



(11) **EP 2 633 741 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
03.12.2014 Bulletin 2014/49

(21) Numéro de dépôt: **11776428.2**

(22) Date de dépôt: **27.10.2011**

(51) Int Cl.:
H05H 7/04 (2006.01) H05H 13/02 (2006.01)

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2011/068844

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2012/055958 (03.05.2012 Gazette 2012/18)

(54) **SYNCHROCYCLOTRON**
FREQUENZMODULIERTES ZYKLOTRON
SYNCHROCYCLOTRON

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorité: **27.10.2010 BE 201006410**

(43) Date de publication de la demande:
04.09.2013 Bulletin 2013/36

(73) Titulaire: **Ion Beam Applications S.A.**
1348 Louvain-la-Neuve (BE)

(72) Inventeurs:
• **MANDRILLON, Jérôme**
F-06100 Nice (FR)
• **CONJAT, Matthieu**
F-06200 Nice (FR)

(74) Mandataire: **Pronovem**
Office Van Malderen
Avenue Josse Goffin 158
1082 Bruxelles (BE)

(56) Documents cités:
US-A- 4 641 057 US-A1- 2007 171 015

- **HOLM S: "Factors affecting beam intensity and quality in synchrocyclotrons", FIFTH INTERNATIONAL CYCLOTRON CONFERENCE BUTTERWORTHS LONDON, UK, 1971, pages 736-748, XP002638376,**
- **A.GARONNA: "Synchrocyclotron Preliminary Design for a Dual Hadrontherapy Center", PROCEEDINGS OF IPAC '10, juin 2010 (2010-06), pages 552-554, XP002638377, Kyoto, Japan**
- **BIGHAM C B: "Magnetic trim rods for superconducting cyclotrons", NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS, NORTH-HOLLAND, vol. 131, no. 2, 24 décembre 1975 (1975-12-24), pages 223-228, XP002436706, ISSN: 0029-554X, DOI: DOI:10.1016/0029-554X(75) 90323-7**

EP 2 633 741 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

DOMAINE TECHNIQUE

5 [0001] La présente invention concerne un synchrocyclotron.

DESCRIPTION DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE

10 [0002] Les synchrocyclotrons, tout comme les cyclotrons, sont des accélérateurs de particules comprenant une structure d'aimant comprenant deux bobines d'induction magnétique entourant radialement une cavité destinée à l'accélération de particules, comprise entre deux pôles, la cavité comprenant un axe central et dans laquelle s'étend un plan médian perpendiculairement audit axe central. Les particules sont produites dans une source de particules située dans la cavité au voisinage de l'axe central, et sont extraites de la source pour être accélérées, dans le plan médian suivant une trajectoire en forme de spirale, par des électrodes accélératrices alimentées par un générateur de tension alternative haute fréquence. De tels synchrocyclotrons sont de plus en plus utilisés pour l'hadron-thérapie.

15 [0003] À la différence des cyclotrons, où les particules sont accélérées à la même fréquence, dans un synchrocyclotron, la fréquence du champ électrique appliqué aux électrodes accélératrices est modulée de manière à compenser l'accroissement de masse relativiste lorsque la vitesse des particules augmente.

20 [0004] Pour réduire la taille d'un cyclotron, il faut augmenter le champ magnétique qui guide les ions durant l'accélération. Pour les cyclotrons isochrones, où la focalisation verticale du faisceau est obtenue par des secteurs magnétiques placés dans l'entrefer, il est difficile d'augmenter le champ magnétique moyen au-dessus de 5 Tesla, car la focalisation verticale devient insuffisante. Au contraire, dans les synchrocyclotrons, on peut, en principe, augmenter sans limites le niveau de champ magnétique. Les synchrocyclotrons sont également plus compacts que les cyclotrons, la taille d'un synchrocyclotron diminuant proportionnellement par rapport au champ magnétique généré entre les deux pôles.

25 [0005] Les documents US 7 541 905 et US 7 696 847 décrivent un synchrocyclotron dont les bobines d'induction sont réalisées en un matériau supraconducteur, refroidies à une température de 4,5K, et capables de produire un champ magnétique compris entre 5 Tesla et 11 Tesla. Des champs magnétiques de 14 Tesla peuvent être produits en diminuant la température jusqu'à 2K pour des bobines d'induction réalisées en Nb₃Sn. La culasse réalisée en fer doux fournit un champ additionnel d'environ 2 Tesla. Afin de réduire la taille d'un synchrocyclotron, les documents susmentionnés suggèrent de produire un champ magnétique élevé dans l'entrefer des pôles. Néanmoins, en augmentant le champ magnétique au-dessus de 6 Tesla, comme suggéré dans les brevets précités, des effets indésirables apparaissent. Ainsi, il devient impossible ou très difficile de dessiner la région centrale du cyclotron, car le champ magnétique très élevé entraîne une diminution du rayon des premières orbites prises par les particules, de manière telle que les particules n'arrivent pas à contourner la source d'ion au premier tour. Un deuxième inconvénient des champs magnétiques supérieurs à 6 Tesla est que la réalisation du dispositif d'extraction devient très complexe. Un troisième inconvénient des champs magnétiques supérieurs à 6 Tesla au centre du cyclotron est que, pour de tels champs magnétiques, le champ magnétique dans les bobines excède le champ magnétique pour lequel on peut utiliser un alliage de Niobium-Titane pour les bobines. On doit utiliser alors utiliser un alliage Nb₃Sn, qui est beaucoup plus coûteux.

30 [0006] Le synchrocyclotron décrit plus haut comprend deux pôles dont le profil permet une faible focalisation des particules accélérées dans le plan médian et une stabilité de phase de façon-à-ce que les particules chargées acquièrent suffisamment d'énergie pour maintenir l'accélération dans l'entrefer des pôles. Dans le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un synchrocyclotron, une particule chargée et accélérée oscille de manière radiale et axiale autour d'une orbite d'équilibre. La fréquence d'oscillation radiale ν_r est donnée par :

45

$$\nu_r = \sqrt{1 - n} \quad (\text{oscillations par révolution}) \quad (I)$$

la fréquence d'oscillation axiale ν_z est donnée par :

50

$$\nu_z = \sqrt{n} \quad (\text{oscillations par révolution}) \quad (II)$$

avec n l'indice de focalisation de champ donné par :

55

$$n = -\frac{r}{B} \frac{dB}{dr} \quad (III)$$

où r est le rayon de l'orbite de la particule, l'origine du rayon passant par un point de l'axe central, et B est le champ magnétique en ce rayon.

[0007] On peut montrer théoriquement qu'il existe une force de focalisation axiale lorsque $n > 0$, ce qui implique que dB/dr soit négatif. Le synchrocyclotron doit donc avoir un profil de champ évolutif qui décroît en fonction du rayon de manière à satisfaire aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ. Généralement, on s'arrange pour avoir un profil de pôle dont l'indice de focalisation de champ est inférieur à 0,2 dans la cavité destinée à l'accélération des particules. Lorsque l'on s'approche du rayon maximum du pôle, le champ magnétique diminue plus rapidement en fonction du rayon, l'indice de champ magnétique augmente, la fréquence radiale ν_r diminue et la fréquence axiale ν_z augmente. Lorsque $n = 0,2$, on a une condition particulière où $\nu_r = 2 \nu_z$. Dans cette condition particulière, connue comme résonance de Walkinshaw, l'énergie des oscillations radiales peut être transférée aux oscillations axiales. Ceci fait augmenter la taille axiale du faisceau et cause généralement la perte de la majorité des ions accélérés. Pour éviter ce phénomène, le synchrocyclotron comprend des ailes de pôles situées sur le bord des pôles, causant une réduction de l'entrefer avant que l'indice de champ ne soit égal à 0,2, de manière à augmenter localement le champ magnétique et à empêcher la perte de particules.

[0008] Dans le cas d'un synchrocyclotron à champ magnétique élevé, tel que décrit dans les deux documents US cités ci-dessus, pour satisfaire aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ n et permettre la focalisation des particules dans le plan médian, le profil des pôles doit évoluer d'une région avoisinant l'axe central où l'entrefer est suffisamment étroit pour produire suffisamment de champ magnétique, vers une région située proche des ailes de pôles où l'entrefer est maximum et dont la hauteur est au moins deux fois supérieure à celle de la zone de l'entrefer avoisinant l'axe central. Les pôles comprennent des surfaces biseautées de façon à élargir progressivement l'entrefer des pôles, la région des pôles où le gap est maximum étant comprise entre deux surfaces formant un angle aigu entre elles. Dans la Fig. 2 du document US 7 696 847, la jonction entre l'aile 134 et la surface 130 présente un angle aigu. Un tel profil de pôle comprenant une région profonde et étroite est assez difficile à usiner avec précision.

[0009] Un synchrocyclotron comprenant un entrefer dans lequel est généré un champ magnétique de 5,5 Tesla est décrit dans le document de Wu X. « Conceptual Design and Orbit Dynamics in a 250 MeV Superconducting Synchrocyclotron » (PhD dissertation, Michigan State University, 1990). Les pertes de particules à la sortie de la source sont moins importantes pour un tel champ magnétique. Néanmoins, l'entrefer entre les pôles de ce synchrocyclotron est relativement étroit, tout comme dans le synchrocyclotron décrit précédemment, ce qui nécessite le forage d'un trou dans la culasse selon l'axe central de la culasse pour l'introduction d'une source de particules dans la région centrale. Le forage du trou dans la culasse modifie localement le champ magnétique au centre de la cavité accélératrice, où le champ magnétique au voisinage de la source s'accroît initialement avec le rayon jusqu'à un maximum, puis retombe légèrement avec le rayon. L'index de focalisation de champ est donc initialement négatif ce qui provoque une défocalisation de la trajectoire des particules sur un court rayon. Cet effet augmente avec le rayon de la source, d'où la nécessité de minimiser le diamètre du trou dans la culasse et le diamètre de la source, ce qui réduit la capacité de production de particules. Aussi, il est nécessaire d'insérer des pièces métalliques circulaires de compensation de champ magnétique, couramment appelées « shims ».

[0010] Un autre inconvénient des synchrocyclotrons décrits précédemment est le peu d'espace disponible pour l'insertion d'un circuit d'oscillation haute fréquence comprenant des électrodes accélératrices et une ligne de transmission. Ce manque d'espace impose une distance réduite entre les électrodes accélératrices et la ligne de transmission, ce qui a pour effet d'augmenter la capacité entre ces deux éléments. Une augmentation de la capacité nécessite plus de puissance au niveau du générateur de tension pour produire la fréquence de courant alternatif désirée dans les électrodes accélératrices.

[0011] Afin de minimiser les problèmes d'extraction des particules de la source, et de réduire les coûts de production d'un synchrocyclotron, il est nécessaire de minimiser le champ magnétique dans l'entrefer compris entre les deux pôles du synchrocyclotron tout en minimisant la taille du synchrocyclotron.

[0012] Il est également souhaitable de réaliser un synchrocyclotron dont les profils de pôles satisfont aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ et sont plus faciles à usiner.

[0013] Il est aussi souhaitable de réaliser un synchrocyclotron dont l'entrefer entre les deux pôles permet l'insertion aisée d'une source et d'un circuit d'oscillation haute fréquence de manière à éviter les problèmes tels que rencontrés dans les synchrocyclotrons de l'art antérieur.

RESUME DE L'INVENTION

[0014] La présente invention concerne un synchrocyclotron comprenant une structure ferromagnétique, une structure à masse froide et une source de particules. La structure ferromagnétique comprend généralement : deux plaques de culasses, en forme de disques situées de manière coaxiale par rapport à un axe central, parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian ; une paire de pôles qui présentent une section de forme généralement circulaire, de rayon R , qui sont agencés de part et d'autre dudit plan médian, centrés sur l'axe central et séparés d'un

entrefer formant une cavité; des retours de flux qui entourent les pôles et joignent les deux plaques de culasses. La structure à masse froide comporte généralement au moins deux bobines d'induction magnétique, et elle est entourée par les retours de flux et entoure les pôles. La source de particules est généralement située dans la cavité dans une première zone circulaire de rayon R1, inférieur au rayon R de la cavité, son origine étant un point de l'axe central.

L'entrefer de la cavité présente normalement un profil substantiellement symétrique par rapport au plan médian, sa hauteur variant radialement. Le profil de l'entrefer comporte successivement à partir dudit axe central : une première portion, de section circulaire avec un rayon R2, centrée sur l'axe central, dont la hauteur de l'entrefer au centre est égale à H_{centre} et qui comprend une sous-portion annulaire (encore appelée : première zone annulaire) dans laquelle la hauteur croît progressivement jusqu'à une hauteur maximale H_{max} au niveau du rayon R2; et une seconde portion de section annulaire (encore appelée : deuxième zone annulaire), qui entoure la première portion, et dans laquelle la hauteur de l'entrefer décroît progressivement jusqu'à une hauteur H_{bords} aux bords des pôles. Selon un premier aspect de l'invention, la hauteur H_{centre} de l'entrefer est supérieure à 10 cm, et le rapport de la hauteur maximale H_{max} sur la hauteur H_{centre} est compris entre 1,1 et 1,5, avantageusement entre 1,2 et 1,5, et de préférence entre 1,2 et 1,4. Il sera noté qu'avec ce profil de l'entrefer, le champ magnétique moyen produit dans la cavité par les bobines et la structure ferromagnétique peut être compris entre 4 et 7 Tesla.

[0015] De préférence, la première portion comprend une sous-portion centrale (encore appelée zone centrale 6) de rayon R1 inférieur à R2, centrée sur l'axe central, où la hauteur de l'entrefer est constante et de hauteur H_{centre} .

[0016] Les pôles comprennent avantageusement une succession de surfaces annulaires biseautées et centrées sur l'axe central, chacune de ces surfaces formant avec sa surface voisine un angle α strictement supérieur à 90°, préférentiellement supérieur à 120°, et encore plus préférentiellement supérieur à 140°.

[0017] De préférence, la sous-portion centrale (zone centrale) s'étend sur un rayon R1 inférieure à 20 % du rayon R de la cavité, et la sous-portion annulaire (première zone annulaire) s'étend entre le rayon R1 et un rayon R2 inférieur à 95% du rayon R de la cavité.

[0018] Dans une exécution préférée, la sous-portion centrale (zone centrale) s'étend sur un rayon R1 de l'ordre de 10 % du rayon R de la cavité et la première sous-portion annulaire s'étend entre le rayon R1 et un rayon R2 de l'ordre de 70% du rayon R de la cavité.

[0019] La source est avantageusement située dans la sous-portion centrale et maintenue par un support inséré dans la cavité de manière substantiellement parallèle audit plan médian.

[0020] Il sera apprécié que, grâce à une hauteur H_{centre} assez importante de l'entrefer, les pôles peuvent être avantageusement pleins, car la source de particules peut être introduite radialement dans la zone centrale de l'entrefer.

[0021] Il sera encore apprécié que, grâce au champ magnétique assez faible, les bobines d'induction magnétique peuvent être réalisées en NbTi.

[0022] Selon un autre aspect, la présente invention concerne une méthode de réalisation d'un synchrocyclotron comprenant les étapes suivantes :

- fixation de la hauteur de l'entrefer entre les pôles au voisinage de l'axe central H_{centre} telle que la hauteur H_{centre} soit supérieure à 10 cm;
- fixation d'une hauteur maximale de l'entrefer H_{max} telle que celle-ci soit supérieure à au moins 1,1 fois la hauteur H_{centre} et inférieure à 1,5 fois la hauteur H_{centre} ;
- fixation d'un champ magnétique dans des bobines d'induction magnétique entourant les pôles formant la cavité accélératrice de particules ;
- optimisation du profil des pôles et des dimensions et position des bobines d'induction magnétique 3 en tenant compte de H_{centre} et H_{max} ainsi que du champ magnétique dans les bobines, de manière à obtenir une cavité accélératrice de particules comprise entre les pôles dont l'entrefer entre les pôles satisfait aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ $n = \frac{-r}{B} \frac{dB}{dr}$, où r est le rayon de l'orbite d'une particule, l'origine du rayon passant par un point de l'axe central, et B est le champ magnétique en ce rayon, n devant être strictement compris entre 0 et 0,2.

DESCRIPTION DES FIGURES

[0023] Des modes de réalisation de la présente invention vont maintenant être décrits, à titre d'exemple, en se référant aux dessins annexés, dans lesquels :

- la Fig. 1 est une coupe simplifiée d'un synchrocyclotron selon un mode de réalisation de la présente invention ; le plan de coupe contenant l'axe central du synchrocyclotron, et la coupe illustrant avant tout une structure ferromagnétique du synchrocyclotron ;
- 5 - la Fig. 2 est une coupe identique à la coupe de la Fig. 1, montrant également de façon schématique une source de particules.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

10 **[0024]** Les Fig. 1 et 2 représentent de façon schématique un synchrocyclotron selon la présente invention. Il est à noter que certaines pièces du synchrocyclotron ne sont pas représentées afin de ne pas encombrer les figures.

[0025] Le synchrocyclotron représenté sur les figures pour illustrer l'invention de façon non-limitative, comprend :

- une structure ferromagnétique 4 comprenant :
 - 15 o deux plaques de base, appelées encore plaques de culasses 16, 16', en forme de disques agencées de manière coaxiale par rapport à un axe central 1 du synchrocyclotron, parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian 2 ;
 - 20 o une paire de pôles 5, 5', présentant une section de forme généralement circulaire, de rayon R, agencés de part et d'autre du plan médian 2 du synchrocyclotron, centrés sur l'axe central 1 et séparés d'un entrefer formant une cavité 9 ; et
 - 25 o des retours de flux 17 entourant les pôles 5,5' et joignant les deux des culasses 16, 16' ;
 - une structure à masse froide comportant au moins deux bobines d'induction magnétique 3, entourée par les retours de flux 17 et entourant les pôles 5, 5' ;
 - une source de particules 11 (cf. Fig. 2), située dans la cavité 9 dans une première zone 6 de section circulaire, de rayon R1 inférieur au rayon R de la cavité 9 et dont l'origine est un point dudit axe central 1 ;
 - 30 - un générateur 14 de tension haute fréquence (cf. Fig. 2) situé en dehors des retours de flux 17 ;
 - une électrode accélératrice (cf. Fig. 2) couplée au générateur 14 de tension haute fréquence ; cette électrode accélératrice comprenant une paire de plaques 12 parallèles, substantiellement semi-circulaires et séparées l'une de l'autre par un gap, situées à l'intérieur de la cavité 9, s'étendant parallèlement et symétriquement de part et d'autre du plan médian 2 et faisant face à la source ; et
 - 35 - une ligne de transmission 13 entourant l'électrode accélératrice 12 et située à une certaine distance de l'électrode 12.
- 40 **[0026]** Selon un aspect préféré, le champ magnétique généré dans l'entrefer entre les pôles 5, 5' du synchrocyclotron est choisi :
- de manière à ce qu'il soit suffisamment élevé pour accélérer des particules à une énergie comprise entre 200 et 45 250 MeV ;
 - pour éviter que les particules sortant de la source ne retombent sur celle-ci sous l'action d'un champ magnétique trop élevé ; et
 - 50 - pour minimiser la taille du synchrocyclotron.

[0027] Le champ magnétique généré dans l'entrefer entre les pôles est avantageusement compris entre 4 et 7 Teslas, préférentiellement entre 4 et 6 Teslas. Il sera apprécié que la production d'un tel champ magnétique ne requiert pas l'utilisation de bobines supraconductrices en Nb₃Sn. En effet, des bobines supraconductrices en NbTi sont adaptées à la production d'un champ compris entre 3 et 5 Tesla, auquel est combiné le champ magnétique généré par la structure ferromagnétique 4, qui est généralement de l'ordre de 2 Teslas. Les bobines supraconductrices en NbTi sont moins coûteuses et plus faciles à mettre en oeuvre que les bobines en Nb₃Sn.

[0028] Selon un aspect préféré, la cavité 9 formée par les pôles 5 a un rayon R, dont l'origine passe par un point de

EP 2 633 741 B1

l'axe central 1, et dont l'extrémité coïncide avec les bords 10 des pôles 5. La hauteur de l'entrefer varie en fonction du rayon de manière à satisfaire aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ n . Préféablement, l'entrefer comprend trois zones 6, 7 et 8, en partant de l'axe central vers le bord des pôles :

- 5 - une zone centrale 6, avantageusement plane (bien que cela ne soit pas nécessairement une limitation de la présente invention) et circulaire de rayon R_1 inférieur au rayon R de la cavité et dont l'origine coïncide avec un point de l'axe central 1, située au voisinage de l'axe central 1 et dont l'entrefer entre les pôles 5 est de hauteur H_{centre} ;
- 10 - une première zone annulaire 7, comprise entre un cercle dudit rayon R_1 et un second cercle de rayon R_2 , inférieur également au rayon R de la cavité et dont l'origine coïncide avec celle du rayon R_1 , dans laquelle la hauteur de l'entrefer entre les pôles 5 augmente progressivement jusqu'à une hauteur maximum H_{max} , de manière à diminuer progressivement le champ magnétique pour assurer une focalisation des particules dans le plan médian 2 ;
- 15 - une deuxième zone annulaire 8, comprise entre un cercle de rayon R_2 et les bords 10 des pôles, dans laquelle l'entrefer entre les pôles diminue progressivement jusqu'à une hauteur minimum H_{min} aux bords 10 des pôles, de manière à faire augmenter de nouveau le champ magnétique et diminuer l'indice focalisation de champ n avant que l'indice de focalisation de champ n n'arrive à une valeur limite à laquelle les particules oscillant axialement autour d'une orbite d'équilibre entrent en résonance avec les particules oscillant radialement autour de la même orbite d'équilibre.

20 **[0029]** Selon un aspect préféré, le rapport entre la hauteur maximum H_{max} de l'entrefer et la hauteur H_{centre} de l'entrefer au voisinage de l'axe central est strictement supérieur à 1 et inférieur à 1,5, de manière à faciliter l'usinage de l'intérieur des pôles, tout en satisfaisant aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ. Plus préféablement, le rapport $H_{\text{max}}/H_{\text{centre}}$ est compris entre 1,2 et 1,5.

25 **[0030]** Selon un autre aspect préféré, toujours dans le but de faciliter l'usinage des pôles 5, la zone comprenant la première zone annulaire 7 et la deuxième zone annulaire 8, est caractérisée par une succession de surfaces annulaires biseautées, centrées sur l'axe central 1, chacune de ces surfaces formant avec sa surface voisine un angle α strictement supérieur à 90° , préférentiellement supérieur à 120° , et encore plus préférentiellement supérieur à 140° .

30 **[0031]** Selon encore un autre aspect préféré, la hauteur H_{centre} de l'entrefer au voisinage de l'axe central 1 est supérieure à 10 cm, plus préféablement supérieure à 15 cm, plus préféablement supérieure à 18,4 cm. Il sera apprécié que la hauteur H_{centre} de l'entrefer au voisinage de l'axe central, plus élevée par rapport aux synchrocyclotrons de l'art antérieur, permet une insertion plus aisée de la source et du circuit d'oscillation haute fréquence comprenant les électrodes accélératrices et la ligne de transmission.

35 **[0032]** L'élargissement de l'entrefer permet par exemple d'augmenter le gap entre les deux plaques 12 de l'électrode accélératrice de manière à éviter une collision des particules avec les plaques 12. L'élargissement de l'entrefer permet également d'augmenter la distance entre l'électrode accélératrice et la ligne de transmission 13, ce qui réduit la capacité entre ces deux composants et permet au générateur de tension 14 de fournir une tension alternative haute fréquence à l'électrode accélératrice avec moins de puissance.

40 **[0033]** Selon un aspect préféré additionnel, la hauteur H_{centre} élevée dans la région de l'entrefer avoisinant l'axe central 1, permet l'insertion d'une source 11 de manière latérale plutôt que de manière axiale (cf. Fig. 2). L'insertion de la source 11 peut se faire, par exemple, au moyen d'un support 15 provenant de l'extérieur de la cavité 9 et comprenant des conduits pour la circulation du gaz dans la source, ainsi que des connexions électriques pour l'allumage de la source. L'insertion d'une source de manière latérale permet de renoncer au forage d'un trou dans la culasse 16, 16' et les pôles 5, 5', ce qui supprime la variation négative de l'indice de focalisation de champ dans la région de l'entrefer avoisinant l'axe central 1 et permet aussi l'utilisation d'une source de diamètre plus grand que dans les synchrocyclotrons de l'art antérieur. De cette manière, la source peut produire un courant de particules plus élevé. Aussi, avec la suppression de la variation négative de l'indice de champ dans la région de l'entrefer avoisinant l'axe central, les problèmes de défocalisation des particules à la sortie de la source sont minimisés, et des anneaux de compensation de champ, tels qu'utilisés dans les synchrocyclotrons de l'art antérieur, deviennent facultatifs, ce qui simplifie cette région de l'entrefer.

45 **[0034]** Dans un exemple, non limitatif, de réalisation d'un synchrocyclotron selon la présente invention, le champ magnétique moyen dans l'entrefer entre les deux pôles est de 5,6 Teslas. La hauteur de l'entrefer entre les pôles dans la région avoisinant l'axe central H_{centre} est de 18,4 cm et la hauteur de l'entrefer maximum H_{max} est de 25,3 cm. Dans ce synchrocyclotron, le rapport $H_{\text{max}}/H_{\text{centre}}$ est par conséquent égal à 1,375. La distance z (cm) séparant les pôles du plan médian en fonction du rayon des pôles r (cm) est renseignée dans le tableau 1. Le rayon externe et la hauteur du synchrocyclotron sont respectivement de 125 cm et de 156 cm. Pour un champ magnétique comparable, les dimensions de cette exécution selon la présente invention sont inférieures au cyclotron décrit par Wu (champ magnétique produit dans la cavité : 5,53 Teslas, hauteur du synchrocyclotron : 173,4 cm, rayon externe du synchrocyclotron : 132,3 cm). Toujours dans cette même exécution selon la présente invention, le gap entre les plaques de l'électrode accélératrice

EP 2 633 741 B1

est de 2 cm, et le gap entre ces plaques et la ligne de transmission est de 7,4cm.

Tableau 1 :

r (cm)	z (cm)
0	9.2
5	9.2
8.25	9.97
11.5	10.45
20	11.3
30	126.5
33.5	12.39
42.4	10.6
46	6.1
47.5	4.45
48	4.3
49.5	4.3

[0035] Il est à préciser que l'homme du métier peut optimiser le profil des pôles en fonction de la position des bobines par rapport au plan médian, ainsi que par les dimensions et la forme de cette bobine, tout en se plaçant dans des conditions où la hauteur de l'entrefer entre les deux pôles dans la première zone est supérieure à 10 cm, où le rapport de la hauteur de l'entrefer maximum H_{\max} sur la hauteur de l'entrefer minimum H_{centre} dans la zone centrale (6) est compris entre 1,1 et 1,5, plus préférablement entre 1,2 et 1,5. Dans l'exemple ci-dessus, les bobines ont un rayon interne de 55,4 cm centré sur l'axe central 1, une largeur de 13 cm et une hauteur de 28,1 cm, et sont distantes l'une de l'autre de 20 cm.

[0036] La présente invention concerne également une méthode de fabrication d'un synchrocyclotron comprenant deux pôles séparés par un entrefer, la méthode comprenant les étapes suivantes :

- fixation de la hauteur de l'entrefer au voisinage de l'axe central H_{centre} telle que la hauteur H_{centre} soit supérieure à 10 cm, préférablement supérieure à 15 cm, préférablement supérieure à 18,4 cm et inférieure à 37 cm ;
- fixation d'une hauteur maximale de l'entrefer H_{\max} telle que celle-ci soit strictement supérieure à la hauteur H_{centre} et inférieure à 1,8 fois la hauteur H_{centre} ;
- fixation d'un champ magnétique dans des bobines d'induction magnétique entourant les pôles formant la cavité accélératrice de particules ;
- optimisation du profil des pôles et des dimensions et position des bobines d'induction magnétique en tenant compte de H_{centre} et H_{\max} , ainsi que du champ magnétique dans les bobines, de manière à obtenir une cavité accélératrice de particules comprise entre les pôles dont l'entrefer entre les pôles satisfait aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ n.

Revendications

1. Synchrocyclotron comprenant :

- une structure ferromagnétique (4) comprenant :

- deux plaques de culasses (16, 16'), en forme de disques, agencées de manière coaxiale par rapport à un axe central (1) du synchrocyclotron, parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian (2) ;

EP 2 633 741 B1

- une paire de pôles (5, 5') présentant une section de forme généralement circulaire, de rayon R, agencés de part et d'autre dudit plan médian (2), centrés sur ledit axe central (1) et séparés d'un entrefer formant une cavité (9) ; et
- des retours de flux (17) entourant lesdits pôles (5,5') et joignant les deux plaques de culasses (16, 16') ;

5

- une structure à masse froide comportant au moins deux bobines d'induction magnétique (3), ladite structure à masse froide étant entourée par lesdits retours de flux (17) et entourant lesdits pôles (5,5') ;

10

- une source de particules (11) située dans ladite cavité (9) dans une première zone (6) de section circulaire de rayon R1 inférieur audit rayon R de ladite cavité (9) et dont l'origine est un point dudit axe central (1) ; l'entrefer formant ladite cavité (9) présentant un profil substantiellement symétrique par rapport audit plan médian (2), dont la hauteur varie radialement, ledit profil de l'entrefer comportant successivement à partir dudit axe central (1) :

15

- une première portion (6, 7), de section circulaire de rayon R2, centrée sur ledit axe central (1), dont la hauteur de l'entrefer au centre est égale à H_{centre} , et qui comprend une sous-portion annulaire (7) dans laquelle la hauteur de l'entrefer croît progressivement jusqu'à une hauteur maximale H_{max} au niveau du rayon R2;

- une seconde portion, de section annulaire (8), entourant ladite première portion (6, 7), où la hauteur de l'entrefer décroît progressivement jusqu'à une hauteur H_{bords} aux bords desdits pôles (5,5') ;

caractérisé en ce que ladite hauteur H_{centre} de l'entrefer est supérieure à 10 cm, et le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur ladite hauteur H_{centre} est compris entre 1,1 et 1,5.

20

2. Synchrocyclotron selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** ladite première portion (6, 7) comprend une sous-portion centrale (6), de section circulaire de rayon R1 inférieur à R2, centrée sur ledit axe central (1), où la hauteur de l'entrefer est constante et égale à la hauteur H_{centre} .

25

3. Synchrocyclotron selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur ladite hauteur H_{centre} est compris entre 1,2 et 1,5.

30

4. Synchrocyclotron selon la revendication 1 ou 2 **caractérisé en ce que** le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur ladite hauteur H_{centre} est compris entre 1,2 et 1,4.

5. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** lesdits pôles (5,5') comprennent une succession de surfaces annulaires biseautées et centrées sur ledit axe central (1), chacune desdites surfaces formant avec sa surface voisine un angle α strictement supérieur à 90°.

35

6. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ladite sous-portion centrale (6) s'étend sur un rayon R1 inférieur à 20 % du rayon R de ladite cavité, et ladite sous-portion annulaire (7) de ladite première portion (6,7) s'étend entre le rayon R1 et un rayon R2 inférieur à 95% du rayon R de ladite cavité (9).

40

7. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ladite sous-portion centrale (6) s'étend sur un rayon R1 de l'ordre de 10 % du rayon R de ladite cavité (9), et ladite sous-portion annulaire (7) de ladite première portion (7) s'étend entre le rayon R1 et un rayon R2 de l'ordre de 70% du rayon R de ladite cavité (9).

45

8. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ladite source (11) est située dans ladite sous-portion centrale (6) et maintenue par un support inséré dans ladite cavité (9) de manière substantiellement parallèle audit plan médian (2).

50

9. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** chacun desdits pôles (5) est plein.

10. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** lesdites bobines d'induction magnétique (3) sont réalisées en NbTi.

55

11. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le champ magnétique moyen produit dans ladite cavité (9) par lesdites bobines (3) et ladite structure ferromagnétique (4) est compris entre 4 et 7 Tesla.

12. Méthode de réalisation d'un synchrocyclotron selon la revendication 1, la méthode comprenant les étapes de :

- fixation de la hauteur de l'entrefer entre lesdits pôles au voisinage de l'axe central H_{centre} telle que ladite hauteur H_{centre} soit supérieure à 10 cm ;
- fixation d'une hauteur maximale de l'entrefer H_{max} telle que celle-ci soit supérieure à au moins 1,1 fois la hauteur H_{centre} et inférieure à 1,5 fois la hauteur H_{centre} ;
- fixation d'un champ magnétique dans des bobines d'induction magnétique (3) entourant les pôles formant la cavité accélératrice de particules ;
- optimisation du profil des pôles et des dimensions et position des bobines d'induction magnétique (3) en tenant compte de H_{centre} et H_{max} ainsi que du champ magnétique dans les bobines, de manière à obtenir une cavité accélératrice de particules comprise entre lesdits pôles dont l'entrefer entre lesdits pôles satisfait aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ $n = \frac{-r}{B} \frac{dB}{dr}$, avec r le rayon de l'orbite d'une particule, l'origine du dit rayon passant par un point de l'axe central, et B le champ magnétique en ce rayon, n devant être strictement compris entre 0 et 0,2.

Patentansprüche

1. Synchrozyklotron, das umfasst:

- eine ferromagnetische Struktur (4), die umfasst,
 - zwei scheibenförmige Jochplatten (16, 16'), die im Verhältnis zu einer zentralen Achse (1) des Synchrozyklotrons koaxial, im Verhältnis zu einer mittleren Ebene (2) parallel und substantiell symmetrisch ausgebildet sind,
 - ein Polpaar (5, 5'), das einen allgemein kreisförmigen Querschnitt mit dem Radius R aufweist, die auf der einen und der anderen Seite der mittleren Ebene (2) zentriert auf der zentralen Achse (1) und getrennt durch einen Spalt, der einen Hohlraum (9) bildet, ausgebildet sind, und
 - Rückflüsse (17), die die Pole (5, 5') umschließen und die beiden Jochplatten (16, 16') erreichen,
- eine Struktur mit kalter Masse, die mindestens zwei magnetische Induktionsspulen (3) aufweist, wobei die Struktur mit kalter Masse von den Rückflüssen (17) umschlossen ist und die Pole (5, 5') umschließt,
- eine Partikelquelle (11), die sich in den Hohlraum (9) in einer ersten Zone (6) mit kreisförmigem Querschnitt mit dem Radius R1 befindet, der kleiner ist als der Radius R des Hohlraums (9) und deren Ursprung ein Punkt der zentralen Achse (1) ist, wobei der Spalt, der den Hohlraum bildet (9), im Verhältnis zur mittleren Ebene (2) ein substantiell symmetrisches Profil aufweist, dessen Höhe radial schwankt, wobei das Profil des Spalts sukzessiv ab der zentralen Achse (1) aufweist:
 - einen auf der zentralen Achse (1) zentrierten ersten Abschnitt (6, 7) mit kreisrundem Querschnitt mit dem Radius R2, wobei die Höhe des Spalts im Zentrum gleich H_{centre} ist, und der einen ringförmigen Unterabschnitt (7) umfasst, in dem die Höhe des Spalts bis zu einer maximalen Höhe H_{max} auf Ebene des Radius R2 schrittweise zunimmt,
 - einen zweiten Abschnitt mit ringförmigem Querschnitt (8), der den ersten Abschnitt (6, 7) umschließt, wobei die Höhe des Spalts schrittweise bis zu einer Höhe H_{bords} an den Rändern der Pole (5, 5') abnimmt, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Höhe H_{centre} des Spalts größer als 10 cm ist und das Verhältnis der maximalen Höhe H_{max} zur Höhe H_{centre} zwischen 1,1 und 1,5 inklusive ist.

2. Synchrozyklotron nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Abschnitt (6, 7) einen zentralen Unterabschnitt (6) mit kreisförmigem Querschnitt mit dem Radius R1, der kleiner als R2 ist, umfasst, der auf der zentralen Achse (1) zentriert ist, wobei die Höhe des Spalts konstant und gleich der Höhe H_{centre} ist.

3. Synchrozyklotron nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verhältnis der maximalen Höhe H_{max} zur Höhe H_{centre} zwischen 1,2 und 1,5 inklusive ist.

4. Synchrozyklotron nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verhältnis der maximalen Höhe H_{max} zur Höhe H_{centre} zwischen 1,2 und 1,4 inklusive ist.

EP 2 633 741 B1

5. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Pole (5, 5') eine Abfolge abgeschrägter ringförmiger Flächen umfassen, die auf der zentralen Achse (1) zentriert sind, wobei jede der Flächen mit ihrer benachbarten Fläche einen Winkel α strikt größer als 90° bildet.
- 5 6. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich der zentrale Unterabschnitt (6) über einen Radius R1 erstreckt, der um 20 % kleiner als der Radius R des Hohlraums ist, und sich der ringförmige Unterabschnitt (7) des ersten Abschnitts (6, 7) zwischen dem Radius R1 und einem Radius R2 erstreckt, der um 95 % kleiner als der Radius R des Hohlraums (9) ist.
- 10 7. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich der zentrale Unterabschnitt (6) über einen Radius R1 in der Größenordnung von 10 % des Radius R des Hohlraums (9) erstreckt und sich der ringförmige Unterabschnitt (7) des ersten Abschnitts (7) zwischen dem Radius R1 und einem Radius R2 in der Größenordnung von 70 % des Radius R des Hohlraums (9) erstreckt.
- 15 8. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die Quelle (11) im zentralen Unterabschnitt (6) befindet und von einem Halter gehalten wird, der in den Hohlraum (9) substantiell parallel zur mittleren Ebene (2) eingesetzt ist.
- 20 9. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder der Pole (5) voll ist.
10. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die magnetischen Induktionsspulen (3) aus NbTi hergestellt sind.
- 25 11. Synchrozyklotron nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das im Hohlraum (9) von den Spulen (3) und der ferromagnetischen Struktur (4) produzierte mittlere Magnetfeld zwischen 4 und 7 Tesla inklusive ist.
- 30 12. Herstellungsmethode eines Synchrozyklotrons nach Anspruch 1, wobei die Methode die folgenden Schritte umfasst:
- Fixieren der Höhe des Spalts zwischen den Polen in der Nähe der zentralen Achse H_{centre} derart, dass die Höhe H_{centre} größer als 10 cm ist,
 - Fixieren einer maximalen Höhe des Spalts H_{max} derart, dass diese um das mindestens 1,1-fache größer als die Höhe H_{centre} ist und um das 1,5-fache kleiner als die Höhe H_{centre} ist,
 - 35 - Fixieren eines Magnetfelds in den magnetischen Induktionsspulen (3), die die Pole umschließen, die den Beschleunigungshohlraum für die Partikel bilden,
 - Optimieren des Profils der Pole und der Größen und Position der magnetischen Induktionsspulen (3) unter Berücksichtigung von H_{centre} und H_{max} sowie des Magnetfelds in den Spulen derart, dass ein Partikelbeschleunigungshohlraum zwischen den Polen inbegriffen entsteht, dessen Spalt zwischen den Polen die von dem
 - 40 Feldfokalisierungsindex $n = \frac{r}{B} \frac{dB}{dr}$ verlangten Bedingungen erfüllt mit r als Radius der Orbitalbahn eines Partikels, wobei der Ausgangspunkt des Radius durch einen Punkt der zentralen Achse läuft, und B als Magnetfeld in diesem Radius ist, wobei n strikt zwischen 0 und 0,2 inklusive sein muss.

45

Claims

1. A synchrocyclotron comprising:
- 50 - a ferromagnetic structure (4) comprising:
- two yoke plates (16, 16'), in the form of discs, arranged coaxially relative to a central axis (1) of the synchrocyclotron, parallel to each other and substantially symmetrical relative to a median plane (2);
 - a pair of poles (5, 5') having a generally circular section, with radius R, arranged on either side of said
 - 55 median plane (2), centered on said central axis (1) and separated by an air gap forming a cavity (9); and
 - flux returns (17) surrounding said poles (5, 5') and joining the two plates (16, 16');
- a cold mass structure including at least two magnetic induction coils (3), said cold mass structure being

surrounded by said flux returns (17) and surrounding said poles (5, 5');

- a particle source (11) situated in the cavity (9) in a first zone (6) with a circular section with radius R1 smaller than said radius R of said cavity (9) and the origin of which is a point of said central axis (1);

the air gap forming said cavity (9) having a substantially symmetrical profile relative to said median plane (2), the height of which varies radially, said profile of the air gap successively including, from said central axis (1):

- a first portion (6, 7), with a circular section with radius R2, centered on said central axis (1), whereof the height of the air gap at the center is equal to H_{centre} , and which comprises an annular sub-portion (7) in which the height of the air gap increases gradually to a maximum height H_{max} at the radius R2;

- a second portion, with an annular section (8), surrounding said first portion (6, 7), where the height of the air gap decreases gradually to a height H_{bords} at the edges of said poles (5, 5');

characterized in that said height H_{centre} of the air gap is greater than 10 cm, and the ratio of the maximum height H_{max} to said height H_{centre} is comprised between 1.1 and 1.5.

2. The synchrocyclotron according to claim 1, **characterized in that** said first portion (6, 7) comprises a central sub-portion (6), with a circular section with radius R1 smaller than R2, centered on said central axis (1), where the height of the air gap is constant and equal to the height H_{centre} .

3. The synchrocyclotron according to claim 1 or 2, **characterized in that** the ratio of said maximum height H_{max} to said height H_{centre} is comprised between 1.2 and 1.5.

4. The synchrocyclotron according to claim 1 or 2, **characterized in that** the ratio of said maximum height H_{max} to said height H_{centre} is comprised between 1.2 and 1.4.

5. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** said poles (5, 5') comprise a series of beveled annular surfaces centered on said central axis (1), each of said surfaces forming, with its adjacent surface, an angle α strictly greater than 90° .

6. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** said central sub-portion (6) extends over a radius R1 smaller than 20% of the radius R of said cavity, and said annular sub-portion (7) of said first portion (6, 7) extends between the radius R1 and a radius R2 smaller than 95% of the radius R of said cavity (9).

7. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** said central sub-portion (6) extends over a radius R1 of approximately 10% of the radius R of said cavity (9), and said annular sub-portion (7) of said first portion (7) extends between the radius R1 and a radius R2 of approximately 70% of the radius R of said cavity (9).

8. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** said source (11) is situated in said central sub-portion (6) and maintained by a support inserted into said cavity (9) substantially parallel to said median plane (2).

9. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** each of said poles (5) is solid.

10. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** said magnetic induction coils (3) are made from NbTi.

11. The synchrocyclotron according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the average magnetic field produced in said cavity (9) by said coils (3) and said ferromagnetic structure (4) is comprised between 4 and 7 Tesla.

12. A method for producing a synchrocyclotron according to claim 1, the method comprising the following steps:

- setting the height of the air gap between the poles near the central axis H_{centre} such that said height H_{centre} is greater than 10 cm;

- setting a maximum height of the air gap H_{max} such that it is greater than at least 1.1 times the height H_{centre} and less than 1.5 times the height H_{centre} ;

EP 2 633 741 B1

- setting a magnetic field in induction coils (3) surrounding the poles forming the particle accelerating cavity;
- optimizing the profile of the poles and the dimensions and position of the magnetic induction coils (3) taking H_{centre} and H_{max} into account as well as the magnetic field of the coils, so as to obtain a particle accelerating cavity comprised between said poles whereof the air gap between said poles satisfies the conditions set out by the field focus index $n = \frac{-r}{B} \frac{dB}{dr}$, with r the radius of the orbit of the particle, the origin of said radius passing through a point of the central axis, and B the magnetic field in that radius, n having to be strictly comprised between 0 and 0.2.

5

10

15

20

25

30

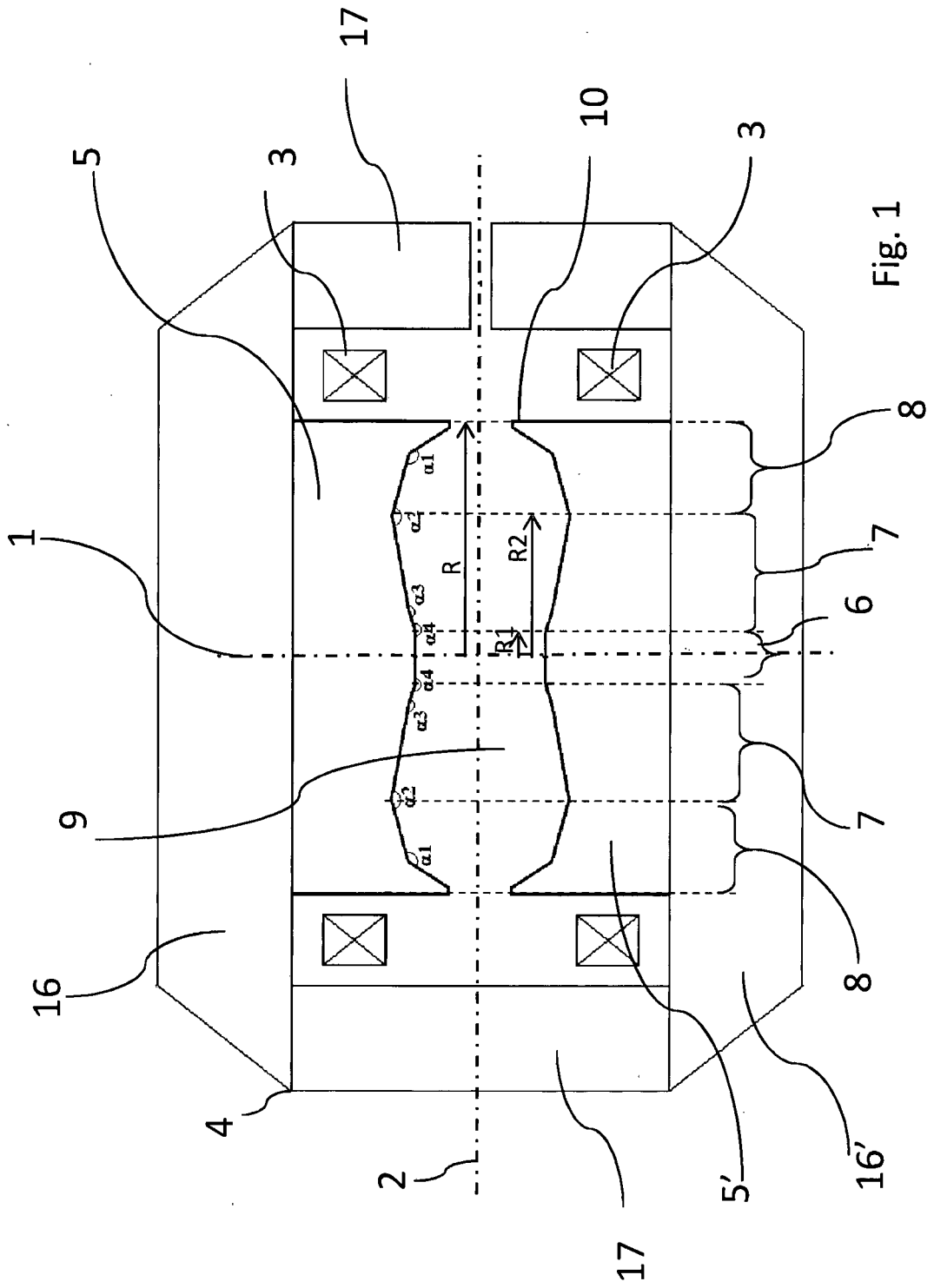
35

40

45

50

55



RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 7541905 B [0005]
- US 7696847 B [0005] [0008]