(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Numéro de publication: **0 128 052**
B1

(12) # FASCICULE DE BREVET EUROPÉEN

(45) Date de publication du fascicule du brevet: **08.06.88**

(51) Int. Cl.⁴: **H 05 H 13/00**

(21) Numéro de dépôt: **84400682.5**

(22) Date de dépôt: **06.04.84**

(54) **Cyclotron à système de défocalisation.**

(30) Priorité: **12.04.83 FR 8305939**

(43) Date de publication de la demande:
12.12.84 Bulletin 84/50

(45) Mention de la délivrance du brevet:
08.06.88 Bulletin 88/23

(84) Etats contractants désignés:
DE GB SE

(56) Documents cité:
FR-A-2 109 273
FR-A-2 254 174
US-A-3 175 131
US-A-4 197 510

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, vol. NS-16, no. 3, parite I, juin 1969, NEW YORK (US); M.K. CRADDOCK et al.: "Magnetic field tolerances for the triumf 500MeV-H cyclotron", pages 415-420.

(73) Titulaire: **C.G.R. MeV, Route de Guyancourt, F-78530 Buc (FR)**

(72) Inventeur: **Meyrand, Gabriel, THOMSON- CSF SCPI 173, bld Haussmann, F-75379 Paris Cedex 08 (FR)**

(74) Mandataire: **Chaverneff, Vladimir, THOMSON- CSF SCPI 19, avenue de Messine, F-75008 Paris (FR)**

EP 0 128 052 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

LIBER, STOCKHOLM 1988

Description

L'invention concerne un cyclotron à système de défocalisation permettant d'augmenter sensiblement la limite de puissance admissible lorsque l'on place la cible à l'intérieur de la structure accélératrice.

Un cyclotron isochrone est un accélérateur de particules chargées (géréralement des protons) qui se compose d'un électro-aimant comprenant deux pièces polaires occupant les deux faces axiales, c'est-à-dire perpendiculaires à l'axe, d'une cavité accélératrice, cylindrique et relativement plate. Une source de particules chargées est disposée au centre de cette cavité de sorte que le champ magnétique perpendiculaire à la trajectoire du faisceau de particules donne à celui-ci une trajectoire circulaire. Un système d'accélération classique comporte deux électrodes plates constituées chacune de deux plaques parallèles en forme de portion de disque. Un tel cyclotron peut comporter des bobines annulaires concentriques dans l'entrefer des électrodes (voir FR-A-2 109 273 et FR-A-2 254 174), ces bobines servant à corriger le champ magnétique. Ces électrodes sont portées à une haute tension alternative, permettant d'appliquer aux particules quatre accélérations successives par tour. Dans ces conditions, l'énergie des particules augmente et la trajectoire du faisceau n'est plus un cercle mais une spirale divergente qui amène les particules jusqu'à la périphérie de la cavité accélératrice. Dans le cas où on désire faire sortir le faisceau de la cavité accélératrice (par exemple pour bombarder une cible de façon à créer un isotope radioactif) on utilise un canal électro-statique courbe porté à une haute tension pour arracher le faisceau de l'attraction du champ magnétique et l'extraire tangentiellement de la cavité. Cet organe est l'un des plus exposés du cyclotron et nécessite d'être particulièrement bien positionné par rapport au faisceau incident pour avoir le meilleur rendement d'extraction possible et aussi pour éviter qu'il ne soit bombardé par une fraction trop importante du faisceau incident. Ceci nécessite une très grande finesse du faisceau, autrement dit une bonne focalisation dans toutes les directions. On caractérise le faisceau par sa focalisation horizontale (ou radiale) dans le plan de la spirale et par sa focalisation verticale dans la direction perpendiculaire aux pièces polaires. On sait que la focalisation horizontale peut être obtenue en augmentant la valeur du champ magnétique en fonction du rayon. Ce gradient de champ dans la cavité permet aussi de compenser l'effet de l'augmentation de la masse de la particule au cours de son accélération (effet relativiste). En revanche, ce gradient est nuisible pour la focalisation verticale. On a résolu ce problème en soumettant la particule, à chaque tour, à une succession alternée de champs forts et de champs faibles. Ceci est obtenu grâce à des pièces polaires comprenant une succession de secteurs épais, espacés et répartis circonférentiellement pour définir dans la cavité une succession alternée de zones à entrefer large et de zones à entrefer étroit. Cet agencement assure, sous certaines conditions, la focalisation verticale. La puissance du faisceau extrait est définie par un rendement d'extraction qui dépend pour beaucoup des limites de dissipation thermique du canal électro-statique d'extraction précité et plus particulièrement d'une fine bande de cuivre de celui-ci, connue dans la technique sous le nom "septum".

Cependant, de nombreux utilisateurs de cyclotron, notamment pour la production de certains radioisotopes, désirent obtenir un faisceau le plus puissant possible. On a alors proposé de placer la cible à l'intérieur de la cavité accélératrice, sensiblement à la même distance du centre que le canal électro-statique d'extraction, ce dernier étant provisoirement retiré de la cavité. Dans ce nouveau mode d'utilisation du cyclotron, la focalisation poussée du faisceau, nécessaire pour l'extraction, devient un inconvénient car la cible ne peut assurer une dissipation thermique pour une zone d'impact aussi localisée et risque donc d'être endommagée. Par conséquent, la puissance du faisceau doit être limitée dans ce mode d'utilisation à cible interne et il n'est pas possible d'utiliser le cyclotron à sa puissance nominale de sorte que le gain de puissance est inférieur à ce qui pouvait être attendu d'une utilisation avec cible interne. L'invention vise à résoudre cet inconvient ; son principe de base consiste à jouer localement sur la focalisation verticale précitée.

Plus précisément, l'invention concerne donc un cyclotron comprenant deux pièces polaires occupant les deux faces axiales d'une cavité accélératrice cylindrique et relativement plate, au centre de laquelle est placée une source de particules chargées et comportant des moyens de positionnement d'une cible à l'intérieur de la dite cavité, du type dans lequel lesdites pièces polaires comprennent une succession de secteurs épais espacés et régulièrement répartis circonférentiellement pour définir dans ladite cavité une succession alternée de zones à entrefer étroit et de zones à entrefer large pour assurer la focalisation dite verticale, caractérisé en ce qu'il comporte en outre un agencement de bobines allongées, de défocalisation verticale, lesdites bobines étant parallèles aux pièces polaires, disposées circulairement au voisinage de la périphérie de ladite cavité et courbées pour venir sensiblement tangenter l'intérieur d'une surface cylindrique fixtive passant par un trajet circulaire correspondant en positionnenment radial de ladite cible, et des moyens d'alimentation électrique de celles-ci, pour faire varier les conditions de focalisation verticale au voisinage du dit trajet circulaire.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages de celle-ci apparaitront mieux à la lumière de la description qui va suivre de deux modes de réalisation possibles d'un cyclotron

selon l'invention, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en référence au dessin annexé dans lequel:

- la figure 1 est une vue schématique en plan des parties essentielles d'un cyclotron selon l'invention ;
- la figure 2 est une section II - II de la figure 1 ; et
- la figure 3 est une vue analogue à la figure 2, illustrant une variante de l'invention.

En se reportant aux figures 1 et 2, la partie principale du cyclotron 11 comporte des moyens pour générer un puissant champ magnétique dans une cavité accélératrice 12 cylindrique et de forme relativement plate. Ces moyens se composent d'une carcasse métallique externe (non représentée) et de deux bobines (non représentées) alimentées en courant continu et situées au voisinage de deux pièces polaires 13, 14 espacées en regard l'une de l'autre pour définir un entrefer. Comme les deux pièces polaires occupent les deux faces axiales de la cavité 12 celle-ci coïncide avec l'entrefer. En fonctionnement, on fait le vide dans la cavité 12. En outre , cette dernière abrite des électrodes accélératrices, non représentées pour plus de clarté dans le dessin mais dont la structure à deux plaques parallèles en forme de portion de disque et bien connue de l'homme du métier. Comme mentionné précédemment, la source de particules 16 est placée au centre de la cavité 12. Lorsque l'on désire extraire le faisceau tangentiellement (voir trajectoire 18 sur la figure 1) on place un canal électrostatique d'extraction 19, courbe, à la partie périphérique de la cavité 12. Celui-ci est composé d'une électrode courbe 20 portée à une haute tension continue et d'une électrode parallèle 21 au potentiel de la masse. Cette électrode appelée "septum" doit être très efficacement refroidie par conduction au moyen de blocs de cuivre disposés en contact thermique avec elle. L'ensemble est monté sur un support mobile radialement, schématisé par un vérin 22, pour pouvoir retirer le canal d'extraction de la cavité 12 et y placer une cible 23, à un autre endroit mais sensiblement à la même distance radiale par rapport à la source 16. Comme mentionné précédemment, la hauteur de l'entrefer n'est pas constante circonférentiellement, ceci est dû à la présence de quatre secteurs épais 24 sur chaque pièce polaire 13, 14, espacés et régulièrement répartis circonférentiellement pour définir dans la cavité 12 une succession alternée de zones à entrefer étroit 25 et de zones à entrefer large 26. Pour ce faire, les secteurs 24 appartenant respectivement aux pôles 13 et 14 sont disposés deux à deux en regard l'un de l'autre de façon à être exactement superposés dans la direction de l'axe de la cavité 12. Les particules chargées, en tournant dans le plan de la figure 1 rencontrent donc successivement des champs faibles (entrefer large) et forts (entrefer étroit) ce qui est la condition d'un bonne focalisation verticale. De façon connue, les bords des secteurs sont spiralés et les particules tournent dans le sens des aiguilles d'une montre en regardant la figure 1, c'est-à-dire de façon à rencontrer un profil de transition concave entre deux zones 23 et 26 voisines.

Selon un aspect essentiel de l'invention, le cyclotron comporte en outre un agencement de bobines allongées 28, 29 disposées circulairement au voisinage de la périphérie de la cavité 12 ainsi que des moyens d'alimentation électrique desdites bobines (non représentés puisqu'il ne s'agit que d'une ou plusieurs sources de courant continu) pour faire varier les conditions de focalisation verticale au voisinage d'un trajet circulaire 30 correspondant au positionnement radial de la cible 23. Dans l'exemple, le trajet circulaire 30 est celui qui correspond aux rayons d'extraction (c'est-à-dire la distance radiale ou l'on place le canal électrostatique 19) lequel trajet est celui des particules effectuant leur dernier tour dans la cavité et ayant par conséquent atteint une énergie maximum. Les bobines 28 sont disposées sur les secteurs 24, c'est-à-dire dans les zones à entrefer étroit et se font face deux à deux. Par ailleurs, les bobines 29 sont disposées dans les zones à entrefer large et se font également face deux à deux. Chaque bobine 28 et 29 est constituée de plusieurs spires étroites parallèles aux pièces polaires et ces spires sont courbées pour épouser au plus près le trajet circulaire 30. Chaque pièce polaire comporte une bobine 28 ou 29 par zone à entrefer étroit ou large, respectivement. Les bobines 29 sont connectées aux moyens d'alimentation avec un sens tendant à renforcer le champ magnétique localement dans les zones à entrefer large tandis que les bobines 28 sont connectées aux moyens d'alimentation avec un sens tendant à diminuer le champ magnétique localement dans les zones à entrefer étroit.

Le développement mathématique qui suit permet de mieux comprendre l'action de ce jeu de bobines sur la focalisation verticale du faisceau.

L'effet de focalisation verticale obtenue par les pièces polaires définies ci-dessus s'exprime par un coefficient vz tel que :

$$vz = \frac{N^2}{N^2-1} \qquad \frac{\varepsilon^2}{2}(1 + tg^2\alpha)-k$$

vz représente le nombre de "noeuds" de focalisation du faisceau par tour (dans la pratique on recherche $vz \cong 0{,}4$, par exemple) et dans la formule ci-dessus:

- N est le nombre de secteurs 24 (quatre dans l'exemple)
- α est un coefficient lié à la géométrie (spiralisation) des secteurs.

$-k = \frac{R}{B}\frac{dB}{dR}$, caractérise le gradient de focalisation horizontale, R étant le rayon d'une orbite considérée et B la valeur du champ magnétique au, voisinage de ce rayon

$\frac{\varepsilon^2}{2} = \frac{\langle B^2\rangle - \langle B\rangle^2}{\langle B\rangle^2}$

représente une sorte d'écart-type de variation de champ magnétique sur une orbite donnée.

Or, pour que la focalisation verticale soit effective, il faut que vz soit positif, une valeur de vz négative signifiant physiquement une défocalisation c'est-à-dire un élargissement du faisceau. C'est précisément ce que réalise l'invention et ceci en réduisant l'écart-type $\frac{\varepsilon^2}{2}$ puisqu'on ne peut modifier ni le nombre de secteurs, ni leur forme, ni la focalisation horizontale. Cette défocalisation doit s'opérer pendant que les particules effectuent les quelques tours qui précédent le trajet circulaire 30 défini plus haut, c'est pourquoi les bobines 28 et 29 sont disposées pour venir sensiblement tangenter l'intérieur d'une surface cyclindrique fictive passant par ledit trajet circulaire 30.

Dans la pratique, plusieurs types de branchement sont possibles. On peut par exemple faire en sorte que toutes les bobines soient reliées (par exemple en série) à une unique source d'alimentation électrique réglable, le sens d'enroulement des bobines 29 situées dans les zones à entrefer large étant inverse du sens d'enroulement des bobines 28 situées dans les zones à entrefer étroit. Dans ce cas particulièrement (mais non exclusivement), le nombre d'ampère-tours des bobines 29 situées dans les zones à entrefer large est plus grand que le nombre d'ampère-tours des bobines 28 situées dans les zones à entrefer étroit puisque la correction de champ magnétique dans ces zones doit être effectuée sur une distance d'entrefer plus faible.

On peut aussi prévoir que toutes les bobines 29 situées dans les zones à entrefer large soient reliées à une première source d'alimentation électrique réglable tandis que toutes les bobines 28 situées dans les zones à entrefer étroit soient reliées à une seconde source d'alimentation électrique réglable avec un sens de branchement inverse. Cette variante fait appel à une alimentation supplémentaire mais est d'une utilisation plus souple dans la mesure où les corrections de champ dans les zones 25 et 26 peuvent être réglées indépendamment.

La figure 3 illustre une variante dans laquelle les zones à entrefer large 26 sont munies de portions circulaires saillantes 32 (appelés "shims") réduisant localement l'entrefer au voisinage du trajet circulaire 30 et/où les zones à entrefer étroit sont pourvues de rainures 34 augmentant localement l'entrefer au voisinage de ce même trajet. Dans ces conditions on a modifié les caractéristiques dimensionnelles des pièces pour placer le cyclotron à la limite inférieure d'une focalisation verticale correcte et il suffit d'intercaler des moyens d'inversion de polarité entre les bobines 28, 29 et les moyens d'alimentation correspondants pour que les champs développés par lesdites bobines viennent, dans un cas, augmenter l'écart-type $\frac{\varepsilon^2}{2}$ et donc renforcer la focalisation pour permettre une extraction correcte du faisceau et, dans l'autre cas, diminuer ce même écart-type pour assurer la défocalisation verticale et permettre le fonctionnement avec cible interne. Avec cette variante, la puissance électrique consommée par les bobines 28, 29 est environ la moitié de celle qui est nécessaire avec le mode de réalisation précédent. En outre, les rainures 34 peuvent être mises à profit pour l'intégration des bobines dans les zones à entrefer étroit ou la place pour les loger est la plus restreinte.

Revendications

1. Cyclotron comprenant deux pièces polaires (13, 14) occupant les deux faces axiales d'une cavité accélératrice (12) cylindrique et de forme relativement plate au centre de laquelle est placée une source (16) de particules chargées et comportant des moyens de positionnement d'une cible (23) à l'intérieur de la cavité, du type dans lequel lesdites pièces polaires comprennent une succession de secteurs épais (24) espacés et régulièrement répartis circonférentiellement pour définir dans ladite cavité une succession alternée de zones à entrefer étroit (25) et de zones à entrefer large (26) pour assurer la focalisation verticale, caractérisé en ce qu'il comporte en outre un agencement de bobines allongées (28, 29) de défocalisation verticale, lesdites bobines étant parallèlles aux pièces polaires, disposées circulairement au voisinage de la périphérie de ladite cavité et courbées pour venir sensiblement tangenter l'intérieur d'une surface cylindrique fixtive passant par un trajet circulaire 30 correspondant en positionnement radial de ladite cible, et des moyens d'alimentation électrique de celles-ci pour varier les conditions de focalisation verticale au voisinage dudit trajet circulaire.

2. Cyclotron selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque pièce polaire comporte une bobine (28 ou 29) par zone à entrefer étroit ou large.

3. Cyclotron selon la revendication 2, caractérisé en ce que les bobines (29) situées dans une zone à entrefer large (26) sont connectées aux moyens d'alimentation avec un sens tendant à renforcer le champ magnétique localement dans cette zone et en ce que les bobines (28) situées dans une zone à entrefer étroit (25) sont connectées auxdits moyens d'alimentation avec un sens tendant à diminuer localement le champ magnétique dans cette zone.

4. Cyclotron selon la revendication 3, caractérisé en ce que les bobines précitées sont toutes reliées à une unique source d'alimentation électrique réglable, le sens d'enroulement des bobines situées dans les zones à entrefer large étant inverse du sens d'enroulement des bobines situées dans les zones à entrefer étroit.

5. Cyclotron selon la revendication 3, caractérisé en ce que toutes les bobines situées

dans les zones à entrefer large sont reliées à une première source d'alimentation électrique réglable tandis que toutes les bobines situées dans les zones à entrefer étroit sont reliées à une seconde source d'alimentation électrique réglable.

6. Cyclotron selon l'une des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce que le nombre d'ampère-tours des bobines situées dans les zones à entrefer large (26) est plus grand que le nombre d'ampère-tours des bobines situées dans les zones à entrefer étroit (25).

7. Cyclotron selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que lesdites zones à entrefer large (26) sont munies de portions circulaires saillantes (32) réduisant localement l'entrefer au voisinage du trajet circulaire (30) précité et/où que lesdites zones à entrefer étroit (25) sont pourvues de rainures (34) augmentant localement l'entrefer au voisinage du même trajet circulaire (30).

Patentansprüche

1. Zyklotron mit zwei Polstücken (13, 14), die die beiden axialen Flächen eines zylindrischen Beschleunigungshohlraums (12) von relativ flacher Form einnehmen, in deren Mitte eine Quelle (16) geladener Teilchen plaziert ist, und mit Mitteln zur Positionierung eines Zieles (23) im Inneren des Hohlraumes, wobei die Polstücke eine Folge von dicken Sektorelementen (24) aufweisen, die mit Zwischenabstand und regelmäßig in Umfangsrichtung verteilt sind und im Hohlraum eine alternierende Folge von schmalen (25) und breiten (26) Luftspalten zur Erzielung einer senkrechten Fokussierung bilden, dadurch gekennzeichnet, daß es weiter eine Anordnung von länglichen Spulen (28, 29) zur vertikalen Defokussierung aufweist, wobei die Spulen parallel zu den Polstücken und kreisförmig in der Nähe des Randes des Hohlraums angeordnet und gebogen sind, um das Innere einer zylindrischen fiktiven Oberfläche in etwa tangential zu berühren, welche durch eine der radialen Position des Ziels entsprechende Kreisbahn (30) verläuft, und daß Mittel zur elektrischen Speisung der Spulen vorgesehen sind, um die vertikalen Fokussierungsbedingungen in der Nähe der Kreisbahn zu variieren.

2. Zyklotron nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jedes Polstück für jede schmale oder jede breite Luftspaltzone je eine Spule (28 oder 29) aufweist.

3. Zyklotron nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die in einer breiten Luftspaltzone (26) angebrachten Spulen (29) an die Speisemittel in einem das Magnetfeld in dieser Zone lokal verstärkenden Sinn und die in einer schmalen Luftspaltzone (25) angebrachten Spulen (28) an die Speisemittel in einem das Magnetfeld in dieser Zone lokal schwächenden Sinn angeschlossen sind.

4. Zyklotron nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß alle Spulen an eine einzige, regelbare elektrische Speisestromquelle angeschlossen sind, wobei der Wicklungssinn der in den Zonen mit breitem Luftspalt angeordneten Spulen dem der Spulen in den Zonen mit schmalem Luftspalt entgegengesetzt ist.

5. Zyklotron anch Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß alle in den Zonen mit breitem Luftspalt angeordneten Spulen an eine erste regelbare elektrische Speisestromquelle angeschlossen sind, während alle in den Zonen mit schmalem Luftspalt angeordneten Spulen an eine zweite regelbare elektrische Speisestromquelle angeschlossen sind.

6. Zyklotron nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Anzahl der Ampèrewindungen der in den Zonen mit breitem Luftspalt (26) angeordneten Spulen größer ist als die Anzahl der Ampèrewindungen der in den Zonen mit schmalem Luftspalt (25) angeordneten Spulen.

7. Zyklotron nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Zonen mit breitem Luftspalt (26) mit vorspringenden, kreisförmigen Teilen (32) ausgestattet sind, welche örtlich den Luftspalt in der Nähe der Kreisbahn (30) einengen und/oder daß die Zonen mit schmalem Luftspalt (25) Nuten (34) aufweisen, welche örtlich den Luftspalt in der Nähe der gleichen Kreisbahn (30) vergrößern.

Claims

1. A cyclotron comprising two pole pieces (13, 14) occupying the two axial faces of a cylindrical acceleration cavity (12) of a relatively flat shape, in the center of which is placed a charged particles source (16), and comprising means for positioning a target (23) inside the cavity, the cyclotron being of the type wherein said polar pieces comprise a sequence of thick, spaced sectors (24) distributed regularly along the circumference so as to define within the cavity an alternating sequence of zones of small interferric gaps (25) and of zones of broad interferric gaps (26) for ensuring the vertical focussing, characterized in that it comprises in addition an arrangement of elongated windings (28, 29) for the vertical defocalization, the windings being disposed parallelly to the polar pieces and circularly near the periphery of the cavity and curved for substantially touching tangentially the inner side of a fictive cylindrical surface passing through a circular trajectory (30) corresponding to the radial position of the target, and that it comprises electric feed means for the windings in order to vary the vertical focussing condition near said circular trajectory.

2. A cyclotron according to claim 1, characterized in that each polar piece comprises

one winding (28 or 29) for each zone with a small or a large interferric gap.

3. A cyclotron according to claim 2, characterized in that the windings (29) placed in a large interferric gap zone (26) are connected to the feed means in a sense tending to locally increase the magnetic field in this zone, and that the windings (28) placed in a small interferric gap zone (25) are connected to said feed means in a sense tending to locally weaken the magnetic field in this zone.

4. A cyclotron according to claim 3, characterized in that all of said windings are connected to a single adjustable electric power source, the winding sense of the windings placed in the broad interferric gap zones being inverse to the winding sense of the windings placed in the small interferric gap zones.

5. A cyclotron according to claim 3, characterized in that all the windings placed in the large interferric gap are connected to a first adjustable electric power source, whereas all the windings placed in the small interferric gap zones are connected to a second adjustable electric power source.

6. A cyclotron according to one of the claims 4 or 5, characterized in that the number of ampèreturns of the windings located in the large interferric gap zones (26) is greater than the number of ampèreturns of the windings located in the small interferric gap zones (25).

7. A cyclotron according to one of the preceding claims, characterized in that the broad interferric gap zones (26) are equipped with projecting circular portions (32) adapted to reduce locally the interferric gap near said circular trajectory (30) and/or that the small interferric gap zones (25) are equipped with grooves (34) adapted to increase locally the interferric gap near this same circular trajectory (30).

FIG_1

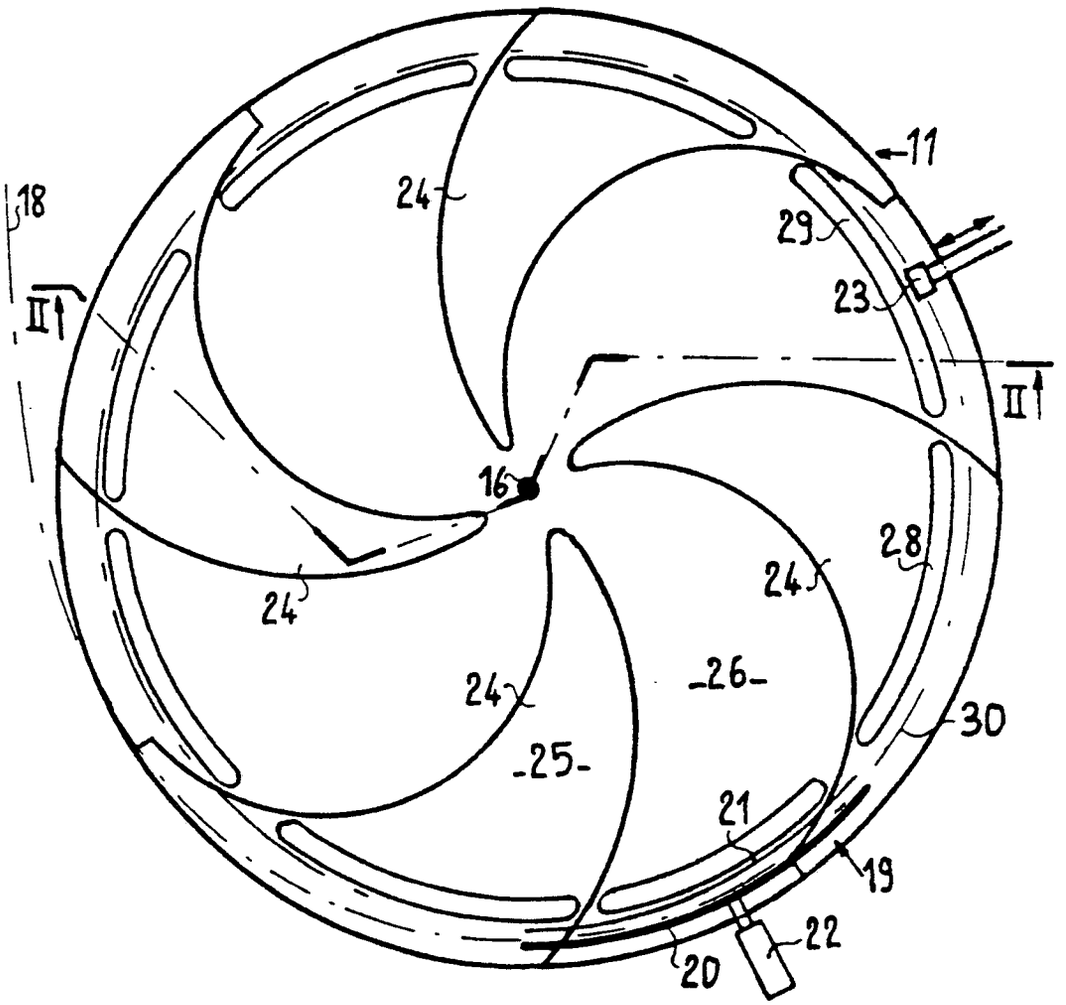


FIG_2

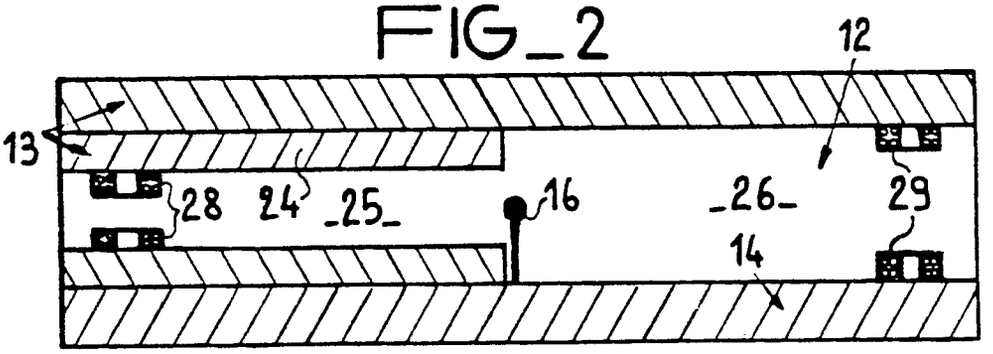


FIG_3

