

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 783 173**

21 Número de solicitud: 201930239

51 Int. Cl.:

**G01T 1/24** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**14.03.2019**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**16.09.2020**

71 Solicitantes:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
(50.0%)**

**Camino de Vera s/n  
46022 Valencia ES y  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**BENLLOCH BAVIERA, José María;  
ILISIE, Victor;  
GIMÉNEZ ALVENTOSA, Vicent;  
SÁNCHEZ MARTÍNEZ, Filomeno y  
GONZÁLEZ MARTÍNEZ, Antonio Javier**

74 Agente/Representante:

**ESCUADERO PRIETO, Nicolás**

54 Título: **MÉTODO Y DISPOSITIVO PARA LA DETECCIÓN DE RAYOS GAMMA CON CAPACIDAD DE DETERMINACIÓN DE INTERACCIONES MÚLTIPLES Y DE SU SECUENCIA DE TIEMPO CORRESPONDIENTE**

**ES 2 783 173 A1**

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 783 173**

21 Número de solicitud: 201930239

57 Resúmen:

Método y dispositivo para la detección de rayos gamma con capacidad de determinación de interacciones múltiples y de su secuencia de tiempo correspondiente.

La presente invención se refiere a un método para la detección de rayos gamma con capacidad de determinación de interacciones múltiples y de su secuencia de tiempo correspondiente, que comprende el uso de un dispositivo que comprende: uno o más medios de detección de la carga de energía  $q_{\text{sub},i}$  depositada sobre las coordenadas  $(x, y, z)$  de un elemento detector y del instante temporal  $t_{\text{sub},i}$  correspondiente a la detección de dicha deposición; medios electrónicos de lectura y adquisición de datos conectados a los medios de detección del dispositivo, estando dichos medios electrónicos configurados para capturar, digitalizar y transmitir las señales de detección del dispositivo; y al menos a una unidad de procesamiento conectada a los medios electrónicos, configurada con medios software y/o hardware para el registro y/o procesamiento de los datos generados por los medios electrónicos de lectura y adquisición de datos.

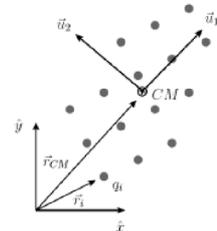


FIG. 1

**DESCRIPCIÓN**

**MÉTODO Y DISPOSITIVO PARA LA DETECCIÓN DE RAYOS GAMMA CON CAPACIDAD DE DETERMINACIÓN DE INTERACCIONES MÚLTIPLES Y DE SU SECUENCIA DE TIEMPO CORRESPONDIENTE**

**CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención se enmarca dentro del campo de la formación de imágenes mediante rayos gamma. Más concretamente, la invención se refiere al diseño de dispositivos capaces de detectar radiación gamma y obtener información de la misma, tales como dispositivos médicos utilizados en imágenes nucleares, como por ejemplo los equipos de tomografía por emisión de positrones (PET), tanto para fines médicos de diagnóstico como para el control de dosis durante los procesos de irradiación, así como telescopios de rayos gamma astrofísicos (por ejemplo, telescopios Compton) u otras aplicaciones técnicas, tales como los procesos de control en el desmantelamiento de centrales nucleares y/o de seguridad nacional.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Las cámaras Compton son ampliamente utilizadas en la actualidad, por ejemplo en el campo de la astronomía, de la astrofísica o de la medicina nuclear. No obstante, si bien dichas cámaras pueden llegar a tener una resolución de energía muy alta, poseen una importante limitación en cuanto a la resolución temporal de los eventos detectados. Ello hace que, en estos sistemas, no sea posible determinar con exactitud la secuencia de tiempo de diferentes eventos de dispersión de los rayos gamma entrantes en las citadas cámaras. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el hecho de que los dispositivos de detección conocidos se basan en configuraciones de tipo multicapa o en detectores de bloques pixelados, pero ninguno de ellos contempla la posibilidad de usar detectores formados por bloques monolíticos compactos, con la capacidad de reconocer varias interacciones Compton, reconstruyendo sus coordenadas de impacto, energías y secuencias de tiempo.

Una propuesta para mejorar en este sentido los sistemas conocidos se describe en la solicitud de patente WO 2016/185123 A1. Sin embargo, el método de reconstrucción divulgado en dicho documento es, en la práctica, difícil de implementar experimentalmente. Ello se debe a que el citado método se basa, esencialmente, en

aplicar una serie de aproximaciones geométricas que resultan difíciles de generalizar a un detector arbitrario. Por tanto, el método descrito sólo funciona en unos tipos de detectores muy concretos, y con una resolución limitada.

- 5 Por otra parte, existen también otros métodos de reconstrucción temporal de eventos en detectores gamma basados en el cálculo del tiempo de vuelo de los mismos, como por ejemplo el método descrito en la solicitud de patente WO 2017/077164 A1. Para ello, los detectores que implementan dicho método están configurados para medir posiciones de interacción tridimensionales en el detector, y la energía depositada en dichas posiciones.
- 10 No obstante, estos métodos tienen la limitación de que, para poder calcular el tiempo de vuelo de los rayos gamma, los detectores utilizados han de tener obligatoriamente una estructura de capas, lo que supone una complejidad añadida al detector, que implica mayores tiempos y costes de fabricación, así como un mayor riesgo de pérdida de precisión.

15

- A la luz de las limitaciones anteriores del estado de la técnica, resulta necesario en el presente campo técnico desarrollar nuevos métodos de detección de rayos gamma que permitan resolver temporalmente los eventos de interacción asociados a los mismos y que, al mismo tiempo, sean utilizables en cualquier estructura de detector, no estando por tanto restringidos a detectores con estructuras de capas. La presente invención plantea una solución a dicha necesidad, mediante un novedoso método para la detección de rayos gamma con capacidad de determinación de interacciones múltiples y de su secuencia de tiempo correspondiente, y de un dispositivo de detección de rayos gamma que implementa dicho método.

25

### **DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INVENCIÓN**

- Según lo descrito en los párrafos precedentes, un primer objeto de la invención se refiere a un método para la detección de rayos gamma con capacidad de determinación de interacciones múltiples y de su secuencia de tiempo correspondiente, que comprende el uso de un dispositivo que, a su vez, comprende:

- 30 - uno o más medios de detección de la carga de energía  $q_i$  depositada sobre las coordenadas (x, y, z) de un elemento detector y del instante temporal  $t_i$  correspondiente a la detección de dicha deposición;
- 35 - medios electrónicos de lectura y adquisición de datos conectados a los medios de detección del dispositivo, estando dichos medios electrónicos configurados para capturar, digitalizar y transmitir las señales de detección del dispositivo; y

- al menos una unidad de procesamiento conectada a los medios electrónicos, configurada con medios software y/o hardware para el registro y/o procesamiento de los datos generados por los medios electrónicos de lectura y adquisición de datos.

5 Ventajosamente, el método de detección de la invención comprende la realización de, preferentemente, los siguientes pasos:

- se calcula el centro de masas de los valores de las cargas depositadas  $q_i$  y/o de las cargas divididas por su sello de tiempo,  $q_i/t_i$ , respecto a las coordenadas (x, y, z) del elemento detector;

10 - se calcula el tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  con respecto al centro de masas de la carga;

- se diagonaliza la matriz correspondiente al tensor de inercia, para extraer sus autovectores, determinando los ejes de simetría de dicha matriz;

- se proyectan los valores de carga  $q_i$  (o  $q_i/t_i$ ) detectados sobre los ejes definidos por los autovectores;

15 - alternativamente se pueden usar distribuciones  $q_i^M / t_i^N$ , donde M y N son dos números naturales que representan la potencia a la que se eleva el valor de la carga y el valor del sello temporal, para hacer que el pico de la distribución sea más apreciable;

- se determina el número de interacciones sufridas por cada rayo gamma en el dispositivo de detección, y sus coordenadas (x, y, z) y tiempos  $t_i$  correspondientes, a

20 partir de la proyección de las cargas  $q_i$  (o  $q_i/t_i$ ) calculada en el paso anterior, identificando una interacción con un máximo en la función de dicha proyección representada en cada eje correspondiente a cada autovector.

En una realización preferente de la invención, la proyección de las cargas  $q_i$  se ajusta  
25 numéricamente a una función matemática, estimándose las coordenadas (x, y, z) y/o la energía depositada correspondiente a partir de las propiedades de dicha función. Más preferentemente, la función matemática es una distribución de tipo gaussiano.

En otra realización preferente de la invención, el método de detección comprende  
30 adicionalmente la determinación de la profundidad de interacción (DOI) de los rayos gamma, a partir de la dispersión de la distribución de carga de energía  $q_i$  en las proyecciones obtenidas en los ejes de autovectores.

En otra realización preferente de la invención, una vez determinado el número de  
35 interacciones sufrido por cada rayo gamma, se establece su secuencia temporal a partir de las coordenadas (x, y, z) de dichas interacciones, de los tiempos de detección  $t_i$  y de la determinación de la velocidad de los rayos gamma y/o de los fotones ópticos propagados

en el elemento detector, obtenida a partir de la velocidad de la luz en el vacío  $c$  y del índice de refracción  $n$  de dicho elemento detector.

Un segundo objeto de la presente invención se refiere a un dispositivo de detección de rayos gamma que comprende, preferentemente:

- uno o más medios de detección de la carga de energía  $q_i$  depositada sobre las coordenadas  $(x, y, z)$  de un elemento detector y del instante temporal  $t_i$  correspondiente a la detección de dicha deposición;
- medios electrónicos de lectura y adquisición de datos conectados a los medios de detección del dispositivo, estando dichos medios electrónicos configurados para capturar, digitalizar y transmitir las señales de detección del dispositivo; y
- al menos a una unidad de procesamiento conectada a los medios electrónicos.

Ventajosamente, la unidad de procesamiento del dispositivo comprende medios software y/o hardware para el registro y/o procesamiento de los datos generados por los medios electrónicos de lectura y adquisición de datos, configurados para la realización de un método según cualquiera de las realizaciones descritas en el presente documento.

En una realización preferente de la invención, el elemento detector de los rayos gamma comprende uno o más centelleadores pixelados o monolíticos, uno o más detectores de estado sólido o uno o más detectores de radiación de Cherenkov, aislados o en combinación.

Más preferentemente, el elemento detector de estado sólido comprende semiconductores de Si, Ge, CdTe, GaAs, PbI<sub>2</sub>, HgI<sub>2</sub>, CZT o HgCdTe, y/o los detectores Cherenkov comprenden PbF<sub>2</sub>, NaBi (WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, PbWO<sub>4</sub>, MgF<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>10</sub> o aerogel de sílice.

Más preferentemente, los elementos centelleadores comprenden centelleadores de cristales orgánicos o inorgánicos, centelleadores líquidos y/o centelleadores gaseosos. Y, aún más preferentemente:

- los centelleadores de cristales orgánicos comprenden antraceno, estilbeno y/o naftaleno;
- los centelleadores de cristales inorgánicos comprenden yoduro de cesio (CsI), yoduro de cesio dopado con talio (CsI (Tl)), germanato de bismuto (BGO), yoduro de sodio dopado con talio (NaI (Tl)), fluoruro de bario (BaF<sub>2</sub>), fluoruro de calcio dopado con europio (CaF<sub>2</sub>(Eu)), tungstato de cadmio (CdWO<sub>4</sub>), bromuro de lantano dopado con cerio (LaBr<sub>3</sub>(Ce)), silicatos de lutecio itria dopados con cerio (LuYSiOs(Ce)(YAG (Ce))), sulfuro

de cinc dopado con plata (ZnS(Ag)) o granito de itrio aluminio dopado con cerio (III)  $Y_3Al_5O_{12}$  (Ce), LYSO, CsF, KI(Tl),  $CaF_2$ (Eu),  $Gd_2SiO_5$ [Ce] (GSO), y/o LSO;

5 - los centelleadores líquidos comprenden p-terfenilo ( $C_{18}H_{14}$ ), 2-(4-bifenilil)-5-fenil-1,3,4-oxadiazol PBD ( $C_{20}H_{14}N_{2O}$ ), butilo PBD ( $C_{24}H_{22}N_{2O}$ ), PPO ( $C_{15}H_{11}NO$ ), disueltos en solventes tales como tolueno, xileno, benceno, fenilciclohexano, trietilbenceno o decalina; y

- los centelleadores gaseosos comprenden nitrógeno, helio, argón, criptón y/o xenón.

10 En otra realización preferente de la invención, el elemento detector comprende uno o más fotodetectores. Más preferentemente, dichos fotosensores comprenden matrices de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), diodos de avalancha de fotones individuales (SPAD), SiPM digitales, fotodiodos de avalancha, fotomultiplicadores sensibles a la posición, fotomultiplicadores, fototransistores, fotodiodos, foto-ICs, o combinaciones de los  
15 mismos.

En otra realización preferente de la invención, el elemento detector de los rayos gamma está acoplado a una o más superficies ópticamente reflectantes, siendo dichas superficies pulidas o rugosas, especulares, difusas, retro-reflectantes o mixtas.

20

Un tercer objeto de la invención se refiere al uso de un método o de un dispositivo según cualquiera de las realizaciones descritas en el presente documento, en un equipo médico de imagen nuclear y/o en un telescopio de rayos gamma.

25 Adicionalmente se proporciona, a continuación, un listado de definiciones de algunos de los términos empleados en la presente descripción:

- Nube de interacción: se refiere a una acumulación de todo tipo de interacciones de partículas (fotoeléctrica, Compton, Bremsstrahlung, Cherenkov,...) que presenta una  
30 magnitud mensurable, como por ejemplo la energía depositada, tiempo instantáneo, carga eléctrica, etc. Esta "nube de interacción" está formada por uno o más interacciones que estén lo suficientemente cerca, espacialmente y/o temporalmente, para que sean experimentalmente indistinguibles.

35 - Información espacial: se refiere a cualquier tipo de datos que son función de la dimensión espacial  $N$  ( $N \leq 3$ ), sean dichas dimensiones discretas o continuas, y de sus coordenadas (x, y, z).

- Material sensible: se refiere a cualquier material físico que interactúa con la radiación produciendo una magnitud física medible.
  
- 5 - Detector: se refiere a cualquier dispositivo con la capacidad de registrar cierta magnitud física (como información espacial y/o temporal y/o cualquier otra magnitud física) que corresponda a una o más nubes de interacción. La información espacial se puede obtener, por ejemplo, mediante el procesamiento de la distribución de la deposición de energía y/o de la distribución de sello de tiempo y/o la distribución de la carga eléctrica,  
10 etc. Estos detectores pueden estar formados por uno o más materiales sensibles, uno o más dispositivos de adquisición, y electrónica de lectura que extrae las señales del detector. Los términos “detector de partículas”, “detector”, “módulo detector” y “módulo de detección” se emplearán como sinónimos en la presente descripción.
  
- 15 - Evento: se define como el número total de interacciones que un solo rayo gamma incidente y sus partículas secundarias producen, hasta que su energía inicial se pierde total o parcialmente (depositándose, siendo absorbida, etc.).
  
- Los términos “superficie reflectante de la luz” y “superficie reflectante óptica” se  
20 consideran como sinónimos en la presente descripción.
  
- Orden temporal, secuencia temporal: son expresiones utilizadas indistintamente y se refieren al conocimiento de la información  $t' > t$  por ejemplo, donde  $t$  y  $t'$  son dos instantes de tiempo (o sellos de tiempo), siendo conocidos o no sus valores.  
25
- Dispositivo de adquisición: se refiere a un dispositivo utilizado para extraer una o más señales generadas en un detector, o en uno o más materiales sensibles.
  
- Carga (de energía): se refiere a la energía depositada en algún dispositivo de  
30 adquisición. En la presente descripción se utiliza el símbolo  $q_i$  para denotar la energía depositada en alguna región del dispositivo de adquisición, como por ejemplo en un píxel determinado de un fotodetector.
  
- Sello de tiempo: se refiere a la información de tiempo registrada por el dispositivo de  
35 adquisición, correspondiente a una interacción. Se utilizará el símbolo  $t_i$  para denotar dicho sello de tiempo.

- Dispositivo de detección: se refiere a un conjunto de detectores, que pueden ser independientes o no, con idéntica estructura o no, que trabajan conjuntamente.

5 - Matriz de datos: se refiere a la información extraída de la lectura de una o más dispositivos de adquisición de uno o más detectores. Esta información puede ser relativa a cualquier tipo de magnitud física medible, como energía, carga eléctrica, sello de tiempo, etc. Las lecturas pueden procesarse para combinar los datos adquiridos en una sola matriz, o más de una. Una matriz de datos puede ser una matriz de dimensión 1 o superior, en cualquier sistema de coordenadas.

10

### DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

15 Las anteriores y otras características y ventajas se comprenderán más plenamente a partir de la descripción detallada de la invención, así como de los ejemplos de realización preferente referidos a los dibujos adjuntos, en los que:

20 La Figura 1 muestra el centro de masas de una distribución discreta de cargas (energías) con respecto a un marco de referencia ortogonal arbitrario (x, y) y los autovectores ( $u_1$ ,  $u_2$ ) del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  (con respecto al centro de masas de la carga).

20

Las Figuras 2a-2b muestran las proyecciones sumadas y agrupadas de la distribución discreta de la carga sobre los autovectores ( $u_1$ ,  $u_2$ ) del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$ , respectivamente.

25 Las Figuras 3a-3b muestran las proyecciones sumadas y agrupadas de la distribución discreta de carga sobre los autovectores ( $u_1$ ,  $u_2$ ) del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$ , respectivamente, para un caso simulado (curvas de trazo discontinuo largo). Las curvas punteadas corresponden a curvas de ajuste de tipo gaussiano.

30 Las Figuras 4a-4c muestran las proyecciones sumadas y agrupadas de la distribución  $q_i/t_i$  sobre los autovectores del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM,q/t}$  (con respecto al centro de masas de la distribución  $q_i/t_i$ ) (Figura 4a), las proyecciones sumadas y agrupadas de la distribución  $q_i$  sobre uno de los autovectores del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM,q/t}$  (Figura 4b) y las proyecciones sumadas y agrupadas de la distribución  $q_i/t_i$  sobre uno de los autovectores del tensor de inercia de la carga  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  (Figura 4c), para un caso simulado (línea de trazo discontinuo largo). Las líneas punteadas se corresponden a las curvas de ajuste de tipo gaussiano.

35

- La Figura 5 muestra la distribución simulada de la carga (energía) para un fotodetector de SiPM digital de tipo Philips (con lectura de energía de  $8 \times 8$  y lectura de sello de tiempo de  $4 \times 4$ ) para un rayo gamma incidente que sufre una interacción Compton y una interacción fotoeléctrica (referidas como C y P, respectivamente). Las flechas negras son los autovectores del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  con respecto al centro de masas de carga, el círculo cruzado es el centro de masas de carga, y el círculo negro es el centro de masa de la distribución  $q_i/t_i$ . Las marcas "X" corresponden a las coordenadas de las dos interacciones reconstruidas con el método de la presente invención.
- La Figura 6 muestra la distribución simulada de carga (energía) para un posible fotodetector digital de SiPM (con  $18 \times 18$  de lectura tanto en energía como de sello de tiempo) para un rayo gamma incidente que sufre una interacción Compton y una interacción fotoeléctrica (referidas como C y P). Las flechas negras son los autovectores del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  con respecto al centro de masas de carga, el círculo cruzado es el centro de masas de carga, y el círculo negro (que en este caso se solapa con el círculo cruzado) es el centro de masa de la distribución  $q_i/t_i$ . Las marcas "X" corresponden a las coordenadas de las dos interacciones reconstruidas con el método de la presente invención.
- La Figura 7 muestra una representación de los fotones ópticos de centelleo más rápidos (1, 2) que viajan a velocidad  $c/n$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $n$  es el índice de refracción del material del detector. Dependiendo del ángulo  $\varphi$ , el fotón (1) o, por el contrario, el fotón (2) alcanzará primero el fotodetector, según se explica en la descripción detallada de la invención.
- La Figura 8 muestra la configuración más probable (dispersión hacia delante) para el caso de dispersión múltiple de rayos gamma incidentes. Usando la fórmula para el ángulo Compton, la energía depositada en la primera interacción Compton es pequeña en comparación con la energía incidente. Como el haz más rápido de fotones ópticos (los que alcanzan primero el fotodetector) se encuentran debajo de la interacción final (que se debe al efecto fotoeléctrico en el ejemplo de la figura), el centro de masas de la distribución  $q_i/t_i$  estará más cerca de la última interacción.
- La Figura 9 muestra la configuración más improbable (dispersión hacia atrás) para la dispersión múltiple de rayos gamma incidentes. Usando la fórmula para el ángulo Compton, la energía depositada en la primera interacción Compton representa una alta fracción de la energía incidente. Como el haz más rápido de los fotones ópticos se

encuentra debajo de la primera interacción (que es una dispersión Compton en el ejemplo de la figura), el centro de masas de la distribución  $q_i/t_i$  estará más cerca de la primera interacción.

- 5 La Figura 10 muestra una configuración probable para el caso de dispersión múltiple de un rayo gamma incidente donde las profundidades de interacción son similares. Como las energías depositadas también son similares, el centro de masas de la distribución  $q_i/t_i$  estará más cerca de la primera interacción, como en el caso de la Figura 9.

## 10 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN

Se expone, a continuación, una descripción detallada de la invención referida a diferentes realizaciones preferentes de la misma, basadas en las Figuras 1-10 del presente documento. Dicha descripción se aporta con fines ilustrativos, pero no limitativos, de la  
15 invención reivindicada.

Como se ha descrito en apartados precedentes, la presente invención se refiere a un dispositivo de detección de rayos gamma (apto para su uso, por ejemplo, en cámaras PET o Compton) que comprende uno o más detectores pixelados, monolíticos o  
20 formados por capas. En dichos detectores, los rayos gamma incidentes pueden dispersarse en su interior (dispersión Compton) y/o ser absorbidos por efecto fotoeléctrico. Tanto la dispersión Compton como el efecto fotoeléctrico, en el caso de los centelleadores, producen fotones de centelleo (fotones ópticos), típicamente del orden de miles por MeV, que se distribuyen uniformemente y de forma isótropa en un ángulo sólido  
25 de  $4\pi$  estereorradianes (distribución esférica). En este contexto, los fotodetectores pixelados del dispositivo de la invención están configurados para proporcionar la lectura electrónica de la información relativa a los fotones ópticos centelleados, incluyendo en dicha información, esencialmente, al menos la energía depositada en cada pixel (denominada dicha energía como "carga") y el instante temporal (o "sello de tiempo") en  
30 que se producen los eventos de centelleo. Al combinar la citada información sobre la energía depositada (carga) y la información de sello de tiempo en cada píxel, los detectores del dispositivo de la invención pueden determinar con precisión las coordenadas de múltiples interacciones Compton y/o de efecto fotoeléctrico. Por otra parte, utilizando la distribución de carga, los detectores también pueden calcular la  
35 profundidad de interacción (o DOI, del inglés "*depth of interaction*") de cada rayo gamma, así como estimar su energía depositada en cada impacto. Esta información combinada

puede ser utilizada para obtener cámaras PET y Compton mejoradas respecto a los sistemas conocidos del estado de la técnica.

Según lo descrito en las secciones anteriores, y gracias a los fotodetectores pixelados descritos (capaces de obtener información sobre la carga y el sello de tiempo de cada evento de interacción por cada rayo gamma), un primer objeto de la presente invención se refiere a un método para la detección de rayos gamma con capacidad de determinación de nubes de interacciones múltiples y de su secuencia de tiempo correspondiente. En dicho método, para un rayo gamma incidente, la salida de la lectura electrónica del detector pixelado se presenta, preferentemente, como dos matrices de datos, donde una de dichas matrices contiene la información sobre la energía (carga) depositada en cada píxel, y la otra contiene información sobre el sello de tiempo para cada interacción y píxel.

Como se ha mencionado, cada elemento de la matriz de carga corresponde a la energía depositada por los fotones ópticos en su píxel correspondiente. Como los fotones ópticos pueden ser considerados como monoenergéticos, la energía total correspondiente a un píxel vendrá dada por el número de fotones detectados por cada píxel. Por otra parte, la matriz que contiene los sellos de tiempo contendrá información sobre el instante de detección del primer fotón óptico detectado en un píxel, o un grupo de píxeles. Por lo tanto, la información generada por cada detector pixelado se puede considerar como una distribución de carga discreta, junto con una distribución de sello de tiempo, ambas bidimensionales (en el mapa de píxeles). Por tanto, las coordenadas vectoriales del centro de masa de carga  $r_{CM}$  de una distribución de cargas  $q_i$  (con  $i=1,\dots,N$ ) están dadas por la siguiente expresión:

$$\vec{r}_{CM} = \sum_i \frac{\vec{r}_i \cdot q_i}{q}, \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $q$  es la carga total  $q = \sum_i q_i$  y  $\vec{r} = (x, y)$ . Una vez obtenida la expresión del centro de masa, es posible calcular las componentes del tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  (que es una matriz de dimensión 2x2) de distribución discreta respecto a dicho centro de masas:

$$I_{\alpha\beta}^{CM} = \sum_i q_i \left( \delta_{\alpha\beta} \sum_{\gamma=1}^2 x_{\gamma,i}^2 - x'_{\alpha,i} x'_{\beta,i} \right), \quad (\text{Ec. 2})$$

donde  $\alpha, \beta = (1, 2)$ ,  $x'_{\alpha, i}$  es la coordenada  $x'_{\alpha}$  de la carga  $q_i$  (respecto a un sistema de referencia con origen en el centro de masa) y  $x'_1 = x'$  y  $x'_2 = y'$ . Diagonalizando la matriz anterior, se obtienen sus autovalores y autovectores correspondientes. Los autovectores del tensor de inercia,  $u_1$  y  $u_2$ , son ortogonales y se muestran esquemáticamente en la

5 Figura 1. Si la distribución de carga de los fotones de centelleo tiene un cierto grado de simetría (lo cual sucede habitualmente), entonces la proyección de la carga para un rayo gamma que sufre dispersión y posiblemente efecto fotoeléctrico, sobre los ejes definidos por los autovectores, se verá de forma similar a la representada esquemáticamente en las Figs. 2a-2b. Por lo tanto, a partir de esta proyección es posible identificar el número

10 de interacciones (nubes de interacción) y reconstruir sus coordenadas bidimensionales (2D).

No obstante, en función de los eventos a detectar, en un caso real es posible obtener proyecciones de menor calidad, necesiándose realizar un ajuste de los resultados de

15 lectura obtenidos. Un ejemplo de dicho tipo de ajuste se muestra en las Figs. 3a-3b para una simulación numérica, donde las líneas discontinuas de trazo más largo corresponden a la distribución de carga recogida, proyectada sobre los ejes designados por los autovectores, las líneas verticales son las coordenadas reales de las interacciones y las líneas de puntos (trazo más fino) corresponden a los ajustes numéricos a distribuciones

20 de tipo gaussiano:

$$G(x) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (\text{Ec. 3})$$

donde  $A$  es una constante de convergencia del ajuste,  $\mu$  es el valor medio del ajuste, y  $\sigma$

25 es la desviación estándar de la distribución. A partir del valor medio  $\mu$ , se pueden estimar las coordenadas 2D de las interacciones, y la constante  $A$  se puede usar para extraer la energía depositada para cada interacción (impacto).

Los ajustes anteriores se pueden mejorar aún más, utilizando la información de sello de

30 tiempo. En una realización posible del método de la invención, en lugar de usar sólo los sellos de tiempo de los fotones más rápidos es posible usar, en su lugar, la distribución completa de los mismos, por ejemplo mediante un parámetro correspondiente al cociente de la carga dividida por el tiempo,  $q_i/t_i$ , donde  $q_i$  es la carga depositada en un píxel  $i$ , y  $t_i$  es el sello de tiempo correspondiente a dicho píxel. Ello permite contemplar

35 expresamente la distribución de carga en las regiones donde los fotones ópticos alcanzan

primero el detector. Así, en esta realización se llevan a cabo los pasos anteriores (usando las Ecuaciones 1-3), haciendo la sustitución:

$$q_i \rightarrow \frac{q_i}{t_i} \quad (\text{Ec. 4})$$

5

El origen de tiempos (correspondiente al sello de tiempo más bajo) no se puede establecer en el valor cero en este caso, si bien es posible establecer una constante de valor infinitesimal  $\varepsilon$  que se añade a todos los sellos de tiempo  $t_i$ . Habiendo calculado el vector de centro de masas  $r^{a/t}_{CM}$  de la distribución  $q_i/t_i$  y también el tensor de inercia  $I^{CM, q/t}_{\alpha\beta}$  y sus autovectores, es posible calcular la distribución de carga dividida por el sello de tiempo sobre los ejes definidos por estos autovectores. Ello permite obtener un perfil mejorado de las nubes de interacción, tal y como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 4a. También se puede proyectar la distribución de carga sobre los autovectores de  $q/t$ , o viceversa (Figs. 4b-4c, respectivamente). Con un test de verificación estadística, por ejemplo mediante un test  $\chi^2$ , es posible elegir los mejores ajustes y usarlos para estimar las coordenadas 2D (x, y) de las interacciones del rayo gamma incidente. Un ejemplo de dicho resultado se muestra en la Figura 5, para una detector fotomultiplicador de silicio digital de tipo Philips (de tamaño  $32 \times 32 \text{ mm}^2$ ), con lectura de energía de  $8 \times 8$  y  $4 \times 4$  sellos de tiempo independientes. En la citada figura, C y P representan las interacciones Compton y fotoeléctricas reales, la cruz en círculo representa el centro de masas, y las dos flechas ortogonales son los autovectores de  $I^{CM}_{\alpha\beta}$ . El círculo negro representa el centro de masa  $q/t$ . Las marcas "X" representan las coordenadas reconstruidas de los puntos de interacción, mediante la utilización del método descrito anteriormente.

25 El uso de píxeles más pequeños mejora tanto la estimación de energía como la estructura de reconfiguración de coordenadas 2D. En este sentido, en el ejemplo mostrado en la Figura 6, donde se ha simulado la lectura electrónica para un detector del mismo tamaño ( $32 \times 32 \text{ mm}^2$ ), pero con lectura de energía de  $18 \times 18$  y  $18 \times 18$  sellos de tiempo independientes. En la figura se muestran las interacciones de rayos gamma reales y reconstruidas, y también el centro de masas y los autovectores de  $I^{CM}_{\alpha\beta}$ , al igual que en la Figura 5 anterior.

La carga (energía) depositada para cada interacción Compton/fotoeléctrica se puede estimar a partir de los ajustes numéricos (es decir, como en la Ecuación 3) o de la distribución de energía en la vecindad de las coordenadas reconstruidas, correspondientes a los puntos de interacción de los rayos gamma. La profundidad de

35

interacción (DOI) también puede ser estimada de forma similar, utilizando la información de la anchura (dispersión) de la distribución de energía. Otro método puede consistir en utilizar la lectura de un fotodetector adicional lateral y/o superior, o ambos. Esta opción mejora tanto la estimación de la DOI como la estimación de la carga, y también puede  
 5 mejorar aún más la reconstrucción de las coordenadas (x, y).

Habiendo estimado la DOI, la tarea restante es el reconocimiento de la secuencia de tiempo de las interacciones. Aquí, nuevamente, debemos hacer la distinción entre la primera interacción de los rayos gamma y la interacción cuyos fotones ópticos  
 10 centelleados alcanzan primero el fotodetector. Idealmente, un ángulo de limitación  $\phi_l$  (que sólo depende del índice de refracción  $n$  como se mostrará a continuación) ayuda a distinguir con precisión entre los diferentes casos posibles. A modo de ejemplo (Figura 7), se considera la interacción de un rayo gamma incidente que sufre una dispersión Compton y una interacción fotoeléctrica. Los fotones ópticos más rápidos (los que llegan  
 15 primero al fotodetector pixelado, que se indican como (1, 2) en la figura) generados por estas interacciones son los que viajan en línea recta hacia el fotodetector, de modo ortogonal al mismo, como se muestra en la Figura 7 (izquierda), con velocidad  $c/n$  (donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $n$  el índice de refracción). Como el rayo gamma incidente es un fotón de alta energía, viaja a velocidad  $c$ , y el rayo gamma dispersado Compton también viajará a la misma velocidad  $c$ . Por lo tanto, de los fotones ópticos (1,  
 20 2), el fotón que se detectará primero dependerá de cuál, entre el rayo gamma dispersado que viaja a velocidad  $c$ , y el fotón óptico (1) viaja a  $c/n$ , llega antes a la línea de puntos mostrada en la Figura 7. Dicha línea es la línea paralela a la fotodetector que cruza el punto donde se produce el efecto fotoeléctrico, que es la fuente del fotón óptico (2). A partir de esta línea, tanto el fotón (1) como el fotón (2) recorren la misma distancia a la  
 25 misma velocidad. Según lo representado en el triángulo de la Figura 7 (derecha), se obtiene:

$$d = ct_2, \quad d' = \frac{c}{n}t_1 = d \cos \phi \quad \Rightarrow \quad \frac{t_1}{t_2} = n \cos \phi \quad (\text{Ec. 7})$$

La conclusión es, por tanto, que  
 30

$$t_1 < t_2 \quad \text{si y sólo si} \quad \phi > \arccos \frac{1}{n}. \quad (\text{Ec. 8})$$

Así, es posible definir un ángulo límite  $\phi_l = \arccos(1/n)$  y, por lo tanto, si  $\phi < \phi_l$  el fotón óptico (2) llega primero al fotodetector, y si  $\phi > \phi_l$  el fotón óptico (1) es el que alcanza  
 35 primero el fotodetector. A modo de ejemplo, para un cristal de centelleo de LYSO, donde

$n \simeq 1.8$ , el ángulo límite es  $\varphi_l \simeq 57^\circ$ . Es importante tener en cuenta que el fotón óptico más rápido puede sufrir dispersión, absorción o incluso llegar al fotodetector sin ser detectado. Por lo tanto, en lugar de confiar en la marca de tiempo de un solo fotón óptico (o solo unos pocos), es posible también considerar toda la distribución  $q_i/t_i$ , tal como se presenta a continuación.

A modo de ejemplo, se ilustrarán tres posibles casos de interés, tal y como se muestran en las Figs. 8, 9 y 10. Dado que la dispersión Compton a 511 keV se produce mayoritariamente hacia delante, el primer caso (Figura 8) representa el caso más probable de interacción. De la ecuación de Compton:

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right), \quad (\text{Ec. 9})$$

(donde  $E_\gamma$  y  $E'_\gamma$  son la energía del rayo gamma incidente y dispersado, respectivamente, y  $m_e$  es la masa del electrón), se deduce que, en el caso de dispersión hacia adelante, la energía depositada ( $E_{dep} = E_\gamma - E'_\gamma$ ) en la primera interacción Compton es pequeña ( $E_{dep} \ll$ ) en comparación con la energía total. Así, la cantidad de energía depositada será mayor para la absorción fotoeléctrica final. Como el ángulo  $\phi$  es pequeño, el grupo más rápido de fotones ópticos de la segunda interacción alcanzará el fotodetector antes que los fotones de la primera interacción. Para eliminar posibles fluctuaciones estadísticas, se utilizará como estimador el centro de masas de la distribución  $q_i/t_i$ . En el caso mostrado por la Figura 8, el centro de masas  $q/t$  se desplaza más cerca de la última interacción.

Para la segunda configuración (Figura 9), se analiza el caso contrario en el que el rayo gamma deposita una gran cantidad de energía en la primera interacción Compton ( $E_{dep} \gg$ ) y se dispersa hacia atrás. El resultado de la reconstrucción del detector de las dos interacciones es indistinguible de la primera. La salida del detector serían dos interacciones, una con una alta deposición de energía y otra con una baja deposición de energía y diferentes DOI. Además, en este caso el centro de masas  $q/t$  se desplaza más cerca del primera interacción.

Para el tercer caso (Figura 10) donde la energía depositada en la primera interacción Compton posee un valor intermedio (denotado como  $E \approx$ ) y las alturas son similares, el centro de masas  $q/t$  está más cerca de la primera interacción. Ellos se debe, en términos generales, al hecho de que el ángulo  $\phi \sim 90^\circ \gg \varphi_l$ .

Si bien en los casos descritos anteriormente solo se producen dos interacciones, el método de la invención se puede extender a un número arbitrario de interacciones.

En resumen, la presente invención se caracteriza esencialmente por el hecho de que el dispositivo de detección de rayos gamma está configurado para distinguir espacialmente entre diferentes nubes de interacción, deducir su secuencia de tiempo y también su fracción correspondiente de energía depositada (con respecto a la energía total depositada de un evento), haciendo uso de cualquier tipo de información espacial registrada y/o información temporal y/o de información de energía. Por ejemplo, para un cristal centelleante, el detector usará preferentemente la distribución de energía depositada, o información sobre las distribuciones de energía y sello de tiempo y/o la distribución  $q^M/t^N_i$ , para obtener la información espacial necesaria, la energía depositada por cada nube de interacción y su secuencia de tiempo. En la presente descripción se ha utilizado  $q_i$  como la carga y  $t_i$  como la información del sello de tiempo de un píxel  $i$  (de un fotodetector pixelado) y  $M, N$  como dos números reales, que representan potencias arbitrarias a las que se pueden elevar dichos valores para hacer que las correspondientes distribuciones tengan un pico más definido.

La información espacial puede ser, por ejemplo, la distribución del número de fotones ópticos producidos por un cristal de centelleo, la distribución de la carga eléctrica producida en un detector semiconductor, detección de radiación de Cherenkov, etc. Es importante recalcar que, sin la información de sello de tiempo, el detector aún puede distinguir espacialmente entre diferentes nubes de interacción, pero no puede establecer su secuencia de tiempo. A la vista de este hecho, la característica más importante del detector de la presente invención es el hecho de que es capaz de realizar tal medición con detectores de bloque monolíticos acoplados a fotosensores pixelados.

En un segundo objeto de la invención, el dispositivo de detección de rayos gamma descrito en el presente documento comprende, preferentemente, uno o más detectores, independientes o no, donde dichos detectores se pueden agrupar en cualquier tipo de estructura, tal como un formato multicapa, independientes, formando un anillo detector etc. Asimismo, los detectores están equipados, preferentemente, con electrónica de lectura y adquisición de datos, configurados para capturar, digitalizar y enviar las señales de detección a una unidad de procesamiento, para su posterior análisis. Dicha unidad estará configurada con medios software y/o hardware para llevar a cabo el método de detección de la invención, en cualquiera de sus realizaciones preferentes, según lo descrito en los apartados anteriores.

Los dispositivos de adquisición de los detectores pueden acoplarse a los materiales sensibles, utilizando cualquier tipo de tecnología o material conocido y utilizado en el estado de la técnica, como por ejemplo, grasa óptica. También se puede acoplar sin  
5 ningún tipo de material intermedio.

El material sensible del dispositivo de detección puede ser cualquier material que produzca una magnitud física mensurable cuando la radiación interactúa con dicho material. Algunos ejemplos son los cristales centelleantes, monolíticos o pixelados,  
10 semiconductores tales como Si, Ge, CdTe, GaAs, Pbl<sub>2</sub>, Hgl<sub>2</sub>, CZT, etc. para detectores de estado sólido, xenón para detectores de centelleo y radiación Cherenkov, etc. Además, los materiales sensibles pueden estar encapsulados o expuestos, acoplados a una superficie reflectante óptica y/o utilizar cualquier técnica conocida para mejorar la calidad de los datos recogidos. Las superficies reflectantes ópticas pueden ser pulidas o  
15 rugosas, especulares, difusas, retro-reflectantes o mixtas. Asimismo, uno o más conjuntos de detección pueden comprender una superficie pintada ópticamente.

En un sistema de detección según la invención, cada dispositivo detector puede ser adyacente a otro que forma un conjunto determinado, pudiendo dicho conjunto  
20 organizarse con respecto a otro, por ejemplo formando una estructura cerrada o abierta. Los componentes de un sistema detector pueden ser idénticos o diferentes, en función de sus condiciones de diseño específicas.

Cada detector en el dispositivo puede tener una forma arbitraria, y puede medir cualquier  
25 magnitud física que proporcione información espacial y/o temporal de, al menos, una nube de interacción de uno o más materiales sensibles. Ejemplos de tales elementos de detección son detectores de estado sólido, detectores de centelleo, etc.

Ejemplos de detectores de estado sólido son semiconductores tales como Si, Ge, CdTe,  
30 GaAs, Pbl<sub>2</sub>, Hgl<sub>2</sub>, CZT o HgCdTe (también conocido como CTM). Radiadores Cherenkov tales como PbF<sub>2</sub>, NaBi (WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, PbWO<sub>4</sub>, MgF<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>10</sub> o aerogel de sílice. Se pueden usar también elementos centelleadores, tales como centelleadores de cristales orgánicos o inorgánicos, centelleadores líquidos o centelleadores gaseosos. Los centelleadores pueden producir una señal de detección que se debe tanto a los procesos  
35 de centelleo como a los de radiación Cherenkov.

Los centelleadores de cristales orgánicos pueden ser, por ejemplo, antraceno, estilbena, naftaleno, centelleadores líquidos (por ejemplo, líquidos orgánicos como p-terfenilo ( $C_{18}H_{14}$ ), 2-(4-bifenilil)-5-fenil-1,3,4-oxadiazol PBD ( $C_{20}H_{14}N_{2}O$ ), butilo PBD ( $C_{24}H_{22}N_{2}O$ ), PPO ( $C_{15}H_{11}NO$ ), disueltos en solventes tales como tolueno, xileno, benceno, fenilciclohexano, trietilbenceno o decalina), centelleadores de gases (como nitrógeno, helio, argón, criptón, xenón), centelleadores de cristales inorgánicos, o combinaciones de cualquiera de los mismos.

Los cristales de centelleo inorgánicos comúnmente conocidos pueden ser también utilizados, por ejemplo, yoduro de cesio (CsI), yoduro de cesio dopado con talio (CsI (Tl)), germanato de bismuto (BGO), yoduro de sodio dopado con talio (NaI (Tl)), fluoruro de Bario ( $BaF_2$ ), fluoruro de calcio dopado con europio ( $CaF_2(Eu)$ ), tungstato de cadmio ( $CdWO_4$ ), bromuro de lantano dopado con cerio ( $LaBr_3(Ce)$ ), silicatos de lutecio itria dopados con cerio ( $LuYSiOs(Ce)$ (YAG (Ce)), sulfuro de cinc dopado con plata ( $ZnS(Ag)$ ) o granito de itrio aluminio dopado con cerio (III)  $Y_3Al_5O_{12}$  (Ce) o LYSO. Ejemplos adicionales son CsF, KI(Tl),  $CaF_2(Eu)$ ,  $Gd_2SiO_5[Ce]$  (GSO), LSO.

Como se ha mencionado previamente, los centelleadores según la presente invención, pueden ser cristales monolíticos o cristales pixelados, o cualquier combinación de los mismos. Preferiblemente el centelleador, sin embargo, será un monocristal (bloque monolítico), ya que los cristales pixelados introducen más áreas de espacio muerto en el detector de rayos gamma, proporcionando por tanto menos sensibilidad al dispositivo detector en comparación con los monocristales.

El dispositivo de detección (de los fotones centelleantes) puede estar formado por fotosensores. Los fotosensores pueden ser matrices de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), diodos de avalancha de fotones individuales (SPAD), SiPM digitales, fotodiodos de avalancha, fotomultiplicadores sensibles a la posición, fotomultiplicadores, fototransistores, fotodiodos, foto-ICs o combinaciones de los mismos. Esto significa que un dispositivo detector puede estar acoplado, por ejemplo, a una matriz de SiPM y otro dispositivo detector puede estar acoplado a una matriz de fototransistores en un sistema detector según las definiciones anteriores.

La información extraída del detector puede ser una matriz de datos espacial y/o temporal de 2D. Sin embargo, el método se puede generalizar trivialmente a cualquier dimensión, dependiendo del formato de lectura.

Un solo detector puede producir una o más matrices de datos. Por ejemplo, si se usa un dispositivo de adquisición para diferentes regiones del detector, se puede obtener un número de matrices de datos igual o mayor que el número de dichas regiones. Además, las lecturas del dispositivo de adquisición también se pueden combinar para crear una sola matriz de datos. Otro ejemplo puede ser un detector grande que usa dos dispositivos de adquisición en una sola región. La combinación de las dos matrices de lectura puede formar una matriz de datos unificada, si se desea.

Alternativa o complementariamente, una pluralidad de detectores puede proporcionar una sola matriz de datos. Por ejemplo, si un detector no es lo suficientemente grande para cubrir una superficie deseada, se pueden disponer dos o más detectores en una matriz, y combinar sus lecturas para obtener una matriz de datos más grande. La matriz de datos se puede expresar utilizando cualquier sistema de coordenadas deseado (cartesiano, cilíndrico, esférico, etc.).

Independientemente del número de dimensión o del sistema de coordenadas de la matriz de datos, el procedimiento utilizado por la invención para obtener las coordenadas de la posición de impacto es el mismo. Por ejemplo, en una matriz de datos D-dimensional con valores discretos o continuos (y  $D \geq 1$ , siendo D entero) como funciones de D dimensiones espaciales ( $D \geq 1$ ). De forma general, el método a realizar comprende los pasos siguientes:

a) Se calcula el centro de masas de carga y/o el centro de masas de la distribución  $q^M/t^N_i$ , donde M y N representan dos números reales, potencias de  $q_i$  y respectivamente de  $t_i$ .

b) Se calcula el tensor de inercia con respecto al centro de masas de carga y/o al centro de masas de la distribución  $q^M/t^N_i$ .

c) Se diagonaliza la matriz correspondiente al tensor de inercia, para extraer sus autovectores. Estos vectores proporcionan los ejes de simetría de la matriz de datos N-dimensional.

Cualquier otro método que extraiga los ejes de simetría de la matriz de datos también es válido y estaría comprendido en el ámbito de la invención. Un ejemplo alternativo podría ser el uso de técnicas de aprendizaje automático, como sucede en las técnicas de redes neuronales.

Hay varias formas de obtener las coordenadas si hay varias nubes de interacción. Como ejemplo, se pueden proyectar datos desde la matriz de datos a lo largo de los ejes definidos por los autovectores del tensor de inercia, y ajustar estas proyecciones a una función conocida o una combinación (lineal o no) de funciones. En el caso de una matriz 2D, para un detector de centelleo, se pueden ajustar estas proyecciones a una combinación lineal de funciones de tipo gaussiano.

## REIVINDICACIONES

- 1.- Método para la detección de rayos gamma con capacidad de determinación de interacciones múltiples y de su secuencia de tiempo correspondiente, que comprende el uso de un dispositivo que, a su vez, comprende:
- uno o más medios de detección de la carga de energía  $q_i$  depositada sobre las coordenadas (x, y, z) de un elemento detector y del instante temporal  $t_i$  correspondiente a la detección de dicha deposición;
  - medios electrónicos de lectura y adquisición de datos conectados a los medios de detección del dispositivo, estando dichos medios electrónicos configurados para capturar, digitalizar y transmitir las señales de detección del dispositivo;
  - al menos a una unidad de procesamiento conectada a los medios electrónicos, configurada con medios software y/o hardware para el registro y/o procesamiento de los datos generados por los medios electrónicos de lectura y adquisición de datos;
- y estando dicho método **caracterizado por que** comprende la realización de los siguientes pasos:
- se calcula el centro de masas de las cargas  $q_i$  depositadas respecto a las coordenadas (x, y, z) del elemento detector;
  - se calcula el tensor de inercia  $I_{\alpha\beta}^{CM}$  con respecto al centro de masas de carga  $q_i$ ;
  - se diagonaliza la matriz correspondiente al tensor de inercia, para extraer sus autovectores, determinando los ejes de simetría de dicha matriz;
  - se proyectan los valores de carga  $q_i$  detectados sobre los ejes definidos por los autovectores;
  - se determina el número de interacciones sufridas por cada rayo gamma en el dispositivo de detección, y sus coordenadas (x, y, z) y tiempos  $t_i$  correspondientes, a partir de la proyección de las cargas  $q_i$  calculada en el paso anterior, identificando una interacción con un máximo en la función de dicha proyección;
  - se establece la secuencia temporal de las interacciones sufridas por cada rayo gamma a partir de las coordenadas (x, y, z) de dichas interacciones, de los tiempos de detección  $t_i$  y de la determinación de la velocidad de los rayos gamma y/o de los fotones ópticos propagados en el elemento detector, a partir de la velocidad de la luz en el vacío  $c$  y del índice de refracción  $n$ , y/o estadísticamente en función de las coordenadas de las distintas interacciones.
- 2.- Método según la reivindicación anterior donde, en los pasos correspondientes al cálculo del centro de masas y a la proyección de los valores de carga  $q_i$ , dichos valores

se dividen por su instante temporal  $t_i$  correspondiente, en la forma  $q_i^{M_i/t_i^{N_i}}$ , donde M y N son dos números reales.

5 3.- Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la proyección de las cargas  $q_i$  se ajusta numéricamente a una función matemática, estimándose las coordenadas (x, y, z) y/o la energía depositada correspondiente a partir de las propiedades de dicha función.

10 4.- Método según la reivindicación anterior, donde la función matemática es una distribución de tipo gaussiano.

15 5.- Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende adicionalmente la determinación de la profundidad de interacción de los rayos gamma, a partir de la dispersión de la distribución de carga de energía  $q_i$  en las proyecciones obtenidas en los ejes de autovectores.

6.- Dispositivo de detección que comprende:

20 - uno o más medios de detección de la carga de energía  $q_i$  depositada sobre las coordenadas (x, y, z) de un elemento detector y del instante temporal  $t_i$  correspondiente a la detección de dicha deposición;

- medios electrónicos de lectura y adquisición de datos conectados a los medios de detección del dispositivo, estando dichos medios electrónicos configurados para capturar, digitalizar y transmitir las señales de detección del dispositivo;

25 - al menos a una unidad de procesamiento conectada a los medios electrónicos; estando dicho dispositivo **caracterizado por que** la unidad de procesamiento comprende medios software y/o hardware para el registro y/o procesamiento de los datos generados por los medios electrónicos de lectura y adquisición de datos, configurados para la realización de un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

30 7.- Dispositivo según la reivindicación anterior, donde el elemento detector de los rayos gamma comprende uno o más centelleadores pixelados o monolíticos, uno o más detectores de estado sólido o uno o más detectores de radiación de Cherenkov, aislados o en combinación.

35 8.- Dispositivo según la reivindicación anterior, donde el elemento detector de estado sólido comprende semiconductores de Si, Ge, CdTe, GaAs, Pbl<sub>2</sub>, Hgl<sub>2</sub>, CZT o

HgCdTe, y/o donde los detectores Cherenkov comprenden  $\text{PbF}_2$ ,  $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{C}_6\text{F}_{14}$ ,  $\text{C}_4\text{F}_{10}$  o aerogel de sílice.

5 9.- Dispositivo según la reivindicación 7, donde los elementos centelleadores comprenden centelleadores de cristales orgánicos o inorgánicos, centelleadores líquidos y/o centelleadores gaseosos.

10.- Dispositivo según la reivindicación anterior, donde:

10 - los centelleadores de cristales orgánicos comprenden antraceno, estilbena y/o naftaleno;

- los centelleadores de cristales inorgánicos comprenden yoduro de cesio (CsI), yoduro de cesio dopado con talio (CsI (Tl)), germanato de bismuto (BGO), yoduro de sodio dopado con talio (NaI (Tl)), fluoruro de Bario ( $\text{BaF}_2$ ), fluoruro de calcio dopado con europio ( $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ ), tungstato de cadmio ( $\text{CdWO}_4$ ), bromuro de lantano dopado con cerio (LaBr<sub>3</sub>(Ce)), silicatos de lutecio itria dopados con cerio (LuY<sub>3</sub>SiO<sub>8</sub>(Ce)(YAG (Ce))), sulfuro de cinc dopado con plata (ZnS(Ag)) o granito de itrio aluminio dopado con cerio (III) Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Ce), LYSO, CsF, KI(Tl),  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ , Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>[Ce] (GSO), y/o LSO;

20 - los centelleadores líquidos comprenden p-terfenilo (C<sub>18</sub>H<sub>14</sub>), 2-(4-bifenilil)-5-fenil-1,3,4-oxadiazol PBD (C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O), butilo PBD (C<sub>24</sub>H<sub>22</sub>N<sub>2</sub>O), PPO (C<sub>15</sub>H<sub>11</sub>NO), disueltos en solventes tales como tolueno, xileno, benceno, fenilciclohexano, trietilbenceno o decalina;

- los centelleadores gaseosos comprenden nitrógeno, helio, argón, criptón y/o xenón.

25 11.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 6-10, donde el elemento detector comprende uno o más fotodetectores.

30 12.- Dispositivo según la reivindicación anterior, donde los fotosensores comprenden matrices de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), diodos de avalancha de fotones individuales (SPAD), SiPM digitales, fotodiodos de avalancha, fotomultiplicadores sensibles a la posición, fotomultiplicadores, fototransistores, fotodiodos, foto-ICs, o combinaciones de los mismos.

35 13.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 6-12, donde el elemento detector de los rayos gamma está acoplado a una o más superficies ópticamente reflectantes, siendo dichas superficies pulidas o rugosas, especulares, difusas, retro-reflectantes o mixtas.

14.- Uso de un dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 6-13 o de un método según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en un dispositivo médico de imagen nuclear y/o en un telescopio de rayos gamma.

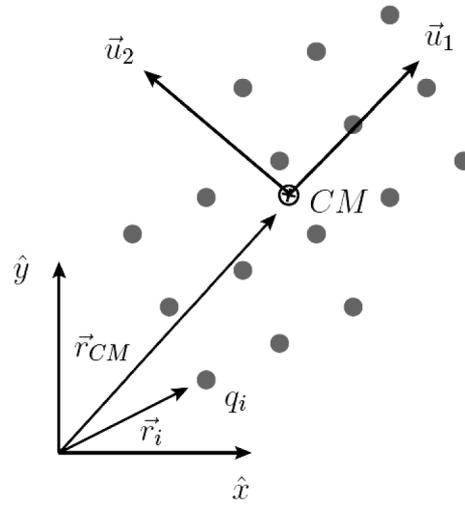


FIG. 1

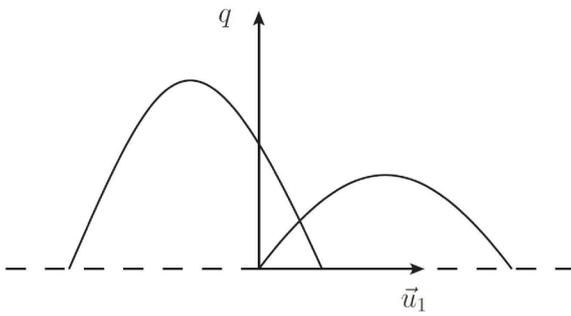


FIG. 2a

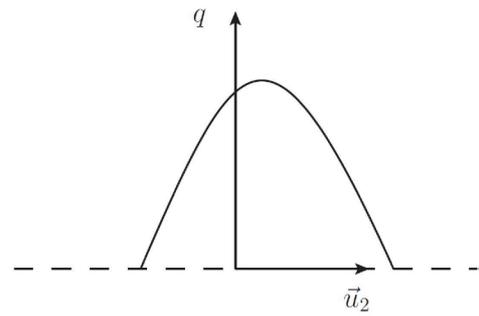


FIG. 2b

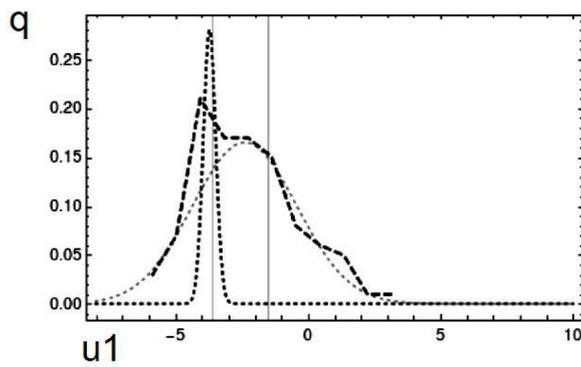


FIG. 3a

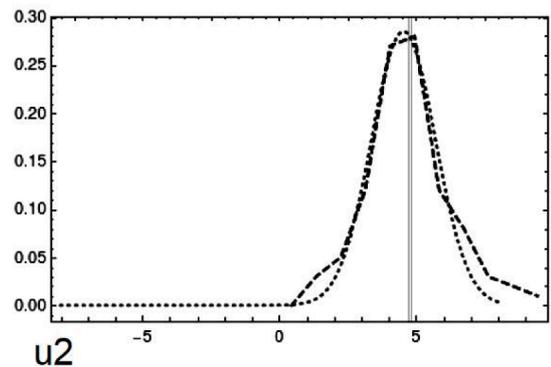


FIG. 3b

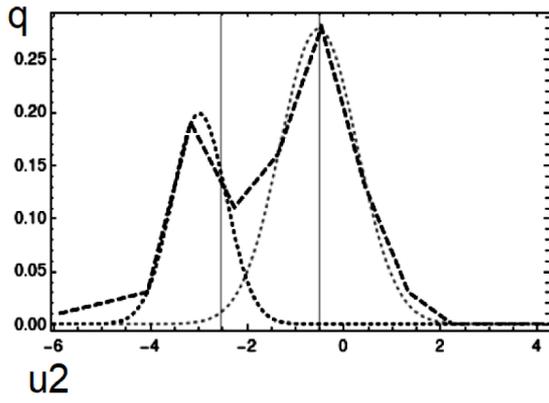


FIG. 4a

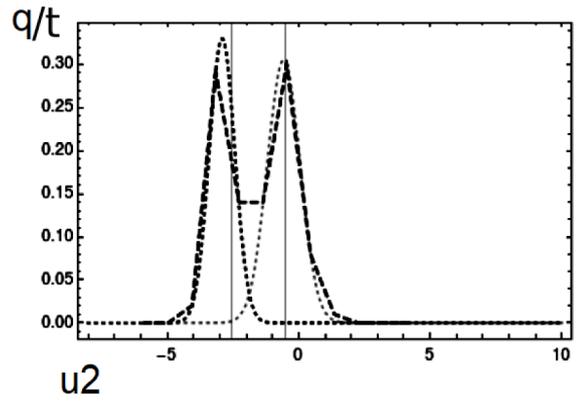


FIG. 4b

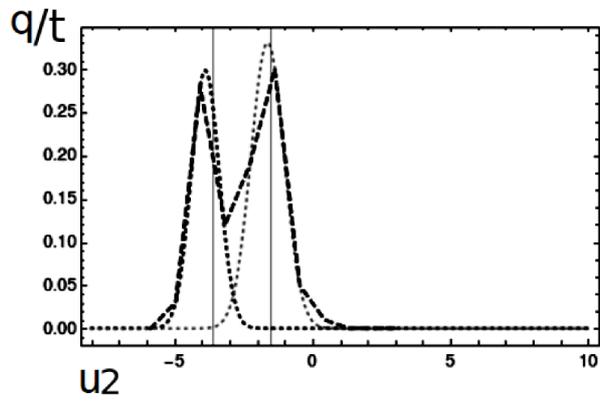


FIG. 4c

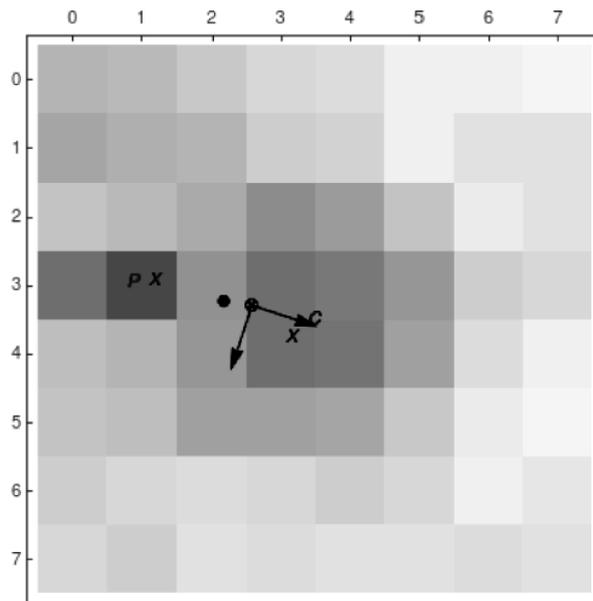


FIG. 5

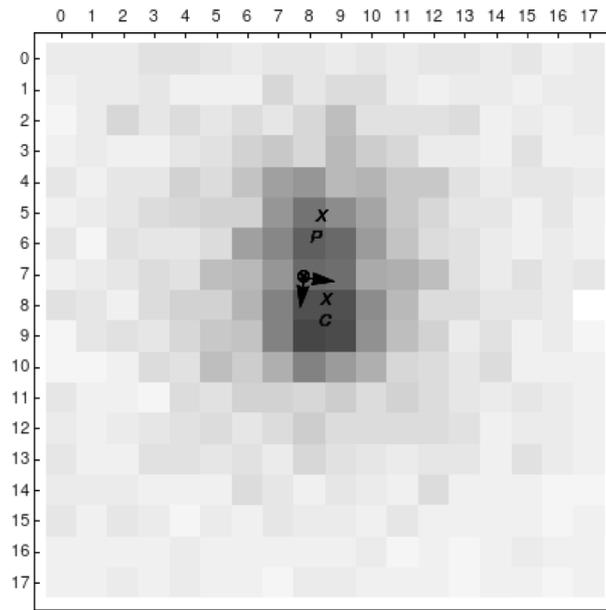


FIG. 6

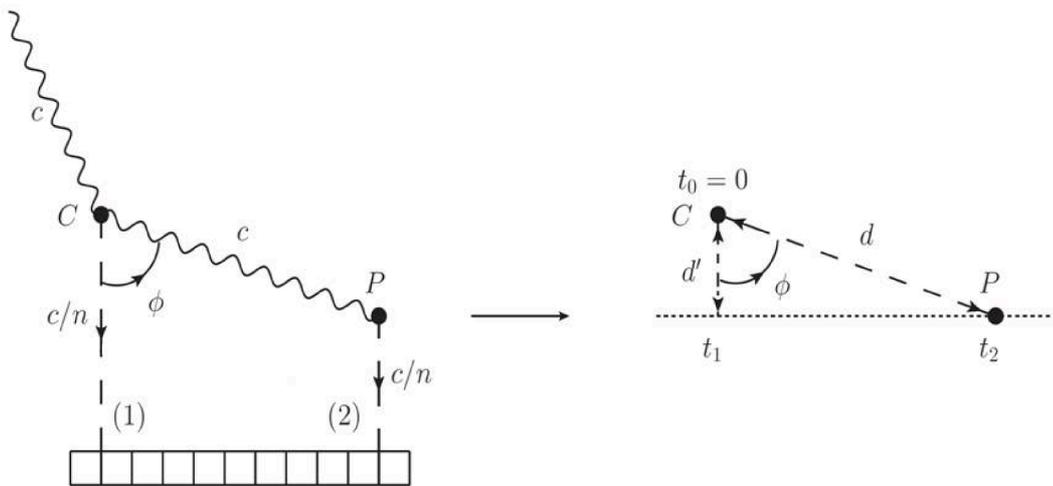


FIG. 7

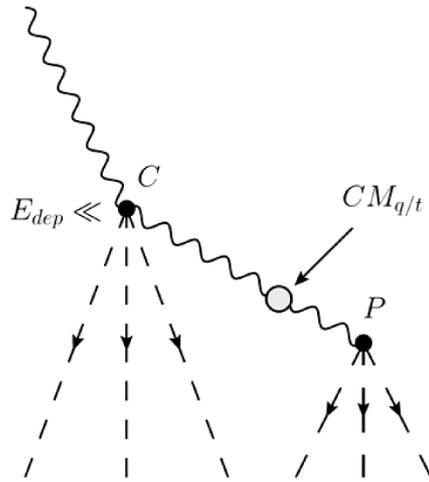


FIG. 8

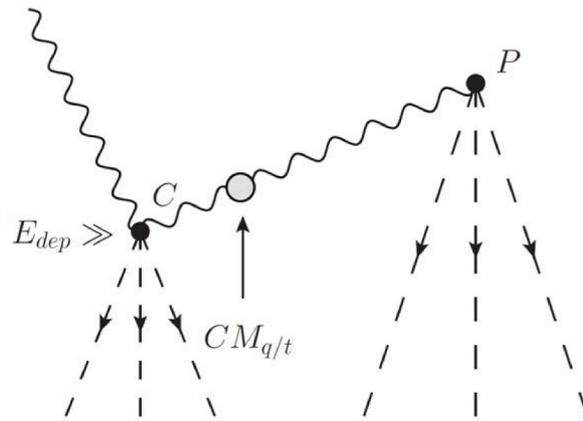


FIG. 9

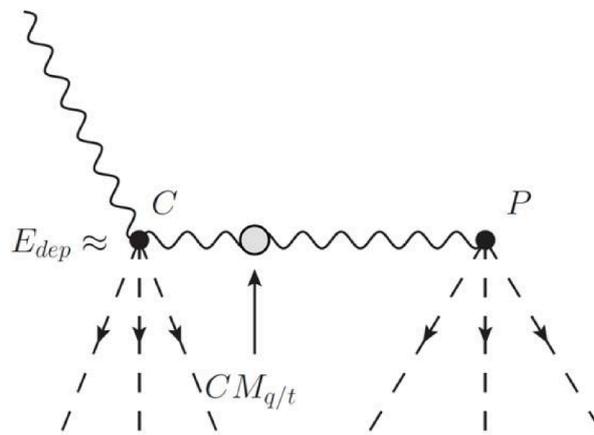


FIG. 10



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

21 N.º solicitud: 201930239

22 Fecha de presentación de la solicitud: 14.03.2019

32 Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

51 Int. Cl.: **G01T1/24** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	56 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 2018289349 A1 (SANDERS JAMES C et al.) 11/10/2018, párrafos [0007] a [0064]; figuras1-9.	1-14
A	HOLUPKA E J et al. Automatic detection of linear artifacts in medical images. MEDICAL PHYSICS, 20040901 AIP, MELVILLE, NY, US. , 01/09/2004, Vol. 31, N° 9, Páginas 2707 - 2710, XP012075042 ISSN 0094-2405, <DOI: 10.1118/1.1783553>	1-14

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe  
28.11.2019

Examinador  
J. Botella Maldonado

Página  
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01T

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, NPL, XPESP, XPAIP, XPI3E, INSPEC.