



MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES

NUMERO DE PUBLICATION : 1009669A3

NUMERO DE DEPOT : 09500832

Classif. Internat. : H05H

Date de délivrance le : 03 Juin 1997

---

Le Ministre des Affaires Economiques,

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 06 Octobre 1995 à 24H00 à l'Office de la Propriété Industrielle

## ARRETE:

ARTICLE 1.- Il est délivré à : ION BEAM APPLICATIONS S.A.  
rue J.E.Lenoir 6, B-1348 LOUVAIN-LA-NEUVE(BELGIQUE)


représenté(e)(s) par : VAN MALDEREN Joëlle, OFFICE VAN MALDEREN, Place Reine  
Fabiola 6/1 - B 1083 BRUXELLES.

un brevet d'invention d'une durée de 20 ans, sous réserve du paiement des taxes annuelles, pour : METHODE D'EXTRACTION DE PARTICULES CHARGEES HORS D'UN CYCLOTRON ISOCHRONE ET DISPOSITIF APPLIQUANT CETTE METHODE.

INVENTEUR(S) : Jongen Yves, avenue des Citeaux 16, B-1348 Louvain-La-Neuve (BE)

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).

Bruxelles, le 03 Juin 1997  
PAR DELEGATION SPECIALE :



L. WUYTS  
CONSEILLER

5

10 METHODE D'EXTRACTION DE PARTICULES CHARGEES HORS D'UN  
CYCLOTRON ISOCHRONE ET DISPOSITIF APPLIQUANT CETTE  
METHODE.

Objet de l'invention.

15 La présente invention se rapporte à une méthode d'extraction de particules chargées hors d'un cyclotron isochrone dans lequel le faisceau de particules est focalisé par secteurs.

20 La présente invention se rapporte également audit cyclotron isochrone appliquant cette méthode d'extraction de particules chargées.

25 La présente invention se rapporte aussi bien aux cyclotrons isochrones compacts qu'aux cyclotrons focalisés par secteurs. De même, la présente invention se rapporte aux cyclotrons isochrones dits supraconducteurs ou non supraconducteurs.

Etat de la technique.

30 Les cyclotrons sont des accélérateurs de particules utilisés en particulier pour la production d'isotopes radioactifs. Ces cyclotrons se composent habituellement de deux ensembles principaux distincts, constitués d'une part par l'électro-aimant et d'autre part par le résonateur haute fréquence.

35 L'électro-aimant assure le guidage des particules chargées sur une trajectoire présentant approximativement une spirale de rayon croissant autour de l'accélération. Dans les

cyclotrons modernes de type isochrone, les pôles d'électro-aimants sont divisés en secteurs présentant alternativement un entrefer réduit et un entrefer plus grand. La variation azimutale du champ magnétique qui en résulte a pour effet  
5 d'assurer la focalisation verticale et horizontale du faisceau au cours de l'accélération.

Parmi les cyclotrons isochrones, il convient de distinguer les cyclotrons de type compact, qui sont énergétisés par au moins une bobine circulaire principale,  
10 et les cyclotrons dits à secteurs séparés, où la structure magnétique est divisée en unités séparées entièrement autonomes.

Le second ensemble est constitué par les électrodes accélératrices, appelées fréquemment "dées" pour des raisons  
15 historiques. Ces électrodes sont destinées à accélérer les particules en rotation dans le cyclotron. On applique ainsi aux électrodes une tension alternative de plusieurs dizaines de kilovolts à la fréquence de rotation des particules dans l'aimant, ou alternativement à une fréquence qui est un  
20 multiple exacte de la fréquence de rotation des particules dans l'aimant. Ceci a pour effet d'accélérer les particules du faisceau tournant dans le cyclotron.

Pour de nombreuses applications utilisant un cyclotron, il est nécessaire d'extraire le faisceau de  
25 particules accélérées hors du cyclotron, et de le guider jusqu'à une cible où on souhaite l'utiliser. Cette opération d'extraction du faisceau est considérée par l'homme de l'art comme l'étape la plus difficile dans la production d'un faisceau de particules accélérées au moyen d'un cyclotron.  
30 Cette opération consiste à amener le faisceau de la partie du champ magnétique où il est accéléré jusqu'à l'endroit où le champ magnétique ne parvient plus à retenir le faisceau. Dans ce cas, le faisceau est libre d'échapper à l'action du champ et est extrait hors du cyclotron.

35 Dans le cas de cyclotrons accélérant des particules

chargées positivement, on connaît l'utilisation d'un défecteur électrostatique dont le rôle est de tirer les particules hors du champ magnétique comme dispositif d'extraction. Pour obtenir un tel effet, il est nécessaire  
5 d'interposer sur le chemin des particules une électrode appelée le septum, qui interceptera une partie de ces particules. De ce fait, le rendement d'extraction est relativement limité, et la perte en particules dans le septum contribuera notamment à rendre le cyclotron fortement  
10 radioactif.

Il est également connu d'extraire des particules chargées négativement en effectuant une conversion des ions négatifs en ions positifs en faisant passer ceux-ci à travers une feuille qui a pour fonction de dépouiller les ions  
15 négatifs de leurs électrons. Cette technique permet des rendements d'extraction proches de 100% et permet également l'utilisation d'un dispositif nettement moins complexe que celui décrit précédemment. Néanmoins, l'accélération des particules négatives présente quant à elle des difficultés  
20 importantes. Le principal inconvénient réside dans le fait que les ions négatifs sont fragiles, et sont de ce fait facilement dissociés par des molécules de gaz résiduelles ou par des champs magnétiques excessifs traversés à haute énergie et présents dans le cyclotron. La transmission du  
25 faisceau dans l'accélérateur est donc limitée, ce qui contribue aussi à l'activation de ce dernier.

A l'opposé, les cyclotrons accélérant des particules positives permettent de produire de plus hautes intensités de courant de faisceaux, et augmentent la  
30 fiabilité du système, et tout en permettant une forte réduction de la taille et du poids de la machine.

Il est également connu par le document "The review of Scientist Instruments, 27 (1956), n° 7" et par le document "Nuclear Instruments and Methods 18, 19 (1962), pp. 41-45"  
35 de J. Reginald Richardson, une technique selon laquelle le faisceau de particules aurait pu être extrait du cyclotron

sans l'utilisation d'un dispositif d'extraction. Les conditions requises pour obtenir cette auto-extraction sont des conditions particulières de résonance du mouvement des particules dans le champ magnétique.

5 Néanmoins, cette méthode décrite est particulièrement difficile à réaliser, et aurait donné un faisceau dont les qualités optiques étaient tellement mauvaises qu'en pratique, elle n'a jamais été appliquée.

**Buts de la présente invention.**

10 La présente invention vise à proposer une méthode d'extraction de particules chargées hors d'un cyclotron isochrone en évitant l'utilisation de dispositifs d'extraction tels que décrits précédemment.

15 Un but complémentaire de la présente invention vise de ce fait à proposer un cyclotron isochrone qui soit de conception plus simple et plus économique que ceux habituellement utilisés.

20 La présente invention vise également à augmenter le rendement d'extraction du faisceau de particules, et en particulier dans le cas d'extraction de particules positives.

**Principaux éléments caractéristiques de la présente invention.**

25 La présente invention se rapporte à une méthode d'extraction de particules chargées hors d'un cyclotron isochrone comportant un électro-aimant constituant le circuit magnétique qui inclut un certain nombre de paires de secteurs appelées "collines" où l'entrefer est réduit, séparées par des espaces en forme de secteurs appelés "vallées" où  
30 l'entrefer est de dimension plus grande; cette méthode étant caractérisée par le fait que l'on réalise un cyclotron isochrone avec un entrefer d'aimant entre les collines dont les dimensions sont choisies de sorte que la valeur minimale de cet entrefer au voisinage du rayon maximal entre les  
35 collines soit inférieure à vingt fois le gain en rayon par tour des particules accélérées par le cyclotron à ce rayon.

Selon cette configuration particulière, on observera que les ions peuvent être extraits de l'influence du champ magnétique sans l'aide d'aucun dispositif d'extraction.

5 Il convient de noter que pour des cyclotrons isochrones de l'état de l'art, l'entrefer de l'aimant est en général compris entre 5 et 20 cm, alors que le gain en rayon par tour est d'environ 1 mm. Dans ce cas, le rapport de l'entrefer au gain en rayon par tour est supérieur à 50.

10 On observe qu'en appliquant la caractéristique principale de la présente invention, le champ magnétique diminue de façon très brutale au voisinage de la limite du pôle de l'aimant, de telle sorte que le point d'auto-extraction est atteint avant que le déphasage des particules  
15 par rapport à la tension accélératrice n'atteigne 90 degrés. De cette manière, les particules sortent automatiquement du champ magnétique sans intervention d'aucun dispositif d'extraction.

20 Selon une forme d'exécution particulièrement préférée de la présente invention, on peut envisager de dessiner un entrefer présentant un profil elliptique qui a tendance à se refermer à l'extrémité radiale des collines, tel que décrit dans le brevet WO93/10651.

25 Selon une forme d'exécution préférée de la présente invention, l'extraction des particules est concentrée sur un secteur grâce à une dissymétrie apportée délibérément à la forme ou au champ magnétique dudit secteur.

30 Selon une autre forme d'exécution préférée de la présente invention, on réduit l'angle de l'un des secteurs au niveau du rayon polaire pour permettre de déplacer les orbites et d'obtenir ainsi l'extraction de tout le faisceau de ce côté, de manière, par exemple, à pouvoir irradier une cible de large volume.

35 Selon une autre forme d'exécution préférée de la présente invention, on réalise une distribution particulière du faisceau de particules de manière à irradier simultanément

plusieurs cibles montées côte à côte sur la trajectoire du faisceau.

La présente invention permet avantageusement d'être utilisée pour la protonthérapie ou la production de radio-isotopes, et plus particulièrement de radio-isotopes destinés à la tomographie par émission de positrons (TEP).

**Brève description des figures.**

Les figures 1 et 2 représentent les profils magnétiques d'un cyclotron isochrone selon l'état de la technique et d'un cyclotron isochrone utilisant la méthode d'extraction selon la présente invention.

La figure 3 représente de manière schématique une vue éclatée des principaux éléments constituant un cyclotron isochrone.

La figure 4 représente une vue en coupe d'un cyclotron isochrone.

**Description d'une forme d'exécution préférée de l'invention.**

Le profil du champ magnétique dans un cyclotron isochrone est tel que la fréquence de rotation des particules doit être constante et indépendante de leur énergie. Pour compenser l'augmentation de masse relativiste des particules, le champ magnétique doit donc augmenter avec le rayon pour assurer cette condition d'isochronisme. Pour décrire cette relation, on définit l'indice de champ par la relation suivante :

$$n = \frac{dB}{B} \cdot \frac{R}{dR}$$

dans laquelle  $dB/B$  et  $dR/R$  sont respectivement les variations relatives du champ magnétique et du rayon au rayon  $R$ .

Il convient de noter qu'il est impossible de maintenir la condition d'isochronisme au voisinage du rayon maximal du pôle. En effet, à ce moment, le champ cesse d'augmenter avec le rayon. Il a atteint un maximum et

commence ensuite à décroître de plus en plus rapidement.

La figure 1 illustre la variation du champ en fonction du rayon dans un cyclotron isochrone classique. Un déphasage croissant s'installe entre la fréquence de rotation des particules et la fréquence de résonance des électrodes accélératrices. Lorsque ce déphasage atteint 90 degrés, les particules cessent d'être accélérées et elles ne peuvent dépasser ce rayon.

La figure 2 illustre la variation du champ en fonction du rayon dans un cyclotron isochrone utilisant la méthode d'extraction selon la présente invention. En choisissant de manière précise les dimensions de l'entrefer de l'aimant entre les collines, de telle sorte qu'il soit réduit à une valeur de moins de vingt fois le gain en rayon par tour, on observe un profil du champ magnétique tel que représenté à la figure 2.

Dans ce cas, le champ magnétique diminue de façon très brutale au voisinage de la limite du pôle de l'aimant, de telle manière que le point d'auto-extraction défini par l'indice de champ  $n = -1$  est atteint avant que le déphasage des particules par rapport à la tension accélératrice n'atteigne 90 degrés.

A partir de ce moment, les particules sortent automatiquement du champ magnétique sans intervention d'aucun dispositif extracteur.

Un cyclotron isochrone tel qu'il est utilisé dans la méthode d'extraction de particules chargées selon la présente invention est représenté schématiquement aux figures 3 et 4. Ce cyclotron est un cyclotron isochrone compact destiné à l'accélération de particules positives, et plus particulièrement des protons.

La structure magnétique 1 du cyclotron se compose d'un certain nombre d'éléments 2, 3, 4 et 5 réalisés en un matériau ferro-magnétique et de bobines 6 réalisées de préférence en un matériau conducteur ou supra-conducteur. La

structure ferro-magnétique comporte de manière classique :

- deux plaques de base appelées culasses 2 et 2',
- au moins trois secteurs 3 supérieurs appelés collines et un même nombre de secteurs inférieurs 3' situés symétriquement par rapport à un plan de symétrie 10 dit plan médian aux secteurs supérieurs 3, et qui sont séparés par un faible entrefer 8,
- entre deux collines consécutives, il existe un espace où l'entrefers est de dimension plus élevée et est qui appelé vallée 4,
- au moins un retour de flux 5 réunissant de façon rigide la culasse inférieure 2 à la culasse supérieure 2',

Les bobines 6 sont de forme essentiellement circulaire, et sont localisées dans l'espace annulaire laissé entre les secteurs 3 ou 3' et les retours de flux 5.

Le conduit central est destiné à recevoir au moins une partie de la source de particules 7 à accélérer. Ces particules sont injectées au centre de l'appareil par des moyens connus en soi.

Pour un cyclotron isochrone accélérant un faisceau de protons jusqu'à une énergie de 11 MeV, l'aimant est dessiné, selon la présente invention, avec un entrefer de 10 mm pour un champ magnétique de 2 teslas sur les secteurs magnétiques 3 et 3'. La tension accélératrice est de 80 kilovolts de manière à obtenir un gain en rayon de 1,5 mm au rayon maximal.

Ce choix inusuel des paramètres permet qu'à l'extrémité radiale des collines, on observe une décroissance extrêmement rapide de l'induction extérieure qui permet d'auto-extraire le faisceau de particules avant la limite d'accélération, ce qui est plus particulièrement représenté à la figure 2.

Selon une première forme d'exécution préférée, on réduit l'angle d'un des secteurs au niveau du rayon polaire de manière à permettre de déplacer les orbites et d'obtenir l'extraction de tout le faisceau de ce côté (voir figure 4).

Le faisceau de particules extrait est alors axialement focalisé et radialement défocalisé.

Selon une autre forme d'exécution préférée, on utilise ce profil de faisceau pour l'irradiation simultanée  
5 de quatre cibles localisées entre les deux bobines 6 montées côte à côte sur la trajectoire du faisceau.

**REVENDICATIONS.**

1. Méthode d'extraction d'un faisceau de particules chargées hors d'un cyclotron isochrone (1) comportant un électro-aimant constituant le circuit magnétique qui inclut  
5 au moins un certain nombre de secteurs (3, 3') appelés "collines" où l'entrefer est réduit, séparés par des espaces en forme de secteurs (4) appelés "vallées" où l'entrefer est de dimension plus grande, la méthode d'extraction étant caractérisée par le fait que le faisceau de particules est  
10 extrait sans recours à un dispositif d'extraction par une disposition particulière du champ magnétique obtenue en dessinant l'entrefer de l'aimant aux collines (3,3') du cyclotron isochrone de telle sorte que le rapport dimension de l'entrefer de l'aimant aux collines au voisinage du rayon  
15 maximum sur le gain en rayon par tour des particules accélérées par le cyclotron à ce rayon soit inférieur à 20.

2. Cyclotron isochrone dans lequel le faisceau de particules est focalisé par secteurs et qui comporte un électro-aimant constituant le circuit magnétique qui inclut  
20 au moins un certain nombre de secteurs (3, 3') appelés "collines" où l'entrefer est réduit, séparés par des espaces en forme de secteurs (4) appelés "vallées" où l'entrefer est de dimension plus grande, caractérisé en ce que l'entrefer de l'aimant aux collines (3, 3') est dessiné de telle sorte  
25 que le rapport dimension de l'entrefer de l'aimant aux collines au voisinage du rayon maximum sur le gain en rayon par tour des particules accélérées par le cyclotron à ce rayon soit inférieur à 20.

3. Cyclotron isochrone selon la revendication 2, caractérisé en ce que le profil de l'entrefer de l'aimant aux collines est un profil elliptique ayant tendance à se refermer à l'extrémité radiale des collines.  
30

4. Cyclotron selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce qu'au moins un secteur présente une forme ou un champ magnétique dissymétrique par rapport aux autres secteurs.  
35

5. Cyclotron selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, caractérisé en ce qu'on réduit l'angle d'un des secteurs au niveau du rayon polaire.

5 6. Cyclotron selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, caractérisé en ce qu'on réalise une distribution particulière du faisceau de particules de manière à irradier simultanément plusieurs cibles montées côte à côte sur la trajectoire du faisceau.

10 7. Utilisation de la méthode d'extraction des particules selon la revendication 1 ou du dispositif selon l'une quelconque des revendications 2 à 6 pour la protonthérapie ou pour la production de radio-isotopes, et en particulier pour la production de radio-isotopes destinés à la tomographie par émission de positrons.

Figure 1

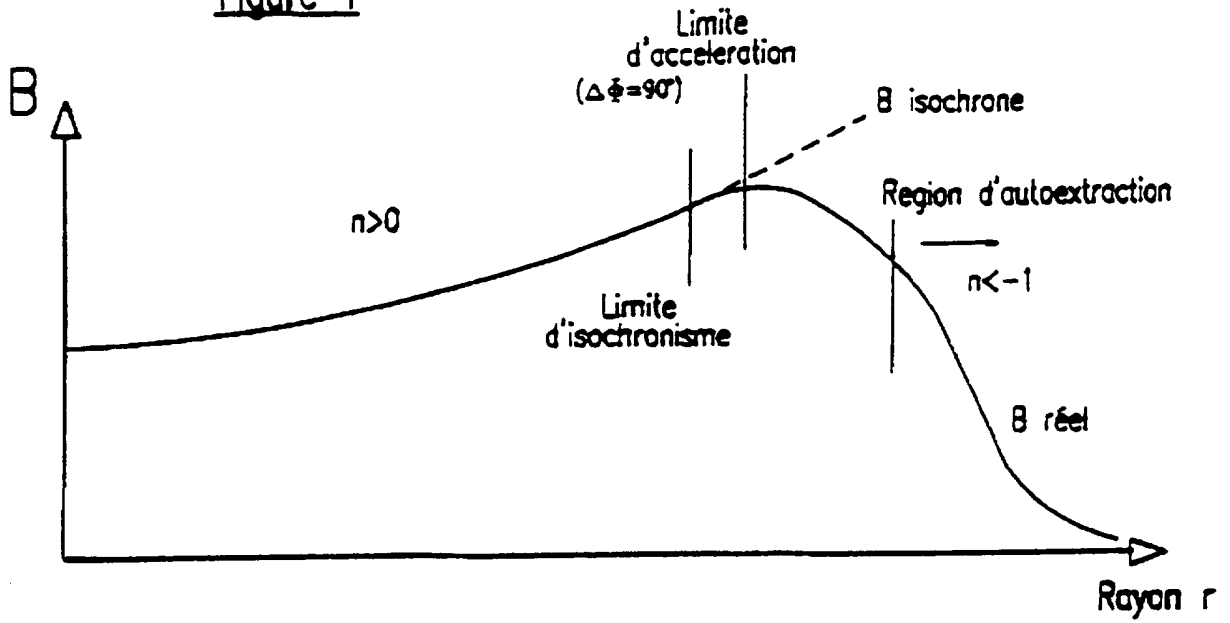


Figure 2

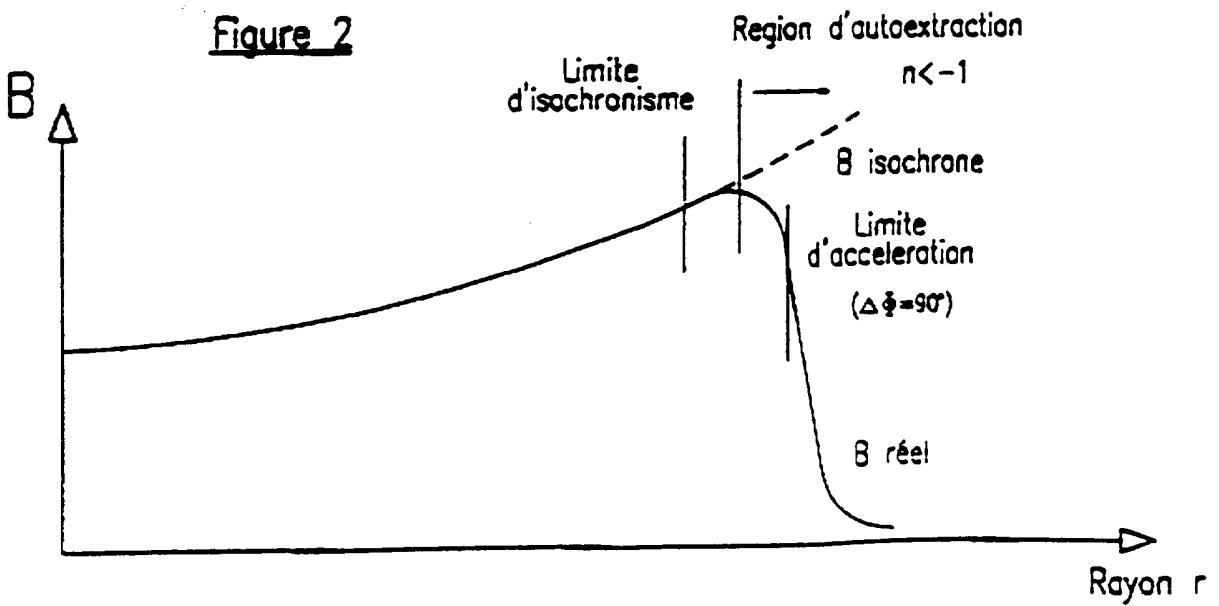
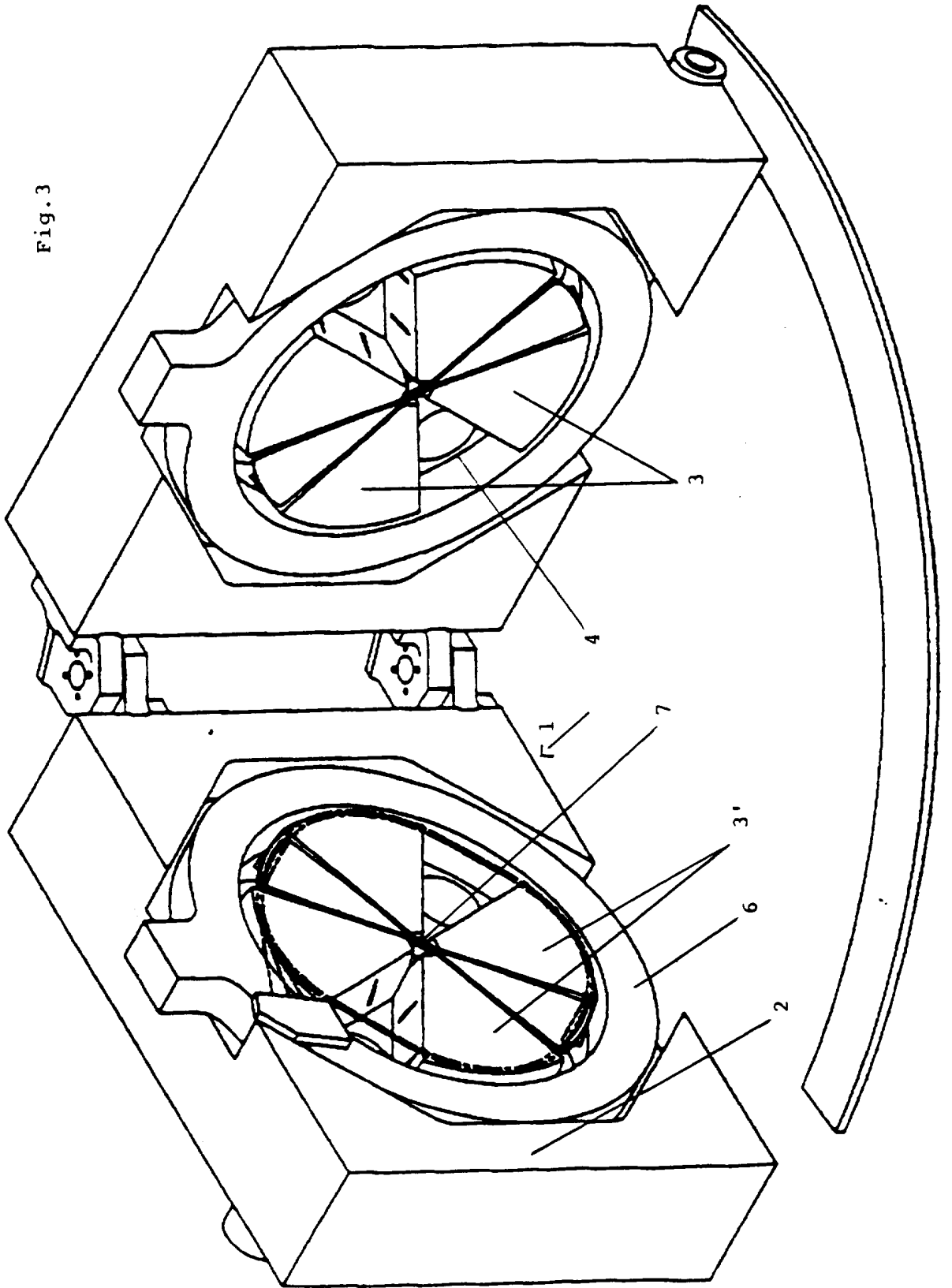


Fig. 3







Office européen  
des brevets

**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

Numero de la demande  
nationale

BO 5761  
BE 9500832

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.6)
D,Y	WO-A-93 10651 (ION BEAM APPLIC SA) 27 Mai 1993 * page 6, ligne 36 - page 7, ligne 34 * ---	1-5	H05H7/10 H05H13/00
Y	US-A-3 024 379 (N.F. VERSTER) 6 Mars 1962 * colonne 1, ligne 39 - ligne 54 * * colonne 2, ligne 45 - ligne 49 * * colonne 2, ligne 67 - ligne 72 * * colonne 3, ligne 28 - ligne 32 * * colonne 4, ligne 45 - ligne 57 * * revendications 1,4 * ---	1-5	
A	FR-A-2 139 671 (THOMSON CSF) 12 Janvier 1973 * page 1, ligne 1 - ligne 34 * * page 2, ligne 23 - ligne 28 * * figure 1 * ---	1,2	
A	US-A-3 175 131 (BURLEIGH ET AL.) 23 Mars 1965 * colonne 4, ligne 3 - ligne 29 * ---	1,2	
A	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A: ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, vol. a256, no. 3, 15 Mai 1987, AMSTERDAM NL, pages 434-438, XP000573276 WOLBER ET AL.: "A kicker magnet for sweeping ion beams from a medical cyclotron" * abrégé * * page 436, alinéa 3.2 * -----	6,7	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.6)
			H05H
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		24 Juin 1996	Capostagno, E
<p><b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b></p> <p>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</p> <p>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  .....  &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

2

EPO FORM 1503 03.82 (P/MC48)

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

BO 5761  
BE 9500832

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.

24-06-1996

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO-A-9310651	27-05-93	BE-A- 1005530	28-09-93
		CA-A- 2122583	23-05-93
		DE-D- 69209312	25-04-96
		EP-A- 0613607	07-09-94
		JP-T- 7501171	02-02-95
		US-A- 5521469	28-05-96
US-A-3024379	06-03-62	CH-A- 380254	
		DE-B- 1128933	
		FR-A- 1246521	08-02-61
		GB-A- 933444	
		NL-C- 112025	
		NL-A- 235411	
FR-A-2139671	12-01-73	AUCUN	
US-A-3175131	23-03-65	AUCUN	