(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 877 772**

(21) Número de solicitud: 202030443

(51) Int. CI.:

G01T 1/29 (2006.01)
G01T 3/06 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN B2

(22) Fecha de presentación:

14.05.2020

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

17.11.2021

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

09.08.2022

Fecha de concesión:

30.12.2022

(45) Fecha de publicación de la concesión:

09.01.2023

(73) Titular/es:

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)
C/ Serrano, nº 117
28006 Madrid (Madrid) ES y
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA (50.0%)

(72) Inventor/es:

LERENDEGUI MARCO, Jorge;
BALIBREA CORREA, Javier;
DOMINGO PARDO, César;
CABALLERO ONTANAYA, Luis;
BABIANO SUÁREZ, Victor y
LADARESCU PALIVÁN, Ion

(74) Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

(54) Título: **DISPOSITIVO Y MÉTODO DE DETECCIÓN, IDENTIFICACIÓN, CUANTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN SIMULTÁNEA DE FUENTES DE RADIACIÓN GAMMA Y DE NEUTRONES**

(57) Resumen:

Dispositivo y método de detección, identificación, cuantificación y localización simultánea de fuentes de radiación gamma y de neutrones.

El dispositivo comprende un colimador mecánico (1) compuesto por un material absorbente de neutrones y transparente a la radiación gamma; un primer detector (2) que comprende un cristal centelleador con capacidad de discriminación neutrón-gamma y un fotosensor sensible a las posiciones, acoplado al colimador mecánico (1); uno o más bloques detectores con cristales centelleadores de radiación gamma o neutrón-gamma (3) y fotosensores sensibles a las posiciones, a continuación del primer detector (2), en una cara opuesta al colimador mecánico (1); y un módulo de adquisición y procesado (4), conectado a los detectores (2, 3). El método incluye la adquisición de una tasa de contaje y la formación de imágenes, permitiendo tanto la discriminación como la cuantificación de la actividad de las fuentes emisoras de radiación gamma (61) y/o de neutrones (62). El dispositivo es apto para su uso en inspecciones de seguridad nuclear, seguridad portuaria, amenazas y accidentes nucleares y tratamientos de hadrón-terapia y medicina nuclear.

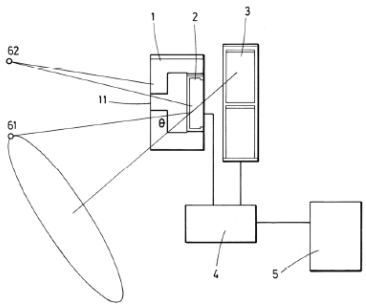

FIG.1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 877 772 B2

DESCRIPCIÓN

DISPOSITIVO Y MÉTODO DE DETECCIÓN, IDENTIFICACIÓN, CUANTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN SIMULTÁNEA DE FUENTES DE RADIACIÓN GAMMA Y DE NEUTRONES

OBJETO DE LA INVENCIÓN

El objeto de la invención es un dispositivo portátil para la detección, cuantificación, identificación y localización espacial o visualización simultánea tanto de fuentes emisoras de neutrones como de fuentes de radiación gamma, apto para su uso, por ejemplo, en inspecciones de seguridad nuclear, seguridad portuaria, amenazas y accidentes nucleares, física médica y otras aplicaciones.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

La mayor parte de dispositivos de detección de radiación y de fuentes radiactivas están optimizados para medir un tipo concreto de radiación o partículas subatómicas. La radiación gamma y los neutrones poseen un alto poder de penetración en la materia, y por ello son particularmente útiles para la detección y localización de fuentes radiactivas que emitan este tipo de radiación o partículas y que puedan estar apantalladas u ocultas por otros materiales.

Este es el caso de la radiación que se emite, por ejemplo, en las barras de combustible de uranio usado procedente de centrales nucleares, las cuales se almacenan en depósitos de agua. En tareas de control de almacenamiento y en tareas de inspección para la no proliferación, resulta útil un sistema que permita medir y visualizar simultáneamente tanto la radiación gamma como los neutrones emitidos por el combustible a inspeccionar. En el caso del tráfico ilegal de combustible gastado, este puede estar oculto por material absorbente de radiación gamma a fin de ser ocultado en las inspecciones llevadas a cabo por las autoridades. En este sentido, tanto la detección e identificación de la radiación gamma como de los neutrones y la localización de su origen, puede ayudar a una mejor identificación como se describe en el artículo [A. Poitrasson-Riviere et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 797 (2015) 278-284].

Alternativamente, en aplicaciones médicas, la radiación gamma y de neutrones puede proporcionar información muy valiosa en tratamientos con haces de protones o de iones más pesados. En este tipo de terapia del cáncer una fracción importante de la dosis secundaria que recibe el paciente es debida a los neutrones producidos durante el tratamiento. La monitorización conjunta de la distribución espacial de neutrones y de radiación gamma puede resultar útil para cuantificar esta dosis secundaria y para determinar el rango de penetración del haz primario de hadrones.

Existen sistemas optimizados para la detección de radiación gamma y sistemas diseñados para la detección de neutrones. También existen dispositivos, como por ejemplo el descrito en el documento US2012/0256094A1, que permiten detectar simultáneamente ambos tipos (radiación gamma y neutrones) y hacer una localización espacial u obtener una imagen de la distribución espacial de las fuentes emisoras.

Los sistemas híbridos o duales existentes de imagen de neutrón y gamma se basan, generalmente, en el uso de centelleadores orgánicos (líquidos o plásticos) para la detección de neutrones. Esta tecnología de detección es aplicable para la detección de neutrones cuya energía sea igual o superior a varias centenas de keV (>200-300keV). Esto implica que estos dispositivos son sensibles únicamente a neutrones rápidos y de energías intermedias, y no tienen capacidad de imagen de neutrones lentos (energías del neutrón entorno al eV) ni de neutrones térmicos (energías de varias décimas de eV). Esta limitación representa una serie de desventajas e inconvenientes en diferentes aplicaciones.

En aplicaciones médicas, durante el tratamiento de tumores con haces de iones (protones, carbono, etc.), la producción de neutrones es un aspecto importante en términos de control de la dosis de radiación que recibe el paciente. Los neutrones que se generan en este tipo de tratamientos tienen fundamentalmente una componente térmica o de baja energía, y otra contribución rápida o de alta energía.

En la actualidad existen dispositivos para medir la dosis de neutrones en todo el espectro energético, pero estos dispositivos no poseen la capacidad de formar una imagen sobre el origen espacial de los neutrones. Existen sistemas con capacidad de imagen para neutrones, pero estos son aplicables, como los descritos anteriormente, en el rango de altas energías del neutrón (neutrones rápidos), como por ejemplo el sistema descrito en el artículo [L. Tagawa et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 936 (2019)

31-33]. Un dispositivo capaz de medir y visualizar la distribución espacial de radiación gamma y de neutrones térmicos y lentos representaría una información complementaria útil y vital para mejorar este tipo de tratamientos.

En inspecciones de seguridad relacionadas con la monitorización de combustible nuclear gastado, o de contrabando de material sensible (plutonio, uranio), la detección y visualización de neutrones térmicos es importante debido a que este rango energético de los neutrones es el predominante cuando se trata de apantallar la muestra radiactiva con materiales hidrogenados (agua, polietileno) para su atenuación u ocultación. Los sistemas de detección referidos anteriormente son sensibles principalmente a la componente rápida o de alta energía de neutrón (>100-200keV). Un sistema de detección simultánea de neutrones y gamma, especialmente sensible a la componente térmica de los neutrones, representaría una mejora significativa con respecto a las técnicas existentes.

Los centelleadores orgánicos empleados mayoritariamente en cámaras duales neutrón-gamma para la detección de neutrones poseen una eficiencia intrínseca de detección y una portabilidad muy reducidas. En las aplicaciones descritas anteriormente, esto supone una desventaja adicional que limita su aplicabilidad.

Otra desventaja del uso de centelleadores orgánicos en cámaras duales neutrón-gamma es debida a la limitada resolución energética de los centelleadores orgánicos, lo cual repercute directamente en una resolución de imagen gamma inferior a la que se podría obtener con centelleadores inorgánicos. Esto es debido a que, en este tipo de sistemas, la imagen de radiación se obtiene por la técnica Compton. Por la ley de dispersión Compton la resolución angular o de imagen depende directamente de la resolución en energía del detector empleado, tal y como se describió en las primeras cámaras Compton duales neutrón-gamma [D. Herzo et al., Nucl. Instr. and Methods, 123 (1975) 587-597].

En general, por las razones expuestas, los sistemas citados presentan gran tamaño, lo cual limita su aplicabilidad en múltiples escenarios, como puedan ser aplicaciones industriales donde el espacio de inspección es restringido, o inspecciones relacionadas con seguridad nuclear que requieren portabilidad (contrabando de plutonio) y con accidentes nucleares (como el de Fukushima) donde el único acceso al campo de

interrogación es por medio de misiones aéreas no tripuladas, generalmente con una autonomía y carga muy limitadas.

En aplicaciones médicas el volumen del sistema de detección también puede representar una importante limitación. En concreto, en tratamientos clínicos con haces de protones y con haces de iones pesados no se permiten elementos circundantes que pudieran dificultar el acceso rápido y atención al paciente en caso de requerir asistencia urgente durante el tratamiento.

La limitada resolución energética de los centelleadores orgánicos y su baja respuesta espectroscópica repercute asimismo en una escasa o nula capacidad para identificar y cuantificar el tipo de isótopo emisor de radiación gamma, como es el caso del sistema descrito en la publicación [X. Liang, et al., Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 951 (2020) 162964].

Parte de estas limitaciones, sobre todo las referidas a la identificación de los radioisótopos, la resolución energética y la resolución de imagen, pueden mejorarse empleando centelleadores inorgánicos con capacidad de discriminación neutrón-gamma y que poseen alta resolución energética, tal y como se describe en el artículo [A. Giaz et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 810 (2016) 132-139]. Sin embargo, los sistemas existentes basados en cristales inorgánicos generalmente emplean colimadores de máscara codificada para formar la imagen de neutrones y la imagen gamma, como por ejemplo el sistema descrito en el documento [C.M. Whitney et al., Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 784 (2015) 346-351]. Estos colimadores presentan varias desventajas, sobre todo en lo referente a la portabilidad, ya que se fabrican con elementos pesados (tungsteno o plomo y cadmio), lo cual limita su uso en aplicaciones como inspecciones aéreas no tripuladas u otros usos similares que requieren dispositivos compactos, ligeros y con amplio campo de visión. Por otro lado, este tipo de sistemas basados en colimación mecánica poseen una apertura reducida y un campo de visión relativamente estrecho, así como una baja eficiencia para la detección de radiación gamma. Esto conlleva tiempos de medida largos o la necesidad de realizar múltiples medidas para caracterizar un entorno.

Alternativamente existen sistemas de detección dual neutrón-gamma portables y ligeros, aptos para misiones aéreas no tripuladas. Sin embargo, los sistemas actuales de este tipo tienen únicamente capacidad de imagen gamma y no de imagen de

neutrones, como el dispositivo utilizado en este trabajo [S. Mochizuki, et al., Journal of Instrumentation (2017) 12 P11014] para inspeccionar aéreamente la zona del accidente nuclear de Fukushima Daiichi. Los sistemas existentes portables, que son sensibles a la radiación gamma y a los neutrones, carecen de resolución espacial o angular intrínseca para visualizar simultáneamente el (los) foco(s) de radiación gamma y el (los) de radiación de neutrones [R. Pavlovsky et al., eprint arXiv:1908.06114 (2019)]. En este último caso, la visualización y localización de las fuentes requiere realizar un rastreo sistemático de la zona con el dispositivo de medida, para posteriormente estimar la ubicación de las fuentes por medio de métodos estadísticos basados en la posición del dispositivo de medida, el ángulo sólido subtendido y la tasa de contaje en cada posición del dispositivo de medida. Este método presenta claras desventajas al aumentar el tiempo de medida y exigir en muchos casos la intervención en la zona de medida para cambiar la posición del sistema de detección.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

El dispositivo de detección simultánea de fuentes de radiación gamma y de neutrones, objeto de la presente invención, permite sortear las limitaciones descritas en el apartado anterior, por medio de:

- un dispositivo de reducido volumen, ligero y altamente portátil, capaz de combinar en un único dispositivo y en una única medida las capacidades de detección, cuantificación, identificación y localización espacial, tanto de radiación gamma como de neutrones,
- un dispositivo con elevada resolución espectroscópica para la radiación gamma, lo cual permite identificar el tipo de radioisótopo emisor y cuantificar su presencia,
- un dispositivo con alta resolución de imagen tanto para la radiación gamma como para fuentes emisoras de neutrones,
- un dispositivo capaz de detectar radiación gamma con alta eficiencia y suficiente resolución energética para identificar radioisótopos emisores y proporcionar su localización en el espacio para un extenso rango energético de radiación gamma,
- un dispositivo capaz de detectar neutrones y proporcionar imagen de la fuente emisora, principalmente en el rango térmico-lento de energías de neutrones, pudiendo llegar hasta energías intermedias del orden de centenares de keV.

La presente invención consiste en una combinación especial de colimación mecánica ligera para la detección de los neutrones y electrónica (o Compton) para la detección de la radiación gamma, pudiendo proporcionar así una imagen de fuentes emisoras de neutrones (intermedios, térmicos y lentos) y de radiación gamma simultáneamente. Esto permite, en una única medida fija (pose o posición de medida), localizar simultáneamente en un entorno o escenario de campo fuentes emisoras de neutrones y de radiación. También permite combinar varias medidas individuales o poses de medida, para obtener una información más completa acerca de la distribución espacial de las fuentes emisoras.

La principal ventaja frente a las técnicas existentes radica en ser un dispositivo ligero y portable, apto para la visualización de fuentes emisoras de neutrones térmicos y lentos, a la vez que permite conformar una imagen híbrida neutrón-gamma de las fuentes emisoras e identificar la naturaleza o los isotopos emisores de radiación gamma mediante espectroscopía de alta resolución.

La implementación de un colimador mecánico ligero para los neutrones permite, en la presente invención, aplicar la técnica Compton para la visualización de la radiación gamma. Esto representa una ventaja frente a los sistemas existentes, ya que permite obtener una eficiencia de detección y un campo de visión significativamente superiores a los de sistemas análogos basados en máscaras codificadas. De esta manera se pueden reducir los tiempos de medida o el número de medidas a realizar para caracterizar un cierto entorno.

A diferencia de otras cámaras neutrón-gamma, la presente invención es principalmente sensible a la componente térmica y lenta del espectro de neutrones. Este motivo le confiere especial utilidad en el ámbito de control de material radiactivo, seguridad y amenazas nucleares, así como en aplicaciones médicas e industriales.

Concretamente, el dispositivo de detección simultánea de fuentes de radiación gamma y de neutrones, que recibe partículas de radiación gamma y/o neutrones de una fuente emisora comprende:

- un colimador mecánico de neutrones, destinado a posicionarse ante la fuente emisora, que no absorbe o afecta de manera significativa a la radiación gamma y de tipo preferentemente “*pin-hole*”, que actúa como una cámara estenopeica para la detección de la fuente emisora de neutrones,

- un módulo detector, situado a continuación del colimador mecánico, en el lado opuesto a la fuente emisora, formado por varios volúmenes de detección, donde al menos uno de ellos tiene capacidad de discriminación neutrón-gamma y donde uno o varios de los volúmenes de detección pueden presentar sensibilidad espacial o capacidad de localizar el punto en el que se ha depositado la energía por medio de la interacción gamma o del neutrón. Concretamente, es un aspecto de la invención, el módulo detector comprende un detector con capacidad de discriminación neutrón-gamma y al menos un detector de radiación gamma, que junto con el anterior conforma una cámara Compton de rayos gamma,
- un módulo de adquisición y procesado, conectado al módulo detector, con capacidad de sincronizar los volúmenes de detección en coincidencia temporal y procesar las señales generadas en dicho módulo, y
- opcionalmente, un módulo de visualización, que permite visualizar una imagen reconstruida o la localización espacial de la fuente emisora de radiación gamma y/o de neutrones.

La comunicación entre el módulo detector, el módulo de adquisición y procesado y opcionalmente el módulo de visualización puede ser por cableado o de manera inalámbrica.

Los detectores de radiación gamma que actúan como detector Compton se basan en la medida simultánea de varias interacciones de la radiación gamma en el volumen sensible de detección. Midiendo la posición y la energía depositada en dichas interacciones es posible reconstruir un cono de posibles direcciones de incidencia de la radiación para cada suceso registrado, cuya apertura viene dada por la ley de Compton para la dispersión de radiación electromagnética. Sobre estos datos se pueden aplicar múltiples técnicas de imagen Compton para reconstruir de manera precisa la posición de la fuente de radiación y su espectro energético.

Para ello se suelen utilizar varios detectores de radiación gamma sensibles a la energía y a las posiciones. Para la formación de imagen de la fuente de neutrones solo es imprescindible el colimador de neutrones y que uno de los detectores del sistema sea sensible a los neutrones. No es necesario que el dispositivo comprenda más de un detector con capacidad de discriminación neutrón/gamma ya que, al menos para la formación de la imagen Compton de la radiación gamma, los sucesos se deben registrar con la técnica de coincidencia temporal.

Esto permite optimizar el dispositivo en parámetros de resolución energética, eficiencia y otros aspectos. Por otro lado, parte del total de los detectores pueden presentar capacidad de identificación o discriminación neutrón/gamma, lo cual puede permitir una optimización del sistema en lo referente a la nitidez de la imagen de neutrones o a la relación señal/fondo en las imágenes de radiación y de neutrones obtenidas con este sistema.

La formación de imagen de neutrones en el módulo de visualización se consigue gracias al colimador mecánico, preferentemente de tipo *pin-hole* y fabricado preferentemente con un material con poco poder de absorción de la radiación gamma pero fuertemente absorbente de neutrones. Existen varios materiales apropiados, como polietileno dopado con litio. Concretamente, polietileno con litio enriquecido isotópicamente en ^{6}Li es particularmente apropiado debido a la ausencia de radiación secundaria en la absorción del neutrón. Otras alternativas comprenden polietileno borado, hidruro de litio, hidruro de litio enriquecido en ^{6}Li, etc.

El colimador mecánico se acopla al módulo detector, concretamente al detector con capacidad de discriminación neutrón-gamma. De este modo, se consigue optimizar la geometría para la reconstrucción óptica de la imagen de la fuente de neutrones.

El colimador mecánico tiene la ventaja de que esencialmente no interfiere con la formación de la imagen gamma. Además, al ser mucho más ligero que los colimadores mecánicos empleados para la formación de imágenes gamma mediante la técnica de colimación *pin-hole* (típicamente de tungsteno o plomo), permite la portabilidad del dispositivo.

Como se ha señalado, el colimador mecánico para la formación de imágenes de neutrones es preferentemente de tipo *pin-hole o cámara estenopeica*, comprendiendo en este caso un orificio de entrada para los neutrones. Alternativamente se pueden usar también colimadores mecánicos para los neutrones con aperturas de tipo de rendija, agujeros paralelos, convergente, divergente, multi *pin-hole* o máscaras codificadas.

En otro aspecto de la invención, el colimador mecánico es de tipo estenopeico o *pin-hole* y tiene una distancia focal (distancia entre el orificio de entrada y su parte posterior donde el primer detector va posicionado) que puede ser modificable mecánicamente de

manera que permite optimizar el campo de visión útil de la imagen de neutrones y la resolución espacial.

En otro aspecto de la invención, el colimador mecánico de neutrones se puede retirar o desacoplar del módulo detector. Se consigue con ello poder reconstruir la imagen gamma sin interferencia del colimador y aumentar la eficiencia de detección de neutrones significativamente. En este aspecto todavía es factible reconstruir la imagen de neutrones usando técnicas estadísticas alternativas si se realizan varias medidas sistemáticas entorno a la fuente emisora.

En otro aspecto de la invención, en el módulo de detección, el volumen sensible con capacidad de discriminación puede comprender un único cristal monolítico o una pluralidad de cristales de centelleo para la detección de radiación gamma y de neutrones, y un único fotosensor sensible a las posiciones o una pluralidad de fotosensores para formar un pulso eléctrico que se puede procesar en el módulo de adquisición y procesado para amplificar la señal eléctrica producida por los fotosensores.

En este caso, los fotosensores son preferentemente de tipo pixelado o tienen capacidad de identificar o proporcionar información sobre la localización del punto o puntos de interacción de la radiación gamma y los neutrones en el volumen sensible (centelleador inorgánico).

Preferentemente, los fotosensores son de tipo semiconductor. Se consigue con ello una mayor ligereza y compactación, comparado con la opción de emplear tubos fotomultiplicadores sensibles a las posiciones o matrices de tubos fotomultiplicadores. Una ventaja adicional del uso de fotosensores de tipo semiconductor es debida a su bajo consumo eléctrico, bajo amperaje y bajo voltaje de operación (decenas de voltios frente a centenas/miles de voltios que requieren los tubos fotomultiplicadores convencionales), lo cual es una ventaja para su uso en aplicaciones que requieren reducido volumen y/o portabilidad.

Como se ha descrito anteriormente, en el módulo de detección, al menos uno de los volúmenes de detección puede ser un detector con capacidad de discriminación neutrón-gamma. Los detectores con capacidad de discriminación serán

preferentemente cristales de centelleo monolíticos o pixelados. Además, están acoplados ópticamente a fotosensores o fotomultiplicadores sensibles a la posición.

En otro aspecto de la invención, el módulo detector comprende más de dos detectores de radiación gamma. La pluralidad de detectores se puede disponer en dos, tres o más planos diferentes (preferentemente paralelos). Esto permite registrar en coincidencia temporal tres o más interacciones de un mismo rayo gamma, lo cual posibilita una mejor reconstrucción de la imagen gamma en el rango de altas energías (>5MeV) y una mejor reconstrucción del espectro de energía y por lo tanto de la identificación del isótopo emisor de la radiación.

Los detectores de radiación gamma comprenden preferentemente un cristal centelleador inorgánico acoplado a un fotosensor semiconductor o a uno o más fotomultiplicadores pixelados.

Asimismo, la detección en tres o más volúmenes de la radiación gamma incidente permite una mejor reconstrucción de la imagen especialmente cuando se desconoce la fuente de radiación gamma y, por tanto, la energía inicial de los rayos gamma.

En otro aspecto de la invención, en el módulo de detección, la distancias entre los volúmenes de detección se puede variar dinámicamente de manera discreta o continua para optimizar el rendimiento del módulo detector en términos de resolución de imagen gamma y eficiencia, lo cual da mayor versatilidad y amplía las posibles aplicaciones del dispositivo.

En otro aspecto de la invención, el módulo de detección, que comprende una pantalla de visualización de datos para mostrar imágenes de las fuentes de radiación gamma y de neutrones, incluye adicionalmente una cámara óptica, de tipo RGB o RGB-D (*Red Green Blue -Depth*, Rojo Verde Azul – Profundidad) que permite fusionar la imagen de radiación con la imagen visible, permitiendo una localización rápida de cualquier tipo de fuente emisora.

En otro aspecto de la invención, el sistema se puede complementar con métodos de visión artificial. Estos métodos, como por ejemplo marcadores fiduciales binarios de tipo Aruco, permiten estimar la pose del sistema de detección, proporcionando una

correspondencia entre las posiciones reales (3D) y sus imágenes proyectadas o medidas (2D) con la cámara RGB.

Adicionalmente, el dispositivo emplea estos métodos y una combinación de múltiples medidas o poses para el cálculo de las distribuciones espaciales tridimensionales de las fuentes emisoras registradas.

En otro aspecto de la invención, el dispositivo puede comprender adicionalmente una cámara térmica, para contrastar tanto las imágenes en el campo visual, como con la imagen de radiación gamma, la imagen de neutrones y el mapa térmico del campo de visión.

En otro aspecto de la invención, el orificio del colimador se puede suplementar con insertos o lentes, con una geometría tal que permiten una reducción conveniente del tamaño del orificio, permitiendo así una mayor resolución espacial para la imagen de neutrones y una mayor versatilidad del sistema.

En resumen, el reducido tamaño y peso del dispositivo objeto de invención se traducen en una elevada portabilidad, lo cual representa una ventaja fundamental para aplicaciones médicas en las que el dispositivo se debe integrar en un entorno médico especial. La portabilidad resulta crucial para inspecciones de seguridad y defensa a bordo de sistemas de vuelo no tripulados, así como en aplicaciones de control de material radiactivo (desmantelamiento de centrales nucleares, monitorización de residuos, accidentes nucleares), donde el dispositivo pueda necesitar ser trasportado y operado por humanos.

La invención plantea, por tanto, una solución a los problemas técnicos descritos en secciones anteriores, y proporciona un dispositivo de detección simultánea de fuentes de radiación gamma y de neutrones, que permite localizar simultáneamente ambos tipos de fuentes mediante una única medida.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de

dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra un corte transversal del colimador mecánico con geometría *pin-hole* acoplado al módulo detector, conectado al módulo de adquisición y procesado, ilustrando el principio de detección y localización simultánea de fuentes de neutrones y fuentes de radiación gamma.

Figura 2.- Muestra un corte transversal del colimador mecánico acoplado al módulo detector, detallando los parámetros clave del colimador mecánico (F distancia focal, D diámetro del orificio de entrada y T espesor del colimador).

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

Se describe a continuación, con ayuda de las figuras 1 y 2, una realización preferente del dispositivo de detección simultánea de fuentes de radiación gamma y de neutrones.

Tal y como se muestra en la figura 1, el dispositivo, que es preferiblemente portátil, comprende en primer lugar un colimador mecánico (1), que se posiciona frente a una fuente emisora (61, 62), que puede ser una fuente emisora de radiación gamma (61) y/o una fuente de neutrones (62).

Para ser detectable la fuente emisora (61, 62) puede estar en cualquier punto del espacio. Sin embargo, para poder formar una imagen de ella la fuente emisora (61, 62) debe estar preferentemente frente al colimador mecánico (1) en el campo de visión del mismo, el cual se puede ajustar tal y como se describe más abajo.

El colimador mecánico (1) es el que permitirá formar una imagen de la fuente de neutrones (62), puesto que está basado en un material altamente absorbente de neutrones, pero esencialmente transparente para la radiación gamma, como por ejemplo polietileno enriquecido con ^{6}Li, es decir polietileno litiado preferentemente enriquecido isotópicamente en ^{6}Li, $^{6}Li(CH_2)_n$, u otros materiales ligeros con un alto coeficiente de absorción neutrónica como ^{nat}LiH, ^{6}LiH, $^{6}Li_2CO_3$, $^{10}B-(CH_2)_n, etc.$

El colimador mecánico (1) es de tipo *pin-hole*, accediendo los neutrones a su interior principalmente a través de un orificio de entrada (11), tal y como se indica en la figura

1. Por otro lado, el colimador mecánico (1) bloquea la mayor parte de los neutrones que no inciden a través del orificio de entrada (11) del mismo.

El dispositivo comprende, además, un módulo detector, acoplado al colimador mecánico (1), en la cara opuesta a la de las fuentes emisoras de rayos gamma (61) y de neutrones (62), y que también se representa en la figura 1. El módulo detector comprende una serie de volúmenes detectores, siendo uno de ellos un primer detector (2) con capacidad de discriminación gamma-neutrón, y que además es sensible a las posiciones de interacción de las partículas con los otros volúmenes detectores activos del módulo. El primer detector (2) puede ser, por ejemplo, un cristal centelleador, monolítico o pixelado, acoplado a un fotosensor sensible a las posiciones, como por ejemplo un tubo fotomultiplicador sensible a las posiciones o un fotomultiplicador pixelado de silicio.

El colimador mecánico (1) puede envolver completamente, a excepción del orificio de entrada (11) de colimación al módulo detector, o puede hacerlo parcialmente como en la realización preferente que se muestra en la figura 1, en la que envuelve al primer detector (2), cuya configuración asume que las fuentes de neutrones (62) se encuentran en la parte frontal del dispositivo. Dicha configuración permite una reducción de volumen y un acercamiento entre los planos de diferentes volúmenes detectores permitiendo una mayor versatilidad en términos de prestaciones de resolución espacial.

La combinación entre el colimador mecánico (1) y el primer detector (2) del módulo detector actúa para los neutrones como una cámara estenopeica, posibilitando así la formación de una imagen óptica invertida de la fuente de neutrones (62) que podría ser puntual o estar distribuida espacialmente. Este funcionamiento es análogo al de una cámara de Anger para la radiación gamma, en la cual se emplea un colimador de tipo *pin-hole* fabricado con un material pesado (tungsteno o plomo generalmente) acoplado a un detector de radiación sensible a las posiciones o a una matriz de detectores de radiación.

Este concepto está representado esquemáticamente en la figura 1, donde se ilustra cómo únicamente los neutrones que inciden en el orificio de entrada (11) del colimador mecánico (1) llegan a causar una señal o interacción en el primer detector (2).

El colimador mecánico (1) es especialmente eficaz en absorber neutrones de baja energía, en todo el rango energético comprendido entre neutrones térmicos (0.025 eV),

lentos y hasta de energías intermedias (centenas de eV). La eficacia del colimador mecánico (1) en la absorción de neutrones y por tanto en la formación de una imagen de la fuente de neutrones (62) depende de la energía de los mismos y del espesor del colimador mecánico (1). Por lo tanto, el espesor del colimador mecánico (1) de neutrones se puede optimizar para cada aplicación en concreto.

El espesor del colimador mecánico (1) viene representado por la letra T en la figura 2. Dicho espesor de colimador mecánico (1) determinará el rango de energías para las cuales es posible la formación de la imagen de la fuente de neutrones (62). A modo de ejemplo, para espesores de 2-3 cm el rango de energías del neutrón para las cuales es posible la formación de una imagen está entre valores térmicos (eV) hasta energías intermedias (centenas de eV).

En la figura 2 se representan también otras dimensiones características y ajustables del colimador mecánico (1), como la distancia focal (F) y el diámetro (D) del orificio de entrada (11). Estos parámetros permiten ajustar o determinar la resolución espacial (angular) del sistema para la formación de la imagen de neutrones, el campo de visión y la eficiencia de detección. En una realización de la invención, el espesor del colimador (T) se puede ajustar o variar mediante una serie de colimadores que encajan unos dentro de otros. Tanto la apertura (D) del colimador mecánico (1) como su geometría se pueden variar mediante un sistema de insertos o lentes que se alojan dentro del orificio de entrada (11) principal mostrado en la Fig.1.

En el caso del primer detector (2) de la presente invención, se trata de cualquier cristal centelleador con capacidad de discriminación neutrón-gamma, especialmente sensible a neutrones térmicos. Entre los distintos cristales con estas características, preferentemente se contemplan los de tipo CLYC6 enriquecido en ^{6}Li para este uso debido a la alta sección eficaz de la reacción $^{6}Li + n = {}^{3}H + \alpha$ en la zona térmica del espectro energético de los neutrones.

Para poder detectar e identificar los sucesos de neutrones o partículas gamma con el primer detector (2), el dispositivo comprende un módulo de adquisición y procesado (4) representado también en la figura 1 y conectado al módulo detector. La identificación de sucesos de tipo neutrón y la discriminación con respecto a la radiación gamma se realiza con técnicas convencionales de análisis de la función de respuesta o de forma de pulso.

Además, conectado al módulo de adquisición y procesado (4) el dispositivo comprende un módulo de visualización (5) que permite la visualización de la información obtenida en el módulo de adquisición y procesado (4) así como las imágenes de las fuentes de radiación gamma (61) y las fuentes de neutrones (62).

Por otro lado, para la formación de imagen gamma, el módulo detector comprende un detector de radiación gamma (3) sensible a la posición de interacción de la radiación, dispuesto a continuación del primer detector (2), tal y como se muestra en las figuras 1 y 2. La combinación, en el módulo de detección, del primer detector (2) y el detector de radiación gamma (3) permite obtener una imagen gamma, que se muestra en el módulo de visualización (5), por la técnica convencional de colimación electrónica o de tipo Compton, ya que el colimador mecánico (1) prácticamente no interfiere para la radiación electromagnética en la colimación electrónica.

Dependiendo del espesor (T) del colimador mecánico (1), éste resultará prácticamente transparente para los rayos gamma por encima de un cierto valor energético. En el ejemplo de un espesor de 2-3 cm, resulta prácticamente transparente a la radiación gamma para energías por encima de aproximadamente 250keV. Este es el rango de energías para el cual el dispositivo objeto de invención permite formar una imagen gamma, mediante la técnica de colimación electrónica (Compton), sin necesidad de usar otros elementos, gracias a los dos volúmenes de detección (2, 3), y gracias a que el colimador mecánico (1) no interfiere en este proceso. Asimismo, para un rango inferior de energías es posible obtener una imagen gamma, aplicando filtros o correcciones, para corregir el efecto del colimador mecánico (1).

Para espesores (T) del colimador mecánico (1) de 3-5 cm es posible visualizar fuentes de neutrones (62) con energías más elevadas, llegando a energías de neutrón de 100 keV. En este caso el rango de energías de radiación gamma a partir de las cuales se puede formar una imagen sin tener interferencia del colimador mecánico (1) es a partir de aproximadamente 400-500keV. De nuevo, en el rango inferior de energías sigue siendo plausible obtener una imagen libre de artefactos aplicando correcciones específicas debidas al colimador mecánico (1).

El detector de radiación gamma (3) no necesariamente ha de poseer capacidad de discriminación neutrón-gamma, ya que solamente es necesario para la formación de la imagen gamma. El detector de radiación gamma (3) posee alta resolución energética,

con la finalidad de mejorar la identificación espectroscópica y con la finalidad de determinar de manera precisa la energía de la radiación incidente, lo cual repercute en la mayor resolución de la imagen obtenida y en la identificación precisa de los radioisótopos emisores de radiación gamma.

Para aumentar la eficiencia de detección gamma, el detector de radiación gamma (3) comprende una matriz de cuatro cristales preferentemente monolíticos que pueden ser, por ejemplo, de haluro de lantano $LaBr_3(Ce)$ o $LaCl_3(Ce)$. Cada cristal tiene una geometría preferentemente de paralelepípedo. Igualmente puede comprender cristales monolíticos o matrices de cristales (cristales pixelados). La sensibilidad en posición se obtiene acoplando cada cristal, o matriz de cristales pixelados, a un fotosensor pixelado o sensible a las posiciones. Este puede ser un tubo fotomultiplicador pixelado, o un fotomultiplicador pixelado de silicio.

En un aspecto de la invención, el dispositivo puede comprender más de un detector de radiación gamma (3), uno o varios de ellos pueden ser además sensibles a neutrones térmicos, lo que permite ampliar la eficiencia de detección de neutrones y mejorar la relación señal/fondo en las imágenes de radiación gamma y de neutrones. Además, uno de los detectores de radiación gamma (3) puede ser también sensible a neutrones rápidos o de alta energía (keV - decenas MeV), con lo que el dispositivo sirve también para detectar la presencia de neutrones de alta energía.

La imagen de la fuente emisora de radiación gamma (61) se puede realizar aplicando la técnica Compton, en la cual se puede calcular, suceso a suceso, un cono Compton, como el mostrado en la figura 1, a partir de las energías medidas en los volúmenes detectores (2, 3) y de las posiciones de interacción de la radiación gamma medida en los mismos volúmenes detectores (2, 3). La apertura de este cono se representa en la figura 1 como θ, y viene dada por la ley de dispersión Compton para la radiación:

$$\frac{1}{E_{\gamma,i}} - \frac{1}{E_{\gamma,f}} = \frac{h}{m_e c^2}(1 - cos\theta)$$

Donde $E_{\gamma,i}$ y $E_{\gamma,f}$ son las energías del rayo gamma incidente y del rayo gamma dispersado, respectivamente, *h* es la constante de Plank, $m_e c^2$ representa la masa del electrón (511keV) y θ corresponde al ángulo Compton de dispersión formado entre la dirección del rayo gamma incidente y el rayo gamma dispersado. Para un detector

absorbente suficientemente grueso, se puede asumir que $E_{\gamma,f} = E_2$, donde E_2 es la energía medida con el detector de radiación gamma (3). Si se desconoce la energía de la radiación incidente, en buena aproximación se puede asumir para un rango amplio de energías, que $E_{\gamma,i} = E_1 + E_2$, donde E_1 es la energía medida en el primer detector (2).

Para aumentar el rango de energías gamma en el que se puede formar una imagen, es posible añadir detectores de radiación gamma (3) adicionales, a continuación del detector de radiación gamma (3) primero, en planos sucesivos.

La reconstrucción de la imagen de la fuente de radiación gamma (61) es posible mediante métodos de retro-proyección (*backprojection*), métodos estadísticos de máxima verosimilitud y otras técnicas similares ampliamente descritas en la literatura científica.

Es finalmente objeto de la presente invención un método de detección simultánea de fuentes de radiación gamma (61) y de neutrones (62), que comprende las etapas de:

- posicionamiento del dispositivo en un escenario a inspeccionar,
- adquisición de una pluralidad de medidas de radiación gamma y de neutrones,
- adquisición de una imagen en el visible registrada con cámaras RGB o RGB-D, y con la posibilidad de ser suplementada con técnicas de visión artificial,
- discriminación de señales registradas en el primer detector (2) con capacidad de discriminación neutrón-gamma, identificando en cada caso si se trata de radiación gamma o de un neutrón,
- formación de una imagen de la fuente de neutrones (62) con las señales registradas en el primer detector (2),
- lectura de señales registradas en los volúmenes detectores (2, 3),
- formación de una imagen de la fuente de radiación gamma (61) con las señales registradas en los volúmenes detectores (2, 3) en coincidencia temporal,
- superposición de las imágenes gamma y de neutrones obtenidas en los pasos anteriores con la imagen visible registrada con la cámara RGB o RGB-D para esa pose de detección,
- cuantificación de las actividades de las fuentes de radiación gamma (61) y de neutrones (62) en el campo de visión del sistema de detección,
- reconstrucción en el espacio tridimensional de la distribución de las fuentes de radiación gamma (61) y de neutrones (62) a partir de los datos adquiridos en las distintas poses.

REIVINDICACIONES

1.- Dispositivo de detección, identificación, cuantificación y localización simultánea de fuentes de radiación gamma (61) y de neutrones (62), que comprende:

- un colimador mecánico (1) de un material absorbente de neutrones transparente a la radiación gamma, destinado a posicionarse frente a las fuentes de radiación gamma (61) y de neutrones (62), en el que el colimador mecánico (1) es de un tipo seleccionado entre colimador mecánico de tipo pin-hole, estenopeico, rendija (slit), agujeros paralelos, convergente, divergente, pin-hole múltiple y de máscara codificada,
- un módulo de detección, que comprende:
  - o un primer detector (2) con capacidad de detección de neutrones y de discriminación gamma-neutrón, acoplado al colimador mecánico (1),
  - o uno o más detectores de radiación gamma (3), a continuación del primer detector (2), en una cara opuesta al colimador mecánico (1), donde el uno o más detectores de radiación gamma (3) comprenden un cristal centelleador inorgánico acoplado a un fotosensor semiconductor o a uno o más fotomultiplicadores pixelados,
  - o uno o más fotosensores, acoplados ópticamente al primer detector (2) y/o al uno o más detectores de radiación gamma (3), y
- un módulo de adquisición y procesado (4), asociado al primer detector (2) y a los detectores de radiación gamma (3).

2.- El dispositivo de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un módulo de visualización (5) conectado al módulo de adquisición y procesado (4), configurado para visualizar una imagen reconstruida de localización espacial de la(s) fuente(s) emisora(s) de radiación gamma (61) y de la(s) fuente(s) de neutrones (62).

3.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el módulo de detección comprende adicionalmente una cámara óptica RGB o RGB-D (Red Green Blue – Depth, Rojo Verde Azul – Profundidad).

4.- El dispositivo de la reivindicación 3, en el que la cámara óptica comprende adicionalmente elementos de visión artificial tipo aruco.

5.- El dispositivo de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un mecanismo de modificación mecánica de la distancia focal (F) del colimador mecánico (1).

6.- El dispositivo de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un mecanismo de modificación de la geometría y/o de la apertura de colimación (D) del colimador mecánico (1).

7.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que los fotosensores acoplados ópticamente al primer detector (2) y/o al detector de radiación gamma (3) son de tipo semiconductor pixelado.

8.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el colimador mecánico (1) es desacoplable del primer detector (2).

9.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el detector de radiación gamma (3) es desacoplable del primer detector (2).

10.- El dispositivo de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un mecanismo de regulación de separación entre el primer detector (2) y el detector de radiación gamma (3).

11.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el colimador mecánico (1) es de un material seleccionado entre ^{nat}LiH, ^{6}LiH, $^{6}Li_2CO_3$ y $^{10}B-(CH_2)_n$.

12.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que uno de los detectores de radiación gamma (3) es adicionalmente sensible a neutrones de baja energía en el rango de térmicos (0.025 eV) a lentos (eV).

13.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que uno de los detectores de radiación gamma (3) presenta capacidad de discriminación neutrón-gamma y es sensible a neutrones de alta energía (keV- decenas MeV).

14.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el detector de radiación gamma (3) comprende una pluralidad de detectores paralelos entre sí en diferentes planos.

15.- El dispositivo de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente una cámara térmica asociada al módulo de adquisición y procesado (4).

16.- Método de detección, identificación, cuantificación y localización simultánea de fuentes de radiación gamma y de neutrones, que hace uso del dispositivo descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1-15, que comprende las etapas de:

- posicionamiento del dispositivo en un escenario a inspeccionar,
- adquisición de una tasa de contaje durante un cierto tiempo en el módulo detector,
- discriminación de señales registradas en el primer detector (2) identificando si se trata de radiación gamma o de un neutrón,
- formación de una imagen de la fuente de neutrones (62) con las señales registradas en el primer detector (2),
- procesado de señales registradas en el módulo detector identificadas como sucesos de radiación gamma,
- formación de una imagen de la fuente de radiación gamma (61) con las señales registradas en el módulo detector,
- adquisición de una imagen óptica y/o fotografía, y
- superposición de las imágenes obtenidas para localizar espacialmente las fuentes (61, 62) en el entorno del dispositivo sobre referencias visuales.
- identificación de los neutrones y partículas gamma a partir de las señales registradas en el módulo detector
- cuantificación de la actividad de las fuentes de neutrones (62) y de las fuentes de radiación gamma (61), a partir de las tasas de contaje registradas y de las imágenes obtenidas.

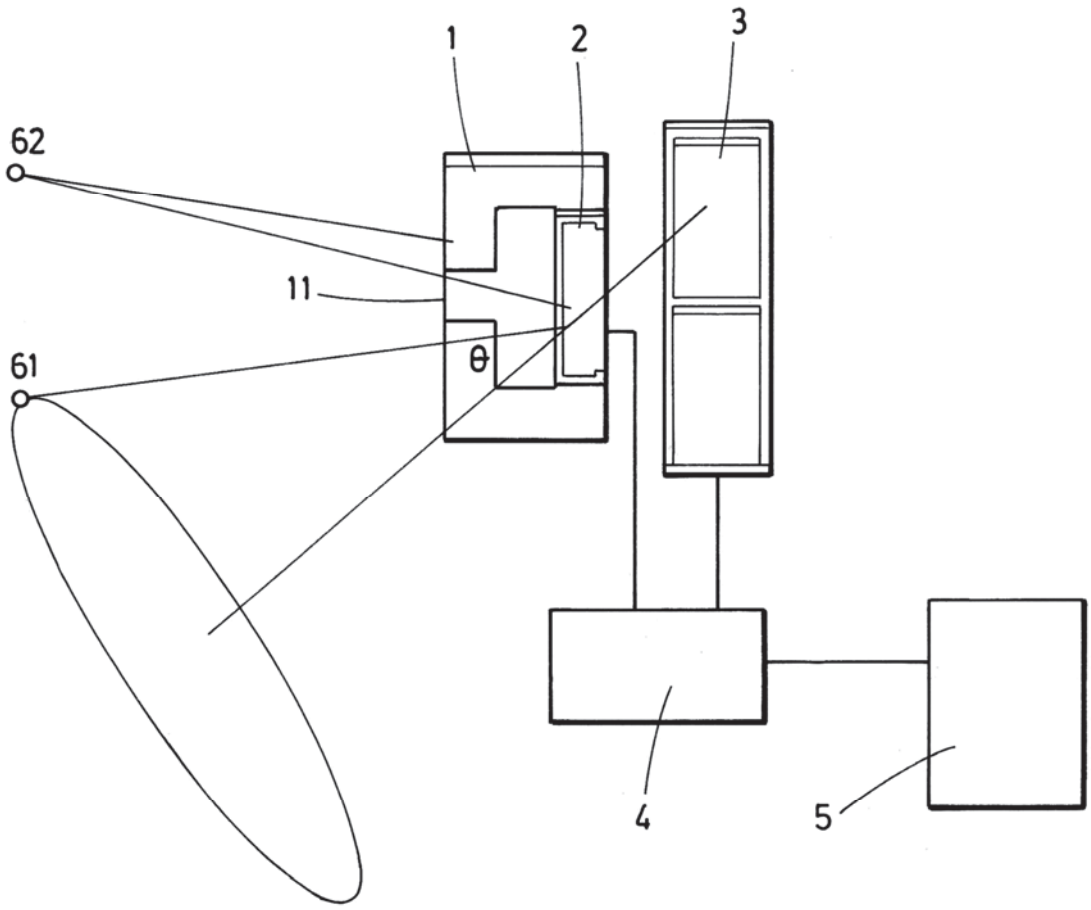

FIG.1

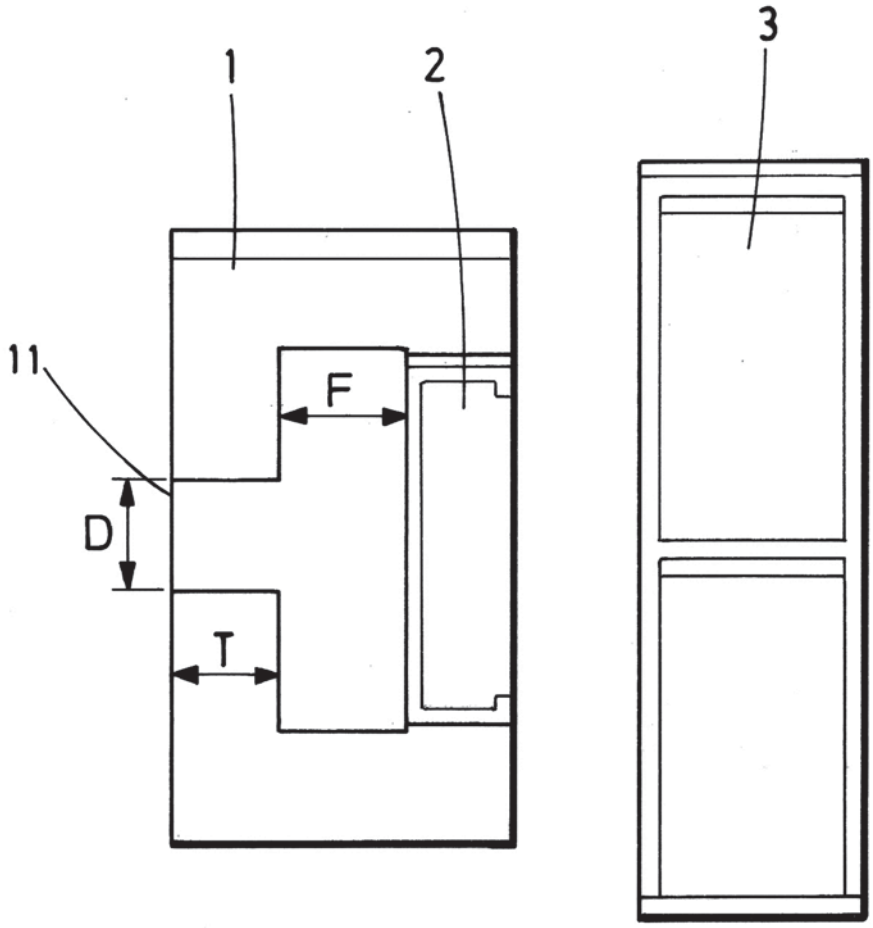

FIG.2