

Trabajo de Fin de Grado en Física

Caracterización del campo de visión de una cámara gamma de tipo Compton

JULIO 2019

Alumno: Santiago Mira Prats

Tutor (1): César Domingo Pardo Tutor (2): Juan de Dios Zornoza Gómez

Índice

Ał	ostract	1			
Re	esumen	1			
1.	Introducción	2			
2.	Sistema de detección i-TED 2.1. Detectores de radiación gamma de tipo Compton 2.2. Módulos de detección 2.3. Reconstrucción de la posición de interacción	5 5 7 9			
3.	Desarrollo experimental 3.1. Adquisición y tratamiento de los datos 3.2. Calibración energética del detector 3.3. Medida de la apertura angular y resolución espacial del detector	10 10 11 12			
4.	Resultados y análisis	14			
5.	Conclusiones	20			
6.	3. Conclusions				
Ac	Acknowledgements				
Re	Referencias				

Abstract

The present work has been carried out in the "Grupo de Espectroscopía Gamma y Neutrones" of the IFIC (Instituto de Física Corpuscular) of Valencia. This group is developing the i-TED detector in the framework of the European Research Council project HYMNS (High sensitivitY Measurements of key stellar Nucleo-Synthesis reactions). This detector is based on a Compton gamma camera wich is capable of producing images of the gamma-rays spatial distribution by means of electronic collimation. With such a type of detection system, the HYMNS project intends to improve the neutron capture cross-section measurements in the n-TOF facility at CERN. In the present work I have performed the characterization of the gamma camera central field of view in order to estimate its angular aperture and spatial resolution along it.

Resumen

El presente trabajo se ha realizado en el "Grupo de Espectroscopía Gamma y Neutrones" del IFIC (Instituto de Física Corpuscular) de Valencia. Este grupo está desarrollando el detector i-TED en el marco del proyecto del *European Research Council* HYMNS (High sensitivitY Measurements of key stellar Nucleo-Synthesis reactions). Este detector se basa en una cámara gamma de tipo Compton que es capaz de producir imágenes de la distribución espacial de los rayos gamma por medio de la colimación electrónica. Con este tipo de sistema de detección, el proyecto HYMNS tiene la intención de mejorar las mediciones de sección eficaz de captura neutrónica en las instalaciones n-TOF del CERN. En el presente trabajo he realizado la caracterización del campo de visión central de la cámara gamma con el fin de estimar su apertura angular y resolución espacial a lo largo del mismo.

1. Introducción

El origen de los elementos pesados en el universo es una de las grandes preguntas que la ciencia moderna aun no ha podido responder. En la actualidad tenemos evidencias de que los elementos pueden fusionarse en ambientes esteleres produciendo así elementos más pesados. Inicialmente, en el núcleo de las estrellas los átomos de hidrógeno se fusionan para formar átomos de helio generando así energía. Cuando se agota prácticamente todo el hidrógeno del núcleo, comienza a fusionarse el helio para producir elementos más pesados. Dependiendo de la masa inicial de la estrella se puede producir mediante este proceso elementos hasta el ⁵⁶Fe. Esto es, en parte, consecuencia de que la energía de enlace por nucleón de este núcleo es la más alta , como podemos observar en la Figura 1, y producir elementos más pesados a partir de este punto es energéticamente desfavorable mediante este proceso.



Figura 1: Gráfica en el que se muestra la energía de enlace por nucleón de distintos elementos de la tabla periódica. Destacar que se encuentra el máximo en el 56 Fe.[1]

Sin embargo, existen otros procesos diferentes al de fusión, que nos permiten superar esta barrera y alcanzar núcleos superiores. Estos procesos son la captura neutrónica y protónica. De cara a la nucleosíntesis estelar, los procesos de captura neutrónica son más importantes, puesto que son la vía de generación de casi todos los núclidos con masa atómicas superiores al 56 Fe. En estos procesos, el núclido capta un neutrón produciendo así un estado estable o inestable de mayor mása atómica. En lo referente a captura neutrónica, cabe diferenciar entre los procesos-s (*slow-process*) y los procesos-r (*rapid-process*), que se muestran en la Figura 2. En los procesos-r los núclidos inestables producidos tienen una tasa de captura neutrónica mayor que su tasa de desintegración, por lo cual a este proceso le precede una o varias capturas neutrónicas más. En los procesos-s pasa lo contrario, la tasa de desintegración vía beta es mayor que la de captura neutrónica y por tanto el núclido se desintegra sin darle tiempo a capturar otro neutrón. El proyecto HYMNS centra su interés en el estudio de los procesos-s.



Figura 2: Sección de la carta de núclidos. En negro se muestran los núclidos estables. Las líneas rojas representan el camino seguido por los procesos-r y las verdes, los procesos-s. En amarillo están recuadradas las zonas de interés en HYMNS.[2]

Como hemos mencionado anteriormente, en los procesos objetos de estudio, un núcleo estable capta un neutrón convirtiendose en un núcleo inestable, y posteriormente decaerá desintegrandose vía emisión de una partícula beta en otro núcleo. Este proceso está esquematizado en la Figura 3. El número de rayos gamma emitidos, así como la energía de estos, dependerá del nivel energético poblado, que a su vez dependerá de la energía de los neutrones absorbidos.



Figura 3: Esquema gráfico del proceso de captura neutrónica seguido de una posterior desintegración β .[3]

El estudio de estos procesos se realiza en las instalaciones n-TOF del CERN, debido a la gran luminosidad que ofrecen de neutrones en el rango energético de interés. En las instalaciones de n-TOF se hace impactar un haz de protones sobre un bloque de Pb, produciendo neutrones por reacciones de espalación¹. Estos neutrones producidos colisionan con la muestra objeto de estudio, provocando así procesos de captura neutrónica. Cuando estos procesos tienen lugar, la muestra

 $^{^{1}}$ La espalación es el proceso en el cual un núcleo pesado emite un gran número de neutrones al ser golpeado por una partícula altamente energética

emite radiación gamma mensurable. Podemos relacionar los tiempos de vuelo de los neutrones con las energías de estos (los neutrones más energéticos alcanzarán antes la muestra y los menos energéticos tardarán más). Conocida la distancia y midiendo el tiempo de vuelo podemos realizar la conversión. Así pues, conocidos los tiempos en los que se producen los neutrones, así como los tiempos de detección de los rayos gamma, podemos asociar los procesos de captura neutrónica a la interacción con neutrones a diferentes tiempos, y en definitiva a diferentes energías. En la Figura 4 se muestra un esquema del proceso que se lleva a cabo en las instalaciones del n-TOF.



Figura 4: Esquema gráfico en el que se representa las instalaciones n-TOF.

Durante el experimento se bombardea la muestra objeto del estudio con neutrones y se estudia la probabilidad de captura de neutrones en función de su energía. Para ciertas energías, de los neutrones, estos se capturan con mayor probabilidad. Estas energías se conocen como resonancias y nos permiten determinar la sección eficaz de proceso. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de un espectro de captura neutrónica obtenido para el ¹⁹⁷Au, el cual es un núcleo del que se conoce muy bien su espectro de captura neutrónica y se utiliza como referencia al tener una resonancia clara a 4.9 eV.



Figura 5: Espectro de captura neutrónica del $^{197}\mathrm{Au}.$ En él se aprecia claramente la resonancia en 4.9 eV.

En lo relativo a entornos estelares, existen algunos núclidos muy importantes en los que existen una ramificación, es decir, varios posibles canales de desintegración. Estos núcleos se conocen como *branching points* y determinan la abundancia de unos núcleos con respecto a otros. El objeto de estudio del proyecto HYMNS es el ⁷⁹Se, que es un *branching point* como se muestra en la Figura 2. Conocida la sección eficaz de captura neutrónica de este núcleo podemos saber las probabilidades de que este se desintegre en ⁷⁹Br emitiendo una partícula beta o que capture un neutrón y pase a ser ⁸⁰Se, y aplicar este conocimiento a modelos de simulación de ambientes estelares.

Convencionalmente, se han empleado sistemas de detección que solo nos permiten obtener la energía de la radiación gamma. No obstante, en el proceso de colisión del haz de neutrones con la muestra, algunos de los neutrones interaccionan con otros materiales produciendo radiación que enmascara la señal que se desea obtener. Si a esto se le añade que algunas de las muestras a estudiar presentan secciones eficaces muy bajas, las señales que se obtienen de la radiación están completamente eclipsadas por las señales de fondo. Para solucionar esta situación, se necesita un detector que sea capaz de discriminar la radiación proveniente de otras zonas que no correspondan a la muestra. Para ello, se podrían emplear detectores con capacidad de colimación, pudiendolos diferenciar entre los de colimación mecánica y de colimación electrónica. En la colimación mecánica se usan materiales pesados con una cierta geometría que solo permiten alcanzar el detector a aquellos rayos provenientes en una dirección. El problema de estos materiales es que producirián capturas neutrónicas adicionales que a su vez aumentarían el fondo de radiación gamma que se pretende reducir. En este marco se diseña el dispositivo i-TED, mostrado en la Figura 6. Este permite conocer la procedencia de la radiación medida, seleccionar los eventos provenientes de la muestra y desestimar los eventos producidos del fondo. En la siguiente sección veremos en profundidad los detalles del dispositivo i-TED.



Figura 6: Diseño conceptual del nuevo i-TED en el que podemos observar cuatro conjuntos de detectores de radiación gamma de tipo Compton rodeando una muestra.[4]

2. Sistema de detección i-TED

2.1. Detectores de radiación gamma de tipo Compton

Los detectores de radiación gamma de tipo Compton son un sistema de detección que nos permite conocer tanto la energía de los rayos gammas detectados como la procedencia espacial de estos sin la necesidad de utilizar la colimación mecánica. Tienen diversas aplicaciones tanto en física médica, para el diseño de sistemas médicos basados en Tomografía por Emisión de Positrones (PET), como en observatorios astrofísicos o en centrales nucleares. Vamos a describir en detalle la estructura y el funcionamiento de un detector Compton.

El funcionamiento de estos detectores se basa en el efecto Compton, que describe como un fotón produce una colisión elástica con un electrón de un núcleo. Este proceso de dispersión viene descrito por la siguiente expresión:

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_e c} \left(1 - \cos \theta \right) \tag{1}$$

donde la energía del fotón es $E = hc/\lambda$ y θ es el ángulo de dispersión, conocido como el ángulo Compton. Para aprovechar este efecto que sufre la radiación gamma, los detectores Compton constan de dos etapas de detección conocidas como *scatterer* y *absorber*, situadas una tras otra respectivamente. Reciben sus nombres debido a que se busca que la radiación se disperse en la primera etapa y luego se absorba completamente el rayo dispersado en la segunda etapa. Teniendo esto en cuenta se escogen los espesores de los detectores para maximizar la detección en ambos, siendo el de la primera etapa inferior. Con esta configuración mostrada en la Figura 7, obtendremos información de la energía depositada E_1 y E_2 en las diferentes estapas, respectivamente, y a su vez de la posición en la que interactuan. Empleando la ecuación 1 podemos desarrollar la siguiente expresión

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$
(2)

que nos permita obtener el ángulo Compton, y en definitiva la procedencia del rayo gamma. No obstante, este ángulo únicamente nos describe como la muestra puede estar contenida en la superficie de un cono y, por tanto, con un único evento no podemos obtener el origen del rayo gamma. Con la detección de varios eventos obtendremos diferentes conos, cuyas superficies interseccionarán en mayor medida en el foco emisor de radiación gamma.



Figura 7: Esquema gráfico del detector empleado y reconstrucción de la dirección de proveniencia de la radiación γ .

En la Figura 7 se ha representado la reconstrucción ideal de un evento en el que conocemos con total exactitud tanto la energía depositada como la posición de interacción. No obstante, en el modelo real del dispositivo tenemos que tener en cuenta las diferentes incertidumbres en estas magnitudes. Como podemos observar en la Figura 8 las incertidumbres en la posición de interacción se traducen en un cambio de eje de interacción que pasa a estar indeterminado en un volumen mayor, mientras que las incertidumbres en la energía depositada producen variaciones en el ángulo Compton. Con la variación del ángulo Compton se genera un volumen en el cual la trayectoria del rayo gamma del evento esta contenida.



Figura 8: Representaciones gráficas de las variaciones producidas debido a las incertidumbres en la posición de interacción (derecha) y la energía depositada (izquierda).

El método de reconstrucción de la imagen que hemos empleado es conocido como Back-Projection. El algoritmo escogido para el desarrollo computacional de la reconstrucción viene descrito en la referencia [6]. Si bien no es el método más sofisticado, ya que existen otros como el MLEM[7] (Maximum Likelyhood Expectation Maximitation) o el SOE[8] (Stochastic Origin Ensemble) que pueden llegar a proporcionar mejores imágenes, es el elegido por varios motivos. El primero es que nos permite interpretar las variaciones entre distintos resultados obtenidos directamente con los posibles fenómenos físicos que generan estan variaciones. El segundo es que se pueden identificar posibles funcionamientos insuficientes del detector que con otros modelos pasarían desapercibidos y se enmascararían en la reconstrucción. El último motivo está relacionado con el objetivo final del sistema. La finalidad del detector es poder discernir entre los eventos procedentes de la fuente de estudio y aquellos que proceden del entorno y contribuyen al ruido. Por tanto, el método de Back-Projection nos genera por cada evento una superficie cónica, y si esta superficie no intersecta con la posición donde situamos la fuente se descarta el evento.

2.2. Módulos de detección

El prototipo i-TED5.3. empleado en nuestro experimento en el laboratorio consta de un *scatterer* y dos *absorbers*. Los *absorbers* están apilados en el eje vertical, como se muestra en la Figura 9 a), de manera que esperamos obtener una mayor resolución en el eje vertical del detector. El futuro prototipo, i-TED5.5 mostrado en la Figura 9 b), constará de cuatro *absorbers* para tener una resolución simétrica entre los ejes vertical y horizontal. Cada módulo consta de un cristal centelleador y un fotomultiplicador pixelado de silicio (SiPM), mostrados en la Figura 10.



Figura 9: A la izquierda se muestra un esquema de los componentes que conforman el dispositivo i-TED5.3. y a la derecha los del dispositivo i-TED5.5. El *scatterer* está situado delante, en la primera etapa, para ambos y detrás se situan los *absorbers*. En color gris claro están respresentados los cristales centelleadores y en color verde los SiPM.

Los cristales de centelleo empleados son inorgánicos y están compuestos de LaCl₃ dopados con Ce. Se emplean estos cristales debido a la gran cantidad de fotones que generan por cada rayo gamma que interacciona, y que permiten mejorar la resolución energética de los cristales. Los fotones de centelleo que produce provienen de sus propiedades electrónicas. Cuando un rayo gamma interacciona en el cristal depositando parte de su energía excita electrones situados en la capa de valencia que promocionan a la capa de conducción, dejando así huecos. Estos huecos son ocupados tras la desexcitación de electrones de la capa de conducción, y en este proceso se emiten fotones cuya longitud de onda viene determinada por el cristal empleado. En la Figura 10 podemos ver como este cristal tiene un recubrimiento. Este es un encapsulado reflectante que se emplea con el fin de evitar pérdidas de fotones de centelleo, aumentando así la resolución del dispositivo.



Figura 10: Fotografía de un cristal 20 mm de grosor de $LaCl_3(Ce)$ junto con un SiPM de 8 x 8 píxeles.

Los fotomultiplicadores transforman la luz de centelleo en pulsos de luz. En i-TED se usan fotomultiplicadores pixelados de silicio (SiPM) de $50x50 \text{ mm}^2$ de superficie divididos en 8x8 pixeles de 6x6 mm² cada uno. Estos píxeles están formados por 22000 microceldas, siendo cada una de ellas un diodo de avalancha. Cuando llega un fotón capaz de promocionar un electrón de la banda

de valencia a la de conducción, se genera un hueco en la primera banda mencionada. El electrón en la capa de conducción y el hueco en la de valencia ya pueden moverse con libertad, y si se les aplica un campo eléctrico obtenemos una corriente. Además, en estos diodos se acelera lo suficiente el par electrón-hueco como para generar más pares y así amplificar la respuesta eléctrica de foto-sensor.

Al emplear fotomultiplicadores tenemos un gran cantidad de señales de salida, 64 señales por módulo. Para procesarlas y transformarlas en señales digitales empleamos una electrónica digital de lectura. La electrónica empleada (PETSyS Electronics[11]) se encarga de la lectura y digitalización de las señales procedentes de cada uno de los 64 píxeles, y posteriormente se envía a un PC vía ethernet. Para mantener la temperatura de la electrónica, y así proporcionar un correcto funcionamiento de esta, se emplean módulos Peltier acoplados a disipadores de calor.

2.3. Reconstrucción de la posición de interacción

Gracias a la pixelación del fotomultiplicador obtendremos, para cada evento, un número de fotones registrados en cada pixel como se muestra en la Figura 11, lo cual nos permitirá reconstruir la posición de interacción del rayo gamma. No obstante, para obtener una posición fiable del punto de interacción necesitamos tener en cuenta los posibles factores físicos que se desenvuelven en los cristales. Para ello empleamos un modelo que describe la distribución de los fotones en los cristales centelleadores desarrollado por Zhi Li et al.[9].

Como hemos mencionado en la sección 2.2. los cristales centelleadores están recubirtos con una capa reflectante. Esta capa provocará que los fotones de centelleo no escapen del cristal, no obstante la modelización de la distribución de los fotones pasa a ser más compleja de describir. En el modelo de Li se tienen en cuenta los fotones reflectados como si se tratasen de fuentes de luz virtuales en una posición simétrica al otro lado del cristal. También se consideran las posibles absorciones en el cristal. La función respuesta obtenida, que indica el número de fotones ópticos recogidos en un píxel, es

$$f = A_0 \cdot \Omega \cdot \sigma(\theta_c - \theta) = A_0 \cdot \frac{z}{\left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2 \right)^{3/2}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot (\theta_c - \theta)}}$$
(3)

donde

$$\theta = \arctan\left[\frac{\sqrt{\left(\left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{i}\right)^{2} + \left(\left(\mathbf{y} - \mathbf{y}_{i}\right)^{2}\right)}}{\mathbf{z}}\right]$$
(4)

es el angulo formado entre la trayectoria del haz de luz y la dirección normal a la superficie donde se encuentra la SiPM. El ángulo θ_c es el ángulo crítico entre el medio del cristal y la superficie inferior. En esta ecuación Ω es el ángulo sólido sustendido por cada píxel, A₀ es una constante que representa la cantidad total de fotones de centelleo producidos y σ es un factor que elimina la aportación de aquellos fotones que acaban reflejandose en la superficie inferior.

Este modelo presenta dos grandes ventajas respecto a otros más sencillos. Principalmente cabe destacar que nos permite obtener una resolución de la posición de interacción en el plano del SiPM mayor que la propia resolución de los pixeles, y en segundo lugar también permite caracterizar la profundidad de interacción en el cristal. Con ello, ajustamos cada evento a la función de Li, consiguiendo así caracterizar la posición (x,y,z) de interacción. En la Figura 11 se muestra un ejemplo del resultado del ajuste de la fórmula analítica 3 a un evento. Este modelo ajustado a nuestro sistema nos proporciona una resolución espacial de aproximadamente 1 mm FWHM[10].



Figura 11: Evento detectado en un SiPM en el que se muestra la distribución de carga asociado a la posición de interacción y la energía del evento. Sobre el evento se muestra en rojo el ajuste al modelo de Li.

3. Desarrollo experimental

3.1. Adquisición y tratamiento de los datos

Al realizar una medida de la radiación emitida por una muestra radiactiva se obtienen una cantidad considerable de datos por parte de los distintos detectores. Una tarea importante es realizar una criba de los datos para tratar únicamente aquellos que sean de nuestro interés. Para ello, se buscarán eventos en coincidencia entre el *scatterer* y cualquiera de los *absorbers*. En el proceso de obtención de los eventos, el programa guarda la información tanto de la carga registrada en cada píxel, proporcional al número de fotones de centelleo, como de los tiempos de detección. En el proceso de generación de eventos se agrupan las respuestas de los distintos píxeles comparando los tiempos relativos de disparo de cada uno. De esta manera se define un tiempo límite que determina la agrupación de eventos que pasen por ambas estapas de detección. Para ello, se comparan los tiempos de cada evento entre el *scatterer* y cada uno de los *absorbers*, buscando aquellos que tengan mayor coincidencia temporal, con un margen de 10 ns.

Por último, tras obtener los eventos en coincidencia, seleccionamos únicamente aquellos eventos en los que se haya depositado toda la energía de los rayos gamma. Para la muestra empleada de ²²Na el proceso de desintegración se generan dos fotones de 511 keV², luego escogeremos una ventana de eventos alrededor de esta energía en el espectro suma de ambos detectores que han registrado la coincidencia. Se escogen estos eventos puesto que se busca que los rayos gamma se absorban completamente en la segunda etapa y poder emplear la reconstrucción mediante el método de *Back-Projection*.



Figura 12: Histograma de coincidencias para una muestra de 22 Na en la que se muestra la resolución energética. Se muestra en color rojo un ajuste gaussiano a la ventana de eventos que seleccionamos para la reconstrucción de la imagen Compton.

Como se ha mencionado anteriormente en la sección 2.1. la resolución energética genera variaciones en la obtención del ángulo Compton, y por ello buscamos una resolución que introduzca la menor incertidumbre posible. Como se muestra en la Figura 12, se obtiene con i-TED5.3. una resolución energética de aproximadamente un 9% *FWHM*.

3.2. Calibración energética del detector

Tras obtener los eventos en coincidencia obtenemos un histograma en el que podemos ver el número de rayos gamma detectados en función de su energía. Puesto que nuestro interés reside en el conocimiento preciso de la energía depositada, se realiza un proceso de calibración energética que cubra el rango energético de interés. Para ello, se emplea una muestra radiactiva de ¹⁵²Eu del que conocemos con precisión las energías de los rayos gamma que emiten. Cuando obtenemos un histograma, comparamos los canales en los que se situan los fotopicos con la energía correspondiente a cada uno y se realiza un ajuste cúbico (que se ha demostrado experimentalmente que proporciona mejores resultados en los límites de energías altas y bajas empleados). El programa que se emplea para analizar los datos recogidos tiene una sección de código dedicada a encontrar los fotopicos en canales, como se muestra en la Figura 13, para luego realizar un ajuste gaussiano que nos permita obtener su centroide, es decir, la posición del canal con máximo en el fotopico. No obstante, los histogramas presentan alteraciones estadísticas que en ocasiones dificultan la tarea de encontrar los fotopicos. Para solucionar estos posibles inconvenientes podemos variar la relación entre los picos más altos y bajos del histograma que el programa emplea para la busqueda o se pueden ajustar los picos por inspección directa.

²El ²²Na se desintegra vía β^+ emitiendo un positrón. Cuando este positrón interacciona con un electrón del medio se aniquilan emitiendo dos fotones con la energía propia de la masa del electrón, 511 keV.



Figura 13: Histogramas obtenidos de cuentas en función de los canales, para los módulos *scatterer* y los dos *absorbers* respectivamente, en el que se puede observar unas líneas verticales rojas, que son los puntos que el programa señala como zona cercana a un fotopico.

Como podemos ver en la Figura 13 necesitaremos una calibración energética para cada detector, y esto se debe a que las características de cada uno de ellos puede variar (ganancia de los SiPM, características del crecimiento de los cristales, etc). La principal diferencia entre estos detectores es la anchura del cristal centelleador empleado, no obstante también hemos detectado alguna diferencia significativa entre los dos *absorbers*. Podemos observar en la Figura 13 como en el segundo *absorber* para canales superiores al canal 900 las cuentas registradas son casi de un orden de magnitud mayores que en el primero. Estas cuentas son debidas a la emisión de partículas alpha que se producen dentro del cristal centelleador y son características del lantano usado. No obstante, estas cuentas no nos molestan puesto que se encuentran fuera de la región energética de interés, y además al ser emisiones intrínsecas se descartan al realizar las coincidencias.

Tras realizar varias medidas de la radiación emitida por la misma muestra se pudo comprobar que aumentos en la temperatura afectan a los histogramas, y en consecuencia a los ajustes energéticos, de manera que desplazaba los fotopicos hacia canales mayores. Por ello, el detector se ha de conectar unos instantes anteriores a realizar las medidas para que se caliente y realice las diferentes medidas a una temperatura similar. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de un sistema de corrección de esta deriva térmica de manera que el espectro no se vea afectado.

3.3. Medida de la apertura angular y resolución espacial del detector

Los objetivos principales de los experimentos realizados son determinar el campo de visión y la apertura angular del detector i-TED5.3. Para ello, se realizan una serie de medidas con el fin de obtener una imagen Compton situando la muestra en distintas posiciones sobre el mismo plano. La configuración que se empleará para realizar las diferentes medidas se muestra en la Figura 14. Se colocará una muestra de ²²Na radioactiva en frente del detector y se moverá a lo largo de los ejes vertical y horizontal.



Figura 14: Configuración empleada en la que se muestran las distintas posiciones en las que se coloca la muestra y las posiciones relativas entre los módulos detectores y el plano de detección.

A continuación, en la Figura 15 mostramos una imagen del detector i-TED5.3., un prototipo que consta de tres módulos de detección, un *scatterer* y dos *absorbers* apilados en el eje Y del sistema como se menciono en la sección 2.2.



Figura 15: Fotografía del detector iTED5.3. donde se muestran las diferentes partes que lo constituyen.

Antes de proceder con la obtención de los archivos a examinar se realizaron una serie de pruebas preliminares. Debido a que se buscaba un mayor control sobre la posición de la muestra, inicialmente se pretendio emplear como plano de prueba, donde colocar las muestras radioactivas, una mampara de plomo. Antes de realizar todas las medidas necesarias se realizó una medida para comprobar si el plomo de la mampara nos generaba eventos extra en los histógramas. La prueba consistía en medir los rayos gamma emitidos por una muestra de ¹⁵²Eu situandola en la pared y posteriormente en la mampara de plomo. Los resultados, mostrados en la Figura 16, muestran como en el *scatterer* aparece un pico para bajas energías cuando colocamos la muestra en la mampara de plomo. Este efecto se debe a que algunos rayos gamma interaccionan con el plomo perdiendo gran parte de su energía, rebotando y finalmente llegando al detector como eventos poco energéticos. Para evitar a este efecto se decide emplear como plano de la fuente la pared del laboratorio.



Figura 16: Histogramas que registran el número de cuentas generadas en función de la energía. El histograma en rojo se ha obtenido con la medida de una muestra sobre la mampara de plomo y el azul, sobre la pared.

Tras obtener la primera imagen Compton situando la muestra justo delante del *scatterer*, en la posición (x,y)=(0,0), se pudo observar en la reconstrucción un *offset* en el eje X de -50 mm. Tras comprobar la configuración del detector, la posición de los planos de detección y de la muestra, se volvieron a obtener las mismas desviaciones. Las causas de estas desviaciones puede ser un mínimo desalineamiento entre las etapas de detección. Se procedió a una corrección de ese *offset* en la generación de las distintas imágenes.

4. Resultados y análisis

Las imágenes obtenidas para las diferentes posiciones de la fuente radioactiva de ²²Na se muestran en las Figuras 17, 18 y 19. A la derecha de cada imagen Compton se muestra una proyección de las cuentas en un intervalo alrededor de la posición del máximo de la imagen. Se realiza un corte en esta proyección con fines de reducción de ruido, ya que si se proyectasen todas las cuentas estariamos sumando la aportación de aquellos conos que no pasan por la zona de interés.



Figura 17: Reconstrucción de la imagen Compton de la muestra radioactiva de 22 Na para la posicion (0,0). A la derecha, la proyección de las cuentas en los ejes X e Y.





Figura 18: De arriba a abajo, reconstrucciones de las imágenes Compton de la muestra radioactiva de 22 Na para las posiciones (-400,0), (-200,0), (200,0) y (400,0), respectivamente. A la derecha, la proyección de las cuentas en los ejes X e Y.





Figura 19: De arriba a abajo, reconstrucciones de las imágenes Compton de la muestra radioactiva de ²²Na para las posiciones (0,400), (0,200), (0,-200) y (0,-400), respectivamente. A la derecha, la proyección de las cuentas en los ejes X e Y.

A partir de las proyecciones de las imágenes, se realizan distintos ajustes funcionales para obtener la posición del máximo y la anchura de esta distribución en torno al máximo. En general, se ha probado como las distribuciones guardan cierta similitud con una doble gaussiana y es la aproximación que empleamos. Con la información de los máximos, representantes de la posición de la fuente, podemos obtener un mapa del campo de visión. Este campo de visión indica los límites a partir de los cuales el detector no puede discernir entre dos posiciones distintas. Los resultados se muestran en ángulos puesto que se suele emplear en mayor medida el concepto de campo de vision angular, independientemente de la distancia al plano de detección. Para realizar el cambio de posiciones en milímetros a ángulos basta con conocer la distancia al plano de detección d, de manera que con la siguiente ecuación

$$\theta = \arctan\left(\mathbf{x}/\mathbf{d}\right) \tag{5}$$

obtenemos los ángulos correspondientes. Los resultados se muestran en la Figura 20, donde podemos comprobar como, en general, a medida que nos alejamos del origen (0,0) la reconstrucción de la posición varía en mayor medida. Estas imágenes muestran varias diferencias entre las reconstrucciones obtenidas a lo largo del eje X e Y. En el eje Y las imágenes van sufriendo una compresión hacia el origen de manera que la reconstrucción nos proporciona una posición de la muestra más cercana al origen de lo que realmente está. Por otro lado, en el eje X se produce un corrimiento hacia posiciones más negativas. Este comportamiento puede deberse a un mínimo desalineamiento entre las dos estapas de detección, como ya vimos en la sección 3.3. que provoca que los eventos se desplacen sistemáticamente hacia la izquierda. Incluso empleando la corrección del *offset*, mencionado en la sección 3.3., este comportamiento no se corrige puesto que el error introducido varía según la posición de la muestra, aumentando para posiciones más alejadas. Por último, destacar que en ambos ejes la reconstrucción permite comprobar como el campo de visión es superior a los límites alcanzados por las medidas.



Figura 20: Campo de visión angular mostrado para los ejes X (azul) e Y (rojo). La línea negra discontinua representa la tendencia que tendría los valores de las reconstrucciones para un detector ideal.

$\theta_{x,real}$ (deg) θ	$\theta_{y,real} \ (deg)$	$\theta_{x,recons}$ (deg)	$\theta_{y,recons}$ (deg)	$\sigma_x \ (deg)$	$\sigma_y \; (\deg)$
0	0	2.9 ± 0.4	1.44 ± 0.18	21.0 ± 0.5	14.2 ± 0.3
39	0	36.3 ± 0.3	2.0 ± 0.3	14.4 ± 0.3	17.0 ± 0.4
58	0	50.5 ± 0.5	-0.8 ± 0.4	17.7 ± 0.7	18.8 ± 0.7
-39	0	-46.2 ± 0.5	1.6 ± 0.3	16.1 ± 0.7	19.2 ± 0.4
-58	0	-63.9 ± 1.4	2.5 ± 0.5	44 ± 2	20.0 ± 0.7
0	39	0.2 ± 0.7	37.6 ± 0.3	29.2 ± 1.4	13.4 ± 0.4
0	58	-1.8 ± 0.9	53.8 ± 1.4	37 ± 2	25.3 ± 1.1
0	-39	5.0 ± 0.5	-35.8 ± 0.3	28.2 ± 1.1	13.4 ± 0.3
0	-58	-2.7 ± 0.9	-53.1 ± 0.7	25 ± 2	27.1 ± 1.1

Tabla 1: Resultados de las resconstrucciones de los ángulos en los que se ha situado la muestra en comparación con los valores reales, junto con las resoluciones de las imágenes obtenidas en las direcciones horizontal (X) y vertical (Y).

A partir de las anchuras de las distribuciones realizamos una estimación de la resolución angular en cada posición. Las diferencias entre la resolución a lo largo de los dos ejes X e Y se debe principalmente a la no simetría del detector que se ha empleado. Al tener únicamente dos *absorbers* apilados en el eje Y, como se muestra en la Figura 9, se mejora la resolución en esta dirección, mientras que la horizontal es significativamente peor. Esta diferencia entre las resoluciones se puede observar en la Figura 21 y en la Tabla 1, donde obtenemos sistemáticamente mejores resultados en el eje Y.



Figura 21: Resolución angular obtenida para las diferentes imágenes reconstruidas a la largo del eje X (azul) e Y (rojo).

Es interesante comprobar como para un cierto rango de ángulos la resolución llega a aumentar respecto a la del origen. Estos resultados concuerdan con un previo análisis de la resolución angular[12]. En este estudio se estimó, para una resolucion espacial de 1 mm y energética de un 6,5%, la resolución angular que se muestra en la Figura 22. En esta figura observamos como para ángulos comprendidos entre 20° y 60° la resolución angular presenta un máximo. Estas predicciones son comparables con los resultados obtenidos en la Figura 21, puesto que los parámetros de la resolución espacial y energética empleados son bastante similares a los experimentales. Experimentalmente observamos una mayor resolución para ángulos que rondan los 40° aproximadamente y como esta resolución decae conforme tratamos ángulos mayores.



Figura 22: Resolución angular predicha para valores de resolucion espacial de 1 mm y energética de un 6,5%.[12]

5. Conclusiones

Se han obtenido imágenes Compton para distintas posiciones a lo largo de los ejes X e Y para una profundidad (z) conocida. Estas medidas han permitido caracterizar tanto el campo de visión angular como la resolución angular del detector empleado. Las resoluciones obtenidas en el origen son de 21° y 14° en los ejes X e Y respectivamente. Los resultados obtenidos están en concordancia tanto con las predicciones de las simuaciones como con los resultados obtenidos previamente.

En un futuro se repetirá la medida y caracterización del campo de visión considerando un mayor número de posiciones. El siguiente prototipo consiste en formar un detector con cuatro *absorbers* en el segundo plano de detección, de modo que se mejore tanto la resolución angular en el eje horizontal del detector como la reconstrucción de las imágenes generadas. Así pues, las asimetrías observadas con el actual sistema deberán desaparecer. Además, en un futuro se pretende implementar métodos de reconstrucción de la imagen más avanzados que nos proporcionen mejores resoluciones y permitan ampliar el campo de visión útil del sistema de detección. Por tanto, los resultados obtenidos en este experimento nos sirven para estimar la cota superior de estos parámetros.

6. Conclusions

Compton images have been obtained for different positions along the X and Y axes for a known depth (z). These measurements have allowed to characterize both the angular field of view and the angular resolution of the detector used. The resolutions obtained at the origin are 21° and 14° on the X and Y axes respectively. The results obtained are in line with both the predictions of the simulations and the results obtained previously.

In the future, the measurement and characterization of the field of view will be repeated considering a greater number of positions. The next prototype will mount four absorbers, so that both the angular resolution on the horizontal axis of the detector and the reconstruction of the generated images will be improved. Thus, the asymmetries observed with the current system should disappear. Also, it is intended to implement more advanced image reconstruction methods to allow the achievement of better resolutions and expand the useful field of view of the detection system. Therefore, the results obtained in this experiment serve us to estimate the upper limit of these parameters.

Acknowledgements

This work has received funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and the innovation programme (ERC Consolidator Grant Project HYMNS, with grant agreement nr. 681740).

Referencias

- [1] Comunicación privada.
- [2] Disponible online: "https://people.physics.anu.edu.au/~ecs103/chart/". Consultado el 26/06/2019.
- [3] Disponible online: "http://www.iki.kfki.hu/nuclear/research/index_en.shtml". Consultado el 15/06/2019.
- [4] C. Domingo Pardo, "i-TED: A novel concept for high-sensitivity (n,γ) cross-sectionmeasurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 825, 2016 pp. 78-86.
- [5] L. J. Schultz, M. S. Wallace, et. al, "Hybrid coded aperture and Compton imaging using an active mask", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 608, 2009 pp. 267-274.
- [6] Scott J. Wilderman, W. Les Rogers, et al., "Fast Algorithm for List Mode Back-Projection of Compton Scatter Camera Data", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 45, No. 3, 1998 pp. 957-961.
- [7] L. J. Schultz, M. S. Wallace, et. al, "Hybrid coded aperture and Compton imaging using an active mask", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 608, 2009 pp. 267-274.

- [8] Andriy Andreyev, Arkadiusz Sitek, et. al, "Fast image reconstruction for Compton camera using stochastic origin ensemble approach", *Medical Physics, vol. 38, No. 1, 2009* pp. 429-438.
- [9] Zhi Li, M Wedrowski, et. al, "Nonlinear least-squares modeling of 3D interaction position in a monolithic scintillator block", *Physics in Medicine and Biology, vol. 55, 2010* pp. 6515-6532.
- [10] V. Babiano, L. Caballero et. al, "γ-Ray position reconstruction in large monolithic LaCl₃(Ce) crystals with SiPM readout", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 931, 2019* pp. 1-22.
- [11] Disponible online: "http://www.petsyselectronics.com/web/". Consultado el 17/06/2019.
- [12] V. Babiano, L. Caballero et. al, "First i-TED demonstrator: A compact and high-efficiency Compton camera", in progress.