

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 373 638**

51 Int. Cl.:

G01T 1/02 (2006.01)

G01T 1/06 (2006.01)

G01T 1/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06753421 .4**

96 Fecha de presentación: **26.04.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1889094**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **20.02.2008**

54 Título: **PROCEDIMIENTO PARA LA DOSIMETRÍA FOTÓNICA ESPECTROMÉTRICA PARA RAYOS X Y GAMMA.**

30 Prioridad:
10.06.2005 DE 102005026795

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
07.02.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
07.02.2012

73 Titular/es:
**GSİ HELMHOLTZZENTRUM FÜR
SCHWERIONENFORSCHUNG GMBH
PLANCKSTRASSE 1
64291 DARMSTADT, DE**

72 Inventor/es:
FEHRENBACHER, Georg

74 Agente: **Isern Jara, Nuria**

ES 2 373 638 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

Procedimiento para la dosimetría fotónica espectrométrica para rayos X y gamma

5 La invención se refiere a un procedimiento para la dosimetría fotónica espectrométrica para rayos X y gamma del intervalo de keV a MeV para la determinación, tanto integral como específica para núclidos, del rendimiento de dosis de radiación gamma.

10 Los sistemas de medición hasta la fecha para la determinación del rendimiento de dosis de radiación gamma en el funcionamiento de rutina se basan esencialmente en sistemas meramente de recuento, que transforman a través de un factor de calibración la tasa de recuento en rendimiento de dosis. El reto técnico para el fabricante de aparatos de medición consiste en adaptar la dependencia energética y angular del sistema de medición a la magnitud de medicación que va a representarse de tal manera que éstas se reproduzcan de manera lo más exacta posible mediante la optimización de la disposición de los componentes activos y de los absorbedores pasivos. Con la
15 incorporación de sistemas espectrométricos, tal como por ejemplo NaJ o detectores de Ge de alta resolución, han surgido nuevas posibilidades para determinar el rendimiento de dosis de radiación gamma. La determinación de espectros de fotones ofrece ventajas en el análisis de campos de radiación. Así pueden determinarse diferentes tamaños de dosis de manera relativamente sencilla, tal como por ejemplo la dosis equivalente ambiental, o asumiendo geometrías de irradiación (PA (paralela desde atrás), AP (paralela desde delante), ISO (uniforme por todas partes), LAT (lateral), ROT (rotatoria) etc.) también dosis orgánicas o la dosis efectiva.

20 Los sistemas de detección espectrométricos comerciales han usado hasta la fecha sólo procedimientos de aproximación, para determinar el espectro de fotones y el espectro de dosis. Las distribuciones medidas con un detector y un analizador de múltiples canales son sólo espectros de fotones aproximadamente reales, deben corregirse con respecto a los acontecimientos en los que tienen lugar sólo deposiciones parciales de energía de los fotones incidentes. Para los detectores de alta resolución hay procedimientos, los denominados procedimientos de deconvolución, con los que pueden determinarse espectros de fotones a partir de distribuciones de amplitud de pulsos con alta resolución en energía (véase el diagrama de flujo representado en la figura 1).

25 Mediante la aplicación de factores de conversión de dosis pueden determinarse a partir del espectro de fotones el espectro de dosis y a través de su suma la dosis integral. El procedimiento de deconvolución usa funciones de respuesta específicas para el detector, que pueden calcularse por ejemplo con programas Monte-Carlo. La resolución en energía de las funciones de respuesta corresponde en el mejor de los casos a la del detector, sin embargo en el caso práctico aproximadamente a de cinco a diez veces la resolución en energía del detector. El
30 procedimiento de deconvolución se basa en una inversión de matriz, los ejemplos mencionados en la bibliografía se han realizado para un intervalo de energía amplio hasta aproximadamente 2 ó 3 MeV; por consiguiente debe trabajarse con una gran matriz y muchas operaciones para la inversión de matriz.

35 El procedimiento ocupa un gran espacio de memoria y consume tiempo de CPU para determinar los espectros de fotones. Cuando el procedimiento se repite a menudo, el consumo de recursos es innecesariamente elevado, es decir el esfuerzo de cálculo o el consumo de energía, que para aparatos de medición integrados más pequeños conllevan un aumento del tiempo empleado y de la necesidad de memoria.

40 En una conferencia del GSI del 26/04/2005 sobre la dosimetría fotónica espectrométrica se presenta un método para la estimación de la exposición específica para núclidos. La medición de la dosis local se realiza según el art. 39 del decreto de protección contra las radiaciones, StrlSchV. La medición de la dosis local se realiza de manera complementaria o como sustitución de la determinación de la dosis personal según el art. 41 StrlSchV. El procedimiento consiste en medir con un detector, HPGe o NaJ por ejemplo, la distribución de amplitud de pulsos M_i . Con un programa Monte-Carlo, por ejemplo EGS4, se calcula la función de respuesta en función de la geometría, por ejemplo de manera isótropa o paralela, de lo que resulta la matriz R_{ij} de respuesta. Ahora, a partir de esto se
45 calcula la distribución de energía de los fotones, el espectro de fotones Φ_j a través de la ecuación representada

$$M_i = \sum R_{ij} \Phi_j$$

50 A este respecto se suma desde $j = 1$ hasta $n_{\text{máx}}$. (En la ecuación representada M_i es la distribución medida). A partir de la distribución de energía de los fotones se obtiene en la siguiente etapa con ayuda de los factores de conversión por ejemplo las dosis equivalente ambiental H^* (10), las dosis orgánicas o la dosis efectiva. Entre otros se presentan un ejemplo de funciones de respuesta, de la radiación ambiental en un laboratorio, la distribución Kerma espectral (KERMA = *kinatic energy released in matter*, energía cinética liberada en la materia) y el ejemplo de la activación en un acelerador.

55 A. Pangratz, G. Fehrenbacher *et al.* presentaron en 2002 el trabajo "Analyse der Aktivierung von Beschleunigerstrukturen und der damit verbundenen möglichen Strahlungsexposition durch Gammastrahlung" en "Praxis des Strahlenschutzes: Messen, Modellieren, Dokumentieren", 34. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., Kloster Seeon, enero de 2002, págs. 485-492. En este trabajo se indican ejemplos de espectros

gamma, que se midieron en la boquilla del sincrotrón de iones pesados de GSI, SIS, tras un tiempo de irradiación con iones de deuterio en estructuras con pérdidas de radiación aumentadas. A partir de la distribución de amplitud de pulsos medida con ayuda de un detector HPGe portátil se determinan mediante deconvolución la densidad de flujo de fotones espectral y el espectro de dosis. Las funciones de respuesta necesarias para la deconvolución se determinaron con el programa de simulación EGS4. Los rendimientos de dosis determinados a partir de los espectros se comparan con los valores de medición de un tubo contador de Geiger-Müller. El porcentaje de radiación no dispersada en el rendimiento de dosis total se estima en un ejemplo.

Además G. Fehrenbacher *et al.* han estudiado en el artículo "Unfolding the response of a Ge detector used for in-situ gamma-ray spectrometry" en la publicación "Nuclear instruments & methods in physics research, section - A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment", Elsevier, Amsterdam, NL, tomo 383, n.º 2, del 11 de septiembre de 1996 en las páginas 454-462, si las funciones de respuesta de detectores de germanio modernos, portátiles, de alta pureza pueden calcularse usando simulaciones Monte-Carlo con una precisión suficiente, para poder medir a partir de las mismas de manera fiable un espectro de fluencia de fotones incidentes. Para ello se compararon entre sí las respuestas medidas y calculadas para espectroscopia *in situ*.

En el documento US 3.646.347 A se describe además un procedimiento para la medición en tiempo real de una dosis de radiación, en el que se mide la radiación incidente con un espectrómetro y se convierten las amplitudes de pulsos de la señal de radiación obtenida de esta manera con una función de conversión en una dosis de radiación.

A. Clouvas *et al.* presentan en Health Physics, febrero de 1998, vol. 74, n.º 2, el artículo "Conversion of in-situ gamma ray spectra". Se propone una conversión basada en el método Monte-Carlo de un espectro de rayos γ *in situ* en una distribución de energía de flujo de fotones. El espectro se midió con un detector de Ge portátil. El espectro se libera en primer lugar de los acontecimientos de radiación cósmica y de absorción parcial, para dejar sólo los acontecimientos que están relacionados con la absorción completa de la radiación gamma. En el espectro restante se aplica la curva de eficiencia de las deposiciones completas de energía del detector, determinada mediante fuentes de puntos calibradas y simulaciones Monte-Carlo, y se deduce la distribución de energía de flujo de fotones. Los acontecimientos que están relacionados con la absorción de partículas en el detector se calculan mediante la simulación Monte-Carlo para ángulos y energías fotónicas de diferente incidencia.

El procedimiento de deconvolución aún no aplicado en la rutina de la práctica técnica sería, para el caso de la mera determinación del rendimiento de dosis, demasiado complejo y requeriría demasiados recursos, cuando se trabaja con una resolución total del detector en el caso de un número total de canales del analizador de múltiples canales. Para el caso rutinario, en el que no debe tener lugar ninguna asociación de radionúclidos, el esfuerzo de cálculo y de almacenamiento es innecesariamente elevado.

Hasta la fecha sólo hay aparatos que se usan únicamente como espectrómetro y cuya parte de software se desarrolló por separado para el método mencionado anteriormente.

La invención se basa en el objetivo de trabajar con distribuciones de amplitud de pulsos medidas, cuya resolución en energía esté adaptada al objetivo de medición que se establezca.

El objetivo se soluciona mediante las etapas de la reivindicación de procedimiento 1. Las etapas son las siguientes:

El espectro se mide en al menos un grupo de energía, sin perder información de dosimetría y para proteger los recursos computacionales.

La medición de la distribución de amplitud de pulsos se realiza con un espectrómetro y un analizador de amplitud de pulsos, teniendo el espectrómetro un número de canales tal que el espectro se representa mediante la distribución de amplitud de pulsos con una resolución requerida en todo el intervalo de energía. Los canales se encuentran equidistantes entre sí para el espectrómetro de alta resolución. Esto permite una asociación de los porcentajes de dosis con radionúclidos individuales en el posterior procedimiento de análisis. En la etapa de deconvolución se convierte la distribución de amplitud de pulsos medida a través de una operación de deconvolución, inversión de matriz, en un espectro de fotones, para lo que se usan en una operación de deconvolución funciones de respuesta, que tienen la misma resolución en energía que la distribución de amplitud de pulsos.

El espectro de fotones:

Aplicando factores de conversión de dosis se calcula el espectro de dosis. Los factores de conversión de dosis dependientes de la energía se relacionan en cada caso con la energía media del intervalo de energía correspondiente. Mediante la suma del espectro de dosis se determina el rendimiento de dosis integral o dosis, con respecto al intervalo de tiempo de medición, y con ello se determina el rendimiento de dosis. A un rendimiento de dosis elevado el tiempo de medición activo se divide mediante la interrupción de la recogida de datos en intervalos de tiempo iguales y se corrigen de nuevo en la posterior determinación de dosis, adaptándose la duración de los espacios temporales al nivel del rendimiento de dosis.

El espectrómetro se cambia para determinar el rendimiento de dosis integral al modo de funcionamiento de baja resolución, que es a menudo el uso convencional del espectrómetro, cuando el rendimiento de dosis integral tiene prioridad. El espectrómetro se cambia, para el análisis de las fuentes de radiación en las que deben identificarse núclidos que provocan rendimientos de dosis elevados, al modo de funcionamiento de alta resolución.

5 Según la reivindicación 2 el número de canales asciende normalmente a $2^{11} = 2048$, para representar la distribución de amplitud de pulsos con una resolución suficiente en el intervalo de energía total. A este respecto los canales para el espectrómetro de alta resolución se encuentran normalmente equidistantes entre sí entre 0,5 y 1 keV. Esto permite una asociación de los porcentajes de dosis con radionúclidos individuales en el posterior procedimiento de análisis.

10 Para evitar efectos de acumulación (*pile-up*) en el caso de rendimientos de dosis muy elevados, el tiempo de medición activo se divide mediante la interrupción de la recogida de datos en intervalos de tiempo iguales y se corrige de nuevo en la posterior determinación de dosis. La duración de los espacios temporales se adapta al nivel del rendimiento de dosis (reivindicación 3).

15 Además de la dosis equivalente ambiental se calculan según la reivindicación 4 las dosis orgánicas mediante la aplicación de factores de conversión específicos para la dirección, cuando existe el conocimiento sobre las geometrías de irradiación (AP, PA, LAT, ROT, isotrópica, publicado en ICRP 74 (International Commission on Radiological Protection, publicación n.º 74).

20 El procedimiento es adecuado para rendimientos de dosis estructurados periódicamente con una longitud de pulso mínima, debiendo estar coordinados entre sí el tiempo de procesamiento del aparato de medición y el periodo de pulso. Por eso pueden medirse fuentes de radiación tanto que irradian de manera continua (reivindicación 4) como que irradian estructuradas de manera periódica (reivindicación 6).

25 El procedimiento combinado seleccionado en este caso combina dos tipos de procesamiento de espectros. Hay dos modos de funcionamiento del espectrómetro:

30 a) una alta resolución en energía y la posibilidad de aplicar el procedimiento de deconvolución de manera específica para los picos, es decir de manera específica para núclidos y relacionar la determinación de dosis con los radionúclidos individuales.

35 b) funcionamiento del espectrómetro con una resolución en energía reducida y un número reducido de canales.

En el caso b) se adapta la resolución en energía a la función de conversión de dosis de tal manera que si bien la dosis se determina de manera suficientemente precisa, el número de canales está reducido sin embargo considerablemente con respecto a la resolución de energía física máxima del detector, de modo que el procedimiento necesita menos recursos y es considerablemente más rápido en su ejecución.

40 La novedad radica en que se trabaja con distribuciones de amplitud de pulsos medidas, cuya resolución en energía está adaptada al objetivo de medición que se establezca. En el caso rutinario debe producirse una medición del rendimiento de dosis con una precisión suficiente pero con una frecuencia de repetición de medición elevada. En el caso del análisis ampliado puede trabajarse con la mejor resolución en energía posible y la posibilidad de asociar el rendimiento de dosis con los radionúclidos individuales. La elección entre estos dos modos de medición permite adaptar mediciones mejoradas al respectivo objetivo de medición.

45 El procedimiento combina dos requisitos en un sistema:

50 a) funcionamiento a una mejor resolución de energía y la posibilidad de asociar los porcentajes de dosis a núclidos individuales y

b) el caso, en el que debe determinarse rápidamente y de manera suficientemente precisa el rendimiento de dosis con una tasa de repetición elevada.

55 En ambos casos existe la posibilidad de determinar diferentes magnitudes de medición de dosis o dosis orgánicas, lo que hasta la fecha no era posible o sólo muy difícilmente en los sistemas meramente de recuento.

60 A continuación se explica más detalladamente el procedimiento mediante los dibujos. Las figuras de los dibujos muestran:

la figura 1 el modo de proceder principal;

la figura 2 el espectro de fotones con asociación del rendimiento de dosis;

65 la figura 3 el espectro de fotones y la distribución de dosis acumulativa;

la figura 4 funciones de respuesta;

la figura 5 la estructura de la distribución.

5 El modo de proceder principal presentado en la figura 1 para la determinación de espectros de fotones y de dosis está constituido por las etapas: medir la distribución de amplitud de pulsos, calcular la deconvolución, obtener a partir de esto el espectro de fotones y como resultado expresar el espectro de dosis.

10 En la figura 2 se representa como ejemplo de la medición la Kerma acumulativa relativa y espectral calculada. Los radionúclidos se identificaron mediante las líneas de energía y se determina con ayuda de la tasa Kerma espectral el porcentaje por pico. Tal como se representa, en el caso de los radionúclidos identificados se trata de Co-56, Co-57, Co-58, Cr-51, V-48, Sc-47, Sc-48, Mn-52 y Mn-54. Por lo demás puede reconocerse que aproximadamente el 60% del rendimiento de dosis medido resulta de una radiación de fotones primaria, sin dispersar, y no de la radiación dispersa. Mediante el conocimiento de los periodos de semidesintegración puede estimarse la reducción del rendimiento de dosis total. La figura 2 muestra el espectro de fotones con asociación del rendimiento de dosis con los radionúclidos así como la función de dosis acumulativa para la magnitud de medición Kerma-aire para un detector de Ge. La resolución de energía es de 10 keV para el espectro y el procedimiento de deconvolución. El procedimiento se midió en la versión de la resolución mayor (espectro en intervalos de 10 keV) para un detector de Ge por ejemplo en estructuras activadas del acelerador GSI. Se determinó el espectro de fotones, y pudieron estimarse las aportaciones de los radionúclidos individuales a la dosis total. En la figura 2 se representa el resultado con los datos porcentuales de los picos individuales con respecto a la dosis total. La dosis acumulativa pudo confirmarse con un aparato de medición de mano integral. Los valores de dosis se refieren en este caso a la magnitud de medición Kerma.

25 Además se indican espectros de fotones, que están representados en dos resoluciones de energía. En el primer caso, la resolución de energía se indica tal como en el ejemplo 1 (figura 2) con 10 keV, en el segundo caso se indican sólo para energías pequeñas de hasta 200 keV el espectro en pasos de 10 keV. Para energías mayores sólo se indica el espectro en pasos de 100 keV. Mediante una división de energía de este tipo se reduce el número de intervalos de energía de 200 a 40. La dosis determinada, véase la figura 3, difiere en ambos casos en menos del 1%, de modo que el procedimiento seleccionado en este caso debe calificarse como suficientemente preciso.

35 La figura 3 muestra el espectro 6 de fotones y la distribución 7 de dosis acumulativa para una resolución de 10 keV. El procedimiento se repitió para una división 8 de energía menos precisa, la distribución 9 de dosis acumulativa con la nueva división de energía de cálculo de nuevo. Se indican los resultados con el espectro de fotones con una resolución 6 de 10 keV, la dosis 7 acumulativa asociada, el espectro con una resolución 8 en energía menos precisa, así como la dosis 9 acumulativa asociada. Los valores de dosis se refieren en este caso a la magnitud de medición dosis equivalente ambiental H^* (10).

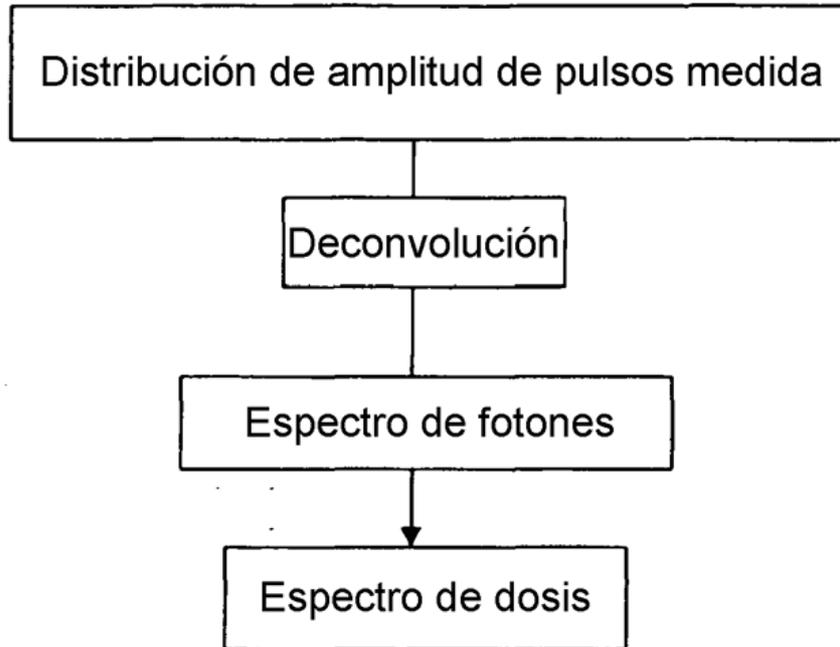
40 La figura 4, por sí sola, y la figura 5, en conjunto, muestran el ejemplo para una matriz de respuesta. En la figura 4 se esboza la respuesta para el flujo de partículas por cm^2 a través de la energía (depositada) aplicada en keV. Se representan el cálculo de las funciones de respuesta para fotones con energías de 400, 800, 1200 y 1600 keV, y concretamente en el caso de una irradiación en paralelo desde delante. Pueden observarse las funciones de respuesta para radiación de fotones con energías de 400, 800, 1200 y 1600 keV con los picos correspondientes, las deposiciones completas de energía, en los puntos correspondientes. Adicionalmente pueden observarse mediante el desarrollo adicional de la curva perteneciente a un pico los acontecimientos con deposiciones parciales de energía.

50 Las estructuras de la distribución se deducen de la figura 5, que es en cierto sentido la representación de la matriz de respuesta R_{ij} . La figura 4 es un corte de la misma. La elevación 1 diagonal muestra el pico de fotones. Hacia la derecha en paralelo le sigue la estructura del pico 2 de escape simple, que disminuye hasta energías bajas, se aplanan y finalmente cae. De manera muy similar a ello discurre a continuación a la izquierda el pico 3 de escape doble. Pueden observarse en la misma todas las funciones de respuesta unas al lado de otras como matriz. La estructura de la matriz reproduce las operaciones físicas que tienen lugar en el detector: deposición total de energía en el pico 1. A partir de 1,022 MeV se transforman los fotones en procesos de formación de pares en positrones y electrones. Dado que los positrones a su vez se aniquilan para dar 2 cuantos gamma, pueden encontrarse picos en los puntos correspondientes. En el pico 2 un cuanto de aniquilación, en el pico 3 dos cuantos de aniquilación se escapan del detector. En el pico 4 puede observarse el pico de los cuantos de aniquilación generados. En el pico 5 puede observarse el pico de retrodispersión de la radiación gamma, que se dispersa de vuelta a la carcasa y a continuación se absorbe.

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Procedimiento para la dosimetría fotónica espectrométrica para rayos X y gamma del intervalo de keV a MeV tanto para la determinación (9) integral como para la determinación (6) específica para núclidos del rendimiento de dosis de radiación gamma, en el que:
- en al menos un grupo de energía se mide un espectro;
 - 10 - con un espectrómetro y con un analizador de amplitud de pulsos se realiza una medición de la distribución (6) de amplitud de pulsos, teniendo el espectrómetro un número de canales, de tal manera que la distribución (6) de amplitud de pulsos que debe medirse puede representarse en todo el intervalo de energía que debe medirse con una resolución requerida;
 - 15 - en una etapa de deconvolución se convierte la distribución de amplitud de pulsos medida a través de una operación de deconvolución en un espectro de fotones, realizándose la operación de deconvolución usando una inversión de matriz y aprovechándose durante la operación de deconvolución funciones de respuesta, que tienen la misma resolución en energía que la distribución de amplitud de pulsos;
 - 20 - a partir del espectro de fotones se calcula el espectro de dosis aplicando factores de conversión de dosis;
 - y mediante la suma del espectro de dosis se determina la dosis integral o la dosis referida al intervalo de tiempo de medición, es decir el rendimiento de dosis,
- 25 caracterizado porque
- los factores de conversión de dosis dependientes de la energía se relacionan en cada caso con la energía media del intervalo de energía correspondiente,
 - 30 - haciéndose funcionar el espectrómetro para determinar el rendimiento de dosis integral en un modo (8) de funcionamiento de baja resolución y cambiándose para el análisis de las fuentes de radiación, en las que deben identificarse los núclidos que provocan rendimientos de dosis mayores, al modo (6) de funcionamiento de alta resolución.
- 35 2.- Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque la medición de la distribución (6) de amplitud de pulsos se realiza con el espectrómetro y el analizador de amplitud de pulsos con, normalmente, de manera aproximada $2^{11} = 2048$ canales, para lo cual los canales para un espectrómetro de alta resolución se encuentran normalmente equidistantes entre sí entre 0,5 y 1 keV.
- 40 3.- Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado porque a un rendimiento de dosis elevado el tiempo de medición activo se divide mediante la interrupción de la recogida de datos en intervalos de tiempo iguales y se corrige de nuevo en la posterior determinación de dosis, adaptándose la duración de los espacios temporales al nivel del rendimiento de dosis.
- 45 4.- Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado porque además de la dosis equivalente ambiental se calculan las dosis orgánicas mediante la aplicación de factores de conversión específicos para la dirección.
- 50 5.- Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores 1 a 4, caracterizado porque se miden los rendimientos de dosis de fuentes de radiación que irradian de manera continua.
- 6.- Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores 1 a 4, caracterizado porque se miden los rendimientos de dosis de fuentes de radiación que irradian de manera periódica, siempre que se tengan en cuenta el tiempo de procesamiento del aparato de medición y el periodo de pulso de la fuente de radiación, con lo que pasan a ser medibles longitudes de pulso mínimas.

Fig. 1



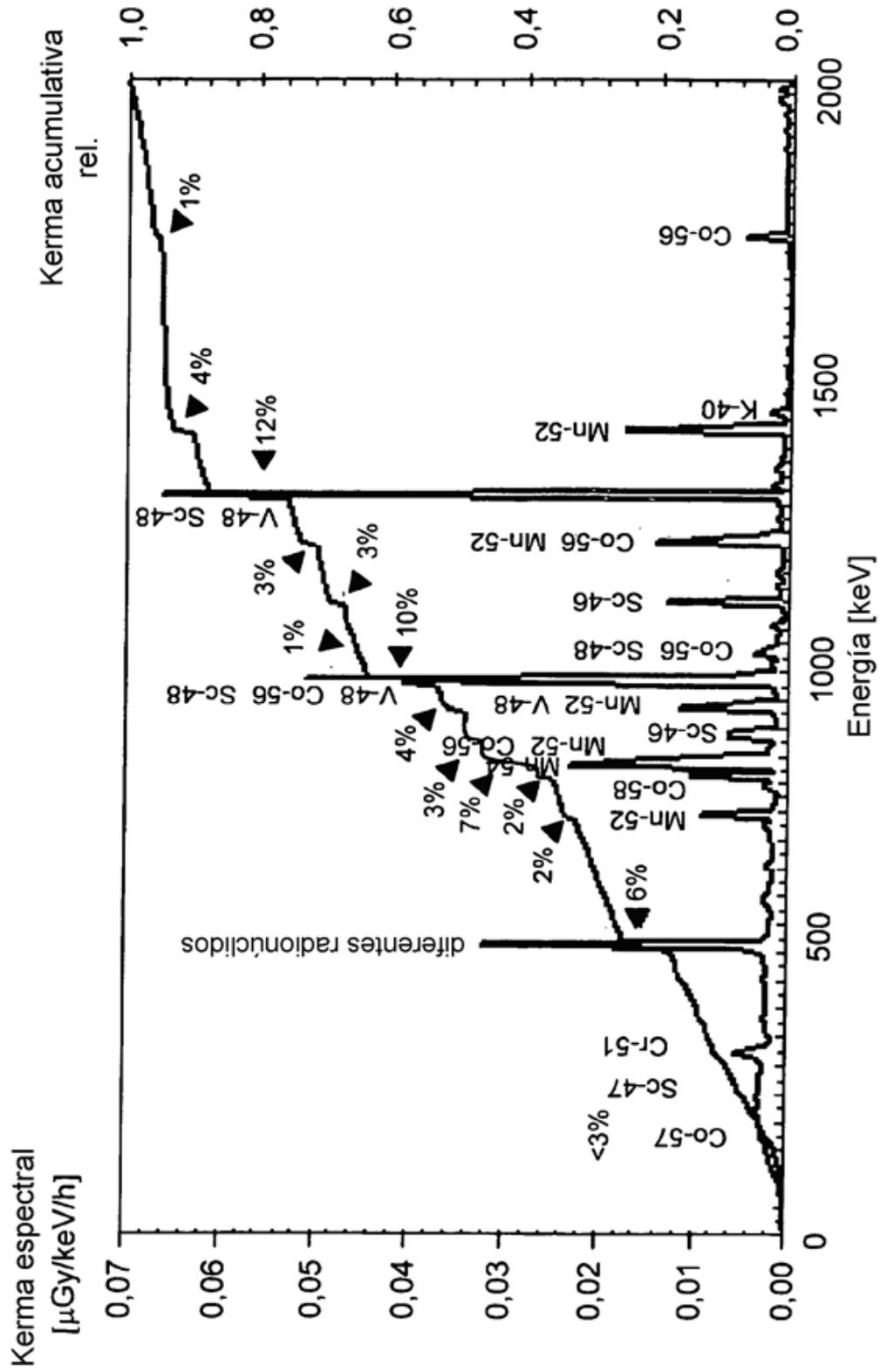


Fig. 2

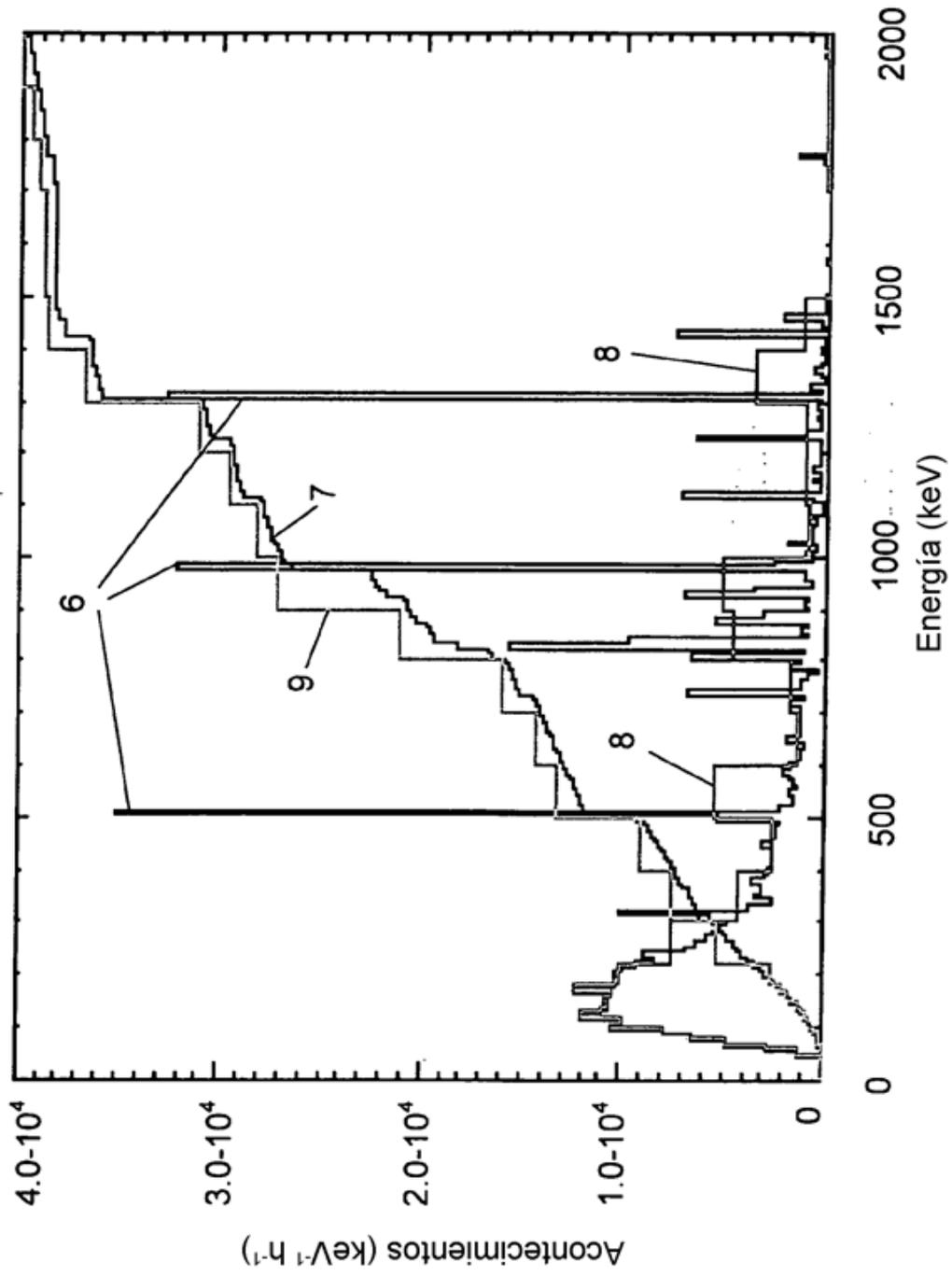


Fig. 3

Fig. 4

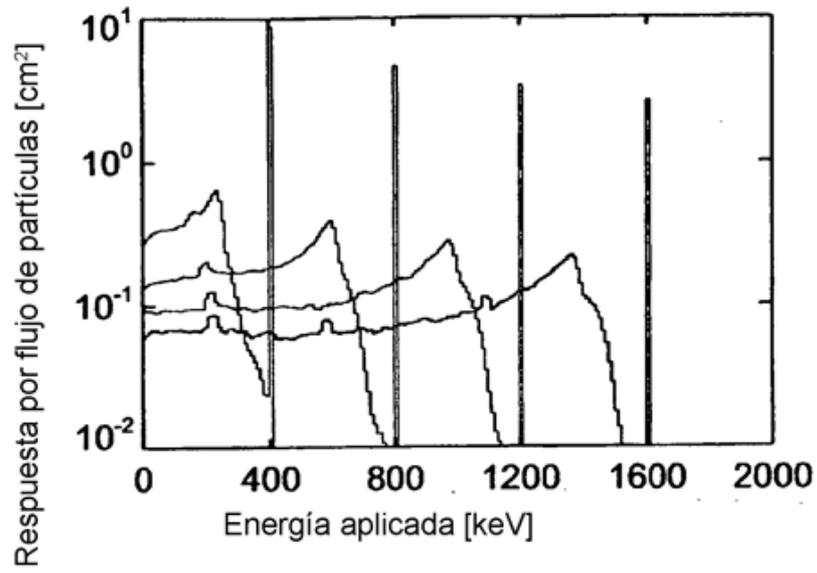


Fig. 5

