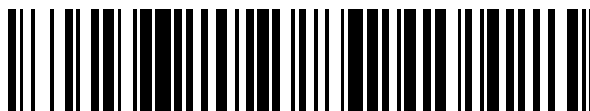


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 658 093**

51 Int. Cl.:

G21G 4/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.04.2016** **E 16166567 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.11.2017** **EP 3091540**

54 Título: **Dispositivo para generar haces de neutrones térmicos de alto brillo, y método de fabricación**

30 Prioridad:

08.05.2015 DE 102015208564

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

08.03.2018

73 Titular/es:

**FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH (100.0%)
Wilhelm-Johnen-Strasse
52425 Jülich, DE**

72 Inventor/es:

**RÜCKER, DR. ULRICH;
BRÜCKEL, PROF. DR. THOMAS;
CRONERT, TOBIAS;
DABRUCK, JAN PHILIPP y
NABBI, PROF. DR. RAHIM**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PALMERO, Fe

ES 2 658 093 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

Dispositivo para generar haces de neutrones térmicos de alto brillo, y método de fabricación.

La invención se refiere a un dispositivo para generar neutrones térmicos para experimentos de dispersión de neutrones y otras aplicaciones de haces de neutrones térmicos, p. ej. terapia por captura de neutrones de boro para el tratamiento de tumores, y a un método para fabricar el dispositivo.

Para estudiar las propiedades de la materia, por ejemplo la estructura de un material, se emplean, entre otros, haces de neutrones. Cuando los neutrones impactan sobre los átomos, estos los dispersan. La distribución espacial de los neutrones dispersados es la magnitud de medida buscada por medio de la cual es posible determinar la estructura del material o las propiedades de la materia. La generación de haces de neutrones para experimentos de dispersión con alta intensidad y dirección definida constituye un desafío.

En la mayoría de las fuentes actuales de neutrones para investigación la generación de neutrones se basa en la fisión nuclear en reactores nucleares térmicos, como se describe en la página de Internet <http://de.wikipedia.org/wiki/Neutron>. Los neutrones primarios así generados, con energías en el rango de MeV, deben desacelerarse en la zona del moderador del reactor hasta energías en el rango de 1 eV (neutrones térmicos), y a continuación alimentar los canales de experimentación para los experimentos de dispersión de neutrones.

En el reactor nuclear térmico, un moderador extenso (casi siempre agua ligera o agua pesada) es un componente integral del reactor nuclear, puesto que la reacción nuclear en cadena solo puede mantenerse por la acción de neutrones térmicos. En los modernos reactores de investigación, como p. ej. en el FRM II de Garching, los neutrones para los instrumentos de dispersión son extraídos del volumen del moderador mediante canales de experimentación tangenciales. Estos canales de experimentación son tubos cerrados por un extremo hechos de un material transparente a los neutrones que se introducen en el moderador y penetran el blindaje biológico del reactor. Su orientación es tal que a través de la abertura en el blindaje del reactor no es visible el núcleo del reactor, de modo que los neutrones primarios de alta energía no pueden llegar directamente a los experimentos a través del canal de experimentación.

La aberturas de los canales de experimentación y el sector angular en el que pueden escapar los neutrones tienen un tamaño tal que desde un canal de experimentación pueden alimentarse varios instrumentos, blindando con un absorbente de neutrones el haz de neutrones en el sector angular entre los instrumentos.

Alternativamente los neutrones primarios se generan mediante reacciones nucleares desencadenadas por partículas cargadas (p. ej., electrones, protones o deuterones) aceleradas hasta altas energías en un acelerador. En tales fuentes de neutrones accionadas por acelerador hay un blanco, también llamado convertidor, que es bombardeado por partículas cargadas de alta energía procedentes del acelerador. Allí se generan neutrones de alta energía que a continuación son moderados en un moderador pospuesto. Conforme al estado actual de la técnica, dicho moderador es un bloque macizo de agua o polietileno que en muchos casos está rodeado de un reflector de grafito o berilio para reducir las pérdidas de neutrones en el borde del moderador. Habitualmente los canales de experimentación se conectan en la superficie del bloque del moderador. Atraviesan el reflector a través de una abertura prevista al efecto y en la superficie del moderador abarcan toda la divergencia que experimentan los neutrones en su recorrido por todo el volumen del moderador. De ahí resulta un flujo de neutrones uniforme en toda la superficie del moderador.

El hecho de que en el caso de fuentes de neutrones accionadas por acelerador los haces de neutrones sean captados en la periferia del moderador hace que en la trayectoria de los neutrones haya un volumen de moderador tal que muchos neutrones ya moderados, que en realidad se mueven en la dirección del haz deseado, vuelvan a ser dispersados fuera de esa dirección. Estadísticamente, los neutrones que llegan al lugar en el que debe extraerse un haz provienen aleatoriamente de todas direcciones, por lo que el haz extraído tiene una fuerte isotropía. Además el flujo de neutrones se distribuye por toda la superficie del moderador. Por tanto no existen puntos señalados en los que puedan extraerse más neutrones que en otros, ni tampoco hay direcciones señaladas en las que se emitan preferentemente muchos neutrones desde el volumen del moderador. Por ello, los haces de neutrones así generados no tienen ninguna dirección preferente, y por tanto tienen una baja intensidad (densidad de radiación por unidad de superficie) y un bajo brillo (intensidad por unidad de ángulo sólido).

Para aumentar el flujo de neutrones térmicos disponibles para el experimento, conforme al estado de la técnica es imprescindible aumentar la potencia del acelerador. Para los aceleradores comerciales se emplean diversas tecnologías. Cada una de esas tecnologías está limitada a un determinado rango de potencia, y el salto de un rango de potencia al inmediatamente superior está asociado a un gasto técnico desproporcionadamente alto. El incremento de la potencia del acelerador conlleva un aumento de la cantidad de calor depositada en el blanco por el haz de iones primarios. Y el necesario aumento de la potencia de refrigeración en el blanco conlleva un nuevo gasto técnico.

Para la mayoría de los métodos de experimentación la dirección del haz de neutrones en el instrumento de dispersión debe estar definida con una precisión mayor de 2°. Por ello, mediante sistemas de colimación se eliminan del haz todos los neutrones que están fuera del sector angular aceptado.

5 El problema de la invención consiste en extraer de un moderador el mayor número posible de neutrones adecuados y el menor número posible de neutrones inadecuados en canales de experimentación, también llamados guías de neutrones, para conducirlos hasta los instrumentos de dispersión de neutrones.

El problema de la invención se resuelve mediante un dispositivo con las características de la reivindicación 1. Para resolver el problema, un método comprende las características de la subreivindicación. De las reivindicaciones dependientes se derivan configuraciones ventajosas.

10 El problema de la invención se soluciona mediante un dispositivo que comprende una fuente de neutrones accionada por acelerador o por láser, y un moderador para moderar neutrones de la fuente de neutrones, caracterizado por que en el moderador hay uno o varios canales que conduce o conducen desde una zona central en el interior del moderador hasta la superficie del moderador.

15 Un canal en el sentido de la presente invención es esencialmente transparente, es decir, permeable para neutrones térmicos en comparación con el material adyacente del moderador. Un canal en el sentido de la presente invención puede estar perforado en el material del moderador, si el material del moderador es un sólido. Si el material del moderador es un líquido, como canal en el sentido de la presente invención puede servir un tubo metálico, por ejemplo un tubo de aluminio.

20 Los neutrones rápidos pierden su energía por dispersión elástica al colisionar con los núcleos de los átomos del moderador, y al cabo de varias colisiones se sitúan en el rango de energía térmica. Los neutrones térmicos ya no pierden en promedio más energía en colisiones elásticas, sino que son desviados de su trayectoria. Por tanto un material adecuado como moderador también actúa como reflector de neutrones térmicos. Los neutrones térmicos, que se mueven desde una zona interior central del moderador hasta la superficie del moderador, disponen fundamentalmente de una dirección adecuada, denominada en cuanto sigue "dirección de avance", para poder salir
25 adecuadamente de la superficie del moderador. Visto desde dicha zona central, la intensidad de neutrones disminuye en la dirección de avance hasta el exterior, puesto que los neutrones térmicos pueden ser dispersados o absorbidos en su recorrido hasta el lugar de extracción. El empleo de un canal desde la zona central del moderador hasta la superficie del moderador permite mantener íntegra la intensidad de neutrones en la dirección de avance. De este modo se produce en la dirección de avance un aumento de la intensidad de neutrones térmicos, que son
30 extraídos del moderador a través de un canal. De este modo se aumenta el flujo de neutrones disponible para los experimentos, lo que por una parte repercute favorablemente en el tiempo de medida necesario y en la precisión de medida limitada por el flujo de neutrones.

En una configuración de la invención la zona interior del moderador es adyacente al convertidor de la fuente de neutrones, o en general adyacente a la fuente de neutrones primarios. Esta fuente de neutrones primarios está
35 rodeada por el material del moderador. Adyacente a dicha fuente hay fundamentalmente un flujo intenso de neutrones térmicos, y sobre todo en comparación con las zonas interiores del moderador cercanas a la superficie, de modo que una disposición semejante aumenta aún más el rendimiento de neutrones térmicos. Adyacente significa que la distancia entre la zona interior y la fuente de neutrones es menor que la distancia de la zona interior a una superficie del moderador. Preferiblemente la distancia desde la zona central a la fuente de neutrones es al menos la
40 mitad de la mínima distancia entre la zona central y una superficie del moderador. Conforme a la invención, la zona interior es una zona determinada con un flujo máximo de neutrones térmicos. El centro se determina especialmente mediante simulación por ordenador, lo que permite lograr un nuevo aumento de la intensidad de neutrones térmicos. Los programas de simulación por ordenador con los que se puede determinar la distribución espacial de neutrones térmicos, y por tanto un flujo máximo en el interior de un moderador, pueden adquirirse en el mercado, por lo que es
45 un medio sencillo y fiable de determinar dicha zona de flujo máximo, también denominada "centro".

A medida que aumenta el volumen del moderador, el flujo térmico en el material del moderador aumenta hasta una tasa de saturación determinada, puesto que los neutrones termalizados (es decir, neutrones térmicos) pueden volver a ser reflejados por las capas externas del moderador. Sin embargo, en la superficie del moderador, en la que habitualmente se extraen los neutrones para el experimento, el flujo térmico vuelve a reducirse a partir de un
50 determinado volumen de moderador. Por ello, en la configuración de la invención el volumen del moderador es de 50-200 litros, preferiblemente de 100-150 litros, por una parte para poder moderar adecuadamente neutrones primarios, y por otra para poder extraerlos con canales de longitud adecuada. El moderador se presenta preferiblemente en forma de bloque, que puede tener forma esférica, cúbica, paralelepípeda, cónica o elipsoidal. Especialmente preferible es el moderador de forma cilíndrica, puesto que con esta forma se consigue una
55 distribución espacial especialmente adecuada de los neutrones térmicos, y por tanto se mantiene especialmente bien un gran número de haces de neutrones térmicos brillantes. Una longitud lateral del bloque no es básicamente mayor que un múltiplo de otras longitudes laterales, de manera que la forma es compacta. En el caso de forma cilíndrica, fundamentalmente un diámetro no es mayor que un múltiplo de la altura, para así mantener una forma compacta. Por tanto, el moderador no presenta una forma especialmente alargada.

- En una configuración de la invención existen al menos cuatro, preferiblemente al menos seis canales que conducen desde una zona interior del moderador a la superficie, y en especial en forma de estrella. Preferiblemente existen no más de 10, y muy preferiblemente no más de 8 canales que conducen desde una zona interior del moderador a la superficie. Así puede seguirse aumentando el rendimiento de neutrones térmicos, p. ej. alimentando con neutrones térmicos varios instrumentos de dispersión de neutrones desde cada canal. Primeramente un número creciente de canales conduce a una mejora del rendimiento de neutrones térmicos. No obstante, si existen demasiados canales no es posible seguir moderando suficientemente los neutrones primarios, de modo que aumentando el número de canales no se mejora continuamente el rendimiento, sino que, por el contrario, disminuye la intensidad en cada canal.
- En una configuración ventajosa de la invención la distancia entre canales en la superficie del moderador es al menos el doble de la longitud de la trayectoria libre de los neutrones térmicos en el material del moderador, para mejorar aún más el rendimiento.
- Como fuente de neutrones sirve especialmente un acelerador lineal con un convertidor que puede fabricarse con un coste técnico relativamente bajo y que no requiere neutrones térmicos para una reacción en cadena, de manera que es posible disponer de un volumen de moderador considerablemente menor que en un reactor nuclear térmico.
- Un material particularmente idóneo para el moderador ha resultado ser el berilio. El material del moderador es un sólido en el que se perforan uno o varios canales.
- Preferentemente los canales están pulidos en su interior para obtener un mejor rendimiento de neutrones térmicos al poderse reflejar en las paredes del canal durante el recorrido a través del canal desde la zona interna del moderador hasta su superficie. Un pulido mecánico es suficiente, especialmente en el caso del berilio, para incrementar aún más el rendimiento de neutrones térmicos. En el caso del aluminio la cara interna del canal se recubre preferentemente de manera adicional para poder extraer de manera adecuada del moderador cada vez mejores neutrones térmicos. El pulido reduce las rugosidades superficiales que se generan durante la fabricación del canal. Por tanto, en un primer paso se fabrica el canal, por ejemplo por perforación. A continuación tiene lugar una segunda fase de mecanizado por la que se reducen las rugosidades superficiales. En una tercera etapa de mecanizado, en una realización se recubre la superficie pulida, y en particular en el caso de tubos de aluminio, para obtener resultados mejorados. Como material de revestimiento es adecuado especialmente el níquel, que presenta un alto coeficiente de reflexión para neutrones. También son adecuadas como recubrimiento de las paredes interiores de los canales las capas múltiples (los denominados superespejos). Estos recubrimientos se aplican, p. ej., mediante pulverización por bombardeo iónico o mediante galvanización de las paredes interiores ya pulidas de los canales de flujo.
- Para mejorar aún más el rendimiento, el diámetro de cada canal es menor que el recorrido libre medio de los neutrones térmicos en el material del moderador. Un canal semejante fue capaz de extraer adecuadamente neutrones térmicos del moderador. Así se evita también dimensionar innecesariamente un canal, lo que iría en detrimento de la eficiencia del material del moderador.
- El diámetro de cada canal se rige por los requisitos del experimento conectado y puede reducirse hasta la medida técnicamente factible. La relación entre el diámetro y la longitud del canal determina el ángulo con el que los neutrones térmicos salen del canal. Cuanto más largo sea el canal en comparación a su diámetro, tanto menor será el ángulo de salida de los neutrones térmicos.
- En una realización de la invención, en el interior de cada canal pueden existir filtros para filtrar neutrones primarios o para evitar que salgan del canal correspondiente. Materiales filtrantes adecuados son, por ejemplo, el plomo y los monocristales de zafiro. De este modo se evita mejor que los neutrones primarios, es decir los neutrones de alta energía, en el rango de MeV, lleguen a los instrumentos o las probetas, pero sin que se haya debilitado el porcentaje de neutrones térmicos en el haz.
- Preferentemente el moderador comprende una envoltura reflectante externa, por ejemplo, de grafito o polietileno. Esto permite aumentar aún más el rendimiento.
- Ante todo para experimentos de dispersión tiene una importancia especial la intensidad de los neutrones térmicos extraídos en una determinada dirección preferente, la dirección del experimento, y por tanto el brillo. Se trata de la componente de avance del flujo de neutrones térmicos en el eje de la instrumentación de neutrones en la dirección del experimento.
- En el centro del moderador, no solo es máximo el flujo total de neutrones térmicos, sino también su componente de avance (o componente radial hacia el exterior). Visto desde el centro, disminuye hacia el exterior tanto el flujo total como la componente de avance del flujo, puesto que los neutrones térmicos pueden ser dispersados o absorbidos en su recorrido hasta el lugar de extracción en la superficie del moderador. El empleo de un canal desde el centro del moderador, el punto de máximo flujo térmico, hasta la superficie del moderador hace que la componente de avance del flujo se mantenga permanentemente y pueda guiarse sin amortiguación, por ejemplo, al comienzo del

conductor de neutrones del instrumento de dispersión de neutrones conectado. Dado que en este punto la componente de avance es independiente del tamaño del moderador, el volumen del moderador o del reflector puede seleccionarse de modo que puede incrementarse el flujo térmico en el centro, y por tanto también la componente de avance.

- 5 Los experimentos han mostrado que la intensidad térmica en dirección de avance ($\theta \leq 2^\circ$ respecto al eje del canal de flujo), y por tanto el brillo, puede aumentarse hasta en un factor 6 dependiendo de la posición del canal de flujo en el moderador.

Se utilizó un moderador de berilio de forma cilíndrica con un radio $r = 31\text{cm}$ y una longitud $l = 41\text{cm}$, lo que corresponde a un volumen de 125 litros. Estudios paramétricos han mostrado que este volumen constituye un buen
10 compromiso entre el máximo flujo térmico y el coste técnico. El moderador está rodeado de una capa de grafito de 20 cm de grosor que actúa como reflector, lo que permite aumentar un orden de magnitud el flujo térmico en la superficie del moderador. El eje del cilindro está sobre el eje del haz de iones primarios (p. ej., iones deuterio en el rango de energía de aprox. 20 MeV), por lo que el reflector está interrumpido en el punto de entrada de los
15 iones, de manera que los iones acelerados por un acelerador lineal colisionan contra la superficie del moderador de berilio y se transforman en neutrones en la primera capa de aprox. 0,4 cm. Esta zona en la que los iones se transforman en neutrones se llama convertidor. En principio el convertidor también puede colocarse dentro del moderador. En este caso el convertidor también tiene su lado posterior rodeado de material del moderador y del reflector, de modo que los neutrones dispersados hacia atrás en favor del flujo térmico total tendrán mayor probabilidad de permanecer en el moderador. En cualquier caso esta variante está ligada a un mayor gasto
20 constructivo, puesto que en la mayoría de los casos es necesaria una costosa refrigeración del convertidor.

Debido a su estructura compacta el moderador puede funcionar con muchas fuentes distintas de neutrones rápidos, por lo que se obtiene una gran flexibilidad de uso y utilización. En el segmento de bajo precio cabría mencionar los generadores de neutrones comerciales basados en fusión, que esencialmente presentan un campo neutrónico
25 isótropo. Para obtener intensidades de neutrones mayores se recurre a aceleradores lineales o ciclotrones. Incluso los láseres pulsantes de corta longitud de onda y alta intensidad son capaces de generar haces de iones primarios intensos, de modo que uno de estos láseres permite una construcción más compacta de toda la instalación.

El aumento del flujo térmico en la dirección de avance en la abertura del canal de flujo depende de la forma geométrica subyacente y de la disposición del canal de flujo en el moderador. Son posibles diversos ángulos de incidencia entre el canal de flujo y el eje del haz de iones primario, dependiendo de la utilización prevista.

- 30 Con una inclinación de 40° respecto a la dirección del haz de iones primario, la intensidad térmica en la abertura del canal de flujo en dirección de avance puede aumentarse en un factor 6, en comparación con una disposición sin canal, como han mostrado los experimentos. Si se desea una proporción menor de neutrones rápidos, el canal se coloca en una configuración ortogonal respecto a la dirección de irradiación de los iones primarios. En este caso la intensidad de neutrones térmicos es mayor en un factor 3.

- 35 Puede influirse intensamente en el flujo de neutrones seleccionando el material del moderador. Se toman en consideración el agua, el grafito, el agua pesada o el berilio, estando dichos materiales ordenados en orden creciente tanto respecto a su capacidad de moderación como al coste necesario. Teniendo en cuenta los aspectos económico y radiológico, la vida útil, la carga radiológica y el coste técnico, constituye una solución preferida, por ejemplo, una combinación de berilio como moderador rodeado de una capa de grafito como reflector.

- 40 El canal puede dotarse de un filtro de plomo o zafiro para reducir el flujo de neutrones rápidos sin perjudicar sustancialmente la intensidad de neutrones térmicos en la dirección de avance.

Los estudios han mostrado que, hasta un número determinado, varios canales de flujo en un moderador térmico no tienen por qué perjudicarse mutuamente. Por esta razón es posible que en un único sistema de moderador
45 funcionen varios canales de flujo para neutrones térmicos. Los canales pueden disponerse, por ejemplo, en forma de cruz, de modo que los canales puedan partir desde la zona central del moderador en diversas direcciones tanto bidireccional como tridimensionalmente y que el espacio que requieren no restrinja los diversos experimentos.

La figura 1 muestra un moderador 1 con un acelerador lineal 2. En el extremo 3 del canal de experimentación para los iones primarios procedentes del acelerador lineal 2 se generan neutrones primarios en un convertidor. El extremo 3 del acelerador lineal 2 formado por el convertidor se introduce en el moderador 1. En la dirección de aceleración
50 del acelerador lineal, en la zona adyacente al extremo 3 se encuentra un máximo de flujo 4 de neutrones térmicos. El flujo máximo se determinó mediante simulaciones por ordenador. Partiendo de este flujo máximo 4, cuatro canales 5 configurados como guías de neutrones se extienden aproximadamente en forma de estrella hasta la superficie 6 del moderador 1.

La figura 2 muestra otra realización con seis canales 5 y con una envoltura exterior 6, por ejemplo de grafito o polietileno.
55

5 En este ejemplo de realización conforme a la figura 2, el dispositivo consta de un acelerador lineal que acelera deuterones hasta 25 MeV y que a través del tubo 2 los guía al convertidor 3, que en este caso consta de una capa de berilio de 0,7 mm de espesor. El moderador 1 es un cilindro de berilio de 62 cm de diámetro y 41 cm de longitud. El extremo del tubo 2 y el convertidor 3 que se encuentra en él está introducido 5 cm en el moderador a lo largo del eje del cilindro. El moderador está rodeado por una capa del reflector 6 de grafito de 10 cm de grosor. Con esta estructura el flujo de neutrones térmicos tiene su máximo 4 a 15 cm de distancia del convertidor a lo largo del eje del cilindro. En este punto comienzan los seis canales de flujo 5, que constan de taladros cilíndricos de 2 cm de diámetro.

10 En esta realización los haces de neutrones procedentes de los dos canales orientados hacia atrás (en dirección del haz de iones) tienen un brillo 1,5 veces mayor que los neutrones de la superficie del moderador, los haces de neutrones procedentes de ambos canales ortogonales al eje del cilindro un brillo 3,5 veces mayor que los neutrones de la superficie del moderador, y los haces de neutrones procedentes de ambos canales orientados hacia delante un brillo 6 veces mayor que los neutrones en la superficie de un moderador de iguales dimensiones sin canales de flujo.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo para generar neutrones térmicos para experimentos de dispersión de neutrones que comprende una fuente de neutrones (3) accionada por acelerador o por láser y un moderador (1) para moderar neutrones procedentes de la fuente de neutrones (2, 3), caracterizado por que en el moderador (1) hay uno o varios canales (5) que conduce o conducen de una zona interior (4) del moderador (1) a la superficie (6) del moderador (1), caracterizado por que la zona interior (4) se encuentra en el máximo de flujo o cerca del máximo de flujo de neutrones térmicos.
2. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado por que el moderador (1) consta de un sólido y los canales (5) están taladrados en el interior del sólido.
3. Dispositivo según la reivindicación que antecede, caracterizado por que el sólido es de berilio.
4. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que la zona interior (4) está ubicada cerca de la fuente de neutrones (3).
5. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que la fuente de neutrones es un convertidor (3) situado en el extremo de un acelerador lineal (2).
6. Dispositivo según la reivindicación que antecede, caracterizado por que la zona interior (4) se encuentra detrás del acelerador lineal, visto en la dirección de aceleración del acelerador lineal (2).
7. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que la fuente de neutrones (3) se encuentra en el moderador (1).
8. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que el moderador presenta un volumen de 100-150 litros.
9. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que en el moderador (1) existen 4-10 canales (5) que van desde una zona interior (4) hasta la superficie (6) del moderador (1).
10. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que el diámetro de cada canal (5) es menor que el doble de la trayectoria libre media de los neutrones térmicos en el moderador.
11. Dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que el moderador (1) está rodeado por una envoltura exterior de grafito o polietileno.
12. Método para fabricar un dispositivo según una de las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que en el moderador se determina un máximo de flujo de neutrones térmicos y los extremos de los canales (5) están dispuestos en la zona del máximo de flujo determinado.
13. Método según la reivindicación que antecede, caracterizado por que las superficies de los canales están pulidas por dentro o están revestidas con un recubrimiento pulido.
14. Dispositivo según las reivindicaciones que anteceden, caracterizado por que en el interior de uno o varios canales existe un filtro de plomo o de monocristal de zafiro para filtrar los neutrones rápidos primarios.

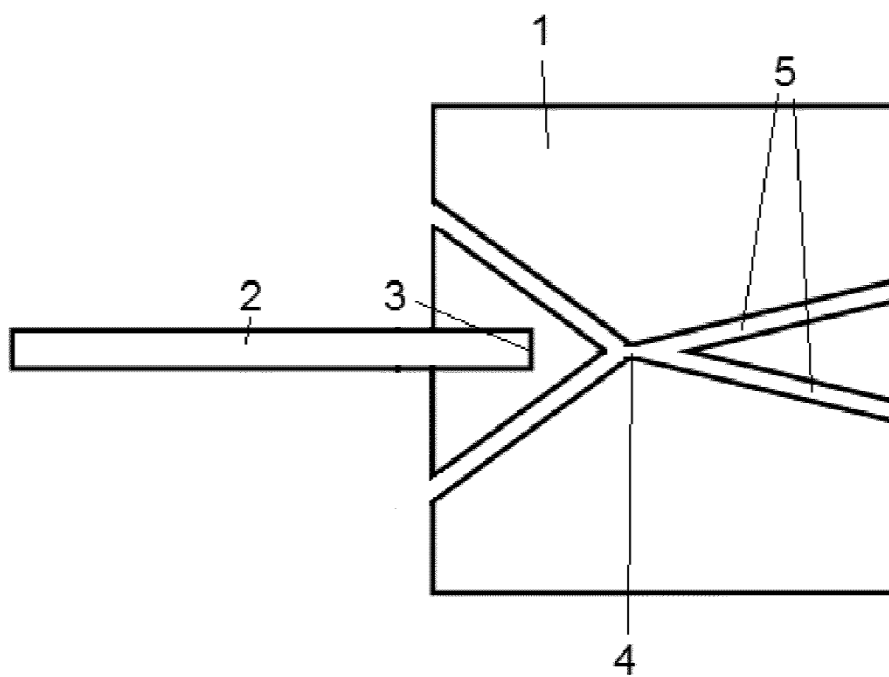


FIG. 1

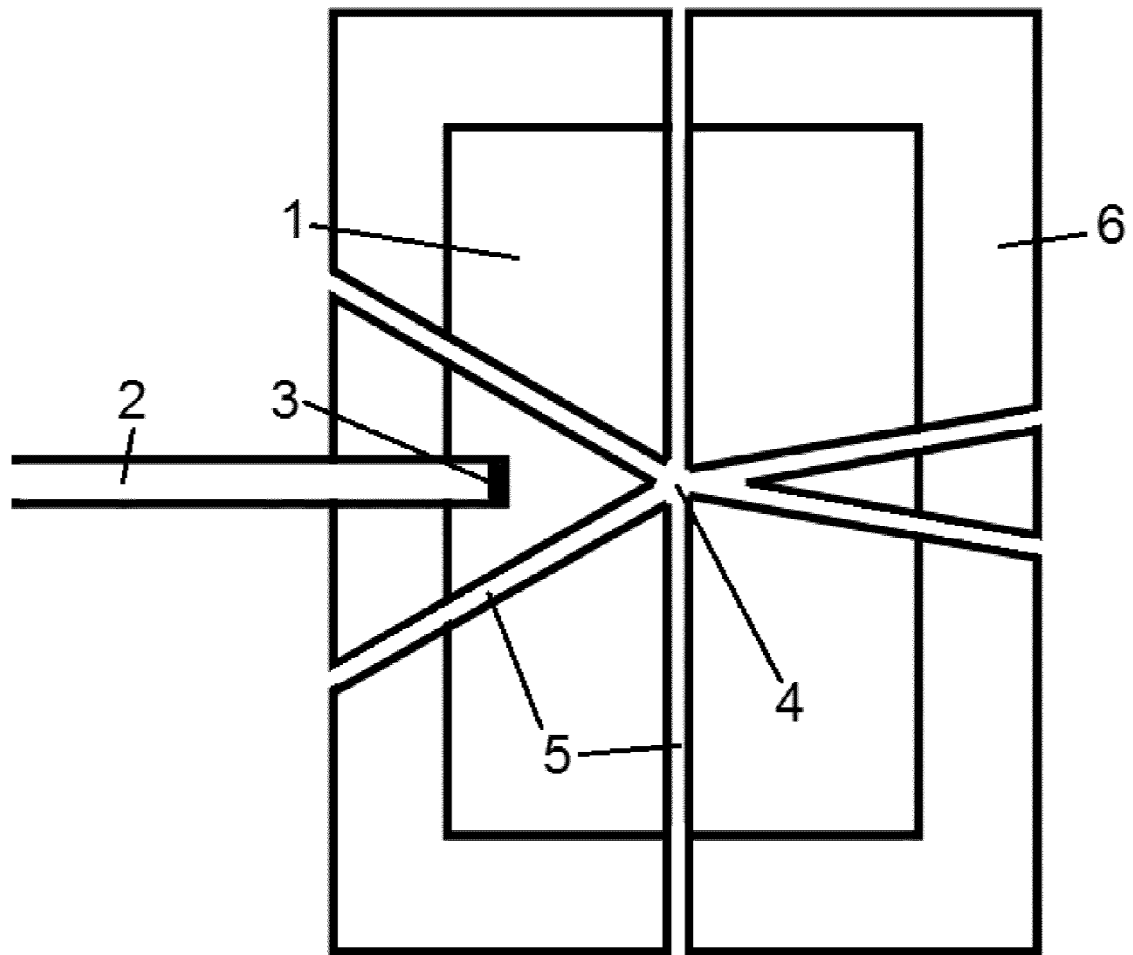


FIG. 2