

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

②

N° 82 19440

-
- ⑤④ Aimant de courbure achromatique avec entrefer à épaulement, notamment pour appareil d'irradiation thérapeutique.
- ⑤① Classification internationale (Int. Cl.³). A 61 N 5/10.
- ②② Date de dépôt 19 novembre 1982.
- ③③ ③② ③① Priorité revendiquée : US, 19 novembre 1981, n° 323,010.
- ④① Date de la mise à la disposition du public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 20 du 20-5-1983.
-
- ⑦① Déposant : Société dite : VARIAN ASSOCIATES, INC. — US.
- ⑦② Invention de : Karl Leslie Brown, William Garfield Turnbull et Phillip Thomas Jones.
- ⑦③ Titulaire : *Idem* ⑦①
- ⑦④ Mandataire : Cabinet Lavoix,
2, place d'Estienne-d'Orves, 75441 Paris Cedex 09.
-

La présente invention concerne le domaine général de l'optique et de la propagation des faisceaux de particules chargées et elle porte plus particulièrement sur la déflexion achromatique d'un faisceau, convenant spécialement à l'utilisation dans un appareil de traitement par radiations.

Des éléments optiques achromatiques sont essentiels dans les appareils d'irradiation industriels et médicaux, à usage thérapeutique, du fait que la caractéristique essentielle pour de telles opérations consiste dans l'intensité relativement élevée du faisceau et dans la commande de cette intensité. Un accélérateur caractéristique à courant de faisceau élevé, comme l'accélérateur linéaire micro-onde, fournit les intensités de faisceau exigées, mais la distribution d'énergie est assez large. Pour utiliser le faisceau disponible, il est donc nécessaire d'introduire des éléments optiques qui sont relativement insensibles à la distribution d'énergie du faisceau. En particulier, dans le cas d'un appareil à rayons X, il est souhaitable de concentrer un faisceau intense sur un spot de faisceau de petite taille sur la cible émettrice de rayons X, pour obtenir une source de rayons X suffisamment petite par rapport à la région d'irradiation visée.

Les dispositifs de déflexion de faisceau utilisés dans les applications d'irradiation industrielles et les applications médicales thérapeutiques sont habituellement sujets à des contraintes mécaniques et géométriques liées à la manoeuvrabilité de l'appareil, au blindage et à la collimation du flux d'irradiation, ainsi qu'à des considérations économiques concernant la structure d'un tel appareil.

Le brevet US 3 867 635 décrit un dispositif de déflexion de faisceau de type achromatique. Dans ce dispositif, le faisceau traverse trois aimants en forme de secteurs à champ uniforme, et deux espaces de glissement, en subissant une déflexion de 270° pour tomber sur la cible émettrice de rayons X. Les pôles des aimants en forme de secteur sont définis avec précision en liaison avec les angles des secteurs. Les angles d'incidence et de sortie du faisceau sont définis par rapport à chaque secteur et un shunt de forme complexe occupe les espaces intermédiaires ainsi que les régions d'en-

trée et de sortie du défecteur, pour assurer l'existence des espaces de glissement exempts de champ qui sont nécessaires. L'alignement interne mutuel de tous les composants du défecteur est essentiel pour l'obtention des performances de ce 5 dispositif de l'art antérieur, et il en est de même pour l'alignement du défecteur assemblé par rapport au faisceau de l'accélérateur.

Un autre dispositif de l'art antérieur est décrit dans le brevet US 3 379 911, dans lequel une déflexion à 270° 10 est accomplie dans un champ uniforme dans lequel on a introduit une région de gradient à proximité du point milieu de la déflexion (135°), de façon que le champ magnétique dans cette région de gradient augmente radialement dans le plan de déflexion, vers la partie extérieure des trajectoires acceptées. 15 Ainsi, les trajectoires qui sont caractérisées par un grand rayon de courbure (en l'absence de gradient) sont soumises à un champ un peu plus intense que les trajectoires ayant de plus petits rayons de courbure. Un réglage correct de la cale établissant le gradient procure une déflexion achromatique au 20 premier ordre sur l'angle désiré.

Dans tous les dispositifs décrits, il est souhaitable que le défecteur n'introduise pas de dispersion notable sur la quantité de mouvement du faisceau et qu'il produise dans le plan de sortie une reproduction fidèle des conditions 25 qui existent dans le plan d'entrée du dispositif.

Le but principal de l'invention est de réaliser un dispositif de déflexion achromatique de premier ordre, particulièrement simple, dans un appareil d'irradiation par des particules chargées.

30 Selon une caractéristique de l'invention, un aimant de déflexion comprend une première région de champ uniforme qui est séparée par une frontière d'une seconde région de champ uniforme, grâce à quoi les trajectoires des particules qui traversent la première région sont caractérisées par un 35 grand rayon de courbure dans la première région et un plus petit rayon de courbure dans la seconde région, après quoi ces particules retraversent la première région avec le grand rayon de courbure.

Selon une autre caractéristique de l'invention, le rapport entre les champs dans les première et seconde régions est une constante et il est obtenu par un premier entrefer (large) et un second entrefer (étroit) entre des faces des pôles qui présentent des épaulements.

Selon une autre caractéristique encore de l'invention, la frontière entre les première et seconde régions est une ligne droite.

Selon une autre caractéristique encore de l'invention, des fentes de sélection d'énergie sont disposées dans l'entrefer relativement étroit de la seconde région de champ, grâce à quoi le rayonnement qui sort de ces fentes est blindé plus efficacement par une plus grande masse des pièces polaires magnétiques dans la seconde région de champ (entrefer étroit).

Selon une autre caractéristique encore de l'invention, l'alignement précis du plan de courbure de l'aimant de déflexion, par rapport à l'axe d'un accélérateur de particules, est obtenu par une rotation de l'aimant autour d'un axe qui traverse le plan de courbure de ce dernier, sans nécessiter un alignement interne des composants de l'aimant.

Selon encore une autre caractéristique de l'invention, la valeur du déplacement des trajectoires à partir de l'orbite centrale, dans le plan image de l'aimant, est égale au déplacement de la trajectoire à partir de l'orbite centrale dans le plan d'entrée de l'aimant, grâce à quoi des rayons parallèles dans le plan d'entrée sont parallèles dans le plan de sortie.

Selon une autre caractéristique encore de l'invention, on utilise un seul élément quadripôle pour produire dans un plan de cible commun un rétrécissement radial et un rétrécissement transversal, dans un dispositif de déviation de faisceau de particules chargées, de type achromatique.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre d'un mode de réalisation et en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

La figure 1 est une représentation schématique de côté, en élévation, d'un appareil thérapeutique à rayons X

qui utilise des caractéristiques de l'invention.

La figure 2 est une représentation montrant des trajectoires dans le plan de courbure de l'invention.

La figure 3A est une coupe (perpendiculairement au plan de courbure) dans l'aimant qui comporte la tête de pôle de la figure 2.

La figure 3B montre l'élément de limitation de champ du mode de réalisation préféré.

La figure 4 montre les trajectoires projetées transversales, dépliées le long de la totalité de la trajectoire centrale.

La figure 5 montre la relation entre les rétrécissements radial et transversal.

La figure 1 représente un appareil de thérapie par rayons X, 10, qui comporte un dispositif de déflexion magnétique 12. L'appareil de thérapie 10 comprend un portique tournant 14, de forme générale en C, qui peut tourner autour d'un axe de rotation 16, dirigé horizontalement. Le portique 14 est supporté sur le sol 18 par un piédestal 20 qui porte un tourillon 22 destiné à supporter de façon tournante le portique 14. Le portique 14 comporte une paire de bras parallèles 24 et 26, d'orientation générale horizontale. Un accélérateur d'électrons linéaire 27 communiquant avec un quadripôle 28 est logé à l'intérieur du bras 26 et le dispositif de déflexion magnétique 12 et une cible 29 sont disposés à l'extrémité extérieure du bras horizontal 26 de façon à projeter un faisceau de rayons X entre l'extrémité extérieure du bras 26 et un élément d'absorption des rayons X, 30, porté à l'extrémité extérieure de l'autre bras horizontal 24. Le patient 32 est supporté par une table 34 à l'intérieur du lobe des rayons X qui sont émis par la cible 29, pour subir un traitement thérapeutique.

On va maintenant considérer les figures 2 et 3A, 3B, sur lesquelles on voit une tête de pôle 50 de la pièce polaire conforme à l'invention. Un épaulement 52 divise la tête de pôle 50 en régions 54 et 56. La tête de pôle 50 a une plus grande épaisseur dans la région 56 que dans la région 54, avec un écart égal à la hauteur h de l'épaulement 52. Par

conséquent, l'aimant qui comporte les têtes de pôle 50 et 50' est caractérisé par un entrefer relativement étroit, de largeur d , dans la région 56 et par un entrefer relativement large (de largeur $d+2h$) dans la région 54. Ainsi, l'aimant 5 comprend une région uniforme constante 54 à champ magnétique relativement faible et une autre région uniforme constante 56 à champ magnétique relativement élevé. L'excitation de l'aimant est obtenue en appliquant un courant à des demi-bobines 58 et 58', séparées axialement, chacune d'elles étant 10 disposée autour de pôles extérieurs respectifs 60 et 60' auxquels sont fixées les têtes de pôle 50 et 50'. Le chemin magnétique de retour est établi par une culasse 62. Des bobines d'ajustage 64 et 64' permettent un réglage fin du rapport de champ dans les régions 54 et 56.

15 Une enceinte à vide 67 est placée entre les pôles de l'aimant et communique avec la cavité 68 de l'accélérateur linéaire micro-onde par l'intermédiaire du quadripôle Q.

Comme il est envisagé ci-après, un autre paramètre de conception important est l'angle d'incidence de la trajectoire par rapport au champ à l'entrée du déflecteur. La 20 définition du champ marginal pour maintenir la position et l'orientation désirées de la frontière virtuelle extérieure du champ, 69, par rapport à la région d'entrée, est accomplie au moyen de l'élément de limitation de champ 66 qui est séparé des têtes de pôle par l'entretoise en aluminium 66'. De 25 façon similaire, la position et l'orientation de la frontière du champ de sortie sont définies par une forme et une position appropriées de l'élément de limitation de champ 66 dans cette région.

30 On peut définir une frontière virtuelle intérieure du champ, 55, par rapport à l'épaulement 52, par une courbure appropriée des surfaces à épaulement 53 et 53'. Cette courbure compense le comportement du champ magnétique lorsqu'il s'approche de la saturation et définit le champ marginal 35 dans cette région. L'utilisation d'une telle forme est bien connue dans la technique.

Ni la frontière de champ 69 ni la frontière 55 ne constitue un lieu bien défini, ce qui fait que, par conven-

tion, chacune d'elles est qualifiée de "virtuelle". Un paramètre est associé à chaque frontière virtuelle de champ pour caractériser le comportement du champ marginal dans la région de transition d'une région de champ magnétique à une
 5 autre. Ainsi, un paramètre K_1 est une description à un seul paramètre de la transition progressive du champ depuis l'espace de glissement d'entrée ℓ_1 vers la région 54, le long d'une trajectoire sélectionnée, comme par exemple l'orbite centrale P_0 (et de façon similaire entre la région 54 et
 10 l'espace de glissement de sortie ℓ_2). Le paramètre de champ marginal K_2 décrit un comportement similaire entre les régions de champ magnétique 54 et 56.

Dans l'examen d'éléments optiques magnétiques dipôles, il est habituel de choisir pour l'axe z du système
 15 de coordonnées la tangente à une trajectoire de référence, avec l'origine $z = 0$ dans le plan d'entrée et $z = 1$ dans le plan de sortie. (Les plans d'entrée et de sortie sont généralement séparés des frontières du champ magnétique par des espaces de glissement, comme il est indiqué, et on ne doit
 20 pas les identifier à une frontière de champ quelconque.) On choisit l'axe x comme étant l'axe de déplacement dans le plan de déflexion du plan de courbure. L'axe y se trouve alors dans la direction transversale par rapport au plan de courbure. Conventionnellement, on appelle "verticale" la di-
 25 rection de l'axe y et "horizontale" la direction de l'axe x .

Dans le plan de déflexion, une particule correspondant à un vecteur de quantité de mouvement de référence P_0 décrit un axe d'orbite centrale désigné par P_0 . On désire que des trajectoires déplacées C_x et C_y , initialement parallèles
 30 à P_0 (respectivement dans le plan de courbure et dans le plan qui lui est transversal) donnent lieu à un déplacement semblable en sortie du déflecteur. Une trajectoire qui entre dans ce dispositif sous un angle β_i par rapport à la frontière de champ sort sous un angle β_f . Dans le mode de réalisation considéré actuellement, on désire avoir : $\beta_i = \beta_f$
 35 $= \beta$. La trajectoire est caractérisée par un rayon de courbure ρ_1 dans la région 54 de l'aimant, à cause du champ magnétique B_1 . Dans la région 56, le rayon de courbure corres-

pondant est ρ_2 , à cause du champ magnétique B_2 . La notation $\rho_{0,1}$ (voir la figure 2) désigne le rayon de courbure de la trajectoire de référence P_0 dans la région de champ faible. La ligne déterminée par les centres respectifs correspondant

5 aux rayons de courbure $\rho_{0,1}$ et $\rho_{0,2}$ rencontre la frontière virtuelle du champ, 55, ce qui détermine l'angle d'incidence β_2 par rapport à la région 56 (à l'entrée) et, par symétrie, l'angle d'incidence au niveau de la frontière de champ 55 lorsque la trajectoire entre à nouveau dans la région 54.

10 Pour simplifier, on supprimera l'indice 0. L'angle de déflexion dans le plan de courbure dans la région 54 (à l'entrée) est α_1 et c'est à nouveau un angle α_1 dans la partie de la même région de champ 54 correspondant à la trajectoire de sortie. Dans la région de champ élevé 56, la particule est déviée

15 sur un angle total $2\alpha_2$, pour un angle de déflexion total $\Psi = 2(\alpha_1 + \alpha_2)$ dans le dispositif de déflexion. Une condition nécessaire et suffisante pour qu'un élément de déflexion soit achromatique est qu'une trajectoire d_x correspondant à une dispersion de la quantité de mouvement (cette trajectoi-

20 re ayant une direction centrale initiale de valeur $P_0 + \Delta P$) soit dispersée et amenée au parallélisme avec la trajectoire centrale P_0 à l'angle de déflexion médian $\alpha_1 + \alpha_2$, c'est-à-dire dans le plan de symétrie. En outre, les trajectoires de particules qui sont initialement déplacées par rapport à

25 la trajectoire P_0 , et parallèles à cette dernière (dans le plan de courbure), sont focalisées de façon à rencontrer la trajectoire P_0 dans le plan de symétrie. Ces trajectoires sont dites "de type cosinus" et sont désignées par C_x , l'indice se rapportant au plan de courbure. Des trajectoires de

30 particules qui divergent initialement de la trajectoire P_0 (dans le plan de courbure), au niveau du plan d'entrée de l'aimant, sont représentées sur la figure 2. Ces trajectoires sont dites "de type sinus", et sont désignées par S_x dans le plan de courbure. La condition de dispersion maxima-

35 le et de focalisation en un point des trajectoires parallèles se produit dans le plan de symétrie, et des fentes de définition 72 sont donc situées dans ce plan pour limiter la plage de quantité de mouvement, ou de divergence angulaire, qu'ac-

cepte le dispositif. Comme dans des dispositifs similaires, ces fentes, qui sont des sources secondaires de radiation, sont éloignées de la cible et sont blindées par les pièces polaires de l'aimant. Dans l'invention, c'est précisément 5 dans cette région que l'entrefer est plus étroit, ce qui fait que la masse plus élevée des pièces polaires 50 et 50' blinde plus efficacement l'environnement par rapport à la radiation des fentes.

Les trajectoires C_y et S_y sont des trajectoires 10 de type cosinus et de type sinus dans le plan vertical (y-z).

Il est donc nécessaire d'obtenir la relation pour les rayons de courbure ρ_1 et ρ_2 , et donc pour les champs magnétiques B_1 et B_2 , pour les paramètres α_1 et α_2 , P_0 et 15 pour les paramètres d'extension de champ K_1 et K_2 des frontières virtuelles du champ, avec la condition de divergence angulaire nulle dans le plan de courbure de la trajectoire correspondant à une dispersion de la quantité de mouvement, dans le plan de symétrie, soit par exemple $\partial d_x / \partial z = 0$ pour 20 l'angle de déflexion $\Psi/2$. A partir de cette condition, imposée dans le plan de symétrie, on peut montrer que d_x et sa divergence, d'_x , s'annulent à la sortie de l'aimant.

Dans un traitement analytique simple du problème, on écrit des matrices de transfert dans le dispositif pour 25 la trajectoire entrante qui traverse la région 54, se poursuit en direction de la partie d'entrée de la région 56, vers le plan de symétrie, puis sort de la région 56 vers la frontière avec la région 54 et sort en traversant à nouveau la région 54. Pour le plan de courbure, on écrit ces matrices 30 sous la forme du produit matriciel des matrices de transfert correspondant à la propagation du faisceau dans les quatre régions 54_0 , 56_0 , 56_i , 54_i qui sont indiquées sur la figure 4.

$$\begin{aligned}
 & 9 \\
 R_x &= \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_x & s_x & d_x \\ c'_x & s'_x & d'_x \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 5 &= \begin{pmatrix} c_2 & s_2 \rho_2 & \rho_2(1-c_2) \\ -\frac{s_2}{\rho_2} & c_2 & s_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\beta_2}{\rho_2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_2}{\rho_2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 & s_1 \rho_1 & \rho_1(1-c_1) \\ -\frac{s_1}{\rho_1} & c_1 & s_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

10

(équation 1)

Dans cette équation, c_1, s_1, c_2, s_2 sont des notations abrégées pour désigner respectivement cosinus α et sinus α dans les régions(1) et (2) correspondant respectivement à un champ faible et à un champ élevé ; et β désigne ici $\text{tg} \beta$.

15 Les variables ρ_1 et ρ_2 désignent les rayons de courbure dans les régions respectives 1 et 2, correspondant aux régions 54 et 56. Les paramètres c_i et s_i sont exprimés conventionnellement sous la forme de déplacements par rapport à la trajectoire de référence. On peut réduire l'équation (1) pour obtenir, dans le plan de courbure :

$$25 \quad R_x = \begin{pmatrix} -1 & l(x) & d_x \\ 0 & -1 & \left[-\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) (1-c_1) (s_2 + \beta c_2) + c_2 (s_1 + \beta_1) (1-c_1) + s_2 \right] \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(équation 2)

L'élément de matrice R_{11} exprime un coefficient qui décrit le déplacement spatial relatif de la trajectoire C_x . L'élément R_{12} décrit le déplacement relatif de S_x . D'une manière similaire, l'élément R_{21} décrit la divergence angulaire relative de C_x et l'élément R_{22} décrit la divergence angulaire relative de la trajectoire S_x . L'élément de matrice R_{13} décrit le déplacement dans le plan de courbure pour la trajectoire à dispersion de quantité de mouvement d_x (qui présentait initialement une relation de congruence avec la trajectoire centrale dans le plan objet) et R_{23} décrit sa divergence. Plusieurs conditions permettent de simplifier l'optique : (a) le dispositif transforme des trajectoires entrantes parallèles en trajectoires sortantes parallèles, dans les plans respectifs d'entrée et de sortie, ce qui découle du fait que l'élément de matrice R_{21} est égal à 0 ; (b) l'aimant de déflexion est indépendant du sens de la trajectoire, d'où il résulte que $R_{22} = R_{11}$ (ceci apparaît également lorsqu'on considère la symétrie du dispositif) ; (c) le déterminant de la matrice est identiquement égal à 1, d'après le théorème de Liouville. Il résulte des conditions (b) et (c) que $R_{11} = -1$.

La ligne inférieure de la matrice décrit la quantité de mouvement dans un plan ou dans l'autre. Ces éléments sont identiquement égaux à 0, 0 et 1, du fait qu'il n'y a pas de perte ou de gain résultant dans l'énergie du faisceau (module de la quantité de mouvement) au cours de la traversée d'un dispositif à aimants statiques quelconque.

Pour un dispositif achromatique, le terme de déplacement de dispersion R_{13} et sa divergence, R_{23} , doivent être égaux à 0. Comme indiqué ci-dessus, la condition relative à R_{23} dans le plan de symétrie est obtenue de façon analytique, pour donner une relation entre certains paramètres de conception du dispositif. Il résulte de ceci qu'on obtient l'expression :

$$d'_x = -\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) (1-c_1) (s_2 + \beta c_2) + c_2 s_1 + c_2 \beta (1-c_1) + s_2 = 0$$

(Equation 3)

qu'on peut résoudre pour donner la condition :

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 + s_1 s_2 c_2 - c_1 c_2^2}{1 - c_1} \quad (\text{Equation 4})$$

En suivant la procédure classique, on peut écrire les matrices correspondantes dans le plan vertical pour les 5 mêmes régions 54 (entrée), 56 (entrée), 56 (sortie) et 54 (sortie), et on peut réduire ces matrices pour obtenir l'équation matricielle pour la propagation dans le plan transversal dans le dispositif :

$$\vec{Y}(1) = R_y \vec{Y}(0)$$

10 dans laquelle 1 est la position du plan de sortie, selon la coordonnée z , pour le plan d'entrée $z = 0$. Une contrainte de conception principale réside dans la réalisation d'une focalisation parallèle-parallèle dans ce plan, et non dans le plan de déflexion, dans lequel la condition correspondante 15 résulte de la configuration géométrique de l'aimant.

Jusqu'à présent, les matrices de transfert R_x et R_y décrivent les fonctions de transfert qui agissent sur le vecteur de quantité de mouvement dirigé vers l'intérieur $P(z_1)$, à la frontière de champ 69, pour produire le vecteur 20 de quantité de mouvement sortant $P(z_2)$ à la frontière de champ 69, après passage dans l'aimant. Dans le mode de réalisation préféré, des espaces de glissement l_1 et l_2 sont incorporés en tant qu'espaces de glissement respectifs d'entrée et de sortie. Des matrices de glissement de la forme

$$25 \quad \begin{pmatrix} 1 & l_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad i = 1, 2$$

agissent sur les matrices $R_{x,y}$ qui présentent toutes deux la forme de l'équation (2), soit par exemple :

$$30 \quad R_x = \begin{pmatrix} -1 & L_x \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad R_y = \begin{pmatrix} -1 & L_y \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

et on observe que la matrice de transfert de l'aimant a la forme d'une matrice de glissement équivalente. Ainsi, la transformation dans le dispositif complet avec les espaces de glissement l_1 et l_2 donne des matrices de transfert globales pour le plan de courbure et le plan transverse qui s'expriment sous la forme :

$$R_{x_T, y_T} = \begin{pmatrix} -1 & \mp L_{x,y} \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

10 dans laquelle le signe moins se rapporte à la matrice R_{x_T} et le signe plus se rapporte à R_{y_T} . Les longueurs L_x et L_y sont les distances depuis le plan de sortie jusqu'aux points de focalisation projetés des trajectoires S_x et S_y .

On va maintenant considérer la figure 5 qui montre 15 la situation générale dans laquelle le rétrécissement dans le plan de courbure ou plan radial et le rétrécissement dans le plan transversal sont obtenus à des positions différentes sur l'axe z. Ainsi, l'enveloppe du faisceau converge dans un plan tandis qu'elle diverge dans un autre plan. Antérieurement, on 20 aurait disposé plusieurs éléments quadripôles pour amener ces rétrécissements en coïncidence à une position z commune. Dans l'invention, les conditions $d'_x = 0$ et $C_y = 0$ sont satisfaites dans le plan de symétrie, ce qui fait que $d_x = 0$ à la frontière de sortie du champ. En outre, il résulte de ceci que 25 C_x caractérise une transformation parallèle - parallèle à travers l'aimant dans le plan de courbure. Dans le plan transversal, la transformation parallèle - parallèle est imposée à la structure. Par conséquent, la matrice décrivant le plan transversal ou le plan de courbure présente la forme indiquée 30 ci-dessus. L'effet du quadripôle unique à l'entrée du dispositif prend la forme :

$$\begin{aligned}
 RQ \Big|_{x,y} &= \begin{pmatrix} -1 & \mp L_T \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & c \\ \mp \left(\frac{1}{f_q}\right) & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -1 \mp \frac{L_T}{f_q} & \pm L_T \\ 0 & -1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

5 dans laquelle on peut identifier f_q à la distance focale (variable) du quadripôle. Le rétrécissement du faisceau est obtenu à partir d'expressions de la forme :

$$\begin{aligned}
 |X_{(1)}|^2 &= |C_x X(0)|^2 + |S_x X'(0)|^2 \\
 |Y_{(1)}|^2 &= |C_y Y(0)|^2 + |S_y Y'(0)|^2
 \end{aligned}$$

10 On note que S_x et S_y ne sont pas affectées par le quadripôle dans la mesure où ces trajectoires présentent, par définition, une amplitude nulle à $z = 0$. Les déplacements des trajectoires C_y et C_x sont situés du côté opposé. Si on a choisi cor-
 15 rectement la distance $\ell_1 + \ell_2$, on peut régler la distance focale du quadripôle de façon à faire coïncider le rétrécissement radial et le rétrécissement transversal.

Les équations matricielles :

$$\begin{aligned}
 \vec{X}(1) &= R_{xT} \vec{X}(0) \\
 \vec{Y}(1) &= R_{yT} \vec{Y}(0)
 \end{aligned}$$

qui décrivent le dispositif global comprenant des espaces de glissement dans le plan vertical et le plan de courbure, peuvent être résolues commodément par des programmes appro-
 25 priés d'optique magnétique, comme par exemple le programme TRANSPORT, dont l'utilisation est décrite dans le document SLAC Report 91, fourni par le Reports Distribution Office, Stanford Linear Accelerator Center, P.O. Box 4349, Stanford, CA 94305, E.U.A. On utilise le programme TRANSPORT pour re-
 30 chercher un ensemble de paramètres cohérents :

ρ_1 , rayon de courbure de P_0 dans la région 54,

ρ_1/ρ_2 , rayon de courbure relatif de P_0 dans la région 54, rapporté au rayon de courbure dans la région 56,

β_1 , angle d'incidence de la trajectoire P_0 sur la 5 frontière virtuelle du champ,

α_2 , rotation angulaire de la trajectoire centrale P_0 dans la région de champ élevé, qui détermine également β_2 , c'est-à-dire l'angle d'incidence de P_0 sur la frontière virtuelle intérieure du champ,

10 α_1 , rotation de la trajectoire de référence dans la région de champ faible,

compte tenu des paramètres d'entrée sélectionnés suivants :

K_1 , paramètre de la frontière virtuelle du champ entre la région de champ faible et les régions externes

15 exemptes de champ,

K_2/K_1 , paramètre relatif décrivant la frontière virtuelle intérieure du champ, entre les régions de champ élevé et de champ faible.

Pour le mode de réalisation préféré, on a imposé 20 la symétrie, soit par exemple $\Psi = 2 (\alpha_1 + \alpha_2)$. Dans un ensemble représentatif de paramètres de conception pour une déflexion d'électrons à 270°, l'énergie moyenne désirée pour les électrons varie entre 6 MeV et 40,5 MeV. Des conditions achromatiques au premier ordre sont exigées sur cette plage.

25 L'angle d'incidence β pour les parties d'entrée et de sortie de la trajectoire est de 45° et la frontière virtuelle extérieure du champ, 69, se trouve à $z = 10$ cm par rapport à l'ouverture du collimateur d'entrée ($z = 0$). La trajectoire centrale tourne sur un angle α_1 de 41,5° sous l'influence

30 d'un champ magnétique B_1 de 0,417 T et elle intercepte la frontière virtuelle intérieure du champ, 55, à $z = 33,5$ cm, sous un angle $\beta_2 = 90^\circ - \alpha_2$ égal à 3,5°, pour atteindre le plan de symétrie à $z = 37,4$ cm, la rotation se poursuivant sur l'angle α_2 (93,5°) sous l'influence du champ magnétique

35 B_2 de 1,59 T. La trajectoire est symétrique à l'intérieur des frontières du champ magnétique et la cible se trouve au-delà de la frontière virtuelle extérieure du champ. A l'entrée du collimateur, l'enveloppe du faisceau mesure 2,5 mm

de diamètre et présente des propriétés de divergence dans les deux plans (demi-angle au sommet) de 2,4 mrd.

La configuration géométrique de l'aimant assure une transformation parallèle - parallèle dans le plan de 5 déflexion. La condition $d'_x = 0$ dans le plan de symétrie procure l'indépendance vis-à-vis des quantités de mouvement. La condition de transformation parallèle -parallèle dans le plan transversal est donc une contrainte. On fait varier les angles de courbure α_1 et α_2 ainsi que le rapport des in- 10 tensités de champ pour obtenir l'ensemble de paramètres de conception désiré.

On a trouvé qu'on pouvait réaliser un dispositif de déflexion achromatique au premier ordre pour un angle de 15 déflexion de 270° avec divers rapports de champ B_1/B_2 , ccm- me il résulte de l'équation (3).

On peut en outre obtenir des valeurs absolues des éléments de matrice correspondants pour le plan horizontal et pour le plan vertical qui soient très proches les unes des autres, donnant ainsi un point image symétrique pour le 20 faisceau.

L'homme de l'art notera qu'il est possible d'obtenir d'autres angles de déflexion avec des dispositifs de déflexion construits de façon similaire. En outre, si on le désire, on peut donner à la frontière intérieure du champ 25 la forme d'une courbe désirée.

Bien entendu diverses autres modifications peuvent être apportées au dispositif décrit et représenté, sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDEICATIONS

1. Appareil d'irradiation à accélérateur de particules chargées, destiné à irradier un objet (32), caractérisé en ce qu'il comprend : (a) des moyens accélérateurs de
5 particules chargées (27) destinés à accélérer un faisceau de particules chargées le long d'un axe donné, et (b) un dispositif de courbure à aimant (12) permettant de courber le faisceau pour l'éloigner de l'axe sur un certain angle de
10 déflexion par rapport à l'axe donné, ce dispositif de courbure à aimant comprenant : (1) une première région de champ magnétique uniforme (54) et une seconde région de champ magnétique uniforme (56), adjacente à la première, le champ magnétique de la seconde région étant supérieur au champ magnétique dans la première région, la première région comportant une première frontière de champ (69) éloignée de la
15 seconde région, et les première et seconde régions comportant une seconde frontière de champ (55) ; (2) des moyens (68) destinés à injecter le faisceau de particules chargées dans la première région (54) à travers la première frontière (69)
20 et sous un angle β par rapport à cette première frontière, dans le plan de déflexion, grâce à quoi ce faisceau est dévié sur un angle α_1 dans le plan de déflexion, le faisceau entrant ensuite dans la seconde région (56) en traversant la seconde frontière (55) sous un angle β_2 par rapport à cette
25 dernière, et étant à nouveau dévié d'un angle $2\alpha_2$ dans la seconde région pour entrer à nouveau dans la première région dans laquelle le faisceau est dévié d'un intervalle angulaire supplémentaire α_1 ; et (3) des moyens destinés à extraire le faisceau de la première région (54).

30 2. Appareil d'irradiation selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend une cible destinée à produire une radiation pénétrante sous l'effet de la collision du faisceau avec la cible.

35 3. Appareil d'irradiation selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comporte en outre un portique (14) destiné à faire tourner l'appareil sur certains angles dans deux plans orthogonaux passant par l'objet (32).

4. Dispositif de déflexion achromatique du premier ordre, destiné à dévier des particules chargées sur un angle de déflexion Ψ , caractérisé en ce qu'il comprend : des pièces polaires (50, 60, 50', 60') comprenant des première et seconde têtes de pôle (50, 50') disposées de part et d'autre d'un plan médian pour établir au moins des première et seconde régions contiguës de champ magnétique (54, 56), chacune de ces régions de champ magnétique correspondant à un champ pratiquement homogène, et la première région comprenant une première frontière de champ éloignée de la seconde région.

5. Dispositif de déflexion selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un épaulement (52, 52') dans l'épaisseur de chaque tête de pôle (50, 50'), pour établir une seconde frontière de champ (55) entre les régions de champ magnétique (54, 56).

6. Dispositif de déflexion selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'épaulement (52, 52') s'étend en ligne droite dans le plan de la tête de pôle (50, 50').

7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 5 ou 6, caractérisé en ce que les particules chargées arrivent dans la première région de champ magnétique (54) en faisant pratiquement un angle $|\beta|$ avec le champ, grâce à quoi on obtient une condition focale désirée et le vecteur de quantité de mouvement des particules chargées subit une rotation d'un angle α_1 .

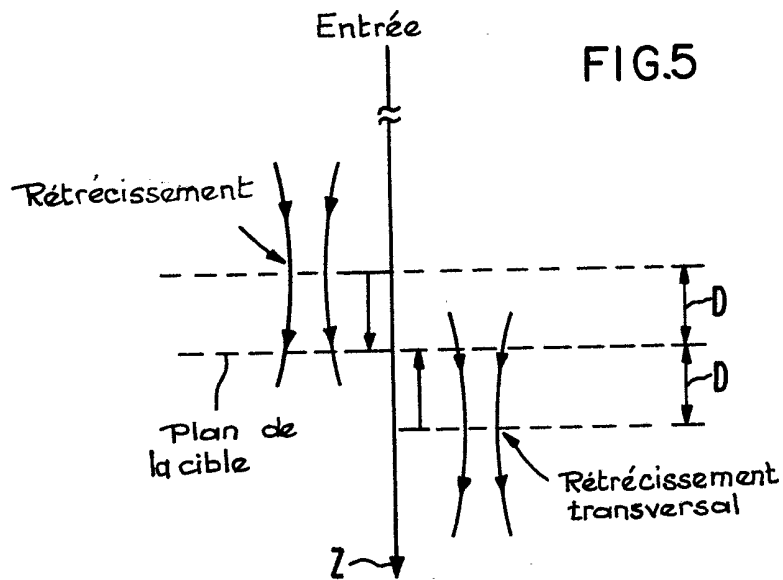
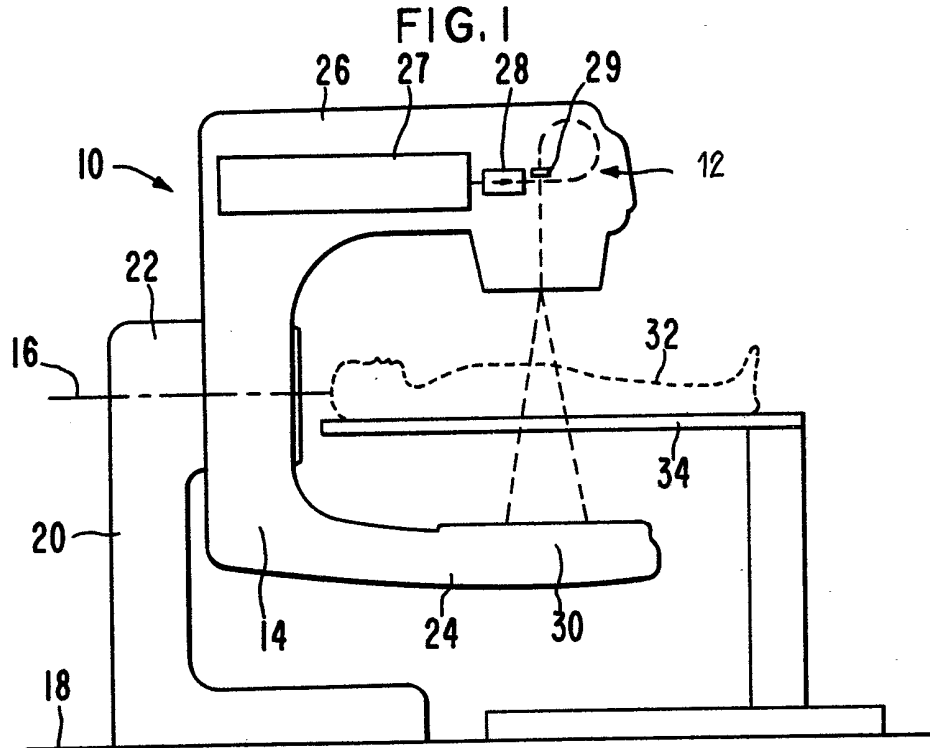
8. Dispositif de déflexion selon la revendication 7, caractérisé en ce que les particules chargées sortent de la première région (54) et entrent simultanément dans la seconde région (56) en traversant la seconde frontière (55) sous un angle β_2 , grâce à quoi une autre condition focale désirée est obtenue et le vecteur de quantité de mouvement des particules chargées subit une rotation d'un angle supplémentaire α_2 , avec la relation $\beta_2 = 90^\circ - \alpha_2$.

9. Dispositif de déflexion selon la revendication 8, caractérisé en ce que les particules chargées subissent une rotation correspondant à un incrément angulaire supplémentaire α_2 pour rencontrer à nouveau la seconde frontière (55) sous l'angle $|\beta_2|$ et pour entrer dans la première ré-

gion (54) à une position distante de la position initiale de traversée de la seconde frontière (55), et on obtient une troisième condition focale.

10. Dispositif de déflexion selon la revendication 5 9, caractérisé en ce que les particules chargées subissent une nouvelle rotation correspondant à un autre incrément angulaire supplémentaire α_1 , ce qui donne la déflexion angulaire totale $|\Psi = 2(\alpha_1 + \alpha_2)|$, et le vecteur correspondant à la quantité de mouvement des particules chargées sort de la première région de champ (54) à un point situé sur la première frontière (69) et distant de la position d'entrée, et sous un angle β par rapport à la première frontière de champ (69).

1/4



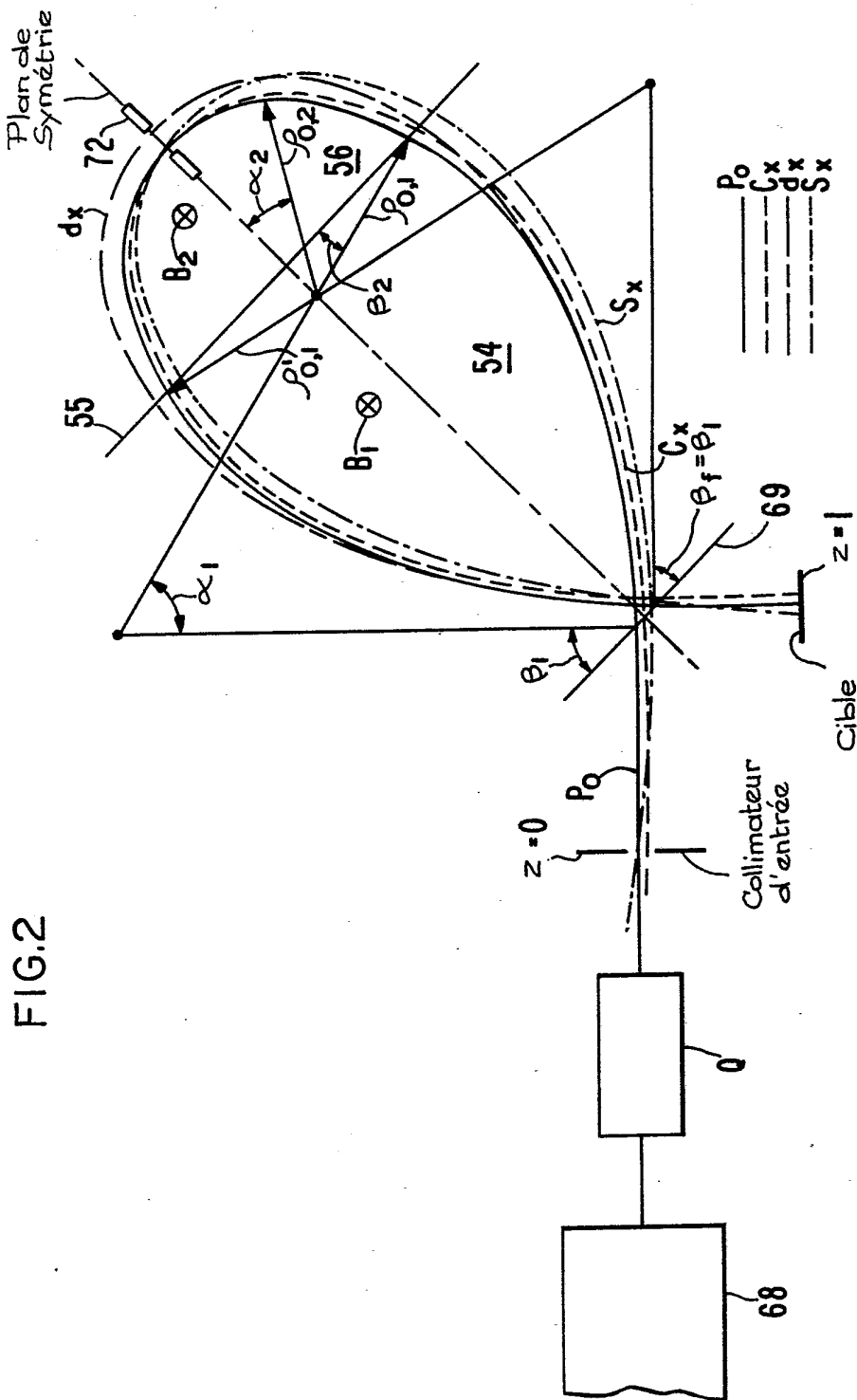


FIG.2

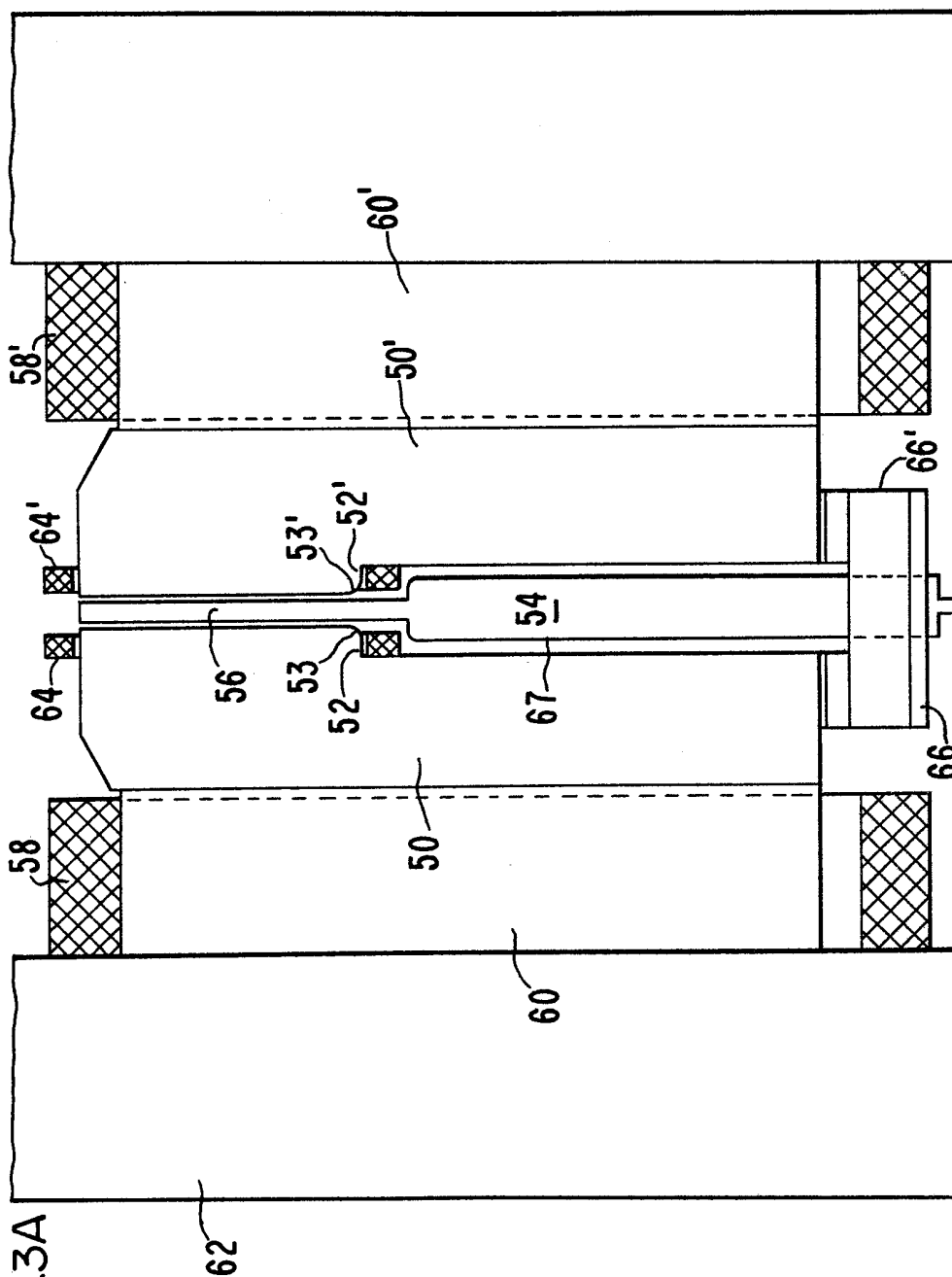


FIG. 3A

