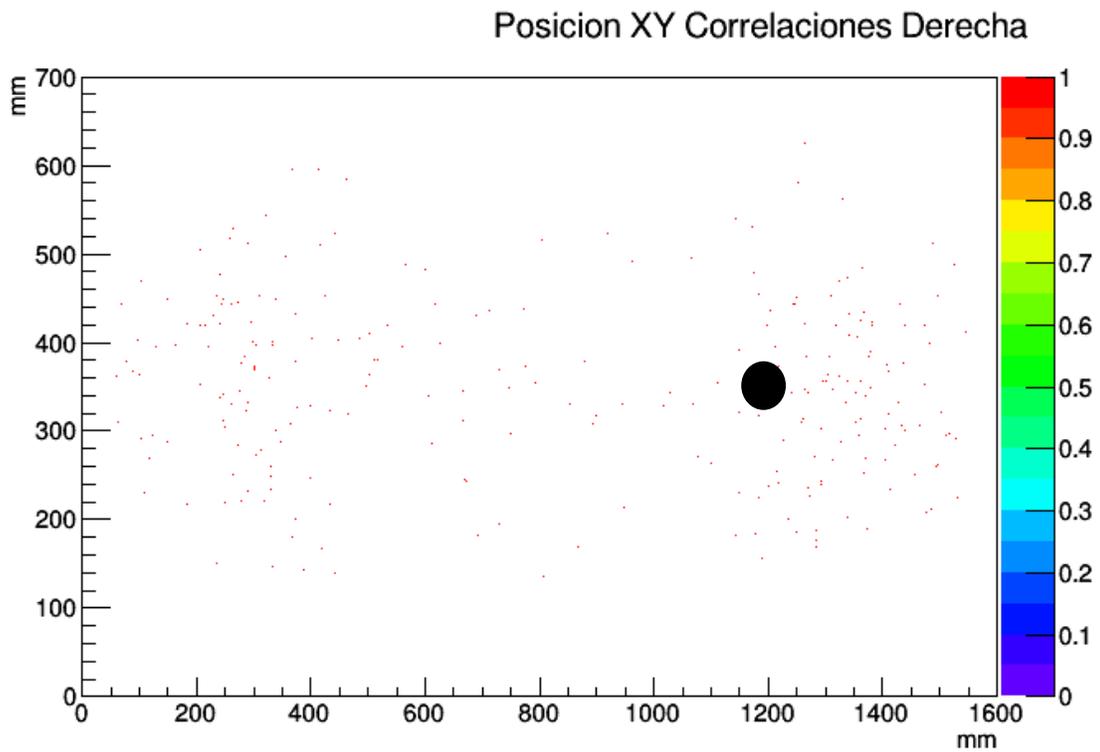


Fig. 4.6.1.1) (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa (Izquierda) Proyección de las posiciones en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) Proyección de las posiciones en el eje Y del mapa bidimensional.

### A5.1.2) Posición Derecha



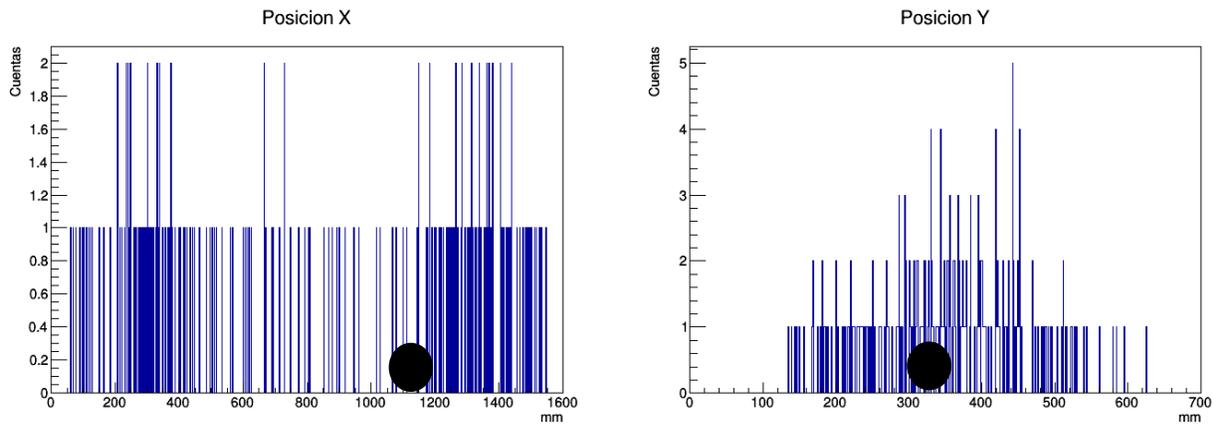
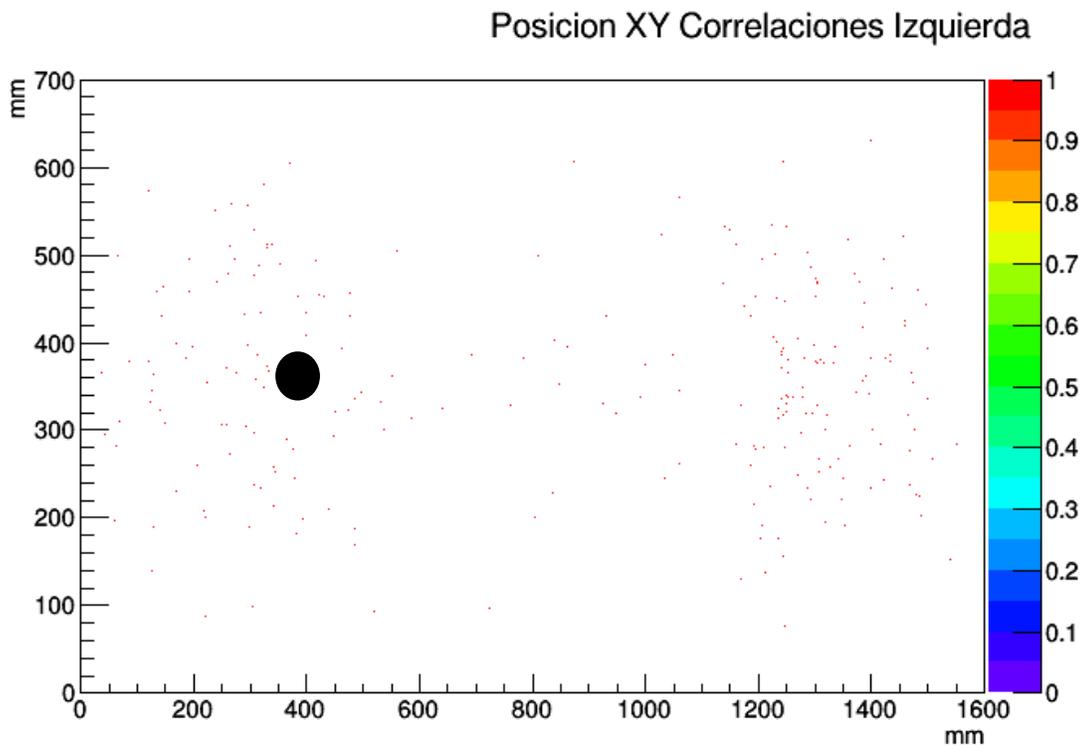


Fig. 4.6.2.1 (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa (Izquierda) Proyección de las posiciones en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) Proyección de las posiciones en el eje Y del mapa bidimensional.

### A5.1.3) Posición Izquierda



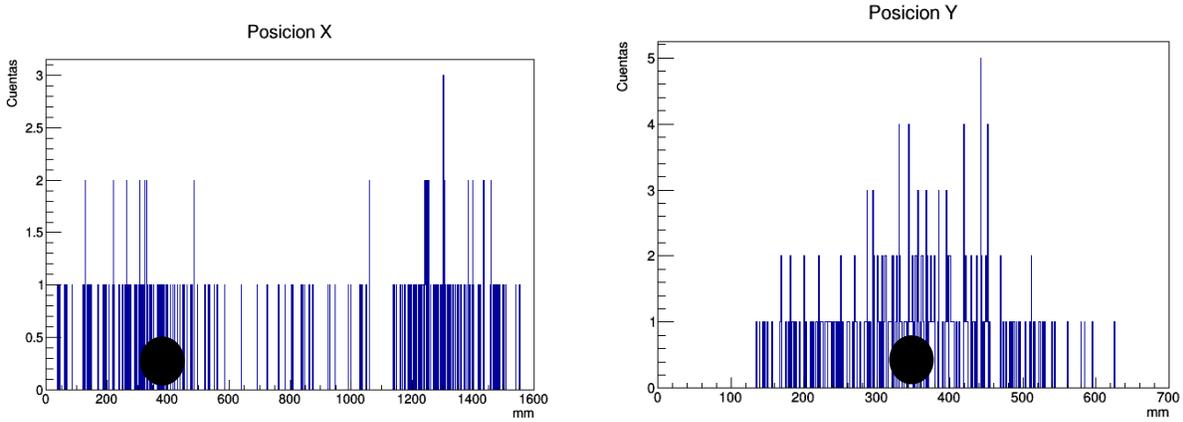


Fig. 4.6.3.2 (Arriba) Mapa bidimensional de las posiciones calculadas por el algoritmo de centro de masa (Izquierda) Proyección de las posiciones en el eje X del mapa bidimensional. (Derecha) Proyección de las posiciones en el eje Y del mapa bidimensional.

# Bibliografía

- [1] E. Chávez, P. Rodríguez, A. Huerta, M. E. Ortiz, L. Barrón-Palos, F. Favela, D. Marín, E. Moreno, G. Murillo, R. Policroniades, and A. Varela, “Elastic scattering of neutrons on natPb at forward angles,” *Eur. Phys. J. A*, vol. 42, no. 2, pp. 179–184, 2009.
- [2] E. Chávez, L. Barrón-Palos, Q. Curiel, R. Guerrero, A. Huerta, M. E. Ortiz, E. Moreno, G. Murillo, R. Policroniades, A. Varela, F. D. McDaniel, and B. L. Doyle, “Characterization of a Fast Neutron Detection System With Large Angular Coverage and Granularity for Physics Studies and Applications,” *AIP Conf. Proc.*, pp. 84–87, 2009.
- [3] A. Sousa Joode, “Algumas Aplicações da neutrongrafia Industrial,” in *VII Seminário Nacional De Ensayos Nao Destrutivos*, 1987, pp. 1–17.
- [4] J. Zhang, P. D. Olcott, and C. S. Levin, “A New Positioning Algorithm for Position-Sensitive Avalanche Photodiodes.,” *Tns*, vol. 54, no. 3, pp. 433–437, 2007.
- [5] Y. Kondo, T. Nakamura, T. Sako, Y. Kawada, G. S. Lee, N. Kobayashi, R. Ninakata, S. Nishi, K. Takajashi, R. Tanaka, N. A. Orr, H. Otsu, Y. Satou, and K. Yoneda, “Calibration methods of the neutron detector array NEBULA,” *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, vol. 45, no. 45, p. 131, 2012.
- [6] A. Chilingarian, A. Daryan, K. Arakelyan, A. Hovhannisyan, B. Mailyan, L. Melkumyan, G. Hovsepyan, S. Chilingaryan, A. Reymers, and L. Vanyan, “Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons,” *Phys. Rev. D*, vol. 82, no. 4, pp. 1–11, 2010.
- [7] E. L. Brady and M. Deutsch, “Angular correlation of successive gamma-rays,” *Phys. Rev.*, vol. 78, no. 5, p. 558, 1950.
- [8] C. D. Muhlberger, “Experiment IX : Angular Correlation of Gamma Rays,” Maryland, 2008.
- [9] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. Michigan: John Wley & Sons, Inc, 2000.
- [10] K. A. Olive et al, *Particle Data Group*, vol. 090001. 2014.
- [11] J. Chadwick, “Possible Existence of a Neutron,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 136, no. 830, pp. 692–708, 1932.
- [12] J. R. Campbell, *Física de las radiaciones en la materia*. Mexico City: Dirección General de Divulgación de la Ciencia, 2001.
- [13] U. Doe, “Doe handBook 1019/1-93 nuclear physics and reactor theory,” *Nucl. Phys.*, vol. 1, no. January, pp. 2238–2239, 1993.
- [14] M. Perricone, “Signal to Background,” *Symmetry Mag.* 3, 2006.
- [15] D. Wackerroth, “Made Painless: Cross Section.” 1996.
- [16] P. Rinard, “Neutron interactions with matter,” *Passiv. Nondestruct. Assay Nucl. Mater. Los Alamos Tech. Rep. NUREG/CR-5550, LA-UR-90-732*, pp. 357–377, 1991.
- [17] K. Sköld and D. L. Price, “Neutron Scattering,” *Methods Exp. Phys.*, vol. 23, no. Part A,

pp. 1–97, 1986.

- [18] R. L. Craun and D. L. Smith, “Analysis of response data for several organic scintillators,” *Nucl. Instruments Methods*, vol. 80, no. 2, pp. 239–244, 1970.
- [19] D. L. Smith, R. G. Polk, and T. G. Miller, “Measurement of the response of several organic scintillators to electrons, protons and deuterons,” *Nucl. Instruments Methods*, vol. 64, no. 2, pp. 157–166, 1968.
- [20] E. Chávez, A. Huerta, R. Macias, M. E. Ortiz, E. Moreno, R. Policroniades, and A. Varela, “Efficiency and Light Response Measurement of a Neutron Detector Using the AP Technique,” *México Nucl.*, vol. 3, no. 1, pp. 9–13, 2002.
- [21] K. J. Thomas, E. B. Norman, A. R. Smith, and Y. D. Chan, “Installation of a muon veto for low background gamma spectroscopy at the LBNL low-background facility,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. A*, vol. 724, p. 47, 2013.
- [22] M. Ackermann and et al., “THE FIRST FERMI -LAT CATALOG OF SOURCES ABOVE 10 GeV,” *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 209, no. 2, p. 34, 2013.
- [23] F. Izraelevich, G. Gutierrez, J. Estrada, R. Piegaia, and G. Ga, Otero y Garzon, “Centelladores” *Material didáctico del Departamento de Física FCEyN, UBA*, 1st ed. Buenos Aires, Argentina: FCEyN UBA.
- [24] P. Design, P. Design, E. Optics, E. Optics, P. Characteristics, P. Characteristics, P. Applications, and P. Applications, “Photomultiplier Handbook,” *Energy*, pp. 8–80.
- [25] ET Enterprises Electron Tubes, “9903B series data sheet.” pp. 1–2, 2015.
- [26] Copper Development Association Inc., “Beryllium Copper.” [Online]. Available: [http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/be\\_cu.html](http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/be_cu.html).
- [27] D. Paneque, H. J. Gebauer, E. Lorenz, M. Martinez, K. Mase, R. Mirzoyan, A. Ostankov, and T. Schweizer, “A method to enhance the sensitivity of photomultipliers for air Cherenkov telescopes,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 504, no. 1–3, pp. 109–115, 2003.
- [28] Q. Curiel, “Desarrollo de un detector de neutrones sensible a la posición en dos dimensiones para el estudio de reacciones nucleares,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [29] I. B. Berlman, *Handbook of fluorescence spectra of Aromatic Molecules*, 2nd ed. Academic Press, Inc. (London) LTD., 1971.
- [30] I. Saint-Gobain Industrial Ceramics, “Premium Plastic Scintillators BC-400 / BC-404 / BC-408 / BC-412 / BC-416 Premium Plastic Scintillators,” *Saint-Gobain Industrial Ceramics, Inc.*, no. 440. pp. 2–3, 1998.
- [31] Mesytec, “MDS-8 Data Sheet,” vol. 8. pp. 1–2.
- [32] E. Chávez Lomelí, A. Hernández Huerta, R. Pérez Macias, M. E. Ortiz Salazar, E. Benitez Moreno, G. Olayo Murillo, R. Rueda Policroniades, and A. Varela González, “Efficiency and Light Response Measurement of a Neutron Detector Using the AP Technique,” *México Nucl.*, pp. 2–4.
- [33] H. O. Anger, “Scintillation camera,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 29, no. 1, pp. 27–33, 1958.

- [34] F. L. H. Wolfs, "Energy spectra collection with the NaI(Tl) detector." [Online]. Available: <http://teacher.pas.rochester.edu/LUX/Electronics/DDC-8/DDC-8.html>.
- [35] Spectech, "UCS30." [Online]. Available: <http://www.spectrumtechniques.com/ucs30.htm>.
- [36] F. Favela, L. Acosta, E. Andrade, V. Araujo, A. Huerta, O. G. De Lucio, M. E. Ortiz, R. Policroniades, P. S. Rita, A. Varela, E. Ch, and E. Mex, "A new supersonic gas jet target ( SUGAR ) for low energy nuclear reaction studies," pp. 1–10, 2015.
- [37] F. Favela, L. Acosta, E. Andrade, V. Araujo, A. Huerta, O. G. de Lucio, G. Murillo, M. E. Ortiz, R. Policroniades, P. Santa Rita, A. Varela, and E. Chávez, "New supersonic gas jet target for low energy nuclear reaction studies," *Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams*, vol. 18, no. 12, p. 123502, 2015.
- [38] A. T. Ramos, "Position Reconstruction from Amplitude Detection Algorithm 'PRADA,'" Universidad Nacional Autonoma de México, 2015.

# Anexo 1

Programa de análisis de datos escrito en C++ e interpretado por el programa de análisis CERN ROOT

```
#include "TFile.h"
#include "TH1.h"
#include "TH2.h"
#include "TRandom.h"
#include "TTree.h"

void render18(char *name="NOTHING", char *rootFile="render18.root")
{

    printf("The argument is %s\n", name);
    printf("The second argument is %s\n", rootFile);

    TFile *f = new TFile(rootFile,"UPDATE");

    TTree *render18 = new TTree("render18","Tree data");

    render18->Write("render18",TObject::kOverwrite);

        Int_t d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8, d9, d10, d11, d12, d13, d14, d15, d16;

        Int_t
    dect1,dect2,dect3,dect4,dect5,dect6,dect7,dect8,dect9,dect10,dect11,dect12,dect13,dect14,dect15,dect16;

        Double_t
    Adect1,Adect2,Adect3,Adect4,Adect5,Adect6,Adect7,Adect8,Adect9,Adect10,Adect11,Adect12,Adect13,Adect14,Adect15,Adect16;

        Double_t xarribatodos,yarribatodos, abajotodos;

//histogramas de posicion

    TH1D*h1render18 = new TH1D("h1render18","Posicion X",165,0,165);
    TH1D*h2render18 = new TH1D("h2render18","Posicion Y",75,0,75);
    TH2D*h3render18 = new TH2D("h3render18","Posicion XY",165,0,165,75,0,75);

    TH1D*h1peaksrender18 = new TH1D("h1peaksrender18","Posicion X",165,0,165);
    TH1D*h2peaksrender18 = new TH1D("h2peaksrender18","Posicion Y",75,0,75);
    TH2D*h3peaksrender18 = new TH2D("h3peaksrender18","Posicion XY",165,0,165,75,0,75);

//hisotrgamas de espectros

    TH1D*detec1historender18 = new TH1D("detec1historender18","detector1historender18",1000,0,1000);
    TH1D*detec2historender18 = new TH1D("detec2historender18","detector2historender18",1000,0,1000);
    TH1D*detec3historender18 = new TH1D("detec3historender18","detector3historender18",1000,0,1000);
    TH1D*detec4historender18 = new TH1D("detec4historender18","detector4historender18",1000,0,1000);
    TH1D*detec5historender18 = new TH1D("detec5historender18","detector5historender18",1000,0,1000);
    TH1D*detec6historender18 = new TH1D("detec6historender18","detector6historender18",1000,0,1000);
```

```

TH1D*detec7historender18 = new TH1D("detec7historender18","detector7historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec8historender18 = new TH1D("detec8historender18","detector8historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec9historender18 = new TH1D("detec9historender18","detector9historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec10historender18 = new TH1D("detec10historender18","detector10historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec11historender18 = new TH1D("detec11historender18","detector11historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec12historender18 = new TH1D("detec12historender18","detector12historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec13historender18 = new TH1D("detec13historender18","detector13historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec14historender18 = new TH1D("detec14historender18","detector14historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec15historender18 = new TH1D("detec15historender18","detector15historender18",1000,0,1000);
TH1D*detec16historender18 = new TH1D("detec16historender18","detector16historender18",1000,0,1000);

```

```

Double_t xt, yt;

```

```

Double_t

```

```

posdetx1,posdetx2,posdetx3,posdetx4,posdetx5,posdetx6,posdetx7,posdetx8,posdetx9,posdetx10,posdetx11,p
osdetx12,posdetx13,posdetx14,posdetx15,posdetx16;

```

```

Double_t

```

```

posdety1,posdety2,posdety3,posdety4,posdety5,posdety6,posdety7,posdety8,posdety9,posdety10,posdety11,p
osdety12,posdety13,posdety14,posdety15,posdety16;

```

```

Int_t BIASmax, BIASmin;

```

```

BIASmax=300;

```

```

BIASmin=30;

```

```

//Posiciones de los Detectores

```

```

posdetx1=79.35;
posdetx2=49.35;
posdetx3=34.35;
posdetx4=2.5;
posdetx5=0;
posdetx6=2.5;
posdetx7=34.35;
posdetx8=49.35;
posdetx9=79.35;
posdetx10=109.35;
posdetx11=124.35;
posdetx12=156.35;
posdetx13=158.7;
posdetx14=156.2;
posdetx15=124.35;
posdetx16=109.35;

```

```

posdety1=0;
posdety2=0;
posdety3=0;
posdety4=2.5;
posdety5=35.0;
posdety6=67.5;
posdety7=70;
posdety8=70;
posdety9=70;

```

```

posdety10=70;
posdety11=70;
posdety12=67.5;
posdety13=35.0;
posdety14=2.5;
posdety15=0;
posdety16=0;

```

```
// Declaracion de los Detectores sin amplificacion
```

```

render18->Branch("Detector1render18",&dect1,"dect1/I");
render18->Branch("Detector2render18",&dect2,"dect2/I");
render18->Branch("Detector3render18",&dect3,"dect3/I");
render18->Branch("Detector4render18",&dect4,"dect4/I");
render18->Branch("Detector5render18",&dect5,"dect5/I");
render18->Branch("Detector6render18",&dect6,"dect6/I");
render18->Branch("Detector7render18",&dect7,"dect7/I");
render18->Branch("Detector8render18",&dect8,"dect8/I");
render18->Branch("Detector9render18",&dect9,"dect9/I");
render18->Branch("Detector10render18",&dect10,"dect10/I");
render18->Branch("Detector11render18",&dect11,"dect11/I");
render18->Branch("Detector12render18",&dect12,"dect12/I");
render18->Branch("Detector13render18",&dect13,"dect13/I");
render18->Branch("Detector14render18",&dect14,"dect14/I");
render18->Branch("Detector15render18",&dect15,"dect15/I");
render18->Branch("Detector16render18",&dect16,"dect16/I");

```

```

render18->Branch("ADetector1render18",&Adect1,"Adect1/D");
render18->Branch("ADetector2render18",&Adect2,"Adect2/D");
render18->Branch("ADetector3render18",&Adect3,"Adect3/D");
render18->Branch("ADetector4render18",&Adect4,"Adect4/D");
render18->Branch("ADetector5render18",&Adect5,"Adect5/D");
render18->Branch("ADetector6render18",&Adect6,"Adect6/D");
render18->Branch("ADetector7render18",&Adect7,"Adect7/D");
render18->Branch("ADetector8render18",&Adect8,"Adect8/D");
render18->Branch("ADetector9render18",&Adect9,"Adect9/D");
render18->Branch("ADetector10render18",&Adect10,"Adect10/D");
render18->Branch("ADetector11render18",&Adect11,"Adect11/D");
render18->Branch("ADetector12render18",&Adect12,"Adect12/D");
render18->Branch("ADetector13render18",&Adect13,"Adect13/D");
render18->Branch("ADetector14render18",&Adect14,"Adect14/D");
render18->Branch("ADetector15render18",&Adect15,"Adect15/D");
render18->Branch("ADetector16render18",&Adect16,"Adect16/D");

```

```

render18->Branch("xtrender18",&xt,"xt/D");
render18->Branch("ytrrender18",&yt,"yt/D");

```

```
// Detectores Externos
```

```

Int_t DetectorExt1, DetectorExt2;
Int_t d1ext, d2ext;
Int_t ADetectorExt1, ADetectorExt2;
Int_t BIASminext, BIASmaxext;
Int_t peak1minE1, peak1maxE1, peak2minE1, peak2maxE1;
Int_t peak1minE2, peak1maxE2, peak2minE2, peak2maxE2;

```

```

    Double_t ADectExt1, ADectExt2;

render18->Branch("DetectorExt1render18",&DetectorExt1,"DetectorExt1/I");
render18->Branch("DetectorExt2render18",&DetectorExt2,"DetectorExt2/I");

render18->Branch("ADetectorExt1render18",&ADetectorExt1,"ADetectorExt1/I");
render18->Branch("ADetectorExt2render18",&ADetectorExt2,"ADetectorExt2/I");

TH1D*histopeaksrender18 = new TH1D("histopeaksrender18","Espectro en Nal de render18",500,100,600);

    BIASminext=100;
    BIASmaxext=4090;

//Dectector Externo 1

    peak1minE1=0;
    peak1maxE1=0;
    peak2minE1=0;
    peak2maxE1=0;

//Detector Externo 2

    peak1minE2=290;
    peak1maxE2=315;
    peak2minE2=330;
    peak2maxE2=350;

    Int_t cuentasIFS;

    Double_t xtpeaks,ytpeaks;

render18->Branch("xtpeaks",&xtpeaks,"xtpeaks/D");
render18->Branch("ytpeaks",&ytpeaks,"ytpeaks/D");
render18->Branch("CuentasDelIFS",&cuentasIFS,"cuentasIFS/I");

// BIAS para pasar a la posicion

FILE *out;

out=fopen(name,"r");
printf("opening %s\n",name);
int count = 0;
int count1 = 0;
int count2 = 0;
while(!feof(out)) {

    fscanf(out,"%d %d",&d1ext, &d2ext);
    fscanf(out,"%d %d %d %d %d %d %d %d",&d1,&d2,&d3,&d4,&d5,&d6,&d7,&d8);
    fscanf(out,"%d %d %d %d %d %d %d %d",&d9,&d10,&d11,&d12,&d13,&d14,&d15,&d16);
    count+=1;
    count1=0;

//Detectores Externos

```

```

    DetectorExt1=0;
    ADetectorExt1=0;
if (d1ext<BIASmaxext && d1ext>BIASminext) {

    DetectorExt1=d1ext;
    ADetectorExt1=(1*DetectorExt1)+0;
}

    DetectorExt2=0;
    ADetectorExt2=0;
if (d2ext<BIASmaxext && d2ext>BIASminext) {

    DetectorExt2=d2ext;
    ADetectorExt2=(1*DetectorExt2)+0;
    histopeaksrender18->Fill(ADetectorExt2);
}

```

//Detectores MONDE

```

    dect1=0;
    Adect1=0;
if (d1<BIASmax && d1>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect1=d1;
    Adect1=(1.0*dect1)+0;
    detec1historender18->Fill(Adect1);

}

    dect2=0;
    Adect2=0;
if (d2<BIASmax && d2>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect2=d2;
    Adect2=(1.0*dect2)+0;
    detec2historender18->Fill(Adect2);

}

    dect3=0;
    Adect3=0;
if (d3<BIASmax && d3>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect3=d3;
    Adect3=(1.0*dect3)+0;
    detec3historender18->Fill(Adect3);

}

    dect4=0;

```

```

    Adect4=0;
if (d4<BIASmax && d4>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect4=d4;
    Adect4=(1.0*dect4)-0;
    detec4historender18->Fill(Adect4);

}

    dect5=0;
    Adect5=0;
if (d5<BIASmax && d5>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect5=d5;
    Adect5=(1.0*dect5)+0;
    detec5historender18->Fill(Adect5);

}

    dect6=0;
    Adect6=0;
if (d6<BIASmax && d6>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect6=d6;
    Adect6=(1.0*dect6)-0;
    detec6historender18->Fill(Adect6);

}

    dect7=0;
    Adect7=0;
if (d7<BIASmax && d7>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect7=d7;
    Adect7=(1.0*dect7)+0;
    detec7historender18->Fill(Adect7);

}

    dect8=0;
    Adect8=0;
if (d8<BIASmax && d8>BIASmin) {

    count1+=1;
    dect8=d8;
    Adect8=(1.0*dect8)+0;
    detec8historender18->Fill(Adect8);

}

    dect9=0;
    Adect9=0;
if (d9<BIASmax && d9>BIASmin) {

```

```

        count1+=1;
        dect9=d9;
        Adect9=(1.0*dect9)+0;
        detec9historender18->Fill(Adect9);
    }
    dect10=0;
    Adect10=0;
    if (d10<BIASmax && d10>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect10=d10;
        Adect10=(1.0*dect10)+0;
        detec10historender18->Fill(Adect10);

    }
    dect11=0;
    Adect11=0;
    if (d11<BIASmax && d11>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect11=d11;
        Adect11=(1.0*dect11)+0;
        detec11historender18->Fill(Adect11);

    }
    dect12=0;
    Adect12=0;
    if (d12<BIASmax && d12>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect12=d12;
        Adect12=(1.0*dect12)+0;
        detec12historender18->Fill(Adect12);

    }
    dect13=0;
    Adect13=0;
    if (d13<BIASmax && d13>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect13=d13;
        Adect13=(1.0*dect13)+0;
        detec13historender18->Fill(Adect13);

    }
    dect14=0;
    Adect14=0;
    if (d14<BIASmax && d14>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect14=d14;
        Adect14=(1.0*dect14)+0;

```

```

    detec14historender18->Fill(Adect14);

}
    dect16=0;
    Adect16=0;
    if (d15<BIASmax && d15>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect16=d15;
        Adect16=(1.0*dect16)+0;
        detec16historender18->Fill(Adect16);

    }

    dect15=0;
    Adect15=0;
    if (d16<BIASmax && d16>BIASmin) {

        count1+=1;
        dect15=d16;
        Adect15=(1.0*dect15)+0;
        detec15historender18->Fill(Adect15);

    }

    cuentasIFS=count1;

    xarribatodos=0;
    yarribatodos=0;
    abajotodos=0;
    xt=0;
    yt=0;

// Posicion TODOS

if(cuentasIFS>=2){

xarribatodos=(posdetx1*Adect1)+(posdetx2*Adect2)+(posdetx3*Adect3)+(posdetx4*Adect4)+(posdetx5*Adect5)
+(posdetx6*Adect6)+(posdetx7*Adect7)+(posdetx8*Adect8)+(posdetx9*Adect9)+(posdetx10*Adect10)+(posdetx
11*Adect11)+(posdetx12*Adect12)+(posdetx13*Adect13)+(posdetx14*Adect14)+(posdetx15*Adect15)+(posdetx
16*Adect16);

abajotodos=(1.0)*(Adect1+Adect2+Adect3+Adect4+Adect5+Adect6+Adect7+Adect8+Adect9+Adect10+Adect11
+Adect12+Adect13+Adect14+Adect15+Adect16);

yarribatodos=(posdety1*Adect1)+(posdety2*Adect2)+(posdety3*Adect3)+(posdety4*Adect4)+(posdety5*Adect5)
+(posdety6*Adect6)+(posdety7*Adect7)+(posdety8*Adect8)+(posdety9*Adect9)+(posdety10*Adect10)+(posdety
11*Adect11)+(posdety12*Adect12)+(posdety13*Adect13)+(posdety14*Adect14)+(posdety15*Adect15)+(posdety
16*Adect16);

```

```

        xt= (xarribatodos/abajotodos);
        yt= (yarribatodos/abajotodos);

//      cout << " X " << xt <<endl;
//      cout << " Y " << yt <<endl;

        h1render18->Fill(xt);
        h2render18->Fill(yt);
        h3render18->Fill(xt,yt);

xtpeaks=0;
ytpeaks=0;

if ( ADetectorExt2>230 && ADetectorExt2<300 ) {

        count2+=1;

        xtpeaks= xt;
        ytpeaks= yt;

        h1peaksrender18->Fill(xtpeaks);
        h2peaksrender18->Fill(ytpeaks);
        h3peaksrender18->Fill(xtpeaks,ytpeaks);
}
}

render18->Fill();

}

cout << "The Number of Events is: " << count <<endl;
cout << "The Number of Events in the Peaks is: " << count2 <<endl;

fclose(out);

f->Write("",TObject::kOverwrite);

}

```