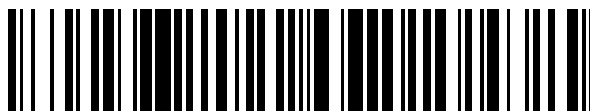


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 632 929**

51 Int. Cl.:

**G01T 1/20** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.03.2014 PCT/EP2014/055589**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.10.2014 WO14154556**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.03.2014 E 14711260 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2017 EP 2979114**

54 Título: **Detector de trazas de partículas ionizantes**

30 Prioridad:

**25.03.2013 FR 1352626**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**18.09.2017**

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)  
Bâtiment le Ponant D, 25 rue Leblanc  
75015 Paris, FR y  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**LEBRUN, FRANÇOIS;  
TERRIER, RÉGIS;  
LAURENT, PHILIPPE;  
OLIVETTO, CHRISTIAN y  
BRELLE, ERIC**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 632 929 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Detector de trazas de partículas ionizantes

### Campo técnico

5 La presente invención se relaciona con un detector de trazas de partículas ionizantes, estando producidas las trazas por centelleo durante el paso de partículas ionizantes en un centellador.

### Estado de la técnica anterior

10 Un centellador es un material que emite luz como consecuencia de la absorción de una radiación ionizante, tal como un fotón o una partícula cargada. En efecto, cuando un material es atravesado por una partícula cargada, ella misma producida eventualmente por un fotón, las moléculas de este material son "excitadas", es decir que un electrón pasa de un nivel energético a un nivel energético superior. La desexcitación de este electrón, es decir la vuelta a descender del electrón a un nivel menos energético, se acompaña de la emisión de un fotón que, en este caso, es un fotón visible. Cuando una partícula (tal como un electrón, un alfa o un ion, por ejemplo) se propaga en un material centelleante, se emite luz a lo largo de la trayectoria. La cantidad de luz producida puede estar ligada a la cantidad de energía aportada por la partícula que ha interactuado con el material. La medida de esta cantidad de luz permite, así, medir la energía depositada en el centellador. Esta última aplicación es la más frecuente pero estos detectores se utilizan igualmente para localizar interacciones. Esta localización puede llevarse a cabo utilizando o bien segmentando el centellador o bien por determinación del baricentro de la luz emitida, como en las cámaras gamma.

20 Estas cámaras gamma se utilizan principalmente para detectar materiales radioactivos, por ejemplo en caso de fuga en una central nuclear, y en el campo médico con el fin de observar los órganos de un paciente y las perturbaciones eventuales de estos órganos generadas por enfermedades. Para hacer esto, un elemento radioactivo que emite fotones gamma es inyectado en el cuerpo de un paciente. La observación de los fotones gamma permite conocer la distribución del elemento radioactivo en el organismo. La cámara gamma permite observar estos fotones gamma. Para hacer esto, una cámara gamma incluye, generalmente:

- 25 - un colimador que permite seleccionar la dirección de los fotones que van a formar la imagen en el plano de detección;
- un centellador que permite convertir los fotones gamma en fotones visibles;
- fotomultiplicadores que permiten convertir los fotones visibles en señales eléctricas.

30 Los colimadores de la técnica anterior están formados, en general, de tubos muy delgados que permiten seleccionar los fotones gamma recibidos por el centellador. Cuanto más delgados son los tubos del colimador, mejor es la resolución espacial de la cámara gamma, pero es más pequeña la cantidad de fotones recibidos por el centellador. Así, en las cámaras gamma de la técnica anterior, es necesario inyectar dosis sustanciales de producto radioactivo para obtener imágenes explotables.

35 Por otro lado, existen también en la técnica anterior detectores de trazas. Los primeros detectores de trazas eran cámaras de niebla y cámaras de burbujas en las que se tomaban fotografías que hacía falta digitalizar a continuación sobre tablas de proyección. Con la cámara de hilos, se hizo posible la digitalización directa de los datos. Hoy en día, los detectores de trazas de tipo cámara de deriva se utilizan corrientemente para detectar la traza de partículas cargadas sobre grandes superficies. Estos detectores gaseosos proporcionan una resolución espacial inferior a 150 µm para un pequeño número de canales de medida, pero son voluminosos y necesitan envoltorios para contener el gas y tuberías para renovar el gas. Los detectores de silicio no tienen estos inconvenientes y permiten conseguir resoluciones de algunas decenas de micras. Sin embargo, los detectores de silicio de pistas, a fortiori de píxeles, necesitan un gran número de canales de medida, una por pista o por píxel, y el consumo del sistema puede llegar a ser prohibitivo. Por otro lado, estos detectores de silicio son relativamente costosos.

45 Un detector de trazas de partículas ionizantes se conoce también del documento de patente alemana DE 195 05 729 C1. Este documento describe un detector con un centellador y un formador de imágenes de silicio, comprendiendo el detector también una red de microlentes unida directamente al centellador o al formador de imágenes.

### Exposición de la invención

50 La invención tiene como objetivo remediar los inconvenientes del estado de la técnica proponiendo un detector de trazas de partículas en un centellador cuyo consumo eléctrico y el coste sigan siendo razonables, sin sacrificar la resolución espacial.

Otro objeto de la invención es proponer un detector de trazas de partículas que permite realizar una imagen en tres dimensiones de una traza de partícula ionizante.

Por fin, otro objeto de la invención es proponer una cámara gamma mucho más sensible que las de la técnica

anterior.

5 Para hacer esto, la invención propone utilizar una red de microlentes para realizar una imagen de la traza centelleante. Cada microlente de la red de microlentes proyecta, sobre un formador de imágenes, la imagen de la traza de las partículas ionizantes. Así, según la invención, la información sobre la traza en el centellador no se transmite ya de manera eléctrica sino de manera óptica gracias a las microlentes que focalizan los fotones emitidos por la traza centelleante sobre el formador de imágenes.

Con más precisión, la invención propone, según un primer aspecto, un detector de trazas de partículas ionizantes que incluye:

- un centellador apto para emitir fotones cuando es atravesado por las partículas ionizantes;
- 10 - un primer formador de imágenes apto para detectar cada fotón emitido por el centellador;
- una primera red de microlentes, estando dispuesta cada microlente de la primera red de microlentes para formar una imagen de la traza de las partículas ionizantes focalizando los fotones emitidos en el centellador, sobre el primer formador de imágenes.

15 El hecho de utilizar una red de microlentes permite detectar las partículas ionizantes también cuando crean una cantidad pequeña de fotones en el centellador. Además, gracias a la utilización de microlentes, la resolución espacial del detector está limitada únicamente por las características ópticas de las microlentes y por la resolución espacial del formador de imágenes. Además, la utilización de una red de microlentes permite tener una profundidad de campo muy buena, de suerte que la imagen puede ser nítida cualquiera que sea la posición de la zona centelleante, es decir, de la zona del centellador en la cual se emiten los fotones. Además, el hecho de utilizar una

20 red de microlentes permite realizar una imagen estereoscópica de la traza creada en el centellador. Esta información de tres dimensiones permite utilizar una máscara codificada dispuesta entre la fuente de partículas y el centellador en lugar de colocar un colimador de manera que se aumente la eficacia de detección de una cámara gamma.

El detector de partículas puede, igualmente, incluir una o varias de las características que siguen tomadas individualmente o según todas las combinaciones técnicamente posibles:

- 25 - el primer formador de imágenes incluye una pluralidad de detectores elementales, estando cada microlente de la primera red de microlentes acoplada a al menos dos detectores elementales del primer formador de imágenes;
- cada microlente de la primera red de microlentes presenta una distancia focal, siendo la distancia  $D$  entre la primera red de microlentes y el primer formador de imágenes estrictamente superior a la distancia focal de las microlentes;
- 30 - el primer formador de imágenes presenta una resolución espacial mejor que 1 mm, y ventajosamente mejor que 200  $\mu\text{m}$ , de manera que se pueda localizar con precisión una partícula ionizante;
- el primer formador de imágenes debe, preferiblemente, ser suficientemente sensible de manera que pueda detectar y localizar cada fotón del centellador, es decir, que la señal producida por cada fotón debe ser superior al ruido;
- el primer formador de imágenes puede estar formado por un CMOS o por un CCD (dispositivo de carga acoplada);
- 35 - el primer formador de imágenes incluye preferiblemente una matriz formada por varios detectores elementales, o píxeles, siendo apto cada detector elemental para crear cargas cuando reciben un fotón;
- cada detector elemental presenta preferiblemente dimensiones inferiores o iguales a 1 mm, y de manera más preferible inferiores o iguales a 200  $\mu\text{m}$ , de manera que forme un formador de imágenes que presenta una resolución espacial muy buena;
- 40 - cada detector elemental es preferiblemente un fotomultiplicador, ventajosamente un fotodiodo de avalancha. Cada fotodiodo de avalancha funciona preferiblemente en modo saturado o modo Geiger, de suerte que cada fotodiodo de avalancha forma un píxel que indica la presencia o la ausencia de fotón recibido en la zona del espacio que representa. Un formador de imágenes tal permite tener una resolución espacial muy buena al tiempo que tiene una sensibilidad muy buena y siendo muy rápido;
- 45 - el primer formador de imágenes igualmente incluye, preferiblemente, un sistema de lectura digital apto para identificar qué detector elemental ha recibido un fotón;
- el detector de trazas de partículas incluye preferiblemente medios de cálculo aptos para calcular la posición tridimensional de la zona centelleante en el centellador a partir de las imágenes del centellador proyectadas sobre el primer formador de imágenes por las microlentes. En efecto, cada microlente proyecta una imagen diferente del centellador sobre el primer formador de imágenes. Comparando las imágenes proyectadas por varias lentes diferentes, se puede pues reconstituir una imagen en tres dimensiones del centellador con una resolución espacial muy buena;
- 50

- el centellador presenta preferiblemente una forma paralelepípedica que incluye:

- o una cara principal de detección que se extiende según un plano de referencia (x,y);
- o una cara secundaria de detección que se extiende perpendicular al plano de referencia (x,y);

5 - la primera red de microlentes y el primer formador de imágenes se extienden preferiblemente en paralelo con la cara principal de detección, de manera que se tiene una resolución espacial muy buena en (x,y) cualquiera que sea la profundidad z a la cual se encuentre en el centellador;

- el detector incluye, además, preferiblemente:

- o un segundo formador de imágenes apto para detectar cada fotón proveniente del centellador;
- o una segunda red de microlentes, estando dispuesta cada microlente de la segunda red para formar una imagen de la traza de las partículas focalizando los fotones emitidos en el centellador sobre el segundo formador de imágenes;

10

- la segunda red de microlentes y el segundo formador de imágenes se extienden preferiblemente en paralelo con la cara secundaria de detección del centellador de manera que se aumente la resolución espacial del detector según la dirección perpendicular al plano de referencia;

15 - cada red de microlentes presenta preferiblemente una malla cuadrada;

- cada microlente presenta preferiblemente dimensiones comprendidas entre 0,5 y 5 mm;

- cada microlente presenta preferiblemente una abertura numérica comprendida entre 0,2 y 0,3, de manera que no se limite la cantidad de fotones que serán focalizados en buenas condiciones.

20 El detector de trazas de partículas ionizantes según la invención permite particularmente visualizar trazas de partículas cargadas tales como partículas  $\alpha$ , iones, fotones, electrones que resultan eventualmente de una interacción de fotones energéticos tales como los fotones X o gamma. En efecto, se puede así realizar por estereoscopia imágenes en tres dimensiones de trazas de partículas ionizantes en el centellador sin tener que recurrir a un gran número de canales de medida.

25 Según un modo de realización, el detector de trazas de partículas puede ser una cámara gamma. Una cámara gamma tal presenta entonces una sensibilidad muy grande, alrededor de 100 veces mejor que las cámaras gamma de la técnica anterior, y una buena resolución espacial.

30 En el caso en el que el detector de trazas de partículas es una cámara gamma, el detector de trazas de partículas incluye preferiblemente una máscara codificada dispuesta entre la fuente de fotones gamma y el centellador. Es la utilización de la red de microlentes la que permite la utilización de la máscara codificada a una distancia corta de la fuente (por ejemplo, inferior a 1 m), lo que le permite a ella misma aumentar considerablemente el número de fotones gamma que llegan sobre el centellador y aumentar así la sensibilidad de la cámara.

### Breve descripción de las figuras

Otras características y ventajas de la invención resultarán de la lectura de la descripción detallada que sigue, en referencia a las figuras anexas, que ilustran:

35 - la figura 1, una representación esquemática de un detector de trazas de partículas según un primer modo de realización de la invención;

- la figura 2, una representación esquemática de un detector de trazas de partículas según un segundo modo de realización de la invención;

40 - la figura 3, una representación esquemática de una cámara gamma según un tercer modo de realización de la invención.

Para mayor claridad, los elementos idénticos o similares se marcan por signos de referencia idénticos en el conjunto de figuras.

### Descripción detallada de al menos un modo de realización

45 La figura 1 representa un detector 1 de trazas de partículas ionizantes según un primer modo de realización de la invención. En este primer modo de realización, el detector 1 es un detector de trazas que permite visualizar la traza centelleante generada por el paso de una partícula ionizante en el centellador. Se comprenderá aquí por "partícula ionizante" una partícula cargada como un protón, un ion o un electrón resultante eventualmente de la interacción de un fotón energético como los fotones X o gamma.

El detector de trazas de partículas ionizantes 1 incluye un centellador 2. El centellador 2 es un medio centelleante, es decir, que está formado por un material apto para emitir fotones, en general fluorescentes, cuando es atravesado por las partículas ionizantes que se quieren seguir. Así, de una manera general, una partícula ionizante produce al menos una interacción 14 en el material centellador 2. Esta interacción libera una gran cantidad de fotones, denominados fotones de centelleo 15, siendo detectados estos últimos por un formador de imágenes 5 acoplado ópticamente con el centellador 2. Una partícula ionizante puede interaccionar múltiples reprises con el centellador. Aunque estas interacciones se producen sucesivamente en el tiempo, su decalaje temporal es tan pequeño que pueden considerarse como simultáneas. Así, una partícula ionizante detectada por el detector 1 produce al menos una o varias interacciones 14 en el detector. El conjunto de lugares de interacción en el detector constituye la traza de la partícula en el detector. La traza puede ser puntual (un solo punto de interacción) o tener la forma de una línea recta o de una curva errática, que une los diferentes puntos de interacción.

El material escogido para el centellador 2 debe ser el más centelleante posible, es decir, producir el mayor número posible de fotones por unidad de energía perdida, es decir, preferiblemente al menos 5 fotones por keV. El material centelleante es preferiblemente muy transparente a la luz que produce y sin envolvente.

Según diferentes modos de realización y en función de las partículas que se quiere detectar, pueden escogerse diferentes materiales centelleantes. En efecto, el material centelleante escogido depende del tipo de partícula a detectar, de los parámetros a medir, de la precisión requerida, del flujo de partículas a detectar o, incluso, del entorno.

Según un modo de realización preferido, el material centelleante escogido es un centellador plástico. En efecto, los centelladores plásticos presentan la ventaja de ser no higroscópicos, de suerte que no necesitan envolvente para contenerlos, siendo toda envolvente susceptible de desviar las partículas cargadas. Además, los materiales centelleantes plásticos pueden ser realizados en volúmenes muy grandes, lo que permite realizar dispositivos de grandes dimensiones. Además, los centelladores plásticos son muy transparentes a la luz que producen. Por fin, éstos producen del orden de 10 fotones por keV de energía depositada en una traza. Para las cámaras gamma, se preferirán cristales centelleantes (materiales inorgánicos) como NaI o LaBr<sub>3</sub>.

El centellador presenta preferiblemente una forma de paralelepípedo, pero son concebibles otras formas como el icosaedro ya que cuantas más caras haya, menos restricciones habrá sobre la abertura numérica de las microlentes. El centellador incluye preferiblemente una cara principal de detección 3 que se extiende según un plano de referencia (x,y) que define las direcciones x e y. La dirección z se define como que es perpendicular al plano de referencia (x,y).

El detector de partículas 1 incluye, igualmente un formador de imágenes 5. El formador de imágenes 5 es apto para detectar cada fotón emitido por el centellador 2. Para ello, el formador de imágenes debe presentar una resolución espacial inferior a 1 mm, ventajosamente inferior a 200  $\mu\text{m}$ . Además, para evitar la superposición de las trazas, el tiempo de lectura del formador de imágenes debe ser muy inferior al tiempo medio entre dos partículas sucesivas. Este tiempo medio depende de las dimensiones del detector y del flujo de partículas. Para un flujo de 100 partículas por segundo, es necesario un tiempo de lectura del orden de milisegundos. Para un flujo 1.000 veces más elevado, el tiempo de lectura será del orden de microsegundos. El formador de imágenes 5 incluye preferiblemente una matriz de detectores elementales 6, siendo apto cada detector elemental 6 para emitir una corriente si recibe un fotón. Cada detector elemental 6 presenta preferiblemente dimensiones inferiores o iguales a 50  $\mu\text{m}$ . Cada detector elemental forma así un píxel. Además, el formador de imágenes incluye un sistema de lectura digital de los detectores elementales que permite identificar qué detector elemental ha recibido un fotón.

Cada detector elemental (o píxel) es preferiblemente un fotomultiplicador como, por ejemplo, un fotodiodo de avalancha o fotomultiplicador de silicio SiPM. En este caso, el formador de imágenes 5 está formado, pues, por una matriz de fotomultiplicadores. En el caso de fotodiodos de avalancha, se aplica a las bornas de cada uno de ellos una tensión tal que el fotodiodo de avalancha funciona en modo saturado o modo Geiger. Además, cada fotodiodo de avalancha 6 presenta preferiblemente dimensiones inferiores o iguales a 50  $\mu\text{m}$ , de suerte que cada fotodiodo de avalancha forma un píxel. Así, si uno de los fotodiodos de avalancha recibe un fotón, él genera una impulsión que permite identificar el píxel correspondiente en la imagen digital. Así, el formador de imágenes permite saber en qué zona del espacio llega un fotón único con una resolución espacial muy buena. Además, los fotodiodos de avalancha presentan la ventaja de ser muy rápidos, es decir, de tener un tiempo de reacción del orden de nanosegundos y de consumir muy poca potencia eléctrica. El formador de imágenes 5 así formado se extiende según un plano paralelo al plano de referencia (x, y).

Según otro modo de realización, el formador de imágenes 5 puede también estar constituido por un CMOS o un CCD.

El detector de partículas incluye, igualmente, una primera red de microlentes 4. Cada microlente 7 está dispuesta para focalizar los fotones emitidos en el centellador en el plano del formador de imágenes 5 y esto, con una resolución espacial muy buena cualquiera que sea la profundidad z a la cual son emitidos estos fotones en el centellador. Se optimiza la resolución espacial colocando el formador de imágenes en la proximidad del plano focal de las microlentes, estando optimizada la distancia a la posición focal en función de la profundidad del centellador.

El hecho de colocar el formador de imágenes a la distancia focal de las microlentes conduciría a focalizar los fotones visibles cuyo ángulo de incidencia sea normal al plano que soporta las microlentes 7. Esto conduce a una puesta a punto denominada “al infinito”, que permite realizar una imagen nítida de las trazas generadas a gran distancia de las microlentes, distancia considerada como infinita con respecto a las dimensiones de las lentes.

5 No obstante, el objetivo del dispositivo de las figuras 1 a 3 es formar la imagen de los lugares de interacciones 14 en el centellador 2, teniendo este último un espesor  $e$  del orden de centímetros, comprendido por ejemplo entre 0,5 y 2 cm, por ejemplo, igual a 1 cm. Dicho de otro modo, cada microlente 7 está configurada para formar, sobre los fotodetectores elementales 6, una imagen nítida de una interacción 14 en el centellador 2, produciendo esta interacción 14 fotones de centelleo 15. Se comprende que esta interacción 14 se produce a una distancia inferior al espesor  $e$  del centellador 2. Es imposible formar una imagen de una fuente situada a una distancia de una lente inferior a la distancia focal  $f$ . También, cada microlente 7 tiene, preferiblemente, una distancia focal pequeña, inferior a 0,5 cm, y por ejemplo igual a 0,1 cm, de manera que puedan realizar imágenes suficientemente nítidas de interacciones que se produzcan en profundidad en el centellador 2, es decir, en la proximidad de la red de lentes 4.

15 Por otro lado, se determina una distancia  $e'$ , con respecto a la microlente 7, a la cual los objetos observados, en este caso, interacciones 14 que generan fotones visibles, deben ser nítidos. En el ejemplo representado en las figuras 1 a 3, las microlentes 7 estando pegadas al centellador 2, la distancia  $e'$  es, naturalmente, inferior o igual al espesor  $e$  del centellador y superior a la focal de las microlentes.

Conociendo  $f$  y  $e'$ , es posible determinar la distancia  $D$  entre el plano de la primera red de microlentes 4 y la matriz de fotodetectores 6, según la expresión:

$$D = f + \frac{f^2}{e' - f}$$

20 Tomando  $f = 0,1$  cm y  $e' = 1$  cm,  $e' = 0,5$  cm,  $e' = 0,2$  cm, se obtienen respectivamente  $D = 0,11$  cm,  $D = 0,125$  cm y  $D = 0,2$  cm, o sea,  $2f$ .

25 Así, de una manera general, la distancia  $D$  entre la primera red de microlentes 4 y el formador de imágenes 5 es estrictamente superior a la distancia focal de las microlentes. Así,  $D > f$ , y preferiblemente  $f < D \leq 2f$ , en particular  $1,1f \leq D \leq 2f$ . Cuanto más se aleje  $D$  de  $f$  más se acerca la zona de nitidez en el centellador 2 a la red de microlentes 6. A la inversa, cuanto más se acerca  $D$  a  $f$ , más se aleja la zona de nitidez en el centellador de la red de microlentes y se acerca a la cara superior 18 del centellador 2, designando esta cara superior la cara del centellador 2 expuesta a la radiación incidente.

30 Esta distancia  $D$  puede ser adaptada, según que se desee disponer de una imagen más nítida de las interacciones 14 producidas en la parte superior del centellador, es decir en la proximidad de la cara superior 18, o en la parte inferior del centellador, es decir en la proximidad de la cara de detección 3.

35 Cada microlente está acoplada ópticamente a una pluralidad de píxeles 6 que constituyen el formador de imágenes matricial 5. Típicamente, cada lente está acoplada ópticamente a un grupo de  $n \times n$  píxeles, con  $n > 1$ . Preferiblemente,  $n$  está comprendida entre 10 y 100. Hay pues menos microlentes 7 que píxeles 6. Típicamente, el número de píxeles 6 es superior a 10 veces, incluso 100 veces, incluso 1.000 veces (o todavía más) el número de microlentes 7.

40 Cuando se produce una interacción 14 en el centellador 2, se generan los fotones de centelleo 15, y una parte de entre ellos alcanzan un grupo de  $m$  microlentes. En el ejemplo de las figuras 1 a 3, se ha representado un grupo de  $4 \times 4$  microlentes 7 “tocadas” por los fotones de centelleo. Estas microlentes tocadas son las que alcanzan los fotones cuyo ángulo de incidencia, con respecto a la normal a la cara 3, es inferior a un ángulo límite de refracción  $\theta_{lim}$ . Cada microlente 7 está acoplada a un grupo de píxeles 6 distinto. También, según esta configuración, se obtienen 16 imágenes de la interacción 14, correspondiendo cada imagen a un grupo de píxeles 6, estando asociado cada grupo de píxeles a una microlente distinta.

45 De una manera general, el dispositivo permite obtener una pluralidad de imágenes de una traza formada por una o varias interacciones 14 en el centellador 2. Hay tantas imágenes como lentes que recogen una cantidad suficiente de fotones de centelleo 15. Dicho de otro modo, con un dispositivo tal, los fotones de centelleo 15 alcanzan  $m$  lentes, permitiendo entonces formar  $m$  imágenes distintas sobre el formador de imágenes. Esto permite obtener una imagen en 3 dimensiones de la traza en el centellador 2, debido a que se forman varias imágenes correspondientes a la misma traza (estereoscopía). La precisión de la localización espacial de la traza depende de la distancia de la interacción al plano de las microlentes  $e'$ , de la focal de las microlentes 7, de la distancia entre el plano de las microlentes 4 y el plano formador de imágenes 5 y de la dimensión de los píxeles 6. Para un sistema optimizado, aquella es típicamente del orden de la dimensión de los píxeles 6.

50 Cada microlente está dimensionada de manera que forme una imagen de una traza centelleante generada en el

centellador con una resolución espacial R dada según las direcciones x e y, y esto cualquiera que sea la profundidad z a la cual se forma la traza en el centellador. Para esto, para un centellador de profundidad p (en centímetros), cada microlente de la primera red presenta preferiblemente un diámetro del orden de  $4 \cdot 10^{-2} p^{1/2}$  y una abertura numérica  $\alpha$ , con  $0,2 \leq \alpha \leq 0,3$ .

- 5 Por otro lado, si la malla de la red es cuadrada, cada microlente presenta preferiblemente una forma cuadrada de manera que se minimicen las zonas no cubiertas por las microlentes.

La primera red de microlentes está dispuesta, preferiblemente, sobre la cara principal 3 del centellador. La primera red de microlentes recubre preferiblemente el conjunto de la cara principal 3 del centellador.

- 10 Las microlentes dan una multitud de puntos de vista sobre las trazas centelleantes generadas en el centellador de suerte que es posible reconstituir una imagen 3D de estas trazas comparando las imágenes formadas por cada una de las microlentes en el plano del formador de imágenes, estando ligado el paso de la red de las imágenes proyectadas a la distancia entre la traza y el plano de las microlentes. En efecto, comparando la diferencia de ángulo bajo el cual cada microlente de la primera red de microlentes proyecta la traza, se puede calcular una imagen en tres dimensiones de las trazas generadas (estereoscopia).

- 15 El detector de partículas así formado permite pues tener una resolución espacial muy buena en x y en y, sobre toda la profundidad del centellador. Sin embargo, un detector tal presenta una resolución espacial menos buena según la dirección z que según las direcciones x e y.

- 20 Para mejorar la resolución espacial del detector según la dirección z, el detector de partículas puede incluir, igualmente, como se representa en la figura 2, un segundo formador de imágenes 8 dispuesto en paralelo con la dirección z y una segunda red de microlentes 9 dispuesta entre el segundo formador de imágenes 8 y el centellador 2. Cada lente de la segunda red de microlentes 9 está dispuesta de manera que forma una imagen de las trazas centelleantes en el centellador en el plano del segundo formador de imágenes 8.

- 25 Según un modo de realización, el segundo formador de imágenes 8 puede ser idéntico al primer formador de imágenes, con la excepción del hecho de que está dispuesto en paralelo a un plano (y, z) en lugar de estar dispuesto en paralelo a un plano (x, y). Lo mismo, según un modo de realización, la segunda red de microlentes puede ser idéntica a la primera red de microlentes, con la excepción del hecho de que está dispuesta en paralelo a un plano (y, z) en lugar de estar dispuesta en paralelo a un plano (x, y).

- 30 Sin embargo, se puede igualmente concebir el dimensionar la segunda red de microlentes y el segundo formador de imágenes de manera diferente de la primera red de microlentes y del primer formador de imágenes de manera que se obtenga una resolución espacial diferente según la dirección z que las que se obtienen según las direcciones x e y.

- 35 Con el fin de aumentar aún más la resolución espacial y la sensibilidad, si el centellador incluye n caras, el detector puede incluir n redes de microlentes, estando situada cada red de microlentes sobre una de las caras del centellador. En este caso, el detector incluye igualmente tanto formadores de imágenes como redes de microlentes tenga, de manera que cada red de microlentes focaliza los fotones emitidos en el centellador en el plano del formador de imágenes asociado.

La figura 3 representa un detector 1' de partículas según otro modo de realización de la invención. En este modo de realización, el detector de partículas 1' es una cámara gamma.

Esta cámara gamma incluye, como en los modos de realización precedentes:

- 40 - un centellador 2;  
- una red de microlentes 4;  
- un formador de imágenes 5.

- 45 El centellador puede, por ejemplo, ser un centellador sólido de yoduro de sodio o de bromuro de lantano. El centellador 2 incluye una primera cara principal 3 opuesta a una segunda cara principal 18. La segunda cara principal 18 del centellador está dispuesta enfrente de la fuente de partículas gamma. La primera cara principal 3 está recubierta por la red de microlentes 4.

La red de microlentes 4 y el formador de imágenes 5 son idénticos a los descritos en los modos de realización precedentes.

- 50 La utilización de una red de microlentes 4 es particularmente ventajosa en el caso de una cámara gamma ya que permite la utilización de una máscara codificada 9, en particular en una utilización médica, en la que la distancia fuente/centellador es del mismo orden de magnitud que la dimensión del centellador. En efecto, la información de tres dimensiones sola permite la reconstrucción correcta de la imagen de la máscara. La máscara codificada 9 permite aumentar la eficacia de la cámara gamma sin degradar la resolución espacial.

La máscara codificada 9 está formada, por ejemplo, por una placa 11 perforada por agujeros 10.

Para más comodidad en las explicaciones, se introducirá la noción de eficacia  $\epsilon_M$  de la máscara codificada. Ésta resulta de tres parámetros: la capacidad de la cámara gamma para muestrear la imagen proyectada a través de la máscara  $\epsilon_e$ , la absorción lineal  $\mu$  de la parte absorbente de la máscara y la transmisión de los agujeros de la máscara definida por relación entre el número de fotones,  $N_d$ , que llegan sobre el detector y los,  $N_i$ , que llegan sobre los agujeros de la máscara:

$$\epsilon_M = \epsilon_e (1 - e^{-\mu x}) \frac{N_d}{N_i} \text{ donde } x \text{ es el espesor de la máscara.}$$

El material utilizado para realizar la máscara y su espesor juegan un primer orden sobre esta eficacia.

Dimensión de los agujeros de la máscara: RM

La capacidad de formación de imágenes de un sistema de máscara codificada reposa sobre un muestreo de la imagen proyectada por la máscara. Para una buena eficacia de muestreo, la dimensión de la imagen de un agujero de la máscara proyectado sobre el detector debe ser sensiblemente más grande que la resolución espacial del detector. En la práctica, se utiliza un tamaño de imagen de agujero dos a tres veces más grande que la resolución del detector ( $\epsilon_e \sim 0,8-0,9$ ). Así, para una resolución de 200 micras al nivel del centellador, convendrán imágenes de agujero de 500 micras.

Material

La máscara es preferiblemente absorbente y delgada para evitar un efecto de colimación que reduciría la eficacia de la máscara. Se escogerá pues, preferiblemente, el material cuya absorción lineal sea la más elevada. Así, según un modo de realización preferido, la máscara codificada se realiza en una placa 11 de tungsteno. En efecto, este material ofrece un muy buen comportamiento mecánico y permite un mecanizado muy fino.

Espesor

Si  $x$  es el espesor de la placa 11, el ángulo límite es  $\theta = \arctg(RM/x)$ . Se puede definir la superficie codificada como la superficie de los agujeros que se proyectan sobre el detector:  $f_c = (RM(ds-dM)/x)^2/4$ , con  $ds$  que es la distancia entre la fuente de fotones gamma y el centellador y  $dM$  que es la distancia entre la máscara y el centellador; esta debe ser suficiente para que se pueda formar una imagen. El número de píxeles de la imagen reconstruida es proporcional a esta superficie codificada. Hace falta pues que  $\theta$  sea lo más grande posible, pues  $RM/x$  debe ser lo más grande posible.

Sin embargo, una máscara gruesa ofrece una buena opacidad pero puede reducir la transmisión de los agujeros. Cuando la placa 11 es de tungsteno, un espesor  $e$  de 5 mm ofrece un buen compromiso porque la máscara codificada absorbe así  $\frac{3}{4}$  de los fotones de 141 keV y que la transmisión no se anulará más que a  $45^\circ$ .

Distancia máscara-detector-fuente

La distancia entre la fuente 12 y el centellador 2 debe ser lo más pequeña posible para maximizar la eficacia de la máscara codificada. Por otro lado, cuanto más grande sea la distancia  $dM$  máscara-centellador, mejor es la resolución al nivel de la fuente, pero cuanto más grande sea la distancia fuente-máscara, mejor es la transmisión de los agujeros y más grande es la superficie codificada. Se puede, pues, optimizar estas distancias en función de las cualidades de formación de imágenes buscadas (campo, resolución).

Ejemplos de realización

La optimización de una cámara gamma tal debe ser efectuada en función de la aplicación pero, para fijar las ideas, puede ser útil dar algunos valores. Considérese una distancia  $ds$  de 20 cm entre la fuente de fotones gamma y el centellador y colóquese a mitad de la distancia entre la fuente y el centellador una máscara codificada de tungsteno de 5 mm de espesor perforada con agujeros de 5 mm de lado sobre la mitad de la superficie.

Eficacia:

Alrededor de 15 a 20 % de los fotones que caen sobre la máscara la atraviesan ( $N_i/N_d \sim 0,15-0,2$ ), la absorción de la máscara es de 0,75 y la eficacia del muestreo es de alrededor de 0,9. La eficacia de la máscara es, pues, del orden de 10 a 13%. Para comparación, la eficacia de un colimador de una cámara médica clásica no excede el 0,1%. Esta ganancia de más de dos órdenes de magnitud en la eficacia se traduce en una reducción del mismo orden de la dosis de producto radioactivo inyectado al paciente.

Resolución:

La resolución al nivel de la fuente es de un milímetro o sea 5 a 6 veces mejor que la de una cámara médica clásica. Naturalmente, la invención no está limitada a los modos de realización descritos en referencia a las figuras y pueden



concebirse variantes sin salir del marco de la invención. Así, en función de las partículas a detectar, pueden escogerse otros tipos de material centelleante para realizar el centellador. Por otro lado, la elección del formador de imágenes depende de la elección del centellador y puede, pues, igualmente, variar en función de las partículas a detectar específicamente.

**REIVINDICACIONES**

1. Detector (1) de trazas de partículas ionizantes que incluye:
- un centellador (2) apto para emitir fotones cuando atraviesa por las partículas ionizantes;
  - un primer formador de imágenes (5) apto para detectar cada fotón emitido por el centellador, incluyendo el primer formador de imágenes una pluralidad de detectores elementales;
  - una primera red de microlentes (4),
- estando dispuesta cada microlente (7) de la primera red de microlentes para formar una imagen de la traza de las partículas ionizantes focalizando los fotones emitidos en el centellador, sobre el primer formador de imágenes, estando espaciados el primer formador de imágenes y la primera red de microlentes una distancia D, estando acoplada ópticamente cada microlente de la primera red de microlentes con al menos dos detectores elementales del primer formador de imágenes, caracterizado por que cada microlente presenta una distancia focal estrictamente inferior a la distancia D entre la primera red de microlentes y el primer formador de imágenes.
2. Detector (1) de trazas según la reivindicación 1, en el cual el primer formador de imágenes es un CMOS o un CCD.
3. Detector (1) de trazas según la reivindicación 1, en el cual el primer formador de imágenes (5) incluye, preferiblemente, una matriz formada por varios detectores elementales (6) siendo apto cada detector elemental (6) para crear una carga cuando recibe un fotón, presentando cada detector elemental (6) dimensiones inferiores o iguales a 1 mm, ventajosamente a 200  $\mu\text{m}$ .
4. Detector de trazas según la reivindicación precedente, en el cual cada detector elemental es un fotomultiplicador, ventajosamente, un fotodiodo de avalancha.
5. Detector (1) de centelleo según una de las reivindicaciones 3 o 4, en el cual el primer formador de imágenes (5) incluye igualmente un sistema de lectura digital apto para identificar qué detector elemental ha recibido un fotón.
6. Detector (1) de trazas según una de las reivindicaciones precedentes, que incluye, además, medios de cálculo aptos para calcular la posición del lugar de emisión de cada fotón emitido en el centellador a partir de las imágenes proyectadas sobre el primer formador de imágenes por las microlentes.
7. Detector de trazas según una de las reivindicaciones precedentes, que incluye, además:
- un segundo formador de imágenes (8) apto para detectar cada fotón emitido por el centellador;
  - una segunda red de microlentes (9), estando dispuesta cada microlente de la segunda red para formar una imagen de la traza de las partículas focalizando los fotones emitidos en el centellador sobre el segundo formador de imágenes;
- extendiéndose la segunda red de microlentes y el segundo formador de imágenes perpendicularmente a la primera red de microlentes.
8. Detector de trazas según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual cada microlente presenta dimensiones comprendidas entre 0,5 y 5 mm.
9. Detector de trazas según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual cada microlente presenta una apertura numérica comprendida entre 0,2 y 0,3.
10. Cámara gamma (1') que incluye un detector de trazas según una de las reivindicaciones precedentes.
11. Cámara gamma según la reivindicación precedente, que incluye, además, una máscara codificada (9).

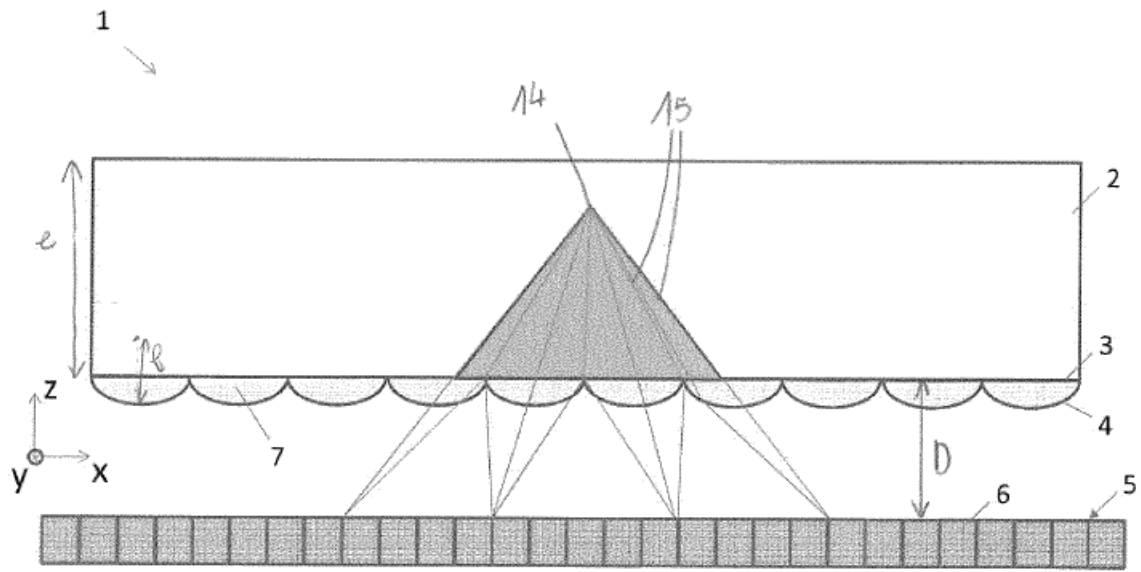


Fig. 1

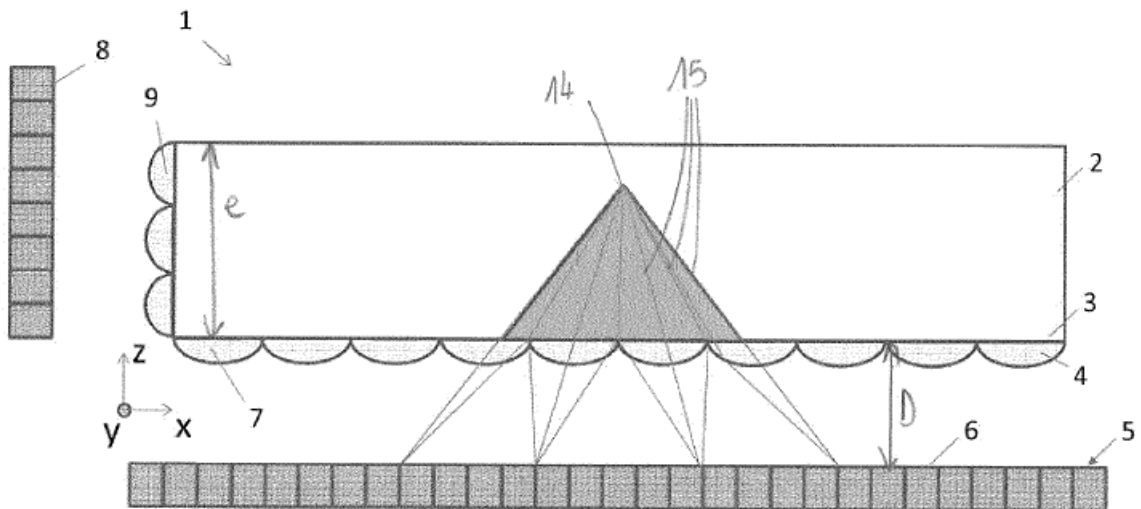


Fig. 2

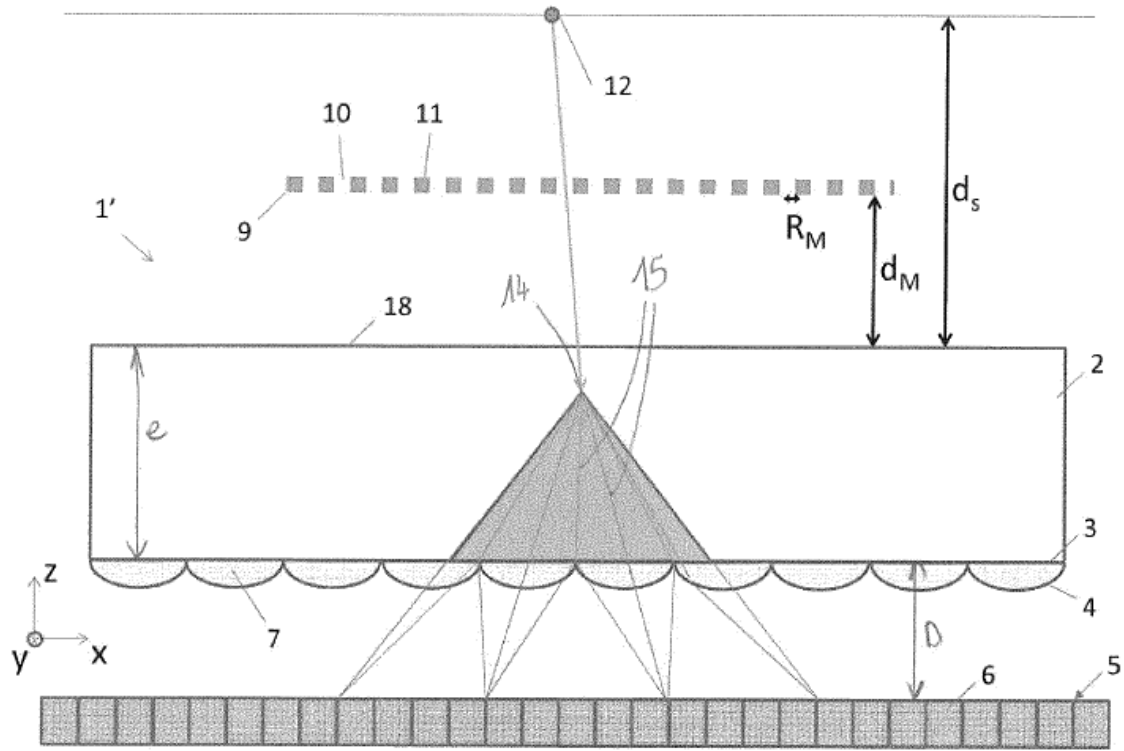


Fig. 3