

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 613 607 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
20.03.1996 Bulletin 1996/12

(21) Numéro de dépôt: **92923442.5**

(22) Date de dépôt: **20.11.1992**

(51) Int Cl.⁶: **H05H 13/00**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/BE92/00050

(87) Numéro de publication internationale:
WO 93/10651 (27.05.1993 Gazette 1993/13)

(54) **CYCLOTRON ISOCHRONE COMPACT**
KOMPAKTES ISOCHRONES ZYKLOTRON
COMPACT ISOCHRONIC CYCLOTRON

(84) Etats contractants désignés:
BE CH DE DK FR GB IT LI LU NL SE

(30) Priorité: **22.11.1991 BE 9101080**

(43) Date de publication de la demande:
07.09.1994 Bulletin 1994/36

(73) Titulaire: **ION BEAM APPLICATIONS S.A.**
B-1348 Louvain-la-Neuve (BE)

(72) Inventeur: **LAISNE, André**
F-91190 Gif-sur-Yvette (FR)

(74) Mandataire: **Van Malderen, Joelle et al**
Office Van Malderen,
Place Reine Fabiola 6/1
B-1080 Bruxelles (BE)

(56) Documents cités:
WO-A-86/06924 WO-A-91/07864
US-A- 2 872 574 US-A- 3 883 761

- **IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE.**
vol. NS-32, no. 5/2, October 1985, NEW YORK
US, pages 3316-3317 SURA ET AL. "A compact
cyclotron C-30 for medical isotopes
production"
- **KERNTECHNIK. vol. 17, no. 8, 1975, MUNCHEN**
DE pages 345 - 349 JOHO ET AL. 'The 590 MeV
isochronous ring cyclotron of the Swiss
Institute of Nuclear Research (S.I.N.)'

EP 0 613 607 B1

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

Description**Objet de l'invention**

La présente invention concerne un cyclotron de conception nouvelle dans lequel le faisceau de particules est focalisé par secteurs. Plus particulièrement, la présente invention concerne un cyclotron isochrone comportant un électro-aimant constituant le circuit magnétique qui inclut au moins trois paires de secteurs appelés "collines" où l'entrefer est réduit, séparés par des espaces en forme de secteurs appelés "vallées" où l'entrefer est de dimension plus grande.

La présente invention concerne plus particulièrement un cyclotron isochrone compact c'est-à-dire énergétisé par au moins une paire de bobines circulaires principales entourant les pôles de l'électro-aimant.

La présente invention concerne à la fois les cyclotrons supraconducteurs et non supraconducteurs. **Etat de la technique**

Les cyclotrons sont des accélérateurs de particules utilisés en particulier pour la production d'isotopes radioactifs.

Les cyclotrons se composent habituellement de trois ensembles principaux distincts constitués par l'électro-aimant, le résonateur haute fréquence et l'enceinte à vide avec pompes.

L'électro-aimant assure le guidage des ions sur une trajectoire représentant approximativement une spirale de rayon croissant au cours de l'accélération.

Dans les cyclotrons modernes de type isochrone les pôles de l'électro-aimant 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 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 paire de bobines circulaires principales et les cyclotrons dits à secteurs séparés où la structure magnétique est divisée en unités séparées entièrement autonomes.

Les cyclotrons isochrones de la première génération sont des cyclotrons qui utilisent des bobines circulaires de type classique, c'est-à-dire non supraconductrices. Pour ces cyclotrons de la première génération le champ d'induction moyen obtenu était limité à des valeurs de 1,4 Tesla.

Un mode de réalisation particulièrement favorable pour un cyclotron de ce type est décrit dans la demande de brevet WO-A-8606924 où l'entrefer des secteurs appelés collines est réduit à une valeur proche de la taille du faisceau accéléré, tandis que l'entrefer des secteurs, appelés vallées, qui séparent les collines, est très grand de façon telle que le champ magnétique y est approximativement nul.

Un autre mode de réalisation particulièrement favorable d'un cyclotron isochrone focalisé par secteurs est décrit dans le document WO-A-9107864 où les collines sont confondues avec le système accélérateur par un choix approprié de leurs configuration et dimensions.

Ces deux documents présentent des entrefers entre collines constants.

Le document US-2 872 574 décrit un cyclotron isochrone dont l'entrefer entre collines présente un profil qui décroît linéairement. Ce cyclotron est destiné à l'accélération de particules jusqu'à quelques dizaines de MeV proton.

Le document IEEE Transaction on Nuclear Science (Vol. NS-32 n° 5/2, octobre 1985, NY-US pp. 3316-3317) décrit un cyclotron isochrone compact permettant d'accélérer des particules H^- jusqu'à une énergie de 30 MeV pour des inductions magnétiques entre les collines de l'ordre de 1,7 Tesla, et dans lequel l'entrefer entre collines présente un profil qui croît jusqu'à une valeur maximale pour décroître au-delà.

Depuis une vingtaine d'années, sont apparus les cyclotrons appelés cyclotrons de la seconde génération qui utilisent les technologies des supraconducteurs. Dans ces cyclotrons, les bobines principales sont de type supraconductrices et permettent d'obtenir des inductions moyennes comprises entre 1,7 et 5 Tesla, ce qui permet de délivrer des faisceaux de particules présentant des rigidités magnétiques (Br) nettement supérieures à celles délivrées par les cyclotrons de la première génération.

Cependant, du fait des inductions plus élevées obtenues, il a fallu augmenter le nombre de cavités accélératrices autant que possible afin d'éviter que le faisceau ne doive exécuter un trop grand nombre de tours au sein du cyclotron. En effet, lorsque le faisceau doit effectuer un nombre élevé de tours, ceci nécessite une précision accrue de réalisation du champ magnétique et on préfère dans ce cas utiliser toutes les vallées pour y loger les cavités accélératrices.

De ce fait, les dispositifs d'extraction dans les cyclotrons isochrones supraconducteurs sont rejetés en colline, ce qui complique nettement l'extraction. Un second inconvénient dû au fait que des champs élevés sont obtenus pour des cyclotrons supraconducteurs est que les dispositifs d'extraction constitués par un canal électrostatique et/ou un canal électromagnétique, ont vu leur efficacité relative diminuer et de ce fait les cyclotrons de la seconde génération nécessitent des dispositifs d'extraction beaucoup plus complexes que ceux de la première génération.

En particulier les dispositifs d'extraction des cyclotrons connus de la seconde génération présentent la particularité qu'ils occupent presque un tour entier de machine le long duquel on peut dénombrer deux à trois extracteurs suivis de trois à dix éléments focalisateurs.

Dans tous les cyclotrons isochrones compacts à bobines supraconductrices ou non, dans lesquels l'entrefer entre

deux collines est essentiellement constant, on observe une décroissance de l'induction qui se fait sentir dès les deux premiers tiers du rayon polaire pour tomber à la moitié de sa valeur maximale à l'extrémité radiale des collines (rayon des collines).

Une première solution afin d'éviter cette décroissance a été proposée en choisissant un rayon polaire notablement plus grand que celui auquel l'énergie maximale est atteinte, mais de ce fait on a également allongé la zone radiale où le champ magnétique continue à croître sans être isochrone; celui-ci passe par un maximum et décroît au-delà. L'extension de cette zone radiale de champ de bord va également compliquer nettement l'extraction.

Buts de l'invention

La présente invention vise à proposer une nouvelle configuration de cyclotron isochrone compact supraconducteur ou non ne présentant pas les inconvénients de l'art antérieur.

Un premier but de la présente invention vise à proposer un cyclotron isochrone compact supraconducteur ou non qui tend à empêcher l'affaiblissement de la composante verticale de l'induction lorsque l'on s'approche de l'extrémité radiale des pôles.

En particulier, la présente invention vise à proposer un cyclotron isochrone où la zone de champ non utilisable à l'extrémité des pôles se réduit à quelques millimètres.

Un but complémentaire de la présente invention est de proposer un cyclotron qui présente un dispositif d'extraction simplifiée, en particulier dans le cas d'un cyclotron supraconducteur.

D'autres buts et avantages apparaîtront dans la description qui suit.

Principaux éléments caractéristiques de la présente invention

La présente invention concerne un cyclotron isochrone compact supraconducteur ou non supraconducteur dans lequel le faisceau de particules est focalisé par secteurs, comprenant un électro-aimant constituant le circuit magnétique qui inclut au moins trois paires de secteurs appelés "collines" où l'entrefer est réduit, séparés par des espaces en forme de secteurs appelés "vallées" où l'entrefer est de dimension plus grande et qui est énergétisé par au moins une paire de bobines circulaires principales entourant les pôles de l'électro-aimant, ce cyclotron étant caractérisé en ce que l'entrefer des collines présente un profil évolutif essentiellement elliptique qui tend vers la fermeture complète à l'extrémité radiale des collines (rayon des collines) sur le plan médian et plus particulièrement qui se referme totalement sur le plan médian.

On entend par l'expression "tend vers la fermeture complète" les configurations où il subsiste une faible ouverture résiduelle (de préférence inférieure à la dimension verticale du faisceau accéléré) et les configurations où la fermeture du profil elliptique de l'entrefer est totale au plan médian.

Selon cette dernière configuration de l'entrefer des collines (fermeture complète de l'entrefer) on obtient théoriquement une continuité parfaite de l'induction sur toute l'étendue radiale des collines dans le cas où la magnétisation du fer est uniforme (module constant et direction constante) et ceci même dans le cas où le rayon polaire est égal au rayon des collines.

En pratique, avec du fer doux, on atteint cet état d'uniformité de la magnétisation lorsque le fer des collines travaille à saturation, c'est-à-dire lorsque l'induction dans le fer des collines est supérieure à 2,2 Tesla. Dans le cas où le rayon polaire vaut approximativement (à 1 mm près) le rayon des collines, la continuité parfaite de l'induction dans l'entrefer est atteinte alors sur la quasi-totalité de l'étendue de l'entrefer des collines.

Néanmoins, il subsiste encore une remontée de l'induction au voisinage du rayon des collines, du fait de la non-uniformité du vecteur magnétisation du fer au voisinage de ce rayon des collines.

Afin d'éviter ce phénomène, on prévoit de réaliser une fermeture de l'entrefer au plan médian sous forme d'un shunt magnétique entre chaque paire de collines. Ce shunt présente de préférence une épaisseur radiale comprise entre 2 et 10 mm de manière à augmenter de cette quantité le rayon polaire par rapport au rayon des collines.

La fermeture de l'entrefer au niveau du shunt ne devant pas être totale; en effet, il suffit que l'entrefer résiduel reste petit par rapport à la dimension verticale des faisceaux accélérés.

Outre le fait que selon cette configuration on rétablit la quasi parfaite continuité de l'induction interne jusqu'au rayon des collines, on observe également une décroissance extrêmement rapide de l'induction à l'extérieur au-delà du rayon des collines, ce qui permet de simplifier fortement le système d'extraction du faisceau de particules.

Brève description des figures

La présente invention sera mieux décrite à l'aide des figures annexées dans lesquelles:

- la figure 1 représente de manière schématique une vue éclatée des principaux éléments constituant

- la figure 2 représente une vue en coupe d'un cyclotron selon la présente invention;
- la figure 3 représente une vue plus détaillée d'un entrefer entre deux collines présentant les caractéristiques essentielles de la présente invention;
- 5 - les figures 4 à 11 sont des représentations graphiques de la valeur de la composante verticale de l'induction en fonction du rayon au plan médian de l'entrefer situé entre deux collines pour un cyclotron de l'art antérieur (fig. 4 et 5) ou selon un cyclotron de la présente invention (fig. 6 à 11).

Description d'une forme d'exécution préférée d'un cyclotron selon l'invention

Le cyclotron représenté schématiquement à la figure 1 est un cyclotron destiné à l'accélération de protons jusqu'à une énergie de 230 MeV.

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

La structure ferromagnétique est constituée de :

- deux plaques de base 2 et 2' appelées culasses;
- d'au moins trois secteurs supérieurs 3 appelés collines et d'un même nombre de secteurs inférieurs 3' (voir figure 2) 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'entrefer est de dimension plus élevée et qui est appelé "vallée" 4;
- d'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.

Ces bobines peuvent être réalisées en un matériau supraconducteur mais dans ce cas il faudra prévoir les dispositifs de cryogénie nécessaires.

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

La figure 2 représente une vue en coupe d'un cyclotron selon la présente invention.

La caractéristique essentielle du cyclotron selon la présente invention est constitué par le fait que l'entrefer 8 localisé entre deux collines 3 et 3' présente un profil évolutif essentiellement elliptique qui tend à se refermer sur le plan médian 10 à l'extrémité radiale des collines appelée rayon des collines R_c .

De préférence, la fermeture est complète au rayon R_c ou tout au moins l'entrefer résiduel est inférieur à la dimension verticale du faisceau.

Selon une forme d'exécution encore préférée représentée à la figure 3, on a disposé au-delà du rayon des collines R_c un shunt magnétique 9 entre chaque paire de collines 3 et 3', qui se présente sous forme d'un écran métallique présentant une épaisseur radiale comprise entre 2 et 10 mm et de préférence de l'ordre de 6,5 mm.

Dans ce cas, le rayon polaire R_p et le rayon colline R_c ne coïncident plus, le rayon polaire se situant bien entendu à l'extrémité radiale du shunt magnétique.

Il est bien entendu que au moins un shunt magnétique 9 est muni d'au moins une ouverture 11 pour permettre le passage du faisceau extrait. De préférence, elle est aménagée en biais par rapport au rayon des collines.

Les figures 4 à 11 représentent la composante verticale B_z de l'induction en fonction du rayon γ dans le cas d'une magnétisation M uniforme.

Les figures 4 et 5 représentent cette variation dans le cas d'un entrefer constant b entre deux collines comme c'est le cas pour un cyclotron selon l'art antérieur.

On observe que dans ce cas l'induction verticale B_z décroît rapidement en fonction du rayon γ et ceci déjà pour une valeur nettement inférieure au rayon polaire R_p .

Cette décroissance se fait déjà sentir dès les deux premiers tiers du rayon polaire pour tomber à la moitié de sa valeur maximale au rayon des collines R_c .

Les figures 6 et 7 représentent la variation de l'induction magnétique B_z en fonction du rayon γ dans le cas où l'entrefer se présente sous forme elliptique se fermant complètement au rayon polaire R_c , dans le cas théorique d'une magnétisation uniforme M .

Dans ce cas théorique, on observe une continuité parfaite de l'induction pour toute distance radiale inférieure au rayon R_c et une décroissance extrêmement rapide au-delà de R_c , même dans le cas où R_p vaut R_c .

Néanmoins ainsi que déjà mentionné précédemment, ce cas est théorique; en réalité avec du fer doux on obtient une non uniformité de la magnétisation M au voisinage du rayon polaire R_p qui génère par conséquent une remontée de l'induction telle que représentée aux figures 8 et 9.

Afin d'éviter cet effet indésirable, il convient d'introduire un shunt magnétique qui obstrue le plan médian et permet ainsi de rétablir l'uniformité de la magnétisation et par conséquent la continuité quasi parfaite de l'induction verticale pour un rayon inférieur au rayon R_c ainsi que cela apparaît aux figures 10 et 11.

Il convient de noter que la valeur de la composante verticale $B_z(r)$ de l'induction magnéto-statique pour le rayon inférieur au rayon R_c dépend essentiellement de la valeur du demi petit axe (b) de l'ellipse générant le profil de l'entrefer formé entre deux collines.

L'avantage principal de cette configuration de l'entrefer pour un cyclotron selon la présente invention réside dans le fait que le système d'extraction du faisceau de particules sera fortement simplifié par rapport au système d'extraction pour des cyclotrons selon l'état de l'art antérieur.

En particulier, un cyclotron selon la présente invention qui est destiné à accélérer des protons à une énergie supérieure à 150 Mev, peut posséder un système d'extraction composé uniquement d'un seul déflecteur électrostatique suivi de deux ou trois canaux magnétostatiques focalisateurs.

Dans le présent cas, ces canaux magnétostatiques sont constitués de barres de fer doux à section rectangulaire de petite dimension et sont par conséquent d'un coût de réalisation très faible.

De manière générale, un cyclotron selon la présente invention présente l'avantage de la réduction du volume de fer nécessaire à la réalisation des pôles de la culasse par rapport à ceux d'un cyclotron selon l'art antérieur.

Revendications

1. Cyclotron isochrone compact (1) supraconducteur ou non supraconducteur dans lequel le faisceau de particules est focalisé par secteurs, comportant un électro-aimant comprenant deux pôles et constituant le circuit magnétique qui inclut au moins trois paires de secteurs (3 et 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 et qui est énergétisé par au moins une paire de bobines (6) circulaires principales entourant les pôles de l'électro-aimant; ce cyclotron étant caractérisé en ce que l'entrefer (8) localisé entre deux collines (3 et 3') présente un profil évolutif essentiellement elliptique qui tend vers la fermeture complète à l'extrémité radiale des collines appelée rayon des collines (R_c) sur le plan médian (10).
2. Cyclotron selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'entrefer (8) entre deux collines (3 et 3') se referme totalement au rayon des collines (R_c) sur le plan médian (10).
3. Cyclotron selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'entrefer (8) entre deux collines (3 et 3') présente une légère ouverture au rayon des collines (R_c) de préférence inférieure à la dimension verticale du faisceau à extraire.
4. Cyclotron selon la revendication 2 ou 3 caractérisé en ce qu'un shunt magnétique (9) réalisé en continuité avec les pôles de l'électro-aimant est disposé entre chaque paire de collines (3 et 3') au-delà de l'extrémité radiale des collines (R_c).
5. Cyclotron selon la revendication 4 caractérisé en ce qu'au moins un shunt magnétique (9) est muni d'au moins une ouverture (11) afin de permettre le passage du faisceau extrait.
6. Cyclotron selon la revendication 4 ou 5 caractérisé en ce que les shunts magnétiques (9) se présentent sous forme d'un écran métallique d'une épaisseur comprise entre 2 et 10 mm et de préférence de l'ordre de 6,5 mm.
7. Cyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que le système d'extraction associé au cyclotron se compose d'un seul déflecteur électrostatique suivi de préférence de deux ou trois canaux électrostatiques focalisateurs.
8. Utilisation d'un cyclotron selon l'une quelconque des revendications précédentes pour l'accélération de protons à une énergie supérieure à 150 Mev.

Patentansprüche

1. Supraleitendes oder nicht-supraleitendes, kompaktes, isochrones Zyklotron, bei dem das Teilchenbündel durch Sektoren fokussiert wird, wobei das Zyklotron einen Elektromagneten umfaßt, der zwei Pole aufweist und den magnetischen Kreis bildet, der mindestens drei als "Hügel" bezeichnete Sektorpaare aus Sektoren (3 und 3') mit

kleinem Eisenspalt aufweist, die durch Zwischenräume in Form von als "Täler" bezeichneten Sektoren (4) mit größerem Eisenspalt getrennt sind, und das Zyklotron durch mindestens ein Spulenpaar aus kreisförmigen Hauptspulen (6), die die Pole des Elektromagneten umgeben, erregt wird; dadurch gekennzeichnet, daß der zwischen zwei Hügeln (3 und 3') gelegene Eisenspalt (8) ein im wesentlichen elliptisches Entwicklungsprofil aufweist, das an dem als Radius (R_c) der Hügel bezeichneten, radialen Ende der Hügel in der Mittelebene (10) zu der vollständigen Schließung hin tendiert.

2. Zyklotron gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sich der Eisenspalt (8) zwischen zwei Hügeln (3 und 3') in der Mittelebene (10) bei dem Radius (R_c) der Hügel vollständig schließt.

3. Zyklotron gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Eisenspalt (8) zwischen zwei Hügeln (3 und 3') bei dem Radius (R_c) der Hügel eine leichte Öffnung aufweist, die vorzugsweise kleiner als die vertikale Abmessung des zu extrahierenden Teilchenbündels ist.

4. Zyklotron gemäß Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein in Kontinuität mit den Polen des Elektromagneten verwirklichter, magnetischer Shunt (9) jenseits des radialen Endes (R_c) der Hügel zwischen jedem Hügelpaar aus Hügeln (3 und 3') angeordnet ist.

5. Zyklotron gemäß Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein magnetischer Shunt (9) mit mindestens einer Öffnung (11) versehen ist, um den Durchlauf des extrahierten Teilchenbündels zu ermöglichen.

6. Zyklotron gemäß Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetischen Shunts (9) die Form eines metallischen Schirms mit einer Dicke zwischen 2 und 10 mm, vorzugsweise ungefähr 6,5 mm haben.

7. Zyklotron gemäß irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das mit dem Zyklotron verbundene Extraktionssystem aus einem einzigen elektrostatischen Deflektor besteht, auf den vorzugsweise zwei oder drei elektrostatische Fokussierungskanäle folgen.

8. Verwendung eines Zyklotrons gemäß irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche zur Beschleunigung von Protonen auf eine Energie von mehr als 150 MeV.

Claims

1. Superconducting or non-superconducting compact isochronal cyclotron (1) in which the particle beam is focused by sectors, comprising an electromagnet comprising two poles and constituting the magnetic circuit which includes at least three pairs of sectors (3 and 3') called "hills" where the air gap is reduced, these being separated by spaces in the form of sectors (4) called "valleys" where the air gap has a greater dimension and which is energized by at least one pair of main circular coils (6) surrounding the poles of the electromagnet, this cyclotron being characterized in that the air gap (8) located between two hills (3 and 3') has an essentially elliptical changing profile which tends towards complete closure at the radial extremity of the hills, called the hill radius (R_c), on the mid-plane (10).

2. Cyclotron according to Claim 1, characterized in that the air gap (8) between two hills (3 and 3') closes up completely at the hill radius (R_c) on the mid-plane (10).

3. Cyclotron according to Claim 1, characterized in that the air gap (8) between two hills (3 and 3') has a slight opening, at the hill radius (R_c), preferably less than the vertical dimension of the beam to be extracted.

4. Cyclotron according to Claim 2 or 3, characterized in that a magnetic shunt (9) produced in continuity with the poles of the electromagnet is placed between each pair of hills (3 and 3') beyond the radial extremity (R_c) of the hills.

5. Cyclotron according to Claim 4, characterized in that at least one magnetic shunt (9) is equipped with at least one opening (11) so as to enable the extracted beam to pass.

6. Cyclotron according to Claim 4 or 5, characterized in that the magnetic shunts (9) are in the form of a metal screen having a thickness lying between 2 and 10 mm and preferably of the order of 6.5 mm.

7. Cyclotron according to any one of the preceding claims, characterized in that the extraction system associated with

the cyclotron is composed of a single electrostatic deflector followed by preferably two or three focusing electrostatic channels.

- 5 8. Use of a cyclotron according to any one of the preceding claims for accelerating protons to an energy greater than 150 MeV.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

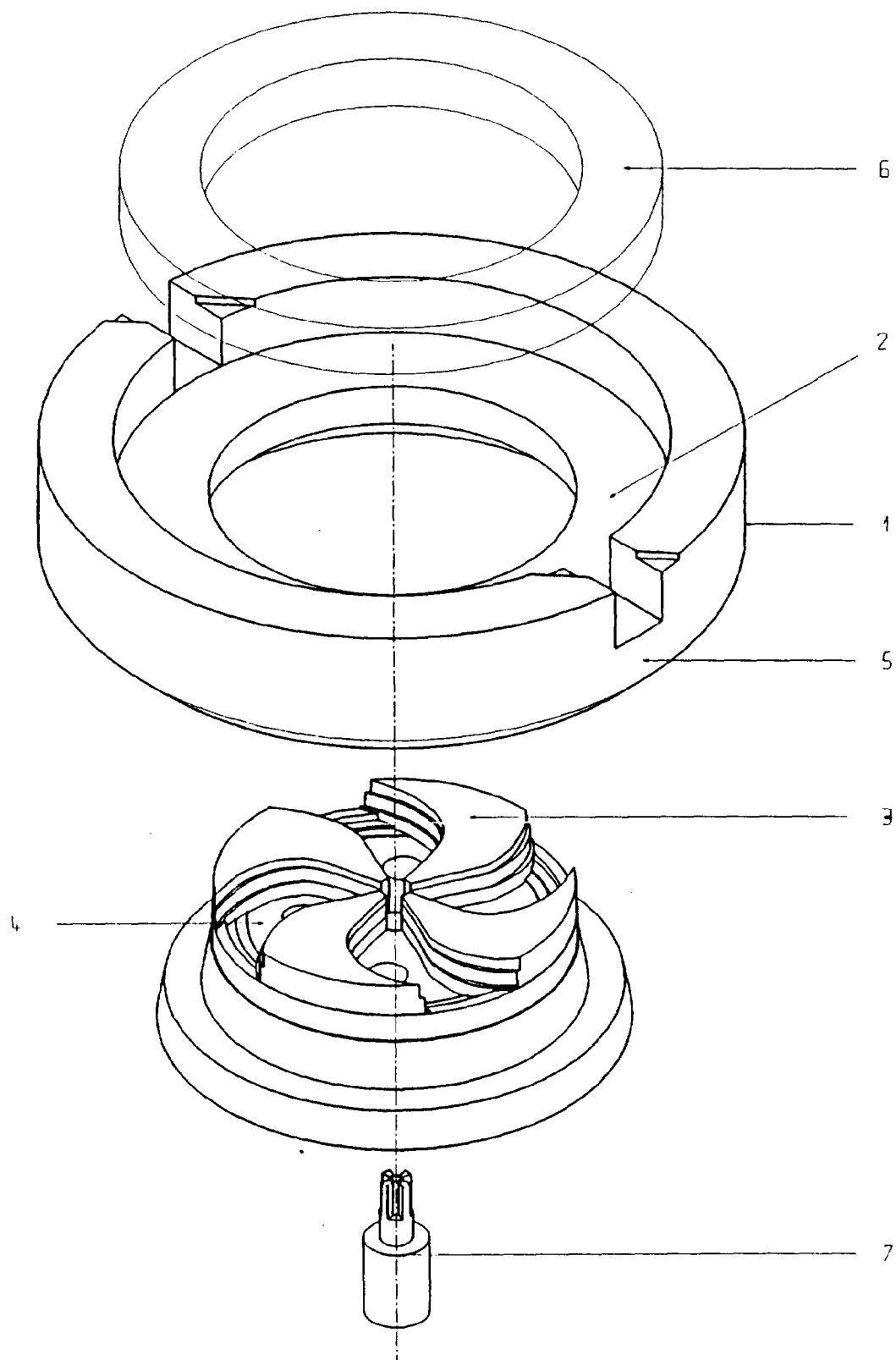


Fig 1

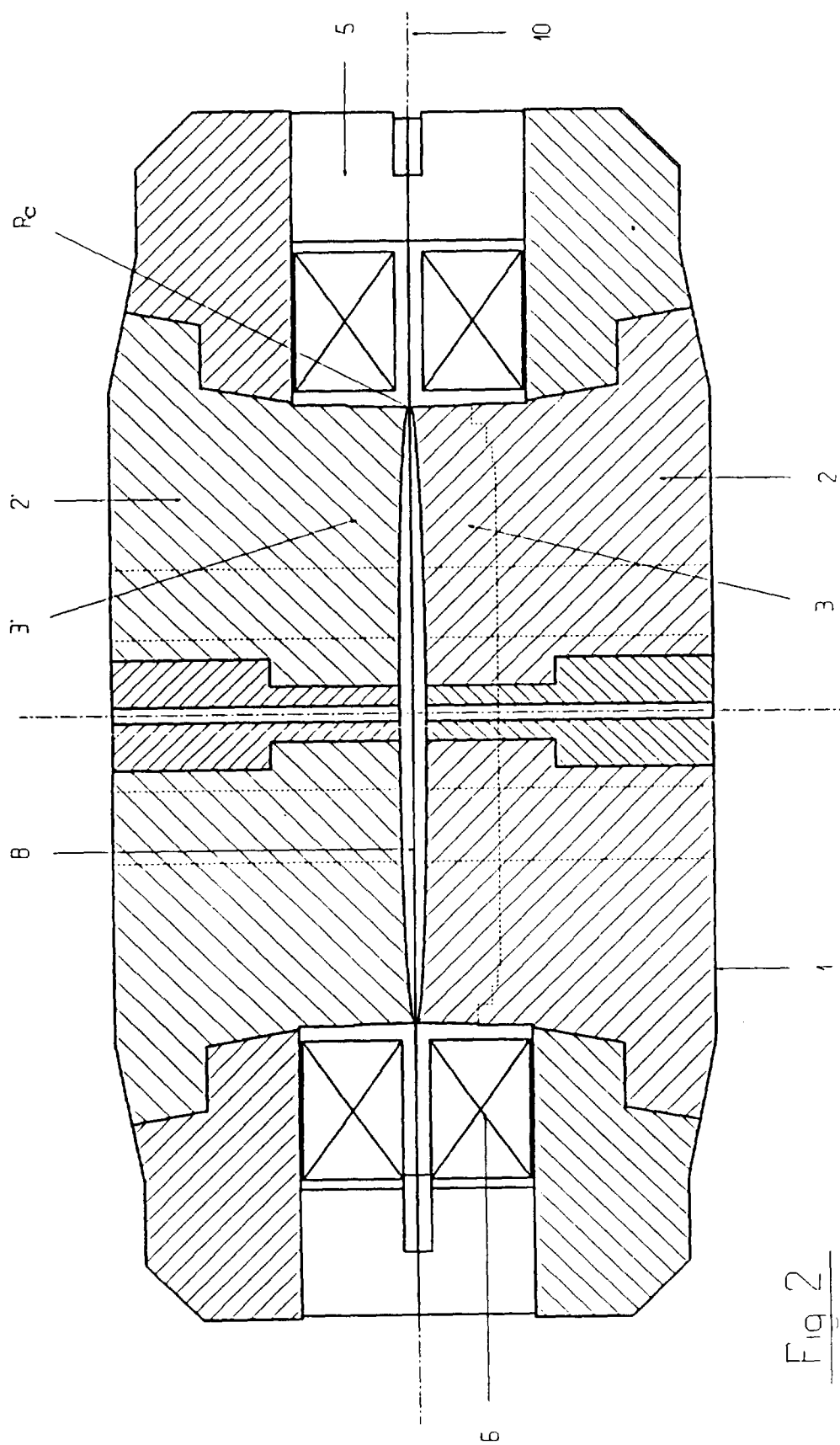


Fig 2

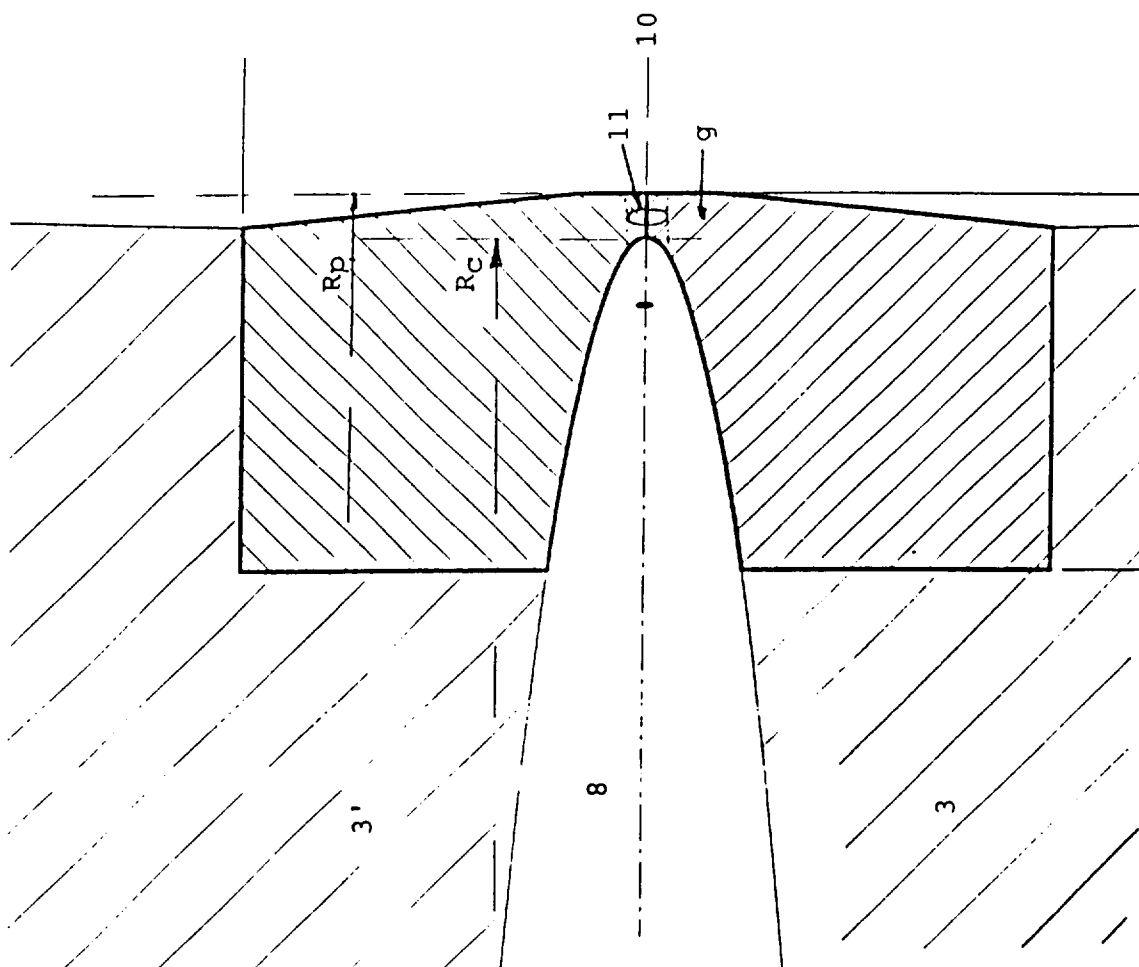


Fig. 3

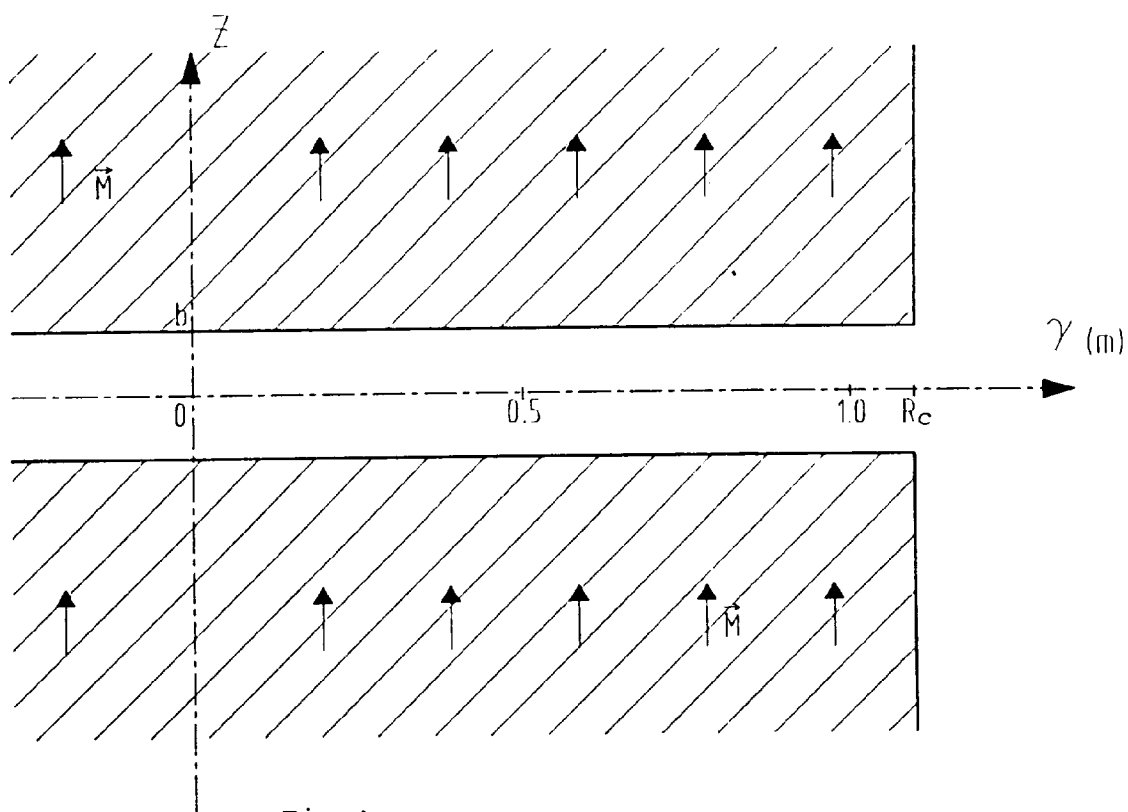


Fig. 4

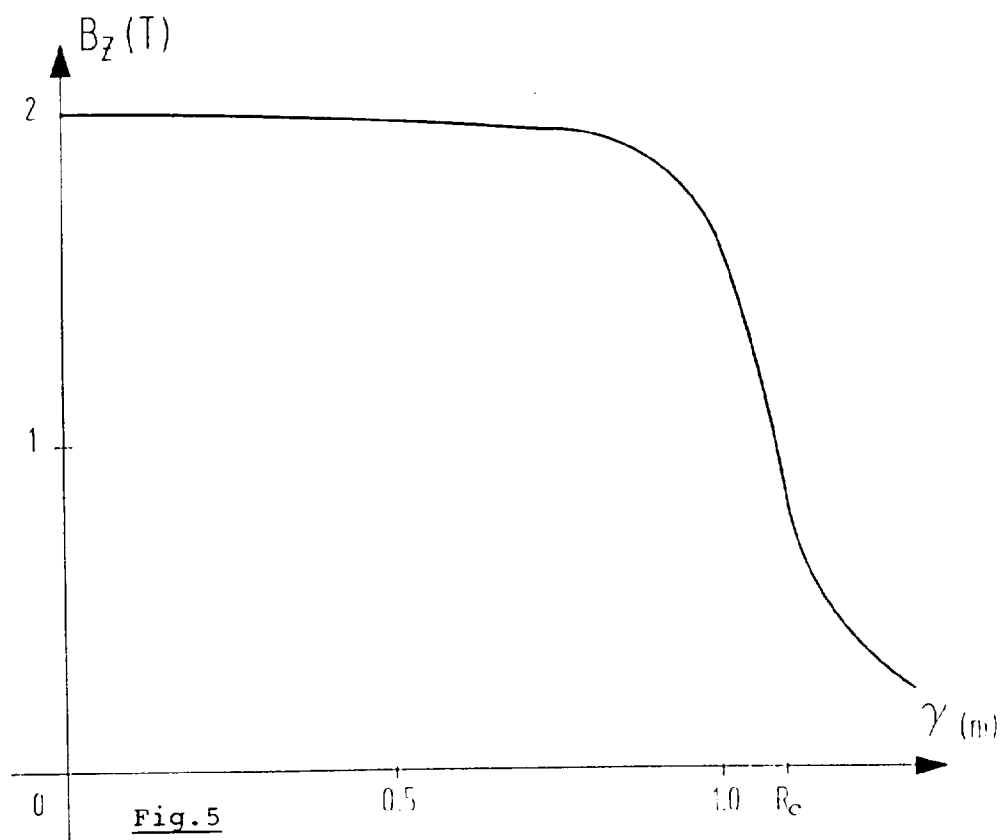


Fig. 5

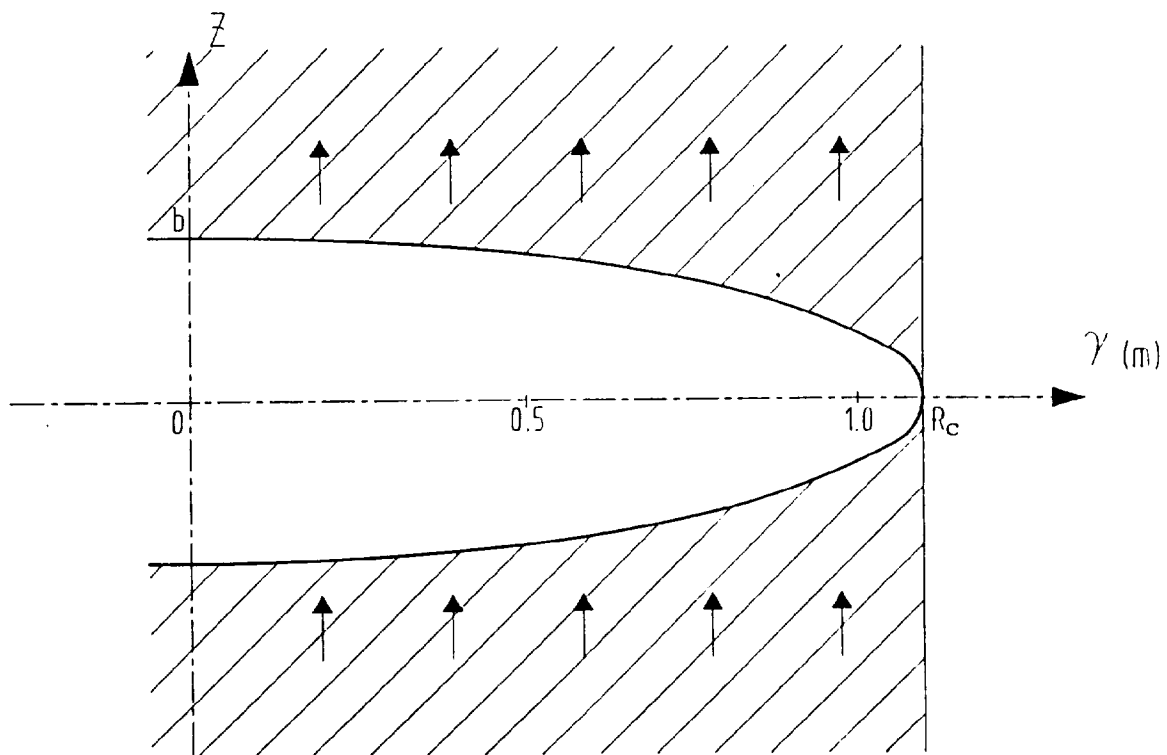


Fig. 6

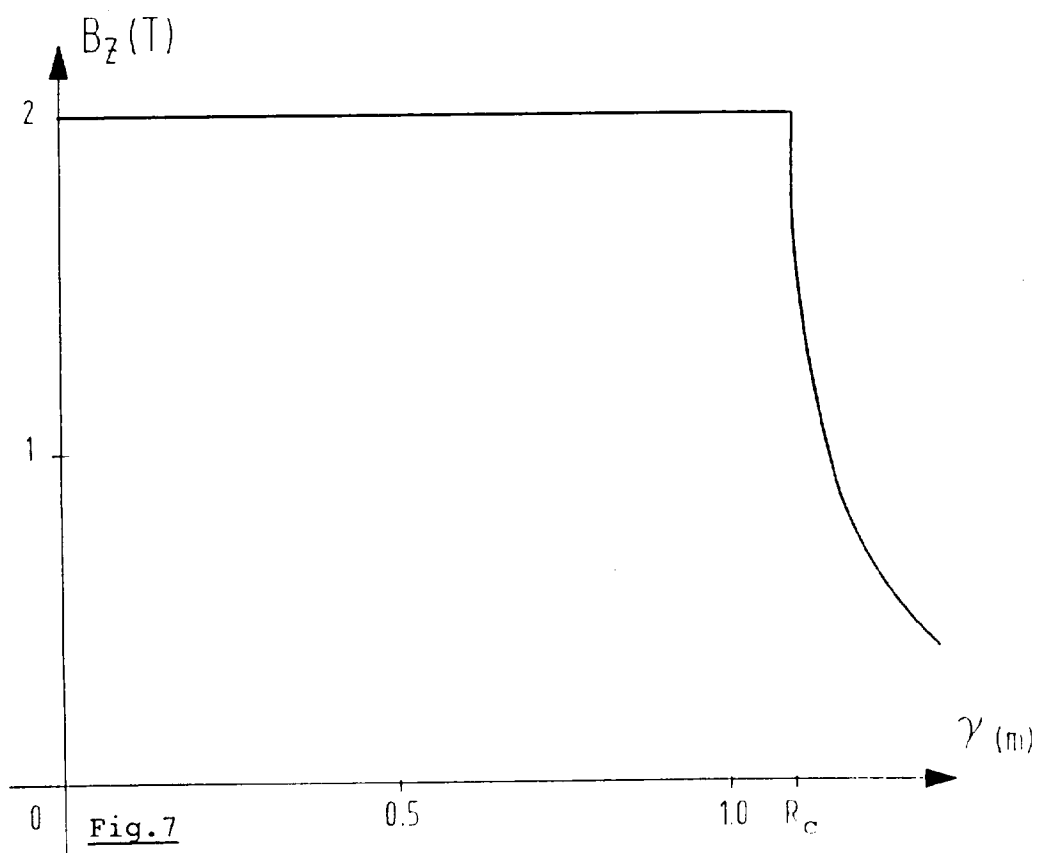


Fig. 7

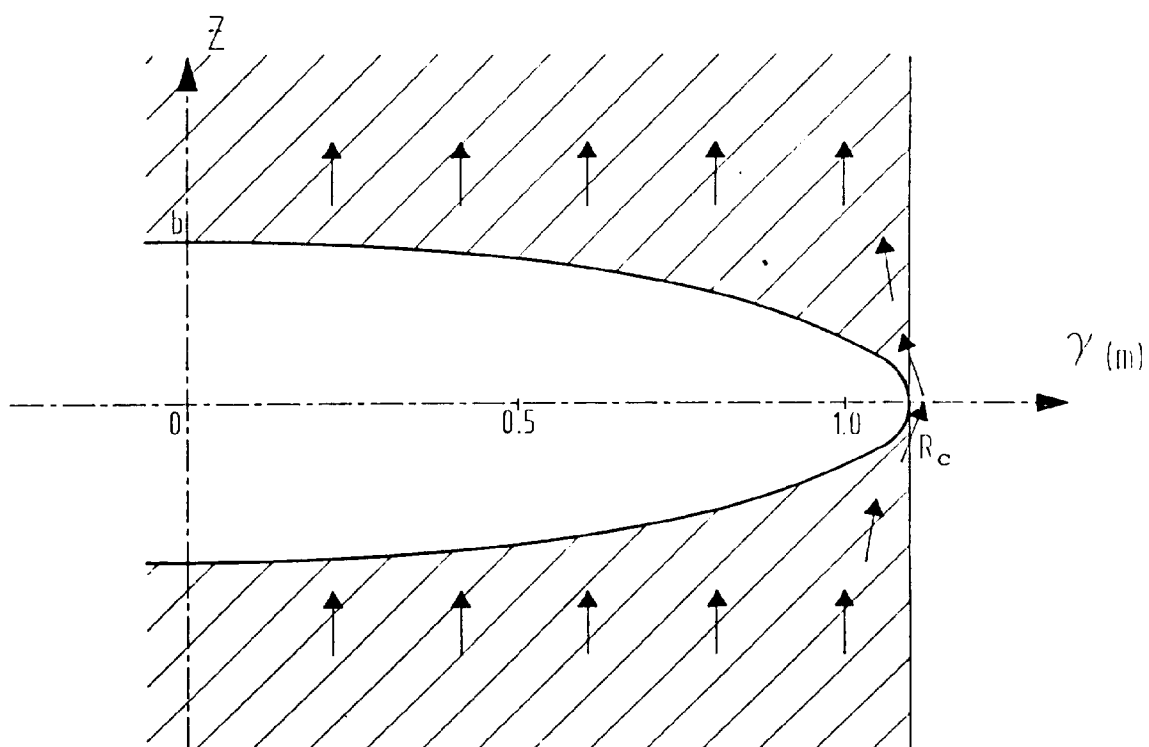


Fig. 8

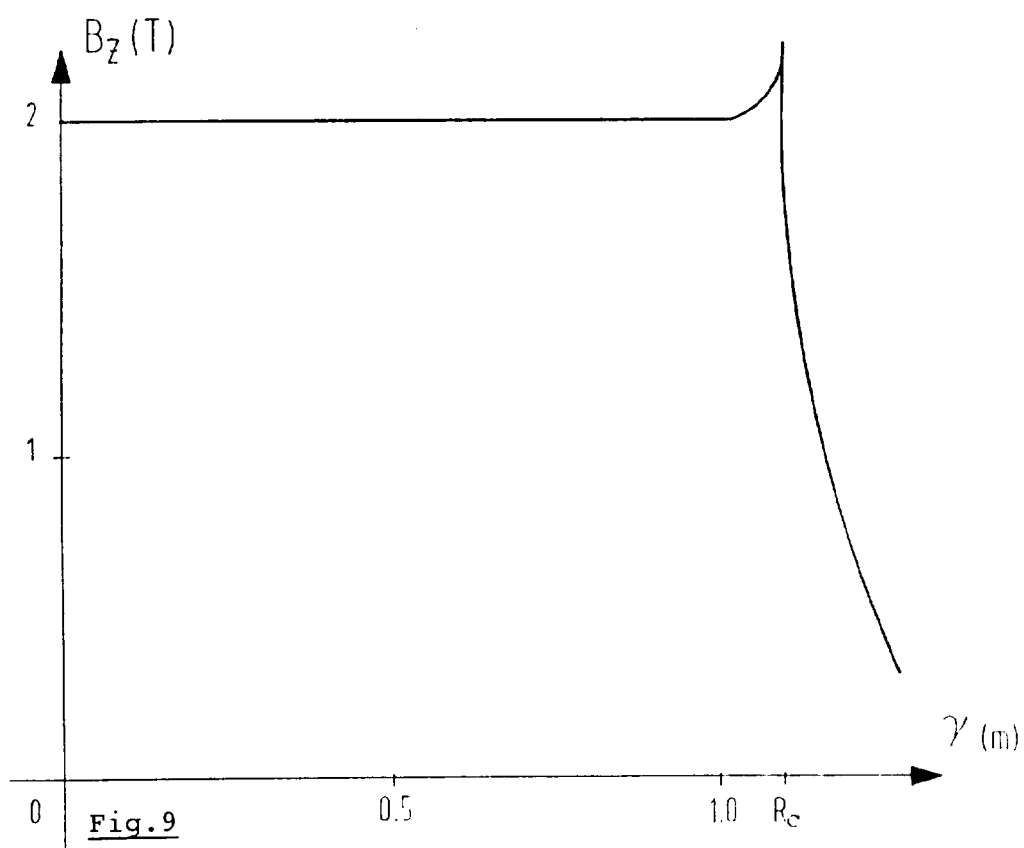


Fig. 9

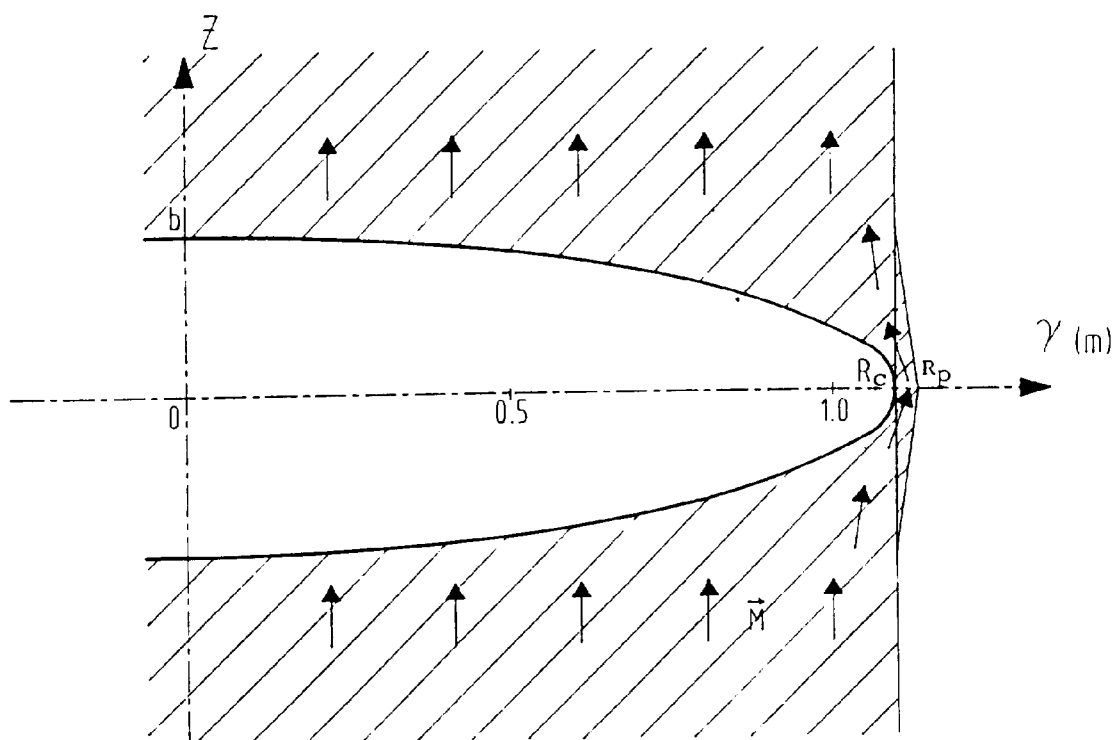


Fig. 10

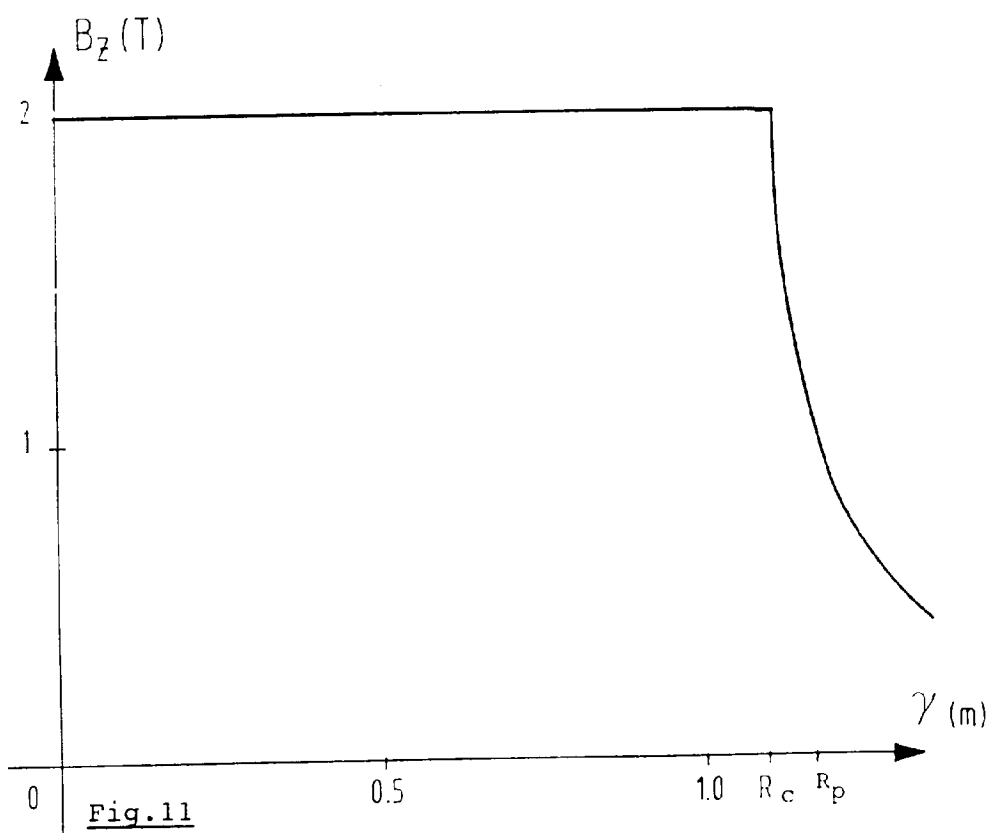


Fig. 11