

BREVET D'INVENTION

ROYAUME DE BELGIQUE

SPF ECONOMIE, P.M.E.,
CLASSES MOYENNES & ENERGIE

Office de la Propriété intellectuelle

NUMERO DE PUBLICATION : 1019557A3

NUMERO DE DEPOT : 2010/0641

Classif. Internat. : H05H

Date de délivrance le : 07 Août 2012

Le Ministre pour l'entreprise,

Vu la loi du 28 Mars 1984 sur les brevets d'invention, notamment l'article 22;

Vu l'arrêté royal du 2 Décembre 1986 relatif à la demande, à la délivrance et au maintien en vigueur des brevets d'invention, notamment l'article 28;

Vu le procès verbal dressé le 27 Octobre 2010 à 24H00 à l'Office de la Propriété Intellectuelle

ARRETE :

Article unique.-Il est délivré à : ION BEAM APPLICATIONS S.A.
Chemin du Cyclotron 3, B-1348 LOUVAIN-LA-NEUVE(BELGIQUE)

représenté(e)(s) par : VAN MALDEREN Joëlle, pronovem Office Van Malderen, Avenue Josse Goffin 158 - B 1082 BRUXELLES.

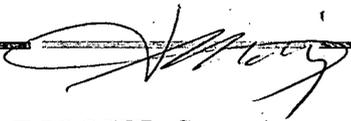
un brevet d'invention d'une durée de 20 ans, sous réserve du paiement des taxes annuelles, pour : SYNCHROCYCLOTRON.

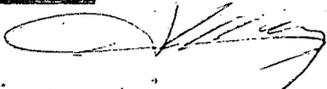
INVENTEUR(S) : Mandrillon Jérôme, Avenue Gravier <<Le Caprera A3>>, F-06100 Nice (FR); Conjat Matthieu, Avenue Joseph Giordan 25, Résidence Ciel de Fabron Bt1, F-06200 Nice. (FR)

ARTICLE 2.- Ce brevet est délivré sans examen préalable de la brevetabilité de l'invention, sans garantie du mérite de l'invention ou de l'exactitude de la description de celle-ci et aux risques et périls du(des) demandeurs(s).

Pour expédition certifiées conforme

Bruxelles, le 07 Août 2012
PAR DELEGATION SPECIALE :


DRISQUE S.
Conseiller


S. DRISQUE
Conseiller

.be

SYNCHROCYCLOTRON

DOMAINE TECHNIQUE

[0001] La présente invention se rapporte à un synchrocyclotron et a une structure d'aimant pour un synchrocyclotron destiné à la hadron-
5 thérapie, la dite structure d'aimant permettant d'obtenir un synchrocyclotron suffisamment compact et de produire le champ magnétique nécessaire pour l'accélération de particules en hadron-
thérapie.

10 DESCRIPTION DE L'ÉTAT DE LA TECHNIQUE

[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
15 pôles, ladite cavité comprenant un axe central et dans laquelle s'étend un plan médian perpendiculairement audit axe central. Des particules sont produites dans une source de particules située dans la cavité au voisinage de l'axe central, et sont extraites de ladite source pour être accélérées, dans le plan médian suivant une trajectoire en forme de spirale, par des
20 électrodes accélératrices alimentées par un générateur de tension alternative haute fréquence.

[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
25 de manière à compenser l'accroissement de masse relativiste lorsque la vitesse des particules augmente.

[0004] Pour réduire la taille d'un cyclotron, il faut augmenter la champ magnétique qui guide les ions durant l'accélération. Pour les cyclotrons isochrones, où la focalisation verticale du faisceau est obtenue
30 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.

5
[0005] Les document 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 capable 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 jusque 2K pour des bobines d'induction réalisées en Nb₃Sn. La culasse réalisée en fer doux fournit un champ additionnel d'environ 2T. Afin de réduire la taille d'un synchrocyclotron, les documents cités précédemment suggèrent de produire un champ magnétique élevé dans l'entrefer des pôles. Néanmoins en augmentant le champ magnétique, au dessus de 6 Teslas, comme dans les brevets précités, des effets indésirables apparaissent : 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 autre inconvénient des champs magnétiques supérieurs à 6 Tesla est que la réalisation du dispositif d'extraction devient très difficile. Un troisième inconvénient des champs magnétiques supérieurs à 6 Tesla au centre du cyclotron est que, pour de tels champs magnétiques, le champ magnétique rencontré dans les bobines excède la champ magnétique auquel on peut utiliser l'alliage de Niobium-Titane pour réaliser les bobines. On doit utiliser alors des bobines supraconductrices utilisant l'alliage Nb₃Sn qui est beaucoup plus coûteux.

20
25
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 telle manière à ce que les particules chargées acquièrent suffisamment d'énergie pour maintenir l'accélération dans l'entrefer desdits 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 (I) :

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

la fréquence d'oscillation axiale ν_z est donnée par (II) :

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

avec n l'indice de focalisation de champ donné par (III)

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

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 le champ magnétique en ce rayon.

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 la 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 cela, 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.

[0007] Dans le cas d'un synchrocyclotron à champ magnétique élevé tel que décrit dans les deux documents 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 figure 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.

[0008] 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 ».

5 **[0009]** 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
10 qui à 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.

[0010] Afin de minimiser les problèmes d'extraction des particules
15 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.

[0011] Il est également souhaitable de réaliser un synchrocyclotron
20 dont les profils de pôles satisfont aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ et sont plus faciles à usiner.

[0012] 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
25 circuit d'oscillation haute fréquence de manière à éviter les problèmes tels que rencontrés dans les synchrocyclotrons de l'art antérieur.

RÉSUMÉ DE L'INVENTION

[0013] Selon un premier aspect, la présente invention concerne un synchrocyclotron comprenant :

- une structure ferromagnétique 4 comprenant :
30 o deux plaques de base appelées culasses 16, 16', en forme de disques situées de manière coaxiale par rapport

à un axe central 1, parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian 2 ;

- 5
 - o 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, suivant ledit axe central 1 et séparés d'un entrefer formant ainsi une cavité 9 ;
 - o des retours de flux 17 entourant lesdits pôles 5,5' et joignant les deux dites culasses 16, 16' ;
- 10
 - une structure à masse froide comportant au moins deux bobines d'induction magnétique 3 entourée par lesdits retours de flux 17 et entourant lesdits pôles 5,5' ;
 - une source de particules 11 située dans ladite cavité 9 dans une première zone 6 circulaire de rayon R1 inférieur au dit rayon R de ladite cavité 9 et dont l'origine est un point dudit axe central
- 15
 - 1 ;

le champ magnétique moyen produit dans ladite cavité 9 par les dites bobines 3 et la dite structure ferromagnétique 4 étant compris entre 4 et 7 Tesla, l'entrefer de ladite cavité 9 présentant un profil symétrique par rapport audit plan médian 2, et dont la hauteur varie radialement, ledit profil de l'entrefer comportant successivement à partir dudit axe central 1 :

- 20
 - une première portion circulaire 7, de rayon R2, centrée sur ledit axe central 1, dont la hauteur de l'entrefer au centre est de hauteur H_{centre} , et croît progressivement jusqu'à une hauteur maximum H_{max} à l'extrémité du rayon R2;
- 25
 - une seconde portion annulaire 8 où la hauteur de l'entrefer décroît progressivement jusqu'à une hauteur H_{bords} aux bords des dits pôles 5,5' ;

le synchrocyclotron étant caractérisé en ce que ladite hauteur H_{centre} de l'entrefer au centre de ladite première portion circulaire (7) est supérieure à 10 cm, et le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur la dite hauteur

H_{centre} est compris entre 1,1 et 1,5.

5 [0014] De préférence, ledit synchrocyclotron est caractérisé en ce que ladite première portion circulaire comprend une sous-portion circulaire 6 de rayon R_1 inférieur à R_2 , centrée sur le dit axe central 1, dont la hauteur de l'entrefer est constante et de hauteur H_{centre} .

[0015] De préférence, ledit synchrocyclotron selon la revendication 1 ou 2 caractérisé en ce que le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur la dite hauteur H_{centre} est compris entre 1,2 et 1,5.

10 [0016] De préférence, ledit synchrocyclotron selon la revendication 1 ou 2 caractérisé en ce que le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur la dite hauteur H_{centre} est compris entre 1,2 et 1,4.

15 [0017] De préférence, ledit synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que les dits pôles 5,5' comprennent une succession de surfaces circulaires biseautées et centrées sur ledit axe central 1, chacune desdites surfaces formant avec sa surface voisine un angle α strictement supérieur à 90° , plus préférentiellement 91° , encore plus préférentiellement 92° .

20 [0018] De préférence, ledit synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite sous-portion circulaire 6 s'étend sur un rayon R_1 égal à 20 % du rayon R de ladite cavité et ladite première portion circulaire 7 s'étend entre le rayon R_1 et un rayon R_2 égal à 95% du rayon R de ladite cavité 9.

25 [0019] De préférence, ledit synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite sous-portion circulaire 6 s'étend sur un rayon R_1 égal à 10 % du rayon R de ladite cavité et ladite première portion circulaire 7 s'étend entre le rayon R_1 et un rayon R_2 égal à 70% du rayon R de ladite cavité 9.

30 [0020] De préférence, ledit synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite source est située dans ladite sous-portion circulaire 6 et maintenue par un support inséré dans ladite cavité 9 de manière substantiellement parallèle audit plan médian 2.

[0021] De préférence, ledit synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que chacun desdits pôles 5 est plein.

5 **[0022]** De préférence, ledit synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que lesdites bobines d'induction magnétique 3 sont réalisées en NbTi.

[0023] Selon un autre aspect, la présente invention concerne une méthode de réalisation d'un synchrocyclotron selon la revendication 1, la méthode comprenant les étapes de :

- 10 - 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
- 15 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
- 20 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
- 25 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.

DESCRIPTION DES FIGURES

30 **[0024]** La figure 1 représente une coupe latérale d'un synchrocyclotron selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0025] La figure 2 représente une coupe latérale plus détaillée du synchrocyclotron selon la figure 1.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'INVENTION

[0026] Les figures 1 et 2 représentent un synchrocyclotron selon la présente invention. Il est à noter que les figures 1 et 2 ne sont pas représentées à l'échelle et que certaines pièces du synchrocyclotron ne sont pas représentées pour des raisons de clarté de la figure. Le synchrocyclotron selon la présente invention comprend :

- une structure ferromagnétique 4 comprenant :
 - o deux plaques de base appelées culasses 16, 16', en forme de disques situées de manière coaxiale par rapport à un axe central 1, parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian 2 ;
 - o 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, suivant ledit axe central 1 et séparés d'un entrefer formant ainsi une cavité 9 ;
 - o des retours de flux 17 entourant lesdits pôles 5,5' et joignant les deux dites culasses 16, 16' ;
- une structure à masse froide comportant au moins deux bobines d'induction magnétique 3 entourée par lesdits retours de flux 17 et entourant lesdits pôles 5,5' ;
- une source de particules 11 située dans ladite cavité 9 dans une première zone 6 circulaire de rayon R1 inférieur au dit rayon R de ladite cavité 9 et dont l'origine est un point dudit axe central 1 ;
- un générateur 14 de tension haute fréquence situé en dehors des retours de flux 17 ;
- une électrode accélératrice couplée au générateur 14 de tension haute fréquence, l'électrode 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 ladite cavité 9,

s'étendant parallèlement et symétriquement de part et d'autre du plan médian 2 et faisant face à ladite source ;

- une ligne de transmission 13 entourant l'électrode accélératrice 12 et située à une certaine distance de ladite électrode 12.

5 **[0027]** Selon un aspect préféré de l'invention, le champ magnétique généré dans l'entrefer entre les pôles 5, 5' du synchrocyclotron est choisi de manière à :

- ce que le champ magnétique soit suffisamment élevé pour accélérer des particules à une énergie comprise entre 200 et 250 MeV ;
- 10 - éviter que les particules sortant de la source ne retombent sur celle-ci sous l'action d'un champ magnétique trop élevé ;
- minimiser la taille du synchrocyclotron.

Préférentiellement, le champ magnétique généré dans l'entrefer entre lesdits pôles est compris entre 4 et 7 Teslas, préférentiellement entre 4 et 6 Teslas.

15 La production d'un tel champ magnétique ne requiert pas l'utilisation de bobines supraconductrices en Nb₃Sn. 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

20 bobines supraconductrices en NbTi sont moins coûteuses et plus faciles à mettre en œuvre que les bobines en Nb₃Sn.

[0028] Selon un aspect préféré de l'invention, la cavité 9 formée par les pôles 5 est caractérisée par un rayon R dont l'origine passe par un point de l'axe central 1 et dont l'extrémité coïncide avec les bords 10 des

25 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. Préférentiellement, l'entrefer comprend trois zones 6, 7 et 8, en partant de l'axe central vers le bord des pôles :

- une première zone 6, préférentiellement plane (bien que cela ne soit pas une limitation de la présente invention) et circulaire de rayon R1 inférieur au rayon R de la cavité et dont l'origine coïncide avec un
- 30 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} ;

- une seconde zone 7, comprise entre un cercle dudit rayon $R1$ et un second cercle de rayon $R2$, inférieur également au rayon R de la cavité et dont l'origine coïncide avec celle du rayon $R1$, 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 ;
- une troisième zone 8 comprise entre le cercle de rayon $R2$ 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 réaugmenter 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.

[0029] Selon un aspect préféré de l'invention, 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 préférablement, le rapport $H_{\text{max}}/H_{\text{centre}}$ est compris entre 1,2 et 1,5.

[0030] Selon un autre aspect préféré de l'invention, toujours dans le but de faciliter l'usinage des pôles 5, l'ensemble desdites seconde 7 et troisième 8 zones comprend une succession de surfaces circulaires biseautées et dont le rayon a pour origine un point dudit axe central, chacune desdites surfaces formant avec sa surface voisine un angle α strictement supérieur à 90° , plus préférablement 91° , encore plus préférablement 92° .

[0031] Selon un autre aspect préféré de l'invention, la hauteur H_{centre} de l'entrefer au voisinage de l'axe central 1 est supérieure à 10 cm, plus

préférentiellement supérieure à 15cm, plus préférentiellement supérieure à 18,4 cm. 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.

5

[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 dites 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.

10

[0033] Selon un autre aspect préféré de l'invention, la hauteur H_{centre} élevée dans la région de l'entrefer avoisinant l'axe central permet l'insertion d'une source de manière latérale plutôt que de manière axiale. L'insertion de la source peut se faire, par exemple, au moyen d'un support 15 provenant de l'extérieur de la cavité 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 dispense le 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 l'utilisation d'une source de diamètre moins réduit 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 les anneaux de compensation de champ tels qu'utilisés dans les synchrocyclotrons de l'art antérieur deviennent facultatifs, ce qui simplifie cette région.

15

20

25

30

[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 $H_{\text{max}}/H_{\text{centre}}$ égal à 1.375. La distance $z(\text{cm})$ séparant les pôles du plan médian en fonction du rayon des pôles $r(\text{cm})$ est donnée dans le tableau 1. Le rayon externe et la hauteur du synchrocyclotron sont respectivement de 125 cm et de 156cm. Pour un champ magnétique comparable, les dimensions de cet exemple de 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 ce même exemple de la présente invention, le gap entre les plaques de l'électrode accélératrice 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 forme de cette bobine, tout en se plaçant dans des conditions où la hauteur de l'entrefer entre les deux pôles dans ladite 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 première zone (6) est compris entre 1,1 et 1,5, plus préférentiellement 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 28,1cm, et sont distantes l'une de l'autre de 20cm.

10 **[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 de :

- 15 - fixation de la hauteur de l'entrefer au voisinage de l'axe central H_{centre} telle que ladite hauteur H_{centre} soit supérieure à 10 cm, préférentiellement supérieure à 15 cm, préférentiellement 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} ;
- 20 - 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 lesdits pôles dont l'entrefer entre lesdits pôles satisfait aux conditions posées par l'indice de focalisation de champ n.
- 25

REVENDICATIONS

1. Synchrocyclotron comprenant :

- une structure ferromagnétique (4) comprenant :
 - o deux plaques de base appelées culasses (16, 16'), en forme de disques situées de manière coaxiale par rapport à un axe central (1), parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian (2) ;
 - o 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), suivant ledit axe central (1) et séparés d'un entrefer formant ainsi une cavité (9) ;
 - o des retours de flux (17) entourant lesdits pôles (5,5') et joignant les deux dites culasses (16, 16') ;
- une structure à masse froide comportant au moins deux bobines d'induction magnétique (3) entourée par lesdits retours de flux (17) et entourant lesdits pôles (5,5') ;
- une source de particules (11) située dans ladite cavité (9) dans une première zone (6) circulaire de rayon R1 inférieur au dit rayon R de ladite cavité (9) et dont l'origine est un point dudit axe central (1)

le champ magnétique moyen produit dans ladite cavité (9) par les dites bobines (3) et la dite structure ferromagnétique (4) étant compris entre 4 et 7 Tesla, l'entrefer de ladite cavité (9) présentant un profil substantiellement symétrique par rapport audit plan médian (2), et dont la hauteur varie radialement, ledit profil de l'entrefer comportant successivement à partir dudit axe central (1) :

- une première portion circulaire (7), de rayon R2, centrée sur ledit axe central (1), dont la hauteur de l'entrefer au centre est de hauteur H_{centre} , et croît progressivement jusqu'à une hauteur maximum H_{max} à l'extrémité du rayon R2;
- une seconde portion annulaire (8) où la hauteur de l'entrefer décroît progressivement jusqu'à une hauteur H_{bords} aux bords des dits pôles (5,5') ;

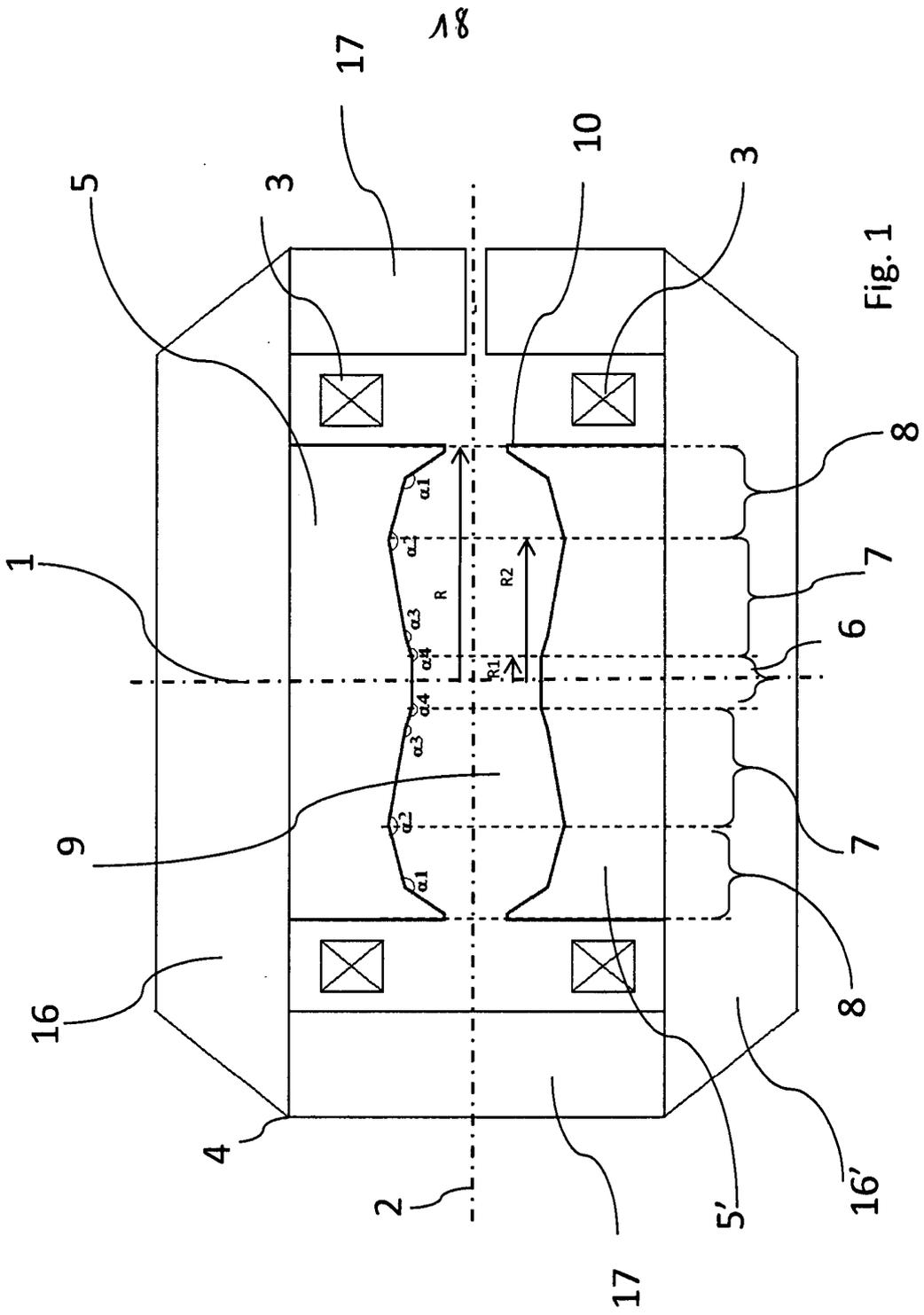
caractérisé en ce que ladite hauteur H_{centre} de l'entrefer au centre de ladite première portion circulaire (7) est supérieure à 10 cm, et le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur la dite hauteur H_{centre} est compris entre 1,1 et 1,5.

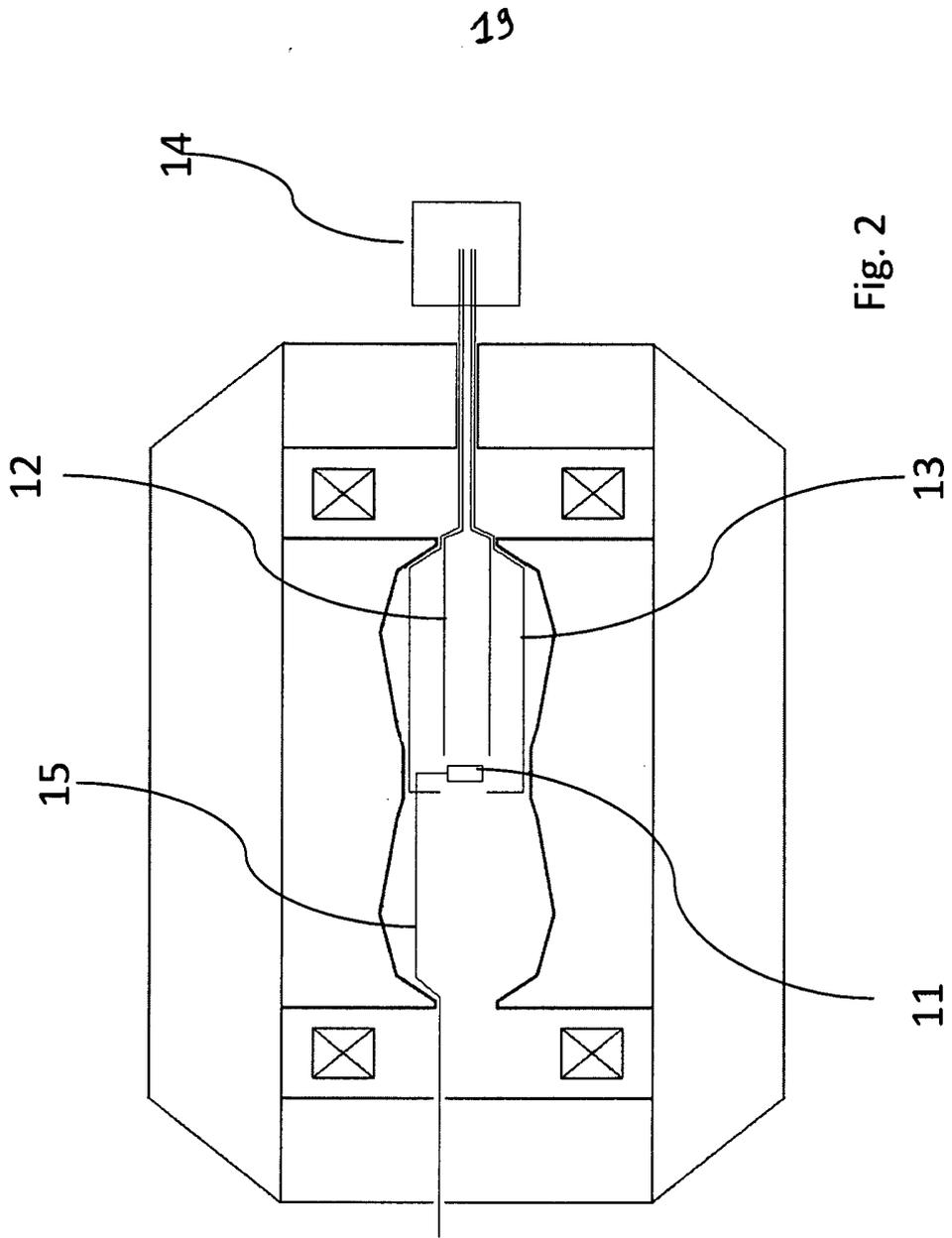
- ### 2. Synchrocyclotron selon la revendication 1 caractérisé en ce que ladite première portion circulaire comprend une sous-portion circulaire (6) de rayon R1 inférieur à R2, centrée sur le dit axe central (1), dont la hauteur de l'entrefer est constante et de hauteur H_{centre} .

3. Synchrocyclotron selon la revendication 1 ou 2 caractérisé en ce que le rapport de ladite hauteur maximale H_{\max} sur la dite hauteur H_{centre} est compris entre 1,2 et 1,5.
4. Synchrocyclotron selon la revendication 1 ou 2 caractérisé en ce que le rapport de ladite hauteur maximale H_{\max} sur la dite hauteur H_{centre} est compris entre 1,2 et 1,4.
5. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que les dits pôles (5,5') comprennent une succession de surfaces circulaires biseautées et centrées sur ledit axe central (1), chacune desdites surfaces formant avec sa surface voisine un angle α strictement supérieur à 90° , plus préférablement 91° , encore plus préférablement 92° .
6. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite sous-portion circulaire (6) s'étend sur un rayon R1 égal à 20 % du rayon R de ladite cavité et ladite première portion circulaire (7) s'étend entre le rayon R1 et un rayon R2 égal à 95% du rayon R de ladite cavité (9).
7. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite sous-portion circulaire (6) s'étend sur un rayon R1 égal à 10 % du rayon R de ladite cavité et ladite première portion circulaire (7) s'étend entre le rayon R1 et un rayon R2 égal à 70% du rayon R de ladite cavité (9).
8. Synchrocyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite source est située dans ladite sous-portion circulaire (6) et maintenue par un support inséré dans ladite cavité (9) de manière substantiellement parallèle audit plan médian (2).
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.

11. 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.





ABREGE**SYNCHROCYCLOTRON**

La présente invention se rapporte à un synchrocyclotron comprenant :

- une structure ferromagnétique comprenant :
 - o deux plaques de base appelées culasses, en forme de disques situées de manière coaxiale par rapport à un axe central (1), parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian ;
 - o une paire de pôles présentant une section de forme généralement circulaire, de rayon R, agencés de part et d'autre dudit plan médian, suivant ledit axe central et séparés d'un entrefer formant ainsi une cavité ;
 - o des retours de flux entourant lesdits pôles et joignant les deux dites culasses ;
- une structure à masse froide comportant au moins deux bobines d'induction magnétique entourée par lesdits retours de flux et entourant lesdits pôles ;
- une source de particules située dans ladite cavité dans une première zone circulaire de rayon R1 inférieur au dit rayon R de ladite cavité et dont l'origine est un point dudit axe central

le champ magnétique moyen produit dans ladite cavité par les dites bobines et la dite structure ferromagnétique étant compris entre 4 et 7 Tesla, l'entrefer de ladite cavité présentant un profil substantiellement symétrique par rapport audit plan médian, et dont la hauteur varie radialement, ledit profil de l'entrefer comportant successivement à partir dudit axe central :

- une première portion circulaire, de rayon R2, centrée sur ledit axe central, dont la hauteur de l'entrefer au centre est de hauteur H_{centre} , et croît progressivement jusqu'à une hauteur maximum H_{max} à l'extrémité du rayon R2;
- une seconde portion annulaire où la hauteur de l'entrefer décroît progressivement jusqu'à une hauteur H_{bords} aux bords des dits pôles ;

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

Fig.1



Numero de la demande nationale

RAPPORT DE RECHERCHE
 établi en vertu de l'article 21 § 1 et 2
 de la loi belge sur les brevets d'invention
 du 28 mars 1984

BO 10071
 BE 201000641

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A,D	US 2007/171015 A1 (ANTAYA TIMOTHY A [US]) 26 juillet 2007 (2007-07-26) * abrégé; figure 2 * * alinéas [0042] - [0045] *	1-11	INV. H05H7/04 H05H13/02
A	HOLM S: "Factors affecting beam intensity and quality in synchrocyclotrons", FIFTH INTERNATIONAL CYCLOTRON CONFERENCE BUTTERWORTHS LONDON, UK, 1971, pages 736-748, XP002638376, * le document en entier * * figure 1; tableau 1 *	1-11	
A	A.GARONNA: "Synchrocyclotron Preliminary Design for a Dual Hadrontherapy Center", PROCEEDINGS OF IPAC '10, juin 2010 (2010-06), pages 552-554, XP002638377, Kyoto, Japan * abrégé; figure 2 * * page 553, colonne 1, ligne 18-20 *	1-11	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
A	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 * abrégé; figure 1 *	1-11	H05H
A	US 4 641 057 A (BLOSSER HENRY G [US] ET AL) 3 février 1987 (1987-02-03) * abrégé; figure 1 *	1-11	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
23 mai 2011		Crescenti, Massimo	
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

3
 EPO FORM 1503 03.02 (P04C48)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET BELGE NO.**

BO 10071
BE 201000641

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche visé ci-dessus.

Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

23-05-2011

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2007171015 A1	26-07-2007	AT 460071 T	15-03-2010
		EP 1977631 A1	08-10-2008
		EP 1977632 A2	08-10-2008
		EP 2190269 A2	26-05-2010
		JP 2009524200 T	25-06-2009
		JP 2009524201 T	25-06-2009
		US 2009206967 A1	20-08-2009
		US 2010148895 A1	17-06-2010
		WO 2007084701 A1	26-07-2007
		WO 2007130164 A2	15-11-2007
-----	-----	-----	-----
US 4641057 A	03-02-1987	AUCUN	
-----	-----	-----	-----



OPINION ÉCRITE

Dossier N° BO10071	Date du dépôt (jour/mois/année) 27.10.2010	Date de priorité (jour/mois/année)	Demande n° BE201000641
Classification internationale des brevets (CIB) INV. H05H7/04 H05H13/02			
Déposant Ion Beam Applications S.A.			

La présente opinion contient des indications et les pages correspondantes relatives aux points suivants :

- Cadre n° I Base de l'opinion
- Cadre n° II Priorité
- Cadre n° III Absence de formulation d'opinion quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle
- Cadre n° IV Absence d'unité de l'invention
- Cadre n° V Déclaration motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle; citations et explications à l'appui de cette déclaration
- Cadre n° VI Certains documents cités
- Cadre n° VII Irrégularités dans la demande
- Cadre n° VIII Observations relatives à la demande

	Examineur Crescenti, Massimo
--	---------------------------------

OPINION ÉCRITE

Demande n°

BE201000641

Cadre n°1 Base de l'opinion

1. Cette opinion a été établie sur la base des revendications déposées avant le commencement de la recherche.
2. En ce qui concerne **la ou les séquences de nucléotides ou d'acides aminés** divulguées dans la demande, le cas échéant, cette opinion a été effectuée sur la base des éléments suivants :
 - a. Nature de l'élément:
 - un listage de la ou des séquences
 - un ou des tableaux relatifs au listage de la ou des séquences
 - b. Type de support:
 - sur papier
 - sous forme électronique
 - c. Moment du dépôt ou de la remise:
 - contenu(s) dans la demande telle que déposée
 - déposé(s) avec la demande, sous forme électronique
 - remis ultérieurement
3. De plus, lorsque plus d'une version ou d'une copie d'un listage des séquences ou d'un ou plusieurs tableaux y relatifs a été déposée, les déclarations requises selon lesquelles les informations fournies ultérieurement ou au titre de copies supplémentaires sont identiques à celles initialement fournies et ne vont pas au-delà de la divulgation faite dans la demande telle que déposée initialement, selon le cas, ont été remises.
4. Commentaires complémentaires :

Cadre n° V Opinion motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle; citations et explications à l'appui de cette déclaration

1. Déclaration

Nouveauté	Oui : Revendications	1-11
	Non : Revendications	
Activité inventive	Oui : Revendications	1-11
	Non : Revendications	
Possibilité d'application industrielle	Oui : Revendications	1-11
	Non : Revendications	

2. Citations et explications

voir feuille séparée

Cadre n° VIII Observations relatives à la demande

voir feuille séparée

Ad point V

Déclaration motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle ; citations et explications à l'appui de cette déclaration

Il est fait référence aux documents suivants :

- D1 US 2007/171015 A1 (ANTAYA TIMOTHY A [US]) 26 juillet 2007 (2007-07-26)
- D2 DATABASE INSPEC [Online]
THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, STEVENAGE, GB; 1971,
HOLM S: "Factors affecting beam intensity and quality in synchrocyclotrons",
Database accession no. 307083 ; & FIFTH INTERNATIONAL CYCLOTRON CONFERENCE 17-20 SEPT. 1969 OXFORD, UK, pages 736-748,
Fifth international cyclotron conference Butterworths London, UK
- D3 A.GARONNA: "Synchrocyclotron Preliminary Design for a Dual Hadrontherapy Center",
PROCEEDINGS OF IPAC '10, juin 2010 (2010-06), pages 552-554, Kyoto, Japan

1 CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES

1.1 Pour les considérations de clarté, voir point VIII.

2 REVENDICATIONS INDÉPENDENTES

2.1 Le document D1, qui est considéré comme l'état de la technique le plus proche de l'objet de la revendication 1, divulgue (les passages entre parenthèses se réfèrent à ce document):

- 3
- un synchrocyclotron (abrégé, Fig.1,2,11) comprenant:
 - une structure ferromagnétique (Fig.2) comprenant:
 - deux plaques de base appelées culasses (38,40), en forme de disques situées de manière coaxiale par rapport à un axe central (z), parallèles et substantiellement symétriques par rapport à un plan médian (r);

- une paire de pôles (142,144) présentant une section de forme généralement circulaire, de rayon R, agencés de part et d'autre dudit plan médian (r), suivant ledit axe central (z) et séparées d'un entrefer formant ainsi une cavité (46);
- des retours de flux (110,112) entourant lesdits pôles (142,144) et joignant les deux dites culasses (38,40);
- une structure à masse froide (Fig.2) comportant au moins deux bobines d'induction magnétique (12,14) entourée par lesdits retours de flux (110,112) et entourant lesdits pôles (142,144);
- une source de particules (50, Fig.11, [0041]) située dans ladite cavité (46) dans une première zone circulaire de rayon R1 inférieur au dit rayon R de la dite cavité (46) et dont l'origine est un point dudit axe central (z), (voir Fig.11).
- le champ magnétique moyen produit dans ladite cavité (46) par lesdites bobines (12,14) et ladite structure ferromagnétique (Fig.2) étant compris entre 4 et 7 Tesla ([0006]), l'entrefer de ladite cavité (46) présentant un profil substantiellement symétrique (Fig.2) par rapport audit plan médian (r), et dont la hauteur varie radialement, ledit profil de l'entrefer comportant successivement à partir dudit axe central (z):
 - une première portion circulaire, de rayon R2, centrée sur ledit axe central (z), dont la hauteur de l'entrefer au centre est de hauteur H_{centre} , et croît progressivement jusqu'à une hauteur maximum H_{max} à l'extrémité du rayon R2;
 - une seconde portion annulaire où la hauteur de l'entrefer décroît progressivement jusqu'à une hauteur H_{bords} aux bords desdites pôles (142,144).

3.1 Par conséquent, l'objet de la revendication 1 diffère de ce D1 connu en ce que:

- ladite hauteur H_{centre} de l'entrefer au centre de ladite première portion circulaire est supérieure à 10 cm;
- le rapport de ladite hauteur maximale H_{max} sur ladite hauteur H_{centre} est compris entre 1,1 et 1,5.

il est donc nouveau.

- 3.2 Le problème que la présente invention se propose de résoudre peut être considéré comme réaliser un profile de pôles d'un synchrocyclotron satisfaisant aux conditions imposées par l'indice de focalisation et sont plus faciles à usiner, et permettant l'introduction aisée d'une source de particules.
- 3.3 La solution à ce problème, proposée dans la revendication 1 de la présente demande, est considérée comme impliquant une activité inventive pour les motifs suivants:
- Les synchrocyclotrons de grande taille généralement nécessitent un entrefer qui s'élargit radialement, pour compenser l'augmentation de vitesse des particules avec une diminution du champ, et une zone de sortie avec des ailes pour augmenter la focalisation en diminuant les dimensions de l'entrefer en zone d'extraction.
 - Les deux zones sont toutefois séparées et créent dans l'art antérieure des excursions très fortes, qui vont réduire la stabilité du faisceau.
 - La solution de la revendication 1 réduit les excursions en proposant un entrefer qui est aussi plus aisément réalisable.
 - L'art antérieure à disposition montre seulement une partie de la sus-mentionnée différence, c.à.d. une hauteur de l'entrefer au centre supérieure à 10 cm (v. D2, Table 1 et Fig. 1), mais la configuration des pôles est plate, contrairement à la revendication 1.
 - Un synchrotron de ce genre n'est donc pas comparable avec celui proposé dans la revendication 1.
- 3.4 Par conséquent, **nonobstant le manque de clarté mentionné au point VIII, et qui doit être résolu**, l'objet de la revendication est considéré comme impliquant une activité inventive.
- 3.5 Le même raisonnement s'applique mutatis mutandis à l'objet de la revendication indépendante de méthode correspondante 11 qui est donc aussi considéré comme nouvelle et inventive.
- 4 REVENDEICATIONS DÉPENDANTES
- 4.1 Les revendications 2-10 dépendent de la revendication 1 et, nonobstant le manque de clarté mentionné au point VIII, et qui doit être résolu, satisfont donc également, en tant que telles, aux exigences de nouveauté et d'activité inventive.

Ad point VIII

Certaines observations relatives à la demande

- 5 La revendication 1 n'est pas claire car il y a contradiction entre revendication, description et dessins:
- la portion (7) est circulaire dans les revendications mais annulaire dans les dessins (Fig.1)
 - la hauteur de l'entrefer croît progressivement (c.à.d.) de façon continue du centre de la portion circulaire (7) jusqu'à R2, tandis que dans Fig.1 du centre jusqu'à $R1 < R2$ la hauteur de l'entrefer est constante .
- 5.1 La revendication 2 dépendante de la revendication 1 n'est pas claire, car il y a contradiction entre le fait que la hauteur de l'entrefer doit croître *progressivement* sur un rayon R2 (selon revendication 1) et le fait que sur un rayon R1 inférieur à R2 la hauteur de l'entrefer doit rester constante (selon la caractéristique additionnelle de la revendication 2).