



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets

⑪ Numéro de publication:

**0 151 078**  
**B1**

⑫

## FASCICULE DE BREVET EUROPÉEN

⑯ Date de publication du fascicule du brevet:  
**27.12.89**

⑮ Int. Cl. 4: **H 01 J 49/32**

⑰ Numéro de dépôt: **85400127.8**

⑲ Date de dépôt: **25.01.85**

④ Spectromètre de masse, à grande clarté, et capable de détection multiple simultanée.

⑩ Priorité: **27.01.84 FR 8401332**

⑪ Date de publication de la demande:  
**07.08.85 Bulletin 85/32**

⑬ Mention de la délivrance du brevet:  
**27.12.89 Bulletin 89/52**

⑭ Etats contractants désignés:  
**DE FR GB IT NL SE**

⑮ Documents cité:  
**GB-A-2 079 039**  
**US-A-3 622 781**

**MASS SPECTROMETRY REVIEWS**, vol. 2, no. 2,  
1983, pages 289-325, John Wiley & Sons Inc.; H.  
MATSDA: "High-resolution high-sensitivity mass  
spectrometers"  
**NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS**, vol. 153,  
no. 2/3, juin 1978, pages 407-414, North-Holland  
Publishing Co., Amsterdam, NL; S. TAYA et al.:  
"Second-order image aberration correction of  
double-focusing mass spectrometers by  
electrostatic hexapole lens"

⑯ Titulaire: **OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE  
RECHERCHES AEROSPATIALES(O.N.E.R.A.), 29,  
avenue de la Division Leclerc, F-92320 Chatillon  
(Hauts de Seine) (FR)**  
Titulaire: **UNIVERSITE DE PARIS- SUD, 15, rue  
Georges Clémenceau, F-91405 Orsay (FR)**

⑰ Inventeur: **Slodzian, Georges, 15, rue Berlioz,  
F-92330 Sceaux (FR)**  
Inventeur: **Costa de Beauregard, François, 17 rue  
des Belles Feuilles, F-75016 Paris (FR)**  
Inventeur: **Daigne, Bernard, 47, Chemin de la  
Vallée aux Loups, F-92290 Chatenay Malabry (FR)**  
Inventeur: **Girard, François, 18, rue Ferrus, F-75014  
Paris (FR)**

⑱ Mandataire: **Plaçais, Jean- Yves, Cabinet Nettier  
40, rue Vignon, F-75009 Paris (FR)**

**EP 0 151 078 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

L'invention concerne un séparateur de particules chargées, ou spectromètre de masse, à grande clarté, pour l'identification et la mesure simultanée de plusieurs éléments.

Le spectromètre est destiné à recevoir un faisceau de particules chargées ou ions, composé par des particules de différentes masses ( $M = M_1, M_2, M_3$ , etc.), animées par des énergies cinétiques légèrement différentes. On notera  $V$ (eV) leur énergie cinétique moyenne et  $\pm \Delta V$  la dispersion énergétique correspondante.

Un spectromètre de masse comporte généralement une fente d'entrée, après laquelle le faisceau passe dans un secteur électrostatique, puis dans un secteur magnétique. Cette disposition a pour but de dévier les particules, d'une manière sélective quant à leur masse et autant que possible indépendamment de leur énergie. La déviation intervient dans un plan dit radial qui est le plan de symétrie de l'instrument et qui est perpendiculaire à la grande dimension de la fente d'entrée.

Le faisceau de particules présente donc une composante radiale, et une composante perpendiculaire, dans ce qu'on appelle la section verticale.

Il est connu d'utiliser un secteur magnétique qui possède une face d'entrée et une face de sortie planes, et dans lequel la face d'entrée est inclinée sur l'axe du faisceau de particules, tandis que le plan de la face de sortie passe par l'intersection de cette face d'entrée avec l'axe du faisceau de particules. Dans ces conditions, l'angle de déviation des particules dans le secteur magnétique ne dépend pas de la masse des particules chargées, ce qui introduit une simplification. Le rayon de courbure des trajectoires dépend de la masse des particules.

La qualité d'un spectromètre de masse se définit par son pouvoir séparateur  $M/\Delta M$ , où  $\Delta M$  est la plus petite différence de masse que l'on peut distinguer avec l'instrument. Dans un spectromètre dont l'optique serait parfaite (le mot "optique" est utilisé ici au sens large), ce pouvoir séparateur ne dépendrait que des dimensions de la fente d'entrée. Dans la réalité, les images de la fente d'entrée, ou raies, sont déformées par les défauts optiques de l'appareil, dits aberrations. Ces aberrations dépendent principalement de la dispersion énergétique  $\Delta V$  des ions, et de l'ouverture du faisceau qui est limité par la fente d'ouverture que l'on insère la plupart du temps avant le secteur magnétique.

Pour un pouvoir séparateur donné, le meilleur spectromètre est le plus sensible, c'est-à-dire celui qui accepte le faisceau dont l'étendue géométrique est la plus grande. Cette aptitude est appelée "clarté" du spectromètre. Cependant, pour une géométrie donnée du spectromètre, on ne peut augmenter la clarté qu'en réduisant l'effet néfaste des aberrations.

Enfin, lorsque l'on veut faire des mesures simultanées sur toutes les raies du spectre (toutes

les masses), la correction ou l'élimination des aberrations est beaucoup plus délicate.

Le problème est donc de réaliser un spectromètre de masse à grande clarté, capable de détection multiple simultanée et qui possède un pouvoir séparateur élevé.

A cet effet, un premier but de la présente invention est de corriger les aberrations propres du spectromètre, en particulier de son secteur magnétique, et aussi de son secteur électrostatique.

Un second but de la présente invention est, à l'aide d'une optique de transfert placée en amont du spectromètre de masse proprement dit, d'améliorer l'adaptation et le transfert du faisceau d'ions sur l'entrée du spectromètre.

Ces buts sont atteints par différents aspects de l'invention, dont certains sont intéressants en eux-mêmes.

De manière connue, le dispositif ici proposé comprend une fente d'entrée, suivie d'un secteur électrostatique, puis d'un secteur magnétique. Une fente d'ouverture peut être insérée entre les secteurs électrostatique et magnétique ou, d'une manière classique, à l'entrée du secteur électrostatique. Cet ensemble permet de dévier un faisceau de particules dans le plan radial perpendiculaire à la grande dimension de la fente d'entrée. Pour ce qui le concerne, le secteur magnétique possède une face d'entrée plane, inclinée sur l'axe du faisceau de particules, et une face de sortie également plane, dont le plan passe par l'intersection de la face d'entrée avec l'axe du faisceau de particules. Il s'agit ici de la disposition des faces magnétiques effectives qui diffèrent des faces matérielles en raison des champs de fuite.

Par ailleurs, il est également connu, dans un contexte particulier, d'interposer un quadrupôle entre les secteurs électrostatique et magnétique (publication H. MATSUDA, MASS SPECTROMETRY REVIEWS, Vol. 2, n° 2 (1983) John Wiley pages 289 à 325). Toutefois, ce quadrupôle fonctionne très différemment de celui que peut utiliser la présente invention.

Enfin, on connaît aussi les spectrographes de masse du type Mattauch-Herzog, dans lesquels l'ouverture d'une part et la largeur de bande d'énergie d'autre part sont délimitées respectivement à l'aide d'un diaphragme d'ouverture et d'un "diaphragme d'énergie" dont les réglages interagissent. Il faut alors réduire les domaines de variation de l'ouverture et de la largeur de la bande d'énergie à des valeurs relativement faibles, si l'on veut que les aberrations du second ordre demeurent négligeables. Il en résulte une faible valeur pour la transmission ou clarté de l'appareil.

Dans le Brevet français publié sous le No 2 056 163 (US-A-3 622 781), il est proposé de transformer un spectrographe de masse du type Mattauch-Herzog, de façon à permettre un réglage indépendant de l'ouverture et de la largeur de bande d'énergie, tout en obtenant une valeur plus élevée pour la clarté de l'appareil.

Le moyen préconisé par ce Brevet français antérieur consiste à disposer une première lentille

électrique (18) entre la fente d'entrée (10) et le diaphragme d'énergie (20) et une seconde lentille électrique (22) entre le diaphragme d'énergie (20) et le secteur magnétique (24). Le Brevet précise le rôle de ces lentilles, en relation avec le diaphragme d'ouverture et le diaphragme d'énergie réglable.

Dans un exemple de réalisation que donne ce Brevet français antérieur (page 8), la face d'entrée du secteur magnétique (24) est inclinée d'un angle  $\varepsilon$  qui se trouve être égal à  $26,6^\circ$ . Cet usage d'une face d'entrée inclinée, bien connu par ailleurs, permet de définir un point focal qui se trouve à une distance de deux fois le rayon dans la direction perpendiculaire au plan de symétrie de l'appareil. Le plan (26) de focalisation est décalé en arrière du champ magnétique, d'un angle  $\omega$  qui est ici égal à  $8,1^\circ$ .

La valeur de  $26,6^\circ$  pour l'angle  $\varepsilon$  correspond à une déviation standard dé  $90^\circ$  de l'aimant. Bien entendu, une valeur différente de l'angle de déviation donne une autre valeur pour l'angle  $\varepsilon$  du Brevet français antérieur.

Il se trouve que cette valeur de  $26,6^\circ$  est proche de celle que va retenir la présente invention, pour d'autres raisons, et avec un secteur magnétique recevant un faisceau de particules qui est parallèle dans le plan radial.

Cependant, dans le Brevet français antérieur No 2 056 163, il existe une focalisation "dans l'autre sens": alors que dans un spectrographe de masse normal les particules qui montent sont perdues, dans le Brevet antérieur les lentilles les ramènent en empêchant le faisceau de s'écartier. Il apparaît donc ainsi que l'inclinaison de la face d'entrée du spectrographe est utilisée dans le Brevet antérieur pour resserrer le faisceau, et non pour corriger les aberrations, comme le fera la présente invention.

Selon une première caractéristique de la présente invention, le spectromètre comporte des moyens tels qu'un quadrupôle ayant un foyer objet au niveau de l'image réelle que donne le secteur électrostatique de la fente d'entrée dans le plan radial, pour fournir au secteur magnétique un faisceau de particules qui est parallèle au moins dans le plan radial, et qui présente, en outre, pour chaque énergie de la bande  $\pm \Delta V$ , l'inclinaison appropriée pour que le secteur magnétique ait un fonctionnement achromatique au niveau de toutes les raies du spectre de masse. De plus,  $\varepsilon$  notant l'angle de la face d'entrée avec la normale à l'axe du faisceau qui est située du côté de la déviation de celui-ci, et  $\theta$  notant l'angle de déviation du faisceau dans le secteur magnétique, ces deux angles satisfont la relation:

$$\operatorname{tg} \theta/2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \varepsilon) = 2$$

Ceci permet d'annuler les aberrations d'ouverture du second ordre créées par le secteur magnétique pour les trajectoires du faisceau situées dans le plan radial (aberrations en  $a^2$ , où  $a$  est l'inclinaison d'une trajectoire dans le plan radial par rapport à la trajectoire centrale). Bien entendu,

l'annulation de ces aberrations intervient aussi pour la composante radiale des trajectoires qui possèdent aussi une composante verticale. Les trajectoires dans la section verticale (ou les composantes, dans la section verticale de trajectoires quelconques) produisent également des aberrations d'ouverture du second ordre dans le plan radial (aberrations en  $b^2$ , où  $b$  est l'inclinaison d'une trajectoire par rapport au plan radial).

Une seconde caractéristique de l'invention fait intervenir l'optique de transfert. Celle-ci est disposée en coopération avec le spectromètre proprement dit, de sorte qu'en sa section verticale, le faisceau de particules comporte une striction entre la fente d'entrée et le secteur électrostatique; il est alors prévu, au niveau de cette striction, un premier hexapôle, agencé pour compenser les aberrations d'ouverture du second ordre créées par le secteur électrostatique pour les trajectoires situées dans le plan radial, aberrations en  $a^2$ , et pour la composante radiale des autres trajectoires. L'emplacement choisi pour l'hexapôle fait que ce dernier n'introduit pas d'aberrations en  $b^2$  venant de l'ouverture dans la section verticale.

Les aberrations d'ouverture du second ordre liées au secteur électrostatique sont déterminables, ce secteur étant par exemple de type sphérique.

De préférence, l'optique de transfert est agencée pour appliquer à la fente d'entrée un faisceau de particules qui est sensiblement parallèle en section verticale. Il est prévu une lentille convergente entre la fente d'entrée et le premier hexapôle (cette lentille convergente étant capable de fournir une post-accélération). L'hexapôle est centré sur le point conjugué de la fente d'entrée par ladite lentille convergente, dans la section verticale du faisceau.

Selon un autre aspect de l'invention, l'optique de transfert comporte deux lentilles électrostatiques, coopérant pour produire une striction du faisceau au niveau de la fente d'entrée dans le plan radial. Entre ces deux lentilles électrostatiques est prévue une lentille à fentes agencée de sorte que le faisceau soit parallèle en section verticale au niveau de la fente d'entrée. C'est alors la lentille convergente (de post-accélération), qui assure la convergence du faisceau au point de striction précédent, en section verticale.

Ce qui précède intéresse la correction des aberrations d'ouverture pour les trajectoires situées dans le plan radial, au niveau du secteur magnétique puis du secteur électrostatique. Pour les trajectoires (ou les composantes de trajectoires) dans la section verticale, il n'y a pas correction des aberrations d'ouverture en  $b^2$ . Toutefois, l'optique de transfert est agencée de telle sorte que les angles vus  $b$  par le spectromètre sont toujours très petits, si bien que les aberrations correspondantes en  $b^2$  sont négligeables.

Un autre aspect encore de l'invention intéresse la correction des aberrations chromatiques, c'est-à-dire dans la dispersion énergétique.

Le secteur électrostatique et le secteur magnétique possédant des centres de rotation chro-

matiques virtuels respectifs, le quadrupôle est placé de manière à conjuguer avec un grandissement approprié ces deux centres de rotation chromatique. Le quadrupôle conjugue le centre de rotation chromatique du secteur électrostatique avec le centre de rotation chromatique du secteur magnétique correspondant à un rayon donné, c'est-à-dire, à une masse donnée. Le quadrupôle est en outre disposé de manière à ce que chaque énergie arrive sur le secteur magnétique avec l'inclinaison appropriée; il s'ensuit que la dispersion chromatique est complètement annulée pour la masse considérée après la sortie du secteur magnétique tandis que pour les autres masses la dispersion chromatique s'annule au niveau de leur raie. Cette correction intervient dans la limite de la bande d'énergie  $\pm \Delta V$  définie par les moyens disposés en amont de l'optique de transfert ou par une fente de filtrage placée en P3.

En pratique, le quadrupôle est disposé de manière que son foyer-objet coïncide avec l'image réelle que donne le secteur électrostatique de la fente d'entrée dans le plan radial, ce quadrupôle étant suivi de moyens de compensation de sa divergence dans la section verticale, de sorte que le faisceau de particules soit ensuite parallèle en ses deux dimensions transversales. Les moyens de compensation de la divergence du quadrupôle en section verticale sont avantageusement une lentille à fentes.

Il existe encore des aberrations mixtes d'ouverture et chromatiques. Pour compenser celles-ci, le dispositif comporte un second hexapôle, disposé après le secteur électrostatique et sensiblement centré sur l'image réelle que donne le secteur électrostatique de la fente d'entrée dans le plan radial.

Cette disposition permet la réduction des aberrations mixtes, pour les trajectoires situées dans le plan radial, avec une compensation exacte pour une masse choisie. Pour les autres masses, l'aberration est considérablement réduite.

Le filtrage chromatique, c'est-à-dire en énergie, du faisceau de particules, s'effectue ici en amont de l'optique de transfert. Dans une variante, il s'effectue au niveau de ce second hexapôle. Celui-ci comporte alors deux hexapôles encadrant une fente de filtrage en énergie.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés, sur lesquels:

- la figure 1 est une première vue schématique d'un spectromètre selon la présente invention, présentée comme une coupe dans le plan radial, cette figure comportant deux faisceaux parallèles arrivant avec des incidences différentes sur le secteur magnétique, ces deux faisceaux correspondant à des énergies légèrement différentes  $\pm \Delta V$ ;
- la figure 2A est une vue semblable à la figure 1, mais illustrant la séparation, dans un même faisceau monoénergétique, de particules pos-

sédatant deux masses différentes;

- la figure 2B est une vue partielle illustrant, en section verticale, la forme du faisceau en amont du secteur électrostatique SE 23 de la figure 2A;
- la figure 2C est une vue illustrant, encore en section verticale, la forme du faisceau en aval du secteur électrostatique SE 23; et
- la figure 2D est une vue en section verticale illustrant la forme du faisceau dans la direction que celui-ci présente en sortie du secteur magnétique SM 30;
- les figures 3A et 3B sont des vues agrandies correspondant aux figures 2A et 2B;
- les figures 4, 4A et 4B illustrent plus précisément un 5 exemple particulier de réalisation du spectromètre de l'invention;
- les figures 5A et 5B illustrent, dans cet exemple, le fonctionnement avec post-accélération; et
- les figures 6A et 6B illustrent, dans le même exemple, le fonctionnement sans post-accélération.

25 Comme précédemment indiqué, la présente invention concerne 15 un séparateur de particules chargées, ou spectromètre de masse, à détection multiple simultanée et à grande clarté.

Par opposition aux spectrographes de masse, qui utilisent comme détecteur final une plaque photographique, les spectromètres de masse n'ont pas nécessairement besoin que leur zone de détection, la surface focale de sortie du secteur magnétique, soit un plan.

Il en est cependant ainsi dans le spectromètre de l'invention, 25 que l'on décrira tout d'abord d'une manière générale en référence aux figures 1 et 2.

Le spectromètre comporte à son entrée une optique de transfert 1. La nature de celle-ci peut dépendre des caractéristiques du faisceau de particules appliquées à l'entrée ou "point-source" S. L'optique de transfert 1 se termine au niveau d'une fente d'entrée FE 20, qui constitue l'entrée du spectromètre de masse proprement dit.

De manière connue, le spectromètre comporte, derrière la fente d'entrée FE 20, un secteur électrostatique SE 23, puis un secteur magnétique SM 30, en amont duquel est prévue une fente d'ouverture FO 29. Cet ensemble de moyens a pour fonction de dévier le faisceau de particules dans un plan radial perpendiculaire à la grande dimension de la fente d'entrée FE 20. Le plan radial est celui des figures 1 et 2A.

On sait que l'organe principal d'un spectromètre de masse est son secteur magnétique, dont l'action dispersive dépend à la fois de la masse et de l'énergie de chaque particule; cette action dispersive se manifeste par des trajectoires en arc de cercle, dont le rayon est plus ou moins grand selon la masse et l'énergie. Il est connu d'associer à un tel secteur magnétique un secteur électrostatique qui le précède, et qui possède de son côté une action dispersive mais uniquement en fonction de l'énergie des particules. Les deux

secteurs sont combinés de telle sorte que l'action dispersive du secteur électrostatique compense l'action dispersive en énergie du secteur magnétique. Il ne reste alors en principe, en sortie du secteur magnétique, que l'action dispersive en fonction de la masse.

Par ailleurs, et bien que cela ne soit pas classique, la publication Matsuda déjà citée montre l'utilisation d'un quadrupôle entre le secteur électrostatique et le secteur magnétique. Cela est donc également considéré comme connu, étant observé que le quadrupôle de Matsuda n'a pas du tout la même fonction que celui de la présente invention.

Enfin, il est également connu de faire en sorte que le secteur magnétique SM 30 possède une face d'entrée plane 31, inclinée sur l'axe du faisceau de particules, et une face de sortie 32 également plane, dont le plan passe par l'intersection 33 de la face d'entrée 31 avec l'axe du faisceau de particules. Cette disposition présente l'avantage de fournir le même angle de déviation quelle que soit la masse. L'angle de déviation est égal au double de l'angle de la face de sortie 32 avec l'axe du faisceau des particules à l'entrée du secteur magnétique SM 30. Il en résulte encore que, pour un faisceau parallèle à l'entrée, la focalisation des particules en sortie du secteur magnétique s'effectue dans un plan PF 35 qui passe lui aussi par le point 33.

Pour obtenir un spectromètre à détection multiple et à grande clarté, en même temps qu'à grand pouvoir séparateur (ou excellente résolution), il est nécessaire de compenser différentes aberrations que présentent les éléments du spectromètre, pris séparément ou dans leurs combinaisons.

Une première aberration est connue sous le nom d'aberration d'ouverture du second ordre du secteur magnétique. En bref, ce type d'aberration réside en ce que deux trajectoires symétriques par rapport à la trajectoire centrale à l'entrée du secteur magnétique se couperont après le secteur en un point situé hors de cette trajectoire centrale; le décalage entre le point d'intersection et la trajectoire centrale est proportionnel au carré de l'inclinaison angulaire  $\alpha$  de chacune des trajectoires sécantes par rapport à la trajectoire centrale (d'où le second ordre en  $\alpha^2$ ).

Un premier aspect de l'invention consiste à corriger ce type d'aberration d'ouverture du second ordre, au niveau du secteur magnétique lui-même. On désigne par 34 la normale à l'axe du faisceau de particules qui est située du côté de la concavité qui sera imprimée au faisceau par le secteur magnétique SM 30. On note par  $\epsilon$  l'angle que forme la face d'entrée 31 du secteur magnétique SM 30 avec cette normale 34. On note par  $\theta$  l'angle de déviation du faisceau dans le secteur magnétique SM 30. De manière tout à fait inattendue, il a été observé par les inventeurs que les aberrations d'ouverture du second ordre créées par le secteur magnétique, pour les trajectoires situées dans le plan radial, sont annulées lorsque ces deux angles satisfont la relation suivante:

$$\operatorname{tg} \theta/2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \epsilon) = 2$$

La présente invention concerne un spectromètre de masse à très grande clarté, c'est-à-dire un appareil acceptant les faisceaux dont l'étendue géométrique est la plus grande, et à détection simultanée, ce qui rend la correction des aberrations très délicate.

L'invention préconise une inclinaison appropriée de la face d'entrée du secteur magnétique, pour que celui-ci ait un fonctionnement dépourvu d'aberrations d'ouverture du second ordre pour toutes les masses - toutes les trajectoires du faisceau situées dans le plan radial - sous réserve bien sûr qu'elles aient été préalablement corrigées les aberrations d'ouverture du secteur électrostatique.

L'inclinaison  $\epsilon$  de la face d'entrée est, en fonction de l'angle de déviation  $\theta$  du secteur magnétique, donnée par la relation précitée:

$$\operatorname{tg} \theta/2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \epsilon) = 2$$

Pour une déviation de  $90^\circ$  dans le secteur magnétique SM, on aboutit à  $\operatorname{tg} \epsilon = 1/2$  soit  $\epsilon = 26,56^\circ$ .

Cette relation a été établie à partir des travaux des Demandeurs, sur la base des coefficients d'aberrations qui se manifestent dans les secteurs magnétiques pour de nombreuses configurations. En combinant certains de ces coefficients d'aberrations, on a pu trouver la relation ci-dessus, pour laquelle sont corrigées les aberrations d'ouverture du second ordre du secteur magnétique. C'est le point principal, qui permet de corriger ces aberrations quelle que soit l'étendue géométrique du faisceau, ce qui est indispensable dès lors que la présente invention vise à collecter un faisceau aussi large que possible.

Il demeure bien entendu l'effet secondaire que l'inclinaison de la face d'entrée dégage le plan de focalisation (PF 35) du champ magnétique de l'aimant, chose antérieurement connue.

Il a été observé que le Brevet français No 2 056 163 déjà cité fait apparaître un secteur magnétique dont la face d'entrée est inclinée de  $26,6^\circ$  pour un angle de déviation de  $90^\circ$ . Toutefois, ce Brevet antérieur utilise cette disposition dans un contexte différent, et par conséquent il n'enseigne nullement à l'homme de l'art que la relation précitée puisse être utilisée pour effectuer une correction des aberrations dans le secteur magnétique. Par contre, l'utilisation de cette même relation selon la présente invention produit une correction des aberrations d'ouverture de l'aimant pour les trajectoires situées dans le plan radial, de sorte qu'il ne reste que les aberrations introduites par le secteur électrostatique, que l'on peut corriger à l'aide d'un hexapôle (HP22) situé en amont.

L'homme de l'art comprendra que cette correction des aberrations d'ouverture du second ordre liées au secteur magnétique lui-même est très importante, et qu'elle peut naturellement servir dans d'autres spectromètres que celui décrit

en détail ici.

Le faisceau de particules disponible en sortie du secteur électrostatique SE 23 présente une striction en un point P3 (figure 2A). Afin de tirer le meilleur parti de la première correction, des moyens sont prévus en aval de ce point P3 pour faire en sorte que le secteur magnétique SM 30 reçoive un faisceau de particules qui est parallèle dans le plan radial.

Ceci peut être réalisé à l'aide d'un ou plusieurs quadrupôles tels que QP 26, interposés entre le secteur électrostatique SE 23 et le secteur magnétique SM 30. Une façon de faire consiste à agencer le quadrupôle unique QP 26 de manière que son foyer-objet coïncide avec le point de striction P3. Comme indiqué précédemment, la position du quadrupôle QP 26 est déterminée de manière que l'inclinaison de chacun des faisceaux parallèles correspondant aux diverses énergies soit appropriées pour donner un fonctionnement achromatique au niveau des raies situées dans le plan PF 35 et cela simultanément pour toutes les masses. Cette propriété est illustrée sur la figure 1 qui montre que deux faisceaux parallèles correspondant aux énergies  $V \pm \Delta V$ , focalisent en un même point du plan PF 35; l'ordonnée est dilatée pour rendre la figure lisible. Comme on le verra plus loin, ce point P3 est l'image réelle que donne le secteur électrostatique SE 23 de la fente d'entrée FE 20 dans le plan radial. Ainsi, la figure 2A fait apparaître dans le plan radial un faisceau parallèle en sortie du quadrupôle QP 26.

La figure 2C montre que le quadrupôle QP 26 possède au contraire une action divergente en section verticale. Cette action divergente est à son tour compensée par une lentille électrostatique à fentes LF 27. En sortie de celle-ci, on retrouve donc aussi un faisceau parallèle, qui traverse exactement la petite dimension de la fente d'ouverture FO 29.

Si maintenant on examine à nouveau la figure 2A, il apparaît que le faisceau parallèle (représenté unique et, pour simplifier la figure, comme correspondant à l'énergie moyenne du faisceau) fourni par le quadrupôle QP 26 dans le plan radial traverse sans modification la lentille à fentes LF 27, pour passer à l'intérieur de la grande dimension de la fente d'ouverture FO 29. La comparaison avec la figure 1 montre que cette grande dimension de la fente d'ouverture FO 29 permet le passage des faisceaux parallèles d'inclinaisons chromatiques diverses issus du quadrupôle QP 26, compte tenu de la dispersion énergétique existant entre le secteur électrostatique SE 23 et le secteur magnétique SM 30.

Des dispositions qui précédent, il résulte finalement que le faisceau de particules est parallèle en ses deux dimensions transversales, en aval de la lentille à fentes LF 27, jusqu'à ce qu'il soit appliqué à la face d'entrée 31 du secteur magnétique SM 30.

On sait que le secteur électrostatique SE 23 et le secteur magnétique SM 30 possèdent chacun un centre de rotation chromatique virtuel

respectif. (L'adjectif "chromatique" est utilisé ici en relation à la dispersion d'énergie). Les particules suivant la trajectoire centrale avant leur entrée dans le secteur électrostatique et présentant une énergie légèrement différente de l'énergie nominale du faisceau sortiront du secteur électrostatique SE 23 avec des trajectoires inclinées. Lorsque l'énergie varie, ces trajectoires inclinées paraissent tourner autour d'un point qui est nommé centre de rotation chromatique.

De manière analogue, le secteur magnétique SM 30 possède un centre de rotation chromatique, vers lequel doivent converger avec l'angle approprié des particules présentant des énergies voisines et la même masse pour qu'elles aboutissent après déviation, au même point du plan focal PF 35 et avec le même angle (trajectoires confondues) quelle que soit l'énergie dans la bande  $\pm \Delta V$ . On obtient alors une compensation complète (au premier ordre) de la dispersion énergétique du prisme magnétique. On notera qu'il y a autant de centres de rotation chromatique qu'il y a de masses considérées.

Toutefois, si, à l'entrée du secteur SM 30, l'inclinaison des trajectoires est simplement proportionnelle à l'écart  $\Delta V$  avec un facteur approprié, le même pour toutes les masses, elles seront quand même convergentes au même point du plan focal PF 35, pour une masse donnée, mais les trajectoires d'énergies différentes n'auront plus la même inclinaison.

Selon une autre caractéristique de l'invention, des moyens sont prévus pour conjuguer les deux centres de rotation chromatiques respectifs du secteur électrostatique SE 23 et du secteur magnétique SM 30. Le quadrupôle QP 26 peut le faire d'une manière très simple avec un grandissement approprié. Ceci permet une correction complète de la dispersion chromatique ou énergétique du faisceau de particules pour une masse, le quadrupôle étant en outre disposé pour fournir pour les autres masses, des trajectoires d'énergies différentes avec l'inclinaison appropriée.

On examinera maintenant la correction des aberrations d'ouverture du second ordre qui se produisent au niveau du secteur électrostatique SE 23. Cette correction fait intervenir essentiellement un premier hexapôle HP 22. Toutefois, ce premier hexapôle HP 22 intervenant aussi en étroite combinaison avec les éléments du spectromètre 2 proprement dit ainsi que de son optique de transfert 1, il convient de décrire maintenant l'ensemble du spectromètre.

Il sera tout d'abord fait référence aux figures 1, 2A, 2B, 3A et 3B pour la description de l'optique de transfert ainsi que de l'entrée du spectromètre 2.

Le faisceau de particules chargées appliqué à l'entrée de l'optique de transfert 1 se présente avec une striction au point S. Ce faisceau d'ions est composé de particules de différentes masses, qui sont animées par des énergies cinétiques légèrement différentes. On note comme précédemment  $V$  leur énergie cinétique moyenne, qui s'ex-

prime en électronvolts, et  $\pm \Delta V$  la dispersion énergétique.

Le faisceau présente en principe une symétrie de révolution au point S. Un tel faisceau peut être constitué par des ions secondaires émis par un échantillon soumis à un faisceau d'ions primaire concentré à sa surface.

Une première lentille électrostatique unipotentielle LE 11 donne une image du point de source S en un point S1. Autour de ce point peuvent être prévues des plaques PC 12 permettant le recouvrement éventuel du faisceau sur l'axe optique.

Après la première lentille LE 11, et éventuellement les plaques de centrage PC 12, est prévue une lentille à fentes LF 13.

Les figures 2A et 3A montrent que cette lentille à fentes n'a aucun effet sur les trajectoires d'ions situées dans le plan radial. Par contre, en section verticale (figures 2B et 3B), la lentille à fentes LF 13 fait converger ces trajectoires en un point de striction S2.

Une seconde lentille électrostatique LE 14 est placée après la lentille à fentes LF 13.

Dans le plan radial (figures 2A et 3A), la lentille LE 14 donne des points S et S1 une image P située au niveau de la fente d'entrée FE 20 et centrée sur l'axe de celle-ci.

Dans la section verticale (figures 2B et 3B), la lentille LE 14 est placée de façon que son foyer soit sensiblement au point S2, cette lentille fournit donc des rayons ou trajectoires sensiblement parallèles se déployant le long de la fente d'entrée FE 20, selon sa grande dimension (figure 3B).

De cette manière, le grandissement au niveau de la fente d'entrée FE 20 dans le plan radial est obtenu en jouant sur le potentiel d'excitation des lentilles électrostatiques LE 11 et LE 14.

Pour les trajectoires situées dans le plan vertical (figures 2B et 3B), un réglage indépendant est obtenu grâce à la lentille à fentes LF 13.

A l'entrée du spectromètre 2 proprement dit, et derrière la fente d'entrée FE 20, sont prévues d'une part une lentille électrostatique convergente notée PA 21, qui permet une post-accélération commandée, et ensuite un premier hexapôle HP 22.

La lentille PA 21 agit, dans la section verticale du faisceau de particules, pour produire une striction de celui-ci en un point situé en amont du secteur électrostatique SE 23. Le premier hexapôle HP 22 est centré au niveau de cette striction.

Cet hexapôle HP 22 est agencé pour compenser les aberrations d'ouverture du second ordre créées par le secteur électrostatique SE 23 pour les trajectoires situées dans le plan radial. Au premier ordre, il n'a aucune action, et ne modifie donc pas les trajectoires situées en section verticale. Par ailleurs, comme il a été déjà indiqué, l'hexapôle n'introduit pas d'aberrations du type  $b^2$  sur les trajectoires dans la section verticale grâce au fait que la striction du faisceau dans cette section se trouve au centre de l'hexapôle.

La lentille de post-accélération PA 21 joue un

autre rôle. Ce rôle consiste à modifier l'angle d'ouverture pour le spectromètre 2 proprement dit. Corrélativement, vue pour le reste du spectromètre, la striction que produit l'optique de transfert en P au niveau de la fente d'entrée dans le plan radial, est reportée en P1 par la lentille de post-accélération PA 21. Ceci permet d'augmenter la clarté du spectromètre après suppression ou correction des aberrations les plus importantes. La post-accélération amène les ions de l'énergie V à l'énergie Vp.

En pratique, le plan principal-objet de la lentille de post-accélération PA 21 est situé dans le plan de la fente d'entrée FE 20, de sorte que le spectromètre voit une fente d'entrée située en P1, dans le plan principal image de la lentille PA 21. Pour le spectromètre, la dimension de l'image gaussienne n'a pas changé. Pour un pouvoir séparateur donné, seul l'angle d'ouverture disponible à l'entrée augmente.

Comme précédemment indiqué, le spectromètre est agencé pour que le foyer image de la lentille de post-accélération PA 21 se trouve au centre de l'hexapôle HP 22, au point P2.

La post-accélération permet, de plus, de réduire la dispersion énergétique relative de  $\Delta V/V$  à  $\Delta V/Vp$ , ce qui entraîne une diminution des aberrations mixtes et des aberrations en  $(\Delta V/Vp)^2$ .

Pour des raisons de commodité, Les Demanderesses ont choisi le rapport  $V/Vp$  de l'ordre de un quart, ce qui implique, pour des ions négatifs d'énergie incidente de  $\pm 5$  kV, de mettre tous les conducteurs constituant le spectromètre et situés en aval de la lentille de post-accélération PA 21 à une tension de  $\pm 15$  kV.

Ensuite, le spectromètre comporte un second hexapôle (HP 25), disposé après le secteur électrostatique (SE 23), et centré sur l'image réelle que donne le secteur électrostatique (SE 23) de la fente (FE 20) dans le plan radial. Ceci permet la réduction des aberrations mixtes d'ouverture et chromatique pour les trajectoires situées dans le plan radial, avec compensation exacte pour une masse choisie. Le fait que HP 25 soit centré sur P3 permet d'effectuer la correction des aberrations mixtes sans avoir à retoucher le réglage de l'hexapôle HP 22 qui corrige les aberrations d'ouverture (indépendance des réglages).

Dans le mode de réalisation décrit, le filtrage en énergie s'effectue en amont de l'optique de transfert.

Dans une variante, il s'effectue au niveau du second hexapôle HP 25. Celui-ci comporte alors deux hexapôles encadrant une fente de filtrage en énergie (non représentés).

Après le second hexapôle HP 25, on retrouve le quadrupôle QP 26, la lentille à fentes LF 27, la fente d'ouverture FO 29, et enfin le secteur magnétique SM 30.

Les figures 1, 2A, 2C, 2D font apparaître certains détails 20 de la structure du secteur magnétique. Celui-ci comporte un aimant, non représenté, qui coopère avec deux pièces polaires 32A et 32B, dont la forme est donnée par les vues illustrées dans le plan radial.

Indépendamment de l'obtention des différentes corrections déjà décrites, l'invention permet de faciliter considérablement ces corrections, en les effectuant par des réglages qui ne nécessitent pas de déplacement des composants du spectromètre, et qui sont rendus autant que possible indépendants les uns des autres.

A cet effet, le montage et le réglage du spectromètre s'effectuent comme suit:

- Sont implantés tout d'abord le secteur électrostatique SE 23, qui est de type sphérique, ainsi que le secteur magnétique SM 30.
- Le quadrupôle QP 26 est alors mis en place, pour respecter a priori la condition d'inclinaison appropriée des trajectoires chromatiques et la condition de parallélisme du faisceau entrant dans le secteur magnétique. La lentille à fentes LF 27 est ensuite mise en place, de manière à corriger la divergence du quadrupôle QP 26 dans la section verticale. La fente d'ouverture FO 29 est elle aussi mise en place, de même que le second hexapôle HP 25, lequel est placé au foyer du quadrupôle QP 26. On notera au passage que la structure en section droite des hexapôles HP 22 et HP 25 est illustrée sur la figure 4A, tandis que celle du quadrupôle QP 26 est illustrée sur la figure 4B.
- En amont du secteur électrostatique SE 23, sont implantés 15 (en remontant le faisceau) l'hexapôle HP 22, centré sur un point choisi à l'avance comme foyer en section verticale, la lentille de post-accélération PA 21, la fente d'entrée FE 20, la seconde lentille électrostatique LE 14, la lentille à fentes LF 13, les plaques de centrage PC 12, et enfin la première lentille électrostatique unipotentielle LE 11.

Tous les éléments peuvent ainsi être placés dans des positions fixes prédéterminées, qui n'auront pas à être modifiées par la suite.

Des réglages additionnels sont alors effectués comme suit :

- Le quadrupôle QP 26 est réglé de façon à donner une inclinaison appropriée aux trajectoires dispersées en énergie issues du secteur électrostatique SE 23.
- La lentille de post-accélération et ses annexes sont réglés de manière à amener le point de striction P3 au foyer du quadrupôle QP 26 et par conséquent au centre de l'hexapôle HP 25; ce réglage assure le parallélisme dans le plan radial du faisceau issu de QP 26 et permet de compenser d'éventuels défauts de position du quadrupôle QP 26.
- La lentille à fentes LF 13 de l'optique de transfert est réglée pour amener le point de striction P2 au centre du premier hexapôle HP 22.

L'homme de l'art comprendra que l'appareil se trouve ainsi entièrement réglé sans qu'il n'y ait

aucune nécessité de démontage pour faire varier les positions relatives des différents constituants.

Il n'y a pas non plus nécessité de réglage au niveau de la collection des particules déviées, en sortie du secteur magnétique SM 30. En effet, les particules des différentes masses arrivent toutes sur un même plan PF 35.

Le séparateur de particules de l'invention permettrait, à la façon d'un spectrographe, d'utiliser une plaque photographique pour la collection des particules déviées, et ayant subi l'analyse en masse.

Selon l'invention, il est estimé préférable de placer dans le plan focal PF 35 une série de dispositifs collecteurs séparés, tels que des multiplicateurs électroniques dont la surface d'entrée sera sensible à l'impact des particules chargées issues du secteur magnétique SM 30.

On décrira maintenant, en faisant essentiellement référence aux figures 4 et suivantes, un exemple particulier de mise en œuvre de l'invention.

## 25 Exemple particulier

### Faisceau d'entrée

Ions négatifs d'énergie moyenne 5 kV, formant un faisceau de révolution qui présente une striction au point S. Le demi-angle au sommet est de l'ordre de  $10^{-2}$  radians pour un pouvoir séparateur  $M/\Delta M$  de l'ordre de 4 000.

### 35 Optique de transfert 1

- Lentille électrostatique LE 11: trois électrodes circulaires, percées d'un trou central de 4 mm de diamètre. L'électrode centrale est portée à un potentiel de - 4670 volts. Les deux autres électrodes, situées de part et d'autre, sont au potentiel de la masse.
- Plaques de centrage PC 12: quatre plaques en acier inoxydable, de surface active 18 x 2 mm, montées pour former un canal carré. La distance entre deux plaques en regard est de 3 mm. Leur centre est placé au niveau d'une striction du faisceau d'ions.
- Lentille à fentes LF 13: trois électrodes comportant des ouvertures rectangulaires dont le grand axe est situé dans le plan radial. Electrode centrale: 6 x 64 mm; les deux autres électrodes: 4 x 30 mm. L'électrode centrale, qui reçoit une tension de - 5 kV, est distante de 66,5 mm de l'axe de la lentille LE 11.
- Lentille électrostatique LE 13: identique à LE 11, sauf électrode centrale portée à - 4310 volts. Cette électrode est située à 36 mm du centre de la lentille à fentes LF 13, et à 30 mm de la fente d'entrée FE 20 située en aval.

**Spectromètre de masse 2**

- Fente d'entrée FE 20: il s'agit d'une ouverture rectangulaire de  $0,024 \times 0,8$  mm (avec post-accélération active), pour une résolution en masse  $M/\Delta M = 4\,000$ . Le grand axe est perpendiculaire au plan radial. La fente est réglable en x et en y.
- Electrode de post-accélération PA 21: disque d'épaisseur 8 mm, percé au diamètre intérieur de 14 mm, et isolé par un cylindre en alumine. Ce disque est porté à + 10 kV en fonctionnement post-accéléré, les éléments aval ayant alors leur référence de tension portée à + 15 kV.
- Hexapôle HP 22: six barres cylindriques de 8 mm de diamètre pour 36 mm de longueur, d'axes régulièrement répartis sur une surface cylindrique de diamètre 24 mm. Différence de potentiel entre barres voisines,  $\pm 36$  volts en alternance. Le centre de l'hexapôle est à 52 mm en aval de l'électrode PC 21 et à 43 mm en amont de la face d'entrée du secteur électrostatique.
- Secteur électrostatique SE 23: angle de déviation 90°. Deux portions de sphère concentriques de rayons 94 et 106 mm. Différence de potentiel appliquée entre l'intérieur et l'extérieur:  $\pm 4819,8$  volts. Fente de garde à l'entrée et à la sortie pour limiter les fuites de champ électrique.
- Hexapôle HP 25: comme H 22, sauf longueur des barres 72 mm, et différence de potentiel  $\pm 1702,5$  volts. Son centre est placé à 77 mm en aval de la face de sortie du secteur électrostatique SE 23.
- Quadrupôle QP 26: quatre barres cylindriques de 24 mm de diamètre pour 120 mm de longueur, d'axes régulièrement répartis sur une surface cylindrique de 46 mm de diamètre. Différence de potentiel :  $\pm 46,4$  volts, en alternance, les barres au potentiel négatif étant celles situées dans le plan radial.
- Lentille à fentes LF 27: même structure générale que LF 13; électrode centrale percée à 14 x 70 mm, électrodes extrêmes percées à 10 x 60 mm. L'électrode centrale est portée au potentiel correspondant à une distance focale de 173 mm, et placée à 119 mm en aval du centre du quadrupôle QP 26.
- Fente d'ouverture FO 29: dimensions  $5 \times 0,7$  mm pour une résolution en masse  $M/\Delta M = 4100$ ; grand axe dans le plan radial.
- Secteur magnétique SM 30: circuit magnétique en fer doux de section en U. Entrefer de l'aimant 8 mm. Rayon des trajectoires utiles de 70 à 350 mm. Induction magnétique réglable jusqu'à 1 Tesla.

Angle de la face d'entrée  $\epsilon = 26,56^\circ$  ( $\operatorname{tg} \epsilon = 1/2$ )

Angle de déviation  $\theta = 90^\circ$

Angle de la face de sortie  $\theta/2 = 45^\circ$

Angle du plan de focalisation PF 35, 53°13'

Le circuit magnétique est au potentiel de la

masse, mais des électrodes non magnétiques placées à l'intérieur de l'entrefer sont portées à un potentiel de + 15 kV en fonctionnement en mode post-accéléré. Enfin, un shunt magnétique limite les fuites du champ sur la face d'entrée du secteur magnétique. Sur la partie supérieure du plan de focalisation PF 35 est placé un ensemble multicollecteur constitué de convertisseurs ions-électrons suivis de multiplicateurs d'électrons.

Les éléments optiques (sauf l'aimant) sont placés dans une pièce de structure en acier inoxydable qui assure les positions mécaniques des différents dispositifs et sert d'enceinte à vide. Un groupe de pompage cryogénique permet d'obtenir l'ultra-vide désiré. L'aimant est relié au dispositif précédent par un système élastique et étanche, et qui comporte des moyens d'alignement mécanique des axes optiques.

Il est maintenant fait référence aux figures 5A et 5B, et 6A et 6B, pour une meilleure illustration des fonctionnements avec et sans post-accélération, respectivement.

Jusqu'à la lentille à fentes LF 13, les trajectoires demeurent celles déjà décrites, et sont les mêmes dans le plan radial et en section verticale.

La figure 5A montre que, dans le plan radial, les trajectoires traversent sans altération la lentille à fentes LF 13, pour venir rejoindre la seconde lentille électrostatique LE 14, et se focaliser en principe au point P. Cependant, la lentille de post-accélération PA 21, portée à 10 kV, produit un point de focalisation apparent au point P1, pour l'aval du spectromètre. C'est donc de ce point P1 que vont partir les trajectoires appliquées à l'hexapôle HP 22. Pour les valeurs numériques précédemment décrites, la distance entre les points P1 et P, ou plus exactement entre les plans PHi et PHO est de 11 mm.

En section verticale (figure 5B), les trajectoires ont été modifiées par la lentille à fentes LF 13. Elles sont donc parallèles jusqu'au plan PHi, après quoi elles convergent légèrement pour traverser la fente d'ouverture FE 20 dans le plan PHO, et prendre alors leur orientation définitive vers le point de striction P2 sur lequel est centré l'hexapôle HP 22.

Les distances focales sont les suivantes :

- Pour LE 11,  $f_{11} = 15$  mm.
- Pour LF 13,  $f_{13} = 9,44$  mm.
- Pour LE 14,  $f_{14} = 19,88$  mm.
- Pour PA 21,  $f_{21} = 97$  mm.

En fonctionnement, sans post-accélération (figures 6A et 6B), seul subsiste l'effet de lentille convergente produit par la lentille PA 21. Le point P demeure donc associé à un point P1, d'où partissent part les trajectoires que l'on retrouve en aval de la lentille PA 21 dans le plan radial.

En section verticale (figure 6B), les réglages de l'optique de transfert sont modifiés de sorte que les trajectoires commencent à converger dès la sortie de la seconde lentille électrostatique LE 14. Elles traversent la fente d'entrée FE 20, pour converger encore un peu davantage au niveau

de la lentille PA 21, et aboutir finalement au même point de striction P2 que précédemment.

Les valeurs de distances focales sont un peu différentes :

- f11 et f14 restent les mêmes
- pour LF 13, f13 = 8,30 mm
- pour PA 21, f21 = 139,09 mm

Alors que l'on obtient un grandissement unité au niveau de la fente d'entrée dans le mode avec post-accélération, le mode sans post-accélération fournit un grandissement de 1,32 entre l'image située en P1 et l'image située en P.

Il apparaît ainsi que la post-accélération, accompagnée de l'effet de convergence lié à l'électrode supplémentaire PA 21 est compatible avec les propriétés de réglage indépendant que possède le dispositif selon l'invention: seules les tensions électriques sont à modifier.

Bien entendu, on pourra remplacer certains des composants du spectromètre décrit en détail par leurs équivalents. Le quadrupôle unique QP 26 pourrait ainsi être remplacé par deux quadrupôles. L'homme de l'art connaît d'autres équivalents au quadrupôle, ainsi qu'aux hexapôles, lentilles électrostatiques et lentilles à fentes.

### Revendications

1. Spectromètre de masse, comprenant une fente d'entrée (FE 20), suivie d'un secteur électrostatique (SE 23), puis d'un secteur magnétique (SM 30) précédé d'une fente d'ouverture (FO 29), montés pour dévier un faisceau de particules dans un plan radial perpendiculaire à la grande dimension de la fente d'entrée (FE 20), le secteur magnétique (SM 30) possédant une face d'entrée plane (31), inclinée sur l'axe du faisceau de particules, et une face de sortie (32) également plane, dont le plan passe par l'intersection (33) de la face d'entrée (31) avec l'axe du faisceau de particules, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens optiques (QP 26) ayant un foyer objet au niveau de l'image réelle que donne le secteur électrostatique (SE 23) de la fente d'entrée dans le plan radial, pour fournir au secteur magnétique (SM 30) un faisceau de particules qui est parallèle dans le plan radial, ces moyens étant agencés de sorte que ce faisceau parallèle présente, pour chaque énergie des particules incidentes, l'inclinaison appropriée pour que le secteur magnétique ait un fonctionnement achromatique, sensiblement pour toutes les masses de particules, et en ce que,  $\epsilon$  notant l'angle de la face d'entrée (31) avec la normale (34) à l'axe du faisceau qui est située du côté de la déviation de celui-ci, et  $\theta$  notant l'angle de déviation du faisceau dans le secteur magnétique (SM 30), ces deux angles satisfont la relation :

$$\operatorname{tg} \theta/2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \epsilon) = 2$$

ce qui permet d'annuler les aberrations d'ouver-

ture du second ordre créées par le secteur magnétique pour les trajectoires situées dans le plan radial.

- 5 2. Spectromètre selon la revendication 1, comprenant une optique de transfert (1) en amont de la fente d'entrée (FE 20), caractérisé en ce que, considéré en sa section verticale, perpendiculaire au plan radial, le faisceau de particules comporte une striction entre la fente d'entrée (FE 20) et le secteur électrostatique (SE 23), et en ce qu'il est prévu, au niveau de cette striction, un premier hexapôle (HP 22), agencé pour compenser les aberrations d'ouverture du second ordre créées par le secteur électrostatique (SE 23) pour les trajectoires situées dans le plan radial sans introduire d'aberrations du même ordre par son action sur les trajectoires dans la section verticale.
- 10 3. Spectromètre selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'optique de transfert (1) est agencée pour appliquer à la fente d'entrée un faisceau de particules qui est sensiblement parallèle en section verticale, en ce qu'il est prévu une lentille convergente (PA 21) entre la fente d'entrée (FE 20) et le premier hexapôle (HP 22), et en ce que cet hexapôle (HP 22) est centré sur le point conjugué de la fente d'entrée (FE 20) par ladite lentille convergente (PA 21), dans la section verticale du faisceau.
- 15 4. Spectromètre selon la revendication 3, caractérisé en ce que la lentille convergente (PA 21) est en même temps une lentille de post-accélération, comportant au moins une électrode supplémentaire pour assurer la convergence réglable.
- 20 5. Spectromètre selon l'une des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que l'optique de transfert (1) comporte deux lentilles électrostatiques (LE 11, LE 14) coopérant pour produire une striction du faisceau au niveau de la fente d'entrée (FE 20) dans le plan radial et, entre ces deux lentilles électrostatiques, une lentille à fentes (LF 13) agencée de sorte que le faisceau soit sensiblement parallèle en section verticale au niveau de la fente d'entrée.
- 25 6. Spectromètre selon l'une des revendications 2 à 5, caractérisé en ce que le secteur électrostatique (SE 23) et le secteur magnétique (SM 30) possédant des centres de rotation chromatique virtuels respectifs, un moyen optique du genre quadrupôle (QP 26) est placé de manière à conjuguer ces deux centres de rotation chromatique avec un grandissement approprié, ce qui permet une correction complète de la dispersion chromatique du faisceau de particules pour une masse donnée, la correction pour les autres masses s'effectuant dans le plan focal (PF 35) du secteur magnétique (SM 30).
- 30 7. Spectromètre selon la revendication 6, caractérisé en ce que le quadrupôle (QP 26) est suivi

de moyens de compensation de sa divergence dans la section verticale, de sorte que le faisceau de particules soit ensuite parallèle en ses deux dimensions transversales.

8. Spectromètre selon la revendication 7, caractérisé en ce que les moyens de compensation de la divergence du quadrupôle en section verticale comprennent une lentille à fentes (LF 27).

9. Spectromètre selon l'une des revendications 2 à 8, caractérisé en ce qu'il comporte un second hexapôle (HP 25), disposé après le secteur électrostatique (SE 23), et centré sur l'image réelle que donne le secteur électrostatique (SE 23) de la fente d'entrée (FE 20) dans le plan radial, ce qui permet la réduction des aberrations mixtes d'ouverture et chromatique pour les trajectoires situées dans le plan radial, avec compensation exacte pour une masse choisie.

10. Spectromètre selon la revendication 9, caractérisé en ce que le second hexapôle (HP 25) comporte deux hexapôles encadrant une fente de filtrage en énergie.

11. Spectromètre selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que  $\theta = 90^\circ$  et  $\operatorname{tg} \varepsilon = 1/2$ .

#### Patentansprüche

1. Massenspektrometer mit einem Eintrittsspalt (FE 20), auf den ein elektrostatischer Sektor (SE 23) folgt, sodann ein magnetischer Sektor (SM 30), dem ein Öffnungsspalt (FO 29) vorangeht, wobei die Montage so gewählt ist, daß ein Partikelstrahl in eine Radialebene senkrecht zur Längserstreckung des Eingangsspaltes (FE 20) abgebogen wird, wobei der magnetische Sektor (SM 30) eine Ebene, gegenüber der Achse des Partikelstrahles geneigte Eingangsseite (31) aufweist und eine gleichermaßen ebene Ausgangsseite (32), deren Ebene durch den Schnittpunkt (33) der Eingangsseite (31) mit der Achse des Partikelstrahles hindurchgeht, dadurch gekennzeichnet, daß es optische Mittel (QP 26) aufweist mit einem Brennpunkt-Objekt auf dem Niveau des reellen Bildes, das der elektrostatische Sektor (SE 23) des Eintrittsspaltes in der Radialebene ergibt, so daß dem magnetischen Sektor (SM 30) ein Partikelstrahl geliefert wird, der parallel in der Radialebene verläuft, wobei die optischen Mittel derart angeordnet sind, daß dieser parallele Strahl für jede Energie der ankommenen Partikel die entsprechende Schräglage darstellt, damit der magnetische Sektor achromatisch arbeitet, und zwar im wesentlichen für alle Partikelmassen, und daß  $\varepsilon$  den Winkel zwischen der Eintrittsseite (31) mit der Normalen (34) zu der Strahlachse darstellt, die auf deren Ablenkungsseite verläuft, während  $\theta$  den Ablenkungswinkel des Strahles in dem magnetischen Sektor (SM 30) darstellt und diese beiden Winkel folgende Beziehung erfüllen:

$$\operatorname{tg} \theta/2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \varepsilon) = 2$$

so daß die Öffnungs-Aberrationen der zweiten Ordnung, die von dem magnetischen Sektor an den in der Radialebene gelegenen Trajektorien erzeugt wurden, verschwinden.

- 5 2. Spektrometer nach Anspruch 1 mit einer Übertragungsoptik (1), die stromauf des Eingangsspaltes (FE 20) angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, daß der Partikelstrahl bei Betrachtung seines Vertikalschnittes senkrecht zur Radialebene eine Einschnürung zwischen dem Eintrittsspalt (FE 20) und dem elektrostatischen Sektor (SE 23) aufweist und das in Höhe dieser Einschnürung ein erster Hexapol (HP 22) vorgesehen ist zum kompensieren der Öffnungs-Aberrationen der zweiten Ordnung, die durch den elektrostatischen Sektor (SE 23) an den in der Radialebene gelegenen Trajektorien erzeugt werden, ohne daß hierdurch Aberrationen der gleichen Ordnung an den Trajektorien im Vertikalschnitt eingeführt werden.
- 10 25 3. Spektrometer nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Übertragungsoptik (1) an dem Eintrittsspalt einen Partikelstrahl erzeugt, der im wesentlichen parallel im Vertikalschnitt verläuft und das eine Sammellinse (PA 21) zwischen dem Eintrittsspalt (FE 20) und dem ersten Hexapol (HP 22) vorgesehen ist und dieser Hexapol (HP 22) mittels der genannten Sammellinse (PA 21) im Vertikalschnitt des Strahles auf den konjugierten Punkt des Eintrittsspaltes (FE 20) zentriert wird.
- 15 40 4. Spektrometer nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Sammellinse (PA 21) gleichzeitig eine Linse zur Nachbeschleunigung ist und zu mindest eine zusätzliche Elektrode aufweist, um die regelbare Konvergenz sicherzustellen.
- 20 45 5. Spektrometer nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Übertragungsoptik (1) zwei elektrostatische Linsen (LE 11, LE 14) aufweist, die zusammenwirken, um eine Einschnürung des Strahles in Höhe des Eintrittsspaltes (FE 20) in der Radialebene herbeizuführen, und daß sie zwischen den beiden elektrostatischen Linsen eine Linse mit Spalten (LF 13) aufweist, um den Strahl im wesentlichen parallel im Vertikalschnitt in der Höhe des Eintrittsspaltes zu halten.
- 25 50 55 6. Spektrometer nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der elektrostatische Sektor (SE 23) und der magnetische Sektor (SM 30) virtuelle chromatische Rotationszentren besitzen, daß ein optisches Mittel der Art eines Quadropols (QP 26) so positioniert, daß die beiden chromatischen Rotationszentren mit einer geeigneten Verstärkung konjugiert werden, so daß eine totale Korrektur der chromatischen Dispersion des Partikelstrahles für eine gegebene
- 30 35 40 45 50 55 60 65

Masse ermöglicht wird und sich die Korrektur für die anderen Massen in der Brennebene (PF 35) des magnetiSektors (SM 30) vollzieht.

7. Spektrometer nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Quadropol (QP 26) gefolgt ist von Mitteln zur Kompensation seiner Divergenz in dem Vertikalschnitt, derart, daß der Partikelstrahl anschließend in seinen beiden Quer-richtungen parallel ist.

8. Spektrometer nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Kompensation der Divergenz des Quadropols im Vertikalschnitt eine Linse mit Spalten (LF 27) aufweisen.

9. Spektrometer nach einem der Ansprüche 2 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß er eine zweiten Hexapol (HP 25) aufweist, der hinter dem elektrostatischen Sektor (SE 23) angeordnet ist und der auf das reelle Bild zentriert ist, das der elektrostatische Sektor (SE 23) des Eintrittsspaltes (FE 20) in der Radialebene ergibt, woraus eine Verringerung der gemischten Öffnungs- und chromatischen Aberrationen für die in der Radialebene liegenden Trajektorien resultiert bei exakter Kompen-sation für eine gewählte Masse.

10. Spektrometer nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Hexapol (HP 25) zwei Hexapole aufweist, die einen Filterspalt mit Energie einrahmen.

11. Spektrometer nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß  $\theta = 90^\circ$  und  $\operatorname{tg} \varepsilon = 1/2$  beträgt.

### Claims

1. A mass spectrometer comprising an inlet slit (FE 20), followed by an electrostatic sector (SE 23), then a magnetic sector (SM 30) preceded by an opening slit (FO 29), mounted to deflect a particle beam in a radial plane perpendicular to the large dimension of the inlet slit (FE 20), the magnetic sector (SM 30) having a planar intake face (31), inclined towards the axis of the particle beam and an outlet face (32) which is also planar, whose plane passes through the intersection (33) of the inlet face (31) with the axis of the particle beam, characterized in that it comprises optical means (QP 26) having an object focus at the level of the real image provided by the electrostatic sector (SE 23) of the inlet slit in the radial plane, to supply to the magnetic sector (SM 30) a particle beam which is parallel in the radial plane, these means being arranged so that this parallel beam has the appropriate inclination for each energy of the incident particles for the magnetic sector to operate achromatically substantially for all the particle masses, and in that, when  $\varepsilon$  denotes the angle of the inlet face (31) with the normal (34) to the axis of the beam which is situated on the side of the deflection of the latter, and  $\theta$  de-

notes the deflection angle of the beam in the ma-gnetic sector (SM 30), these two angles satisfy the relation,

$$5 \quad \operatorname{tg} \theta / 2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \varepsilon) = 2$$

which makes it possible to cancel the opening aberrations of the second order created by the magnetic sector for the trajectories situated in the radial plane.

2. A spectrometer according to claim 1 comprising an optical transfer unit (1) ahead of the inlet slit (FE 20), characterized in that, considered in its vertical section perpendicular to the radial plane, the particle beam comprises a constriction between the inlet slit (FE 20) and the electrostatic sector (SE 23), and in that provision is made at the level of this constriction for a first hexapole (HP 22) arranged to compensate the opening

20 aberrations of the second order created by the electrostatic sector (SE 23) for the trajectories situated in the radial plane, without introducing any aberrations of the same order by its action on the trajectories in the vertical section.

3. A spectrometer according to claim 2, charac-terized in that the optical transfer unit (1) is arran-

30 ged to apply a particle beam which is substantial-ly parallel in the vertical section to the inlet slit, in that provision is made for a convergent lens (PA 21) between the inlet slit (FE 20) and the first hexapole (HP 22), and in that this hexapole (HP 22) is centred on the conjugate point of the inlet slit (FE 20) by the said convergent lens (PA 21) in the vertical section of the beam.

4. A spectrometer according to claim 3, charac-terized in that the convergent lens (PA 21) is at the same time a post-acceleration lens, compri-sing at least one additional electrode for ensuring the adjustable convergence.

5. A spectrometer according to one of claims 2 to 4, characterized in that the optical transfer unit (1) comprises two electrostatic lenses (LE 11, LE 14) which cooperate to produce a constriction of the beam at the level of the inlet slit (FE 20) in the radial plane, and between these two electrostatic lenses, a slotted lens (LF 13) arranged so that the beam is substantially parallel in its vertical section at the level of the inlet slit.

6. A spectrometer according to one of claims 2 to 5, characterized in that since the electrostatic sector (SE 23) and the magnetic sector (SM 30) have respective virtual chromatic rotation centres, a quadrupole-type optical means (QP 26) is positioned so as to join these two chromatic rotation centres with an appropriate magnification, which permits a complete correction of the chromatic dispersion of the particle beam for a given mass, the correction for the other masses being effected in the focal plane (PF 35) of the magnetic sector (SM 30).

7. A spectrometer according to claim 6, characterized in that the quadrupole (QP 26) is followed by means for compensating its divergence in the vertical section, so that the particle beam is subsequently parallel in its two transverse dimensions. 5

8. A spectrometer according to claim 7, characterized in that the means for compensating the divergence of the quadrupole in the vertical section comprise a slotted lens (LF 27). 10

9. A spectrometer according to one of claims 2 to 8, characterized in that it comprises a second hexapole (HP 25), disposed after the electrostatic sector (SE 23) and centred on the real image provided by the electrostatic sector (SE 23) of the inlet slit (FE 20) in the radial plane, which permits a reduction of the mixed opening and chromatic aberrations for the trajectories situated in the radial planes, with an exact compensation for a chosen mass. 15  
20

10. A spectrometer according to claim 9, characterized in that the second hexapole (HP 25) comprises two hexapoles surrounding an energy filtering slit. 25

11. A spectrometer according to one of claims 1 to 10, characterized in that  $\theta = 90^\circ$  and  $\operatorname{tg} \varepsilon = 1/2$ . 30

35

40

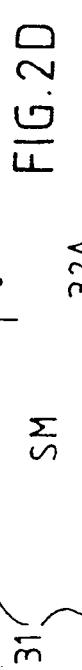
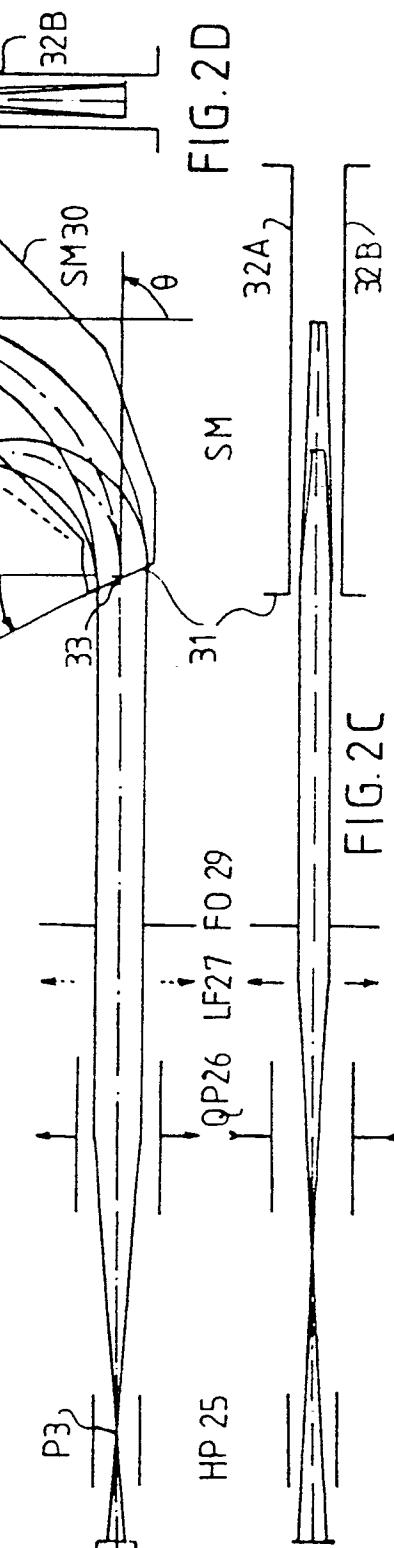
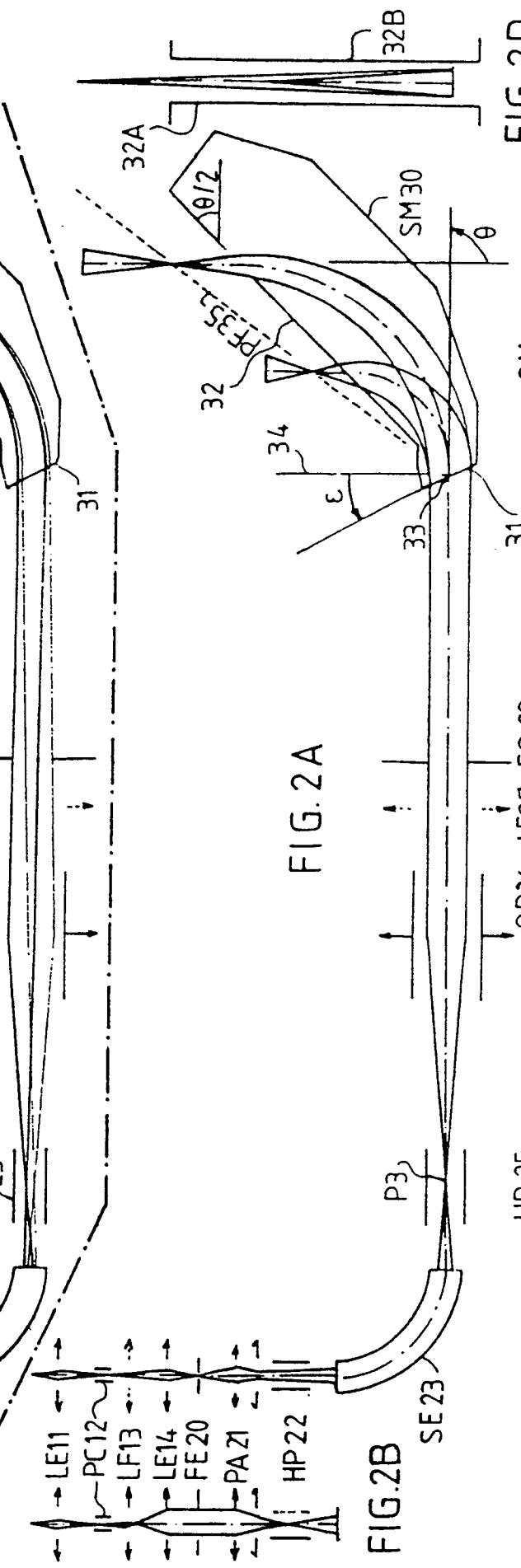
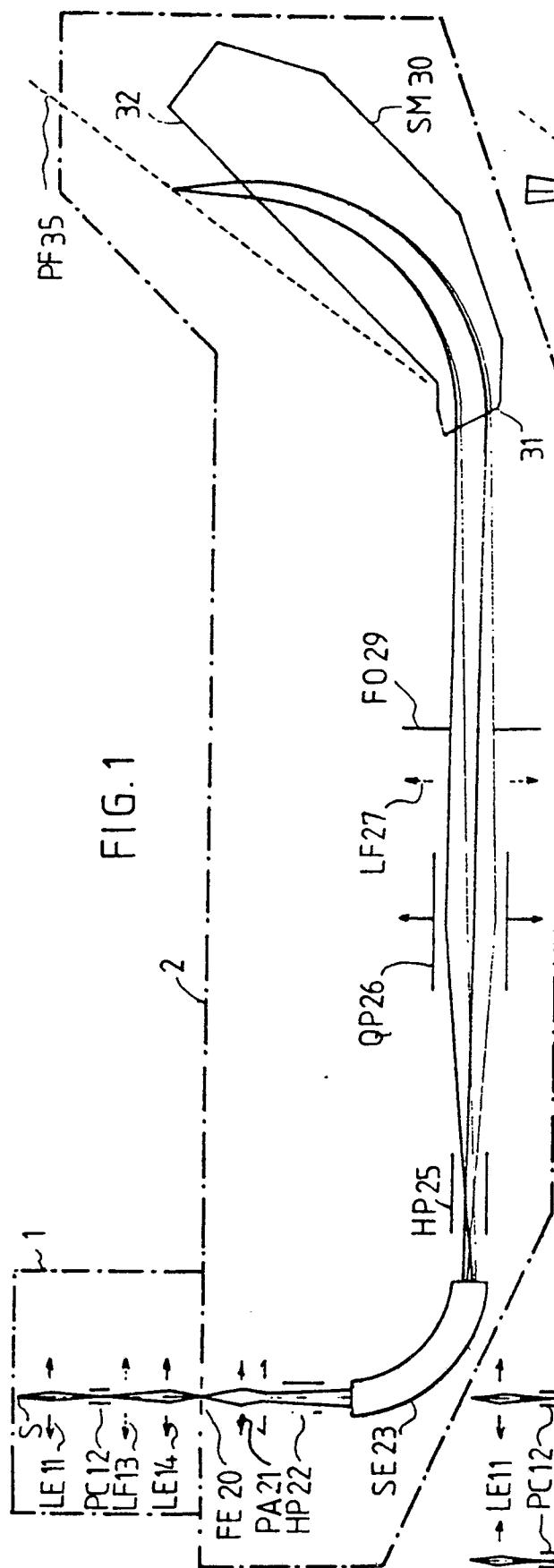
45

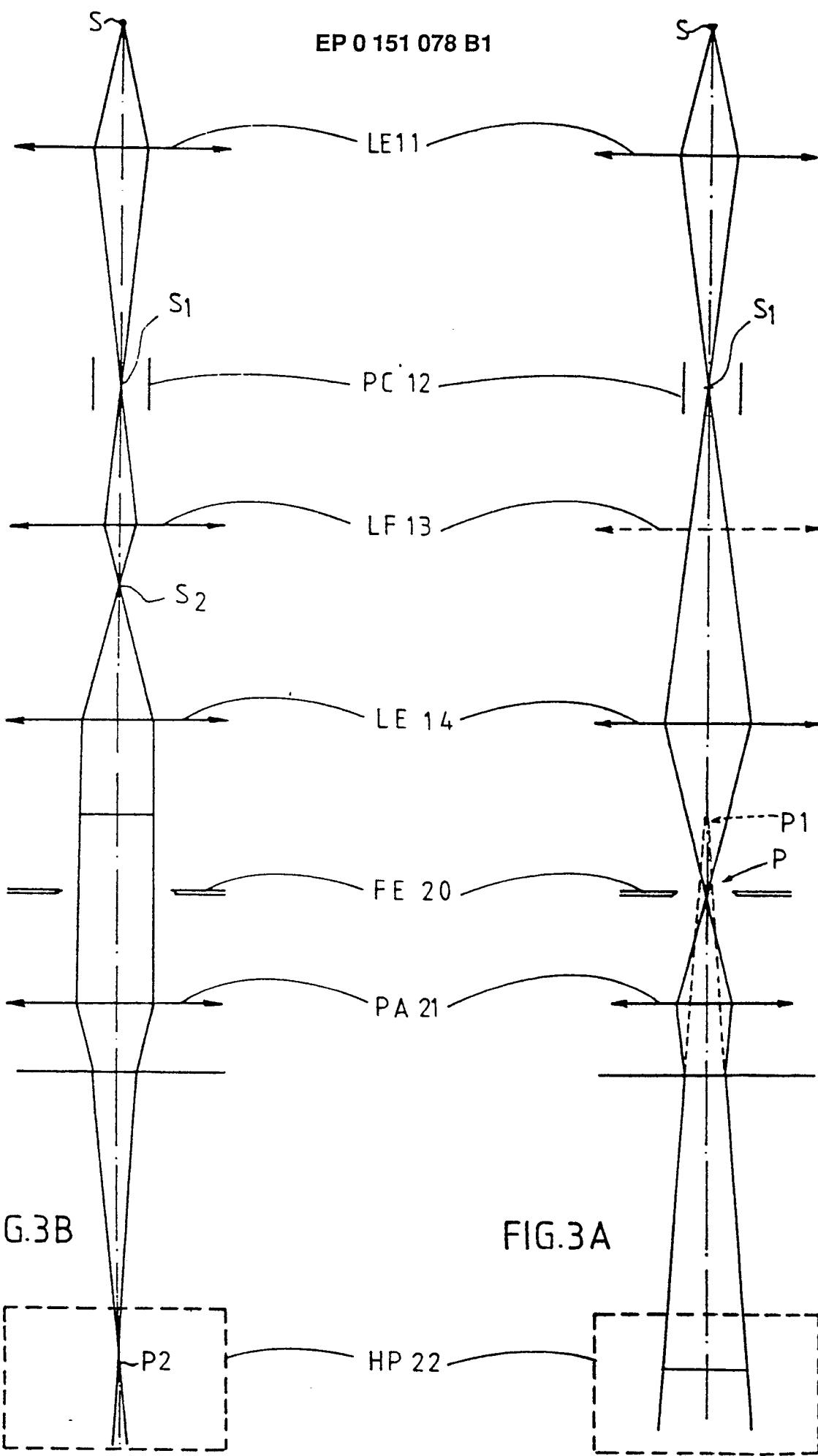
50

55

60

65





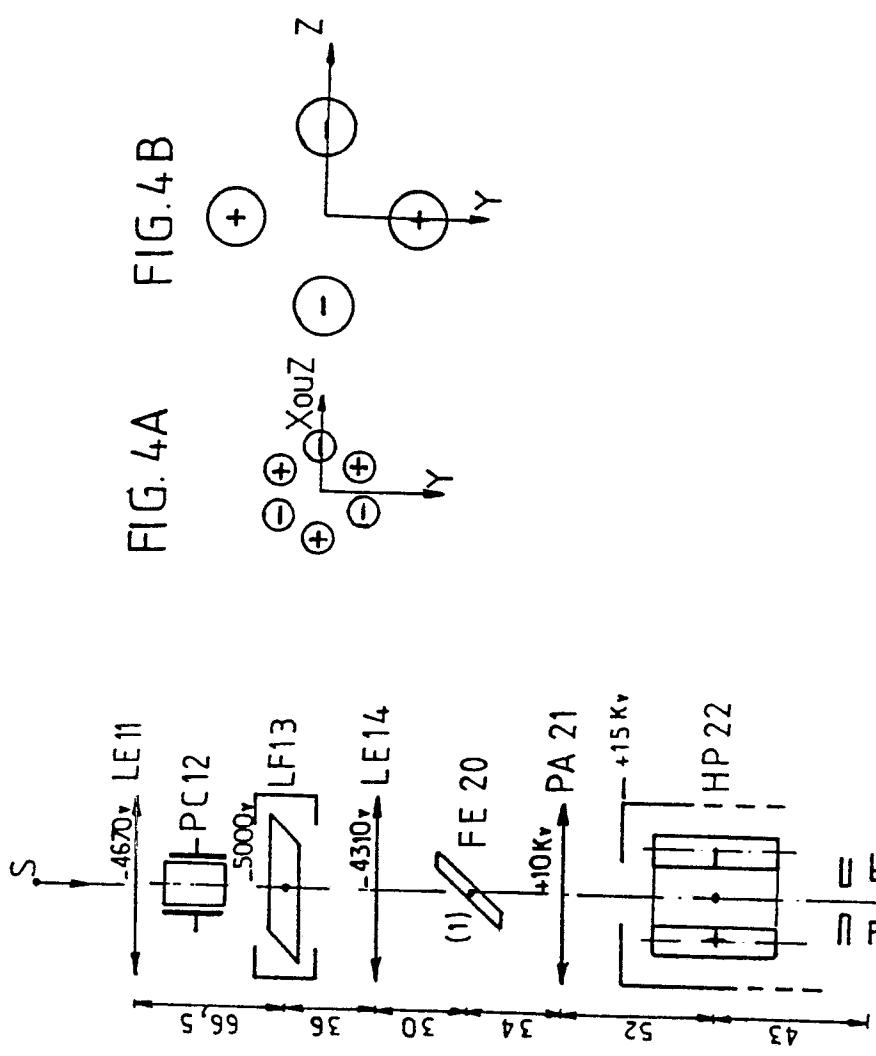
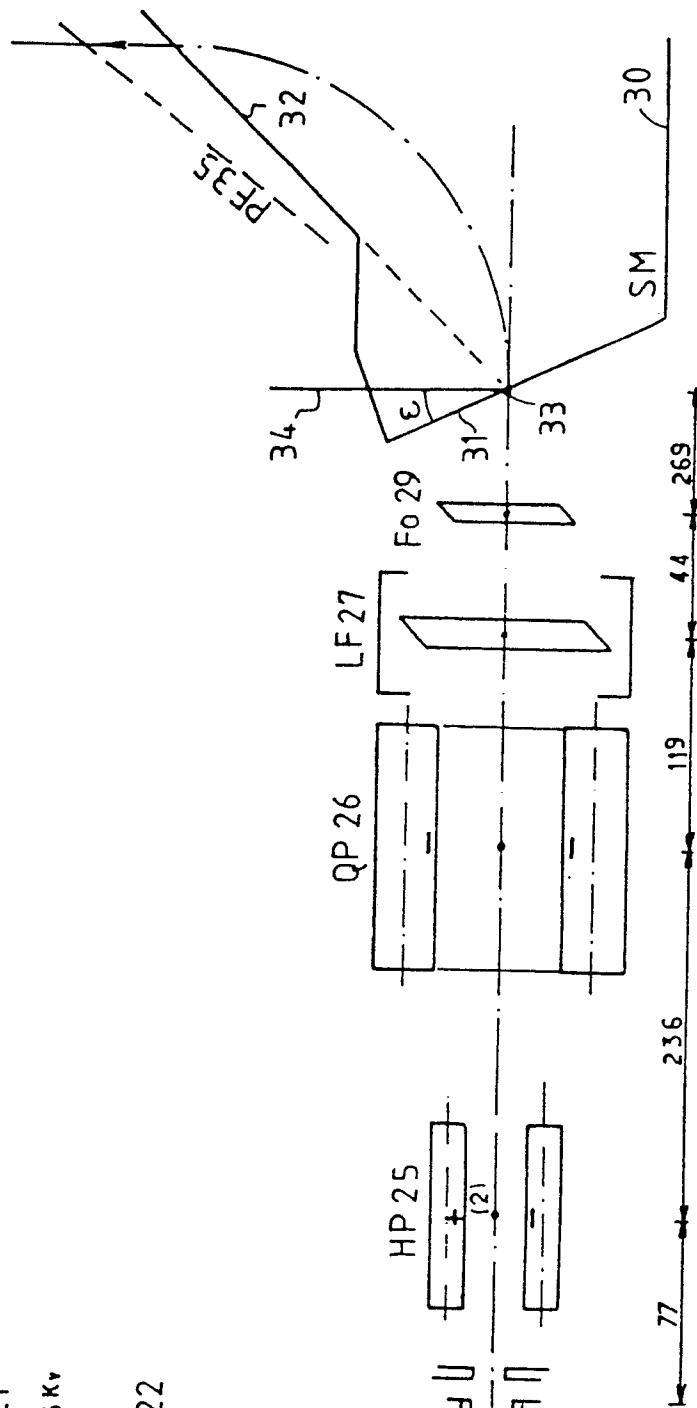
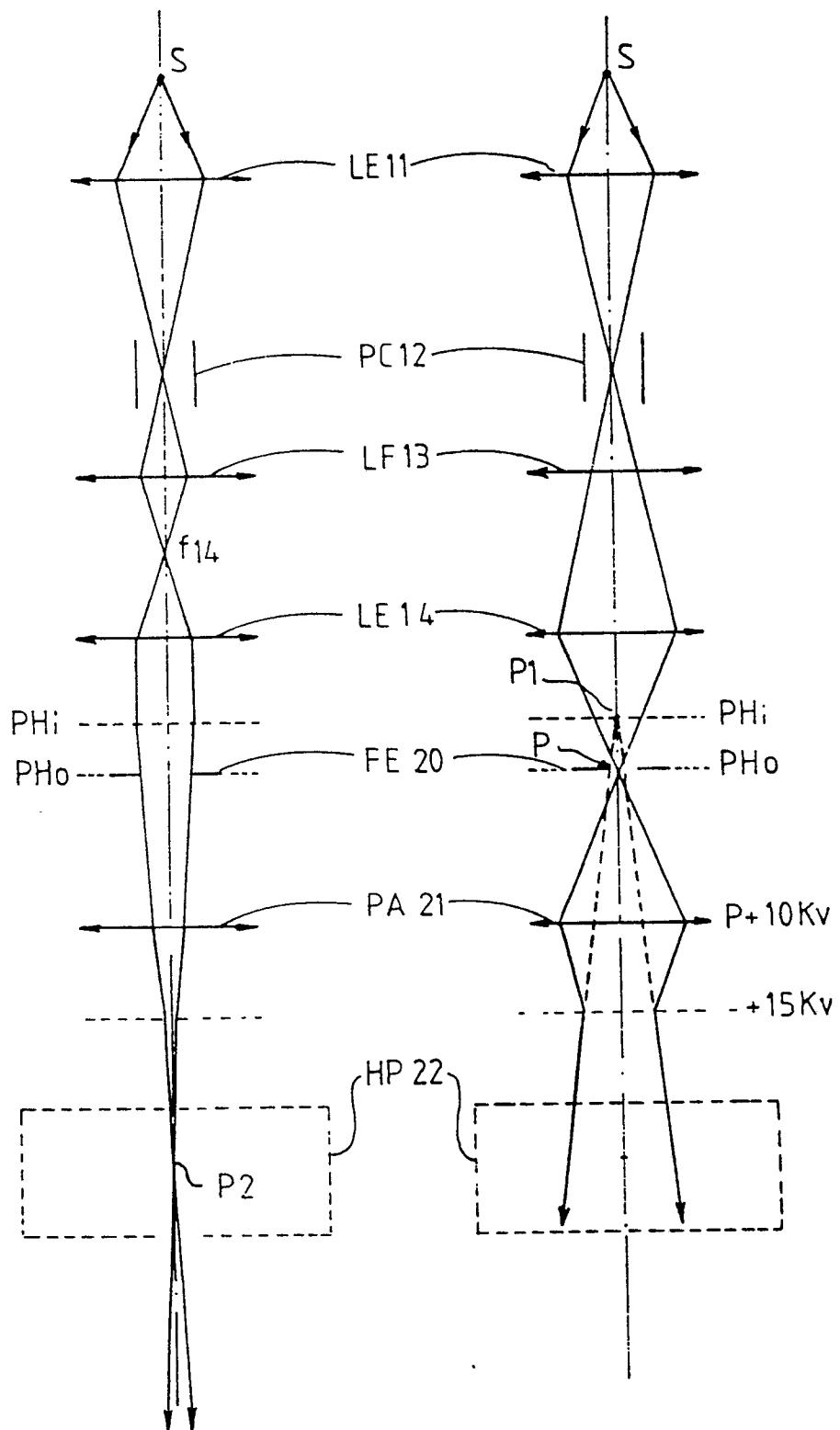


FIG. 4





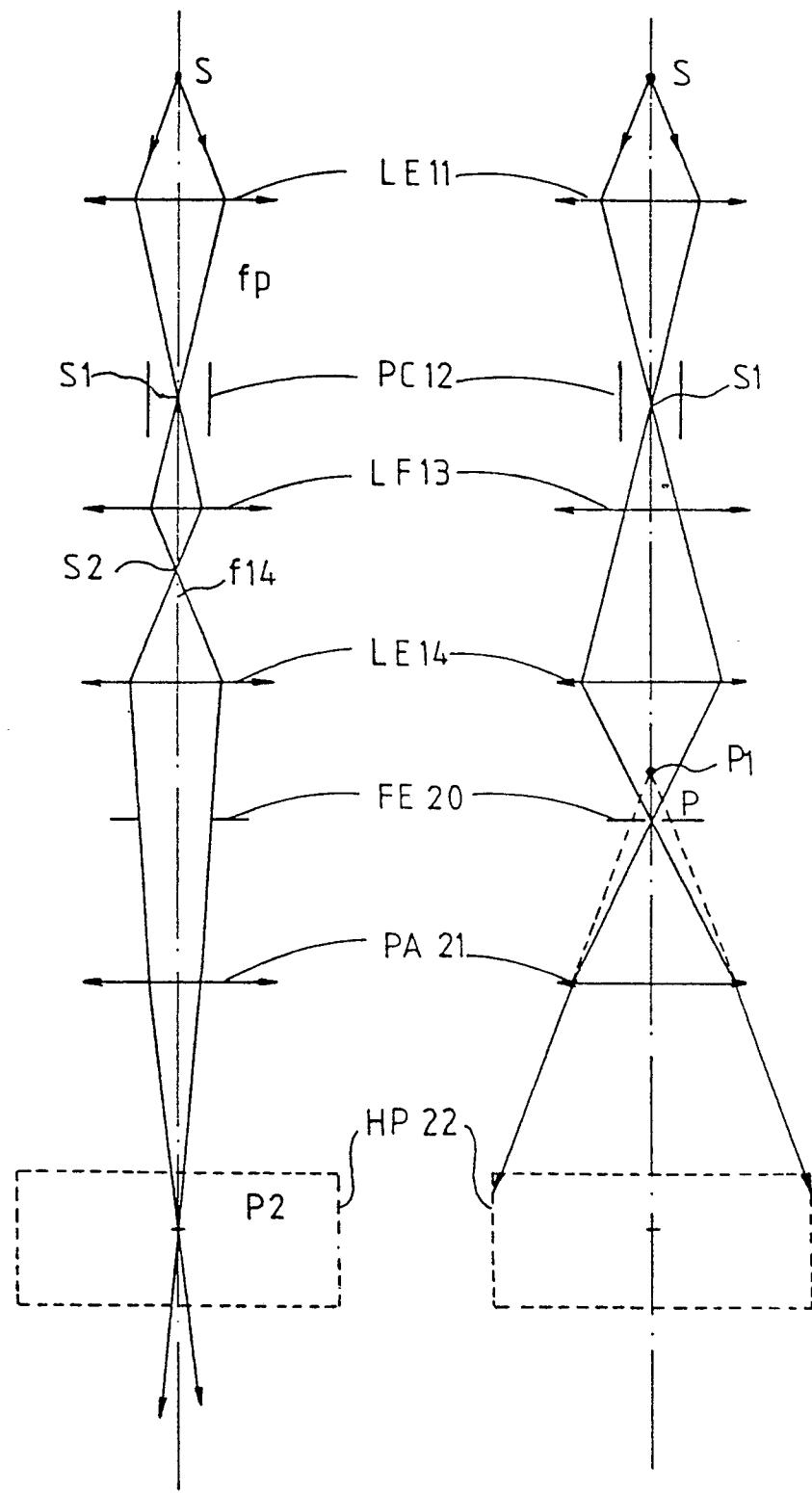


FIG. 6B

FIG. 6A