

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開2022-69391
(P2022-69391A)

(43)公開日

令和4年5月11日(2022. 5. 11)

(51)Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
H 0 1 J 49/06 (2006. 01)	H 0 1 J 49/06 2 0 0	
G 2 1 K 5/04 (2006. 01)	G 2 1 K 5/04 A	
G 2 1 K 1/00 (2006. 01)	G 2 1 K 1/00 A	
G 2 1 B 3/00 (2006. 01)	G 2 1 B 3/00	

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 20 頁)

(21)出願番号	特願2021-136608(P2021-136608)	(71)出願人	504157024 国立大学法人東北大学 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号
(22)出願日	令和3年8月24日(2021. 8. 24)	(71)出願人	504151365 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 茨城県つくば市大穂1番地1
(31)優先権主張番号	特願2020-178286(P2020-178286)	(74)代理人	100143834 弁理士 楠 修二
(32)優先日	令和2年10月23日(2020. 10. 23)	(72)発明者	永谷 幸則 茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)	(72)発明者	名取 寛顕 茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内 最終頁に続く

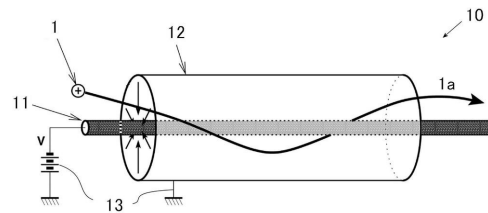
(54)【発明の名称】荷電粒子輸送装置

(57)【要約】

【課題】設備コストを低減することができ、荷電粒子の量によらず、効率よく荷電粒子を輸送することができる荷電粒子輸送装置を提供する。

【解決手段】細長い内側導体11と、内側導体11の長さ方向に沿って伸びるよう配置された外側導体12とを有している。外側導体12は、内側導体11との間に間隔をあけて、内側導体11の側面の全体または一部を覆っている。電位差付与手段13が、内側導体11と外側導体12との間に電位差を付与可能に設けられている。電位差付与手段13により電位差を付与したとき、内側導体11と外側導体12との間の空間で、荷電粒子1が内側導体11の周囲を巡回しながら内側導体11の長さ方向に沿って移動可能に、その荷電粒子1に、内側導体11に向かう力が常に加わるよう構成されている。

【選択図】図4



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

細長い内側導体と、

前記内側導体との間に間隔をあけて、前記内側導体の側面の全体または一部を覆い、前記内側導体の長さ方向に沿って伸びるよう配置された外側導体と、

前記内側導体と前記外側導体との間に電位差を付与可能に設けられた電位差付与手段とを有し、

前記電位差付与手段により前記電位差を付与したとき、前記内側導体と前記外側導体との間の空間で、荷電粒子が前記内側導体の周囲を巡回しながら前記内側導体の長さ方向に沿って移動可能に、前記荷電粒子に、前記内側導体に向かう力が常に加わるよう構成されていることを

特徴とする荷電粒子輸送装置。

【請求項 2】

前記外側導体は、細長い管状であり、

前記内側導体は、前記外側導体の内側に、前記外側導体と同軸に配置されていることを特徴とする請求項 1 記載の荷電粒子輸送装置。

【請求項 3】

前記内側導体および前記外側導体は、1 または複数から成り、長さ方向に対して垂直な断面が、円形、楕円形、三角形、矩形、多角形、または、それらのいずれかの外形を有する環状を成していることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の荷電粒子輸送装置。

【請求項 4】

前記内側導体および前記外側導体は、長さ方向に沿った一部が湾曲していることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の荷電粒子輸送装置。

【請求項 5】

前記内側導体および / または前記外側導体は、長さ方向に沿った所定の区間が、その他の区間とは異なる電位を付与可能に設けられた電位可変部を成し、

前記電位差付与手段は、前記内側導体と前記外側導体との間に、前記電位可変部の区間とその他の区間とで異なる電位差を付与可能に構成されていることを

特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に荷電粒子輸送装置。

【請求項 6】

前記電位差付与手段は、前記電位可変部の区間の電位差を変化可能に構成されていることを特徴とする請求項 5 記載の荷電粒子輸送装置。

【請求項 7】

前記内側導体および / または前記外側導体は、前記電位可変部を、長さ方向に沿って互いに間隔をあけて 2 つ以上有し、

前記電位差付与手段は、各電位可変部のうちの 2 つの電位可変部の間に前記荷電粒子を閉じ込め可能に、各電位可変部の区間に電位差を付与可能に構成されていることを

特徴とする請求項 6 記載の荷電粒子輸送装置。

【請求項 8】

前記内側導体と前記外側導体との間の空間に磁場を印加可能に、前記外側導体の外側に設けられた磁場印加手段を有することを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に荷電粒子輸送装置。

【請求項 9】

前記磁場印加手段は、前記空間に印加する磁場を変化可能に構成されていることを特徴とする請求項 8 記載の荷電粒子輸送装置。

【請求項 10】

前記磁場印加手段は、前記外側導体の長さ方向に沿って互いに間隔をあけて 2 つ以上設けられ、いずれか 2 つの磁場印加手段が前記空間に印加する磁場により、前記空間の中に前記荷電粒子を閉じ込め可能に構成されていることを特徴とする請求項 9 記載の荷電粒子輸送装置。

10

20

30

40

50

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、荷電粒子輸送装置に関する。

【背景技術】**【0002】**

加速器利用の分野において、加速したビームを標的に照射し、ビームと標的との反応により生成した二次的な荷電粒子が利用されている。例えば、生成した正もしくは負の電荷をもったミュオン、陽電子、反陽子、荷電中間子、不安定核などの多様な粒子が利用されている。これらを利用する際には、ノイズとなる多数の様々な粒子が発生する標的付近から、背景ノイズとなる不要な粒子や放射線の少ない環境が要求される利用場所まで、利用したい荷電粒子を選択的かつすみやかに輸送する必要がある。

10

【0003】

また、化学の分野において、様々な化学反応の過程を解明することは、化学の大きな目標の一つであり、原子レベルで反応を明らかにする分野として反応動力学がある。反応動力学では、反応を明らかにするために、反応後の粒子の運動エネルギー分布などを調べることが必要不可欠であり、そのためには、反応後の粒子を、運動エネルギー分布などの観測場所まで、迅速に輸送する必要がある。

【0004】

従来、荷電粒子を輸送する方法として、例えば、多数の同軸型の環状電極に交流電位と直流電位とを同時に印加して、リング形状に荷電粒子をトラップし、電極電位を徐々に切り替え、リング形状のトラップ箇所を徐々に移動することにより粒子を輸送する、同軸イオンガイドの方法（例えば、特許文献1参照）がある。しかし、この方法では、トラップした荷電粒子の輸送に時間がかかるため、短寿命の粒子を観測することができないという問題があった。

20

【0005】

そこで、この問題を解決するために、反応後の粒子を観測場所まで迅速に輸送する方法として、例えば、管に巻き付けたソレノイドコイルに電流を流し、それにより生成される磁場により、管の内側を通して荷電粒子を輸送する方法（例えば、非特許文献1乃至3参照）や、管の中心を通したワイヤにパルス電流を流し、それにより生成される磁場により、荷電粒子を収束させながら輸送する方法（例えば、非特許文献4参照）、電場や磁場によるレンズ効果を用いて、荷電粒子を像転送して輸送する方法（例えば、非特許文献5または6参照）が開発されている。

30

【0006】

また、荷電粒子と物質との相互作用を用いて、荷電粒子を輸送する方法も提案されており、例えば、ガス中に荷電粒子ビームを打ち込んで、電離によりガスを帯電させ、その電離したガスが形成する電位分布により荷電粒子に中心力を作用させて、荷電粒子をビーム軸に沿って輸送する、いわゆるイオンガイドによる方法（例えば、非特許文献7参照）がある。また、棒状または線状の絶縁体に、輸送する荷電粒子ビームを照射して帯電させ、その帯電した絶縁体が形成する電位分布により中心力電場を形成することで、絶縁体の周囲に荷電粒子を巻き付けるようにして輸送する方法（例えば、非特許文献8参照）もある。

40

【0007】

なお、あらゆる物質中での様々な放射線挙動を、核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コード（PHITS）が開発されている（例えば、非特許文献9参照）。

【先行技術文献】**【特許文献】****【0008】**

【特許文献1】特表2016-516986号公報

50

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献1】下山拓也、「反水素合成に向けた陽電子の蓄積および輸送」、東京大学大学院 修士論文、[online]、2009年3月、[2020年10月7日検索]、インターネット URL: http://radphys4.c.u.tokyo.ac.jp/theses/master/Shimoyama_mthes.pdf

【非特許文献2】K. Nakahara, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Strasser, K. Nishiyama, N. Kawamura, H. Fujimori, S. Makimura, A. Koda, K. Nagamine, T. Ogitsu, A. Yamamoto, T. Adachi, K. Sasaki, K. Tanaka, N. Kimura, Y. Makida, Y. Ajima, K. Ishida, and Y. Matsuda, "The super omega muon beamline at J PARC," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 600, p.132 134

【非特許文献3】Y. Makida, Y. Ikedo, T. Ogitsu, K. Shimomura, Y. Miyake, M. Yoshida, T. Adachi, R. Kadono, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, H. Fujimori, K. Nishiyama, H. Ohhata, T. Okamura, R. Okada, and T. Orikasa, "Performance of a superconducting magnet system operated in the Super Omega Muon beam line at J PARC", [online], 17 February 2015, AIP Conf. Proc., 1573, 438, [2020年10月7日検索]、インターネット URL: <https://doi.org/10.1063/1.4860734>

【非特許文献4】J. Hylen et al., "The Hadron Hose: Continuous Toroidal Focusing for Conventional Neutrino Beams", Nucl. Instrum. Meth. A498, 2003, p.29 51, [2020年10月12日検索]、インターネット URL: <https://arxiv.org/abs/hep-ex/0210051>

【非特許文献5】K. Shimomura, A. Koda, P. Strasser, N. Kawamura, H. Fujimori, S. Makimura, W. Higemoto, K. Nakahara, K. Ishida, K. Nishiyama, K. Nagamine, Y. Miyake, "Superconducting muon channel at J PARC," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 600, p.192 194

【非特許文献6】Mikhail Yavor, "Transporting Charged Particle Beams in Static Fields", Advances in Imaging and Electron Physics, 2009, Volume 157, p.95 139

【非特許文献7】高山健、「II 加速器物理入門」、高エネルギー加速器セミナー OH0'92、[online]、1992年、p24 26、[2020年10月7日検索]、インターネット URL: http://accwww2.kek.jp/oho/OH0txt/OH0_1992/txt_1992_%E2%85%A1.pdf

【非特許文献8】D. S. Prono, G. J. Caporaso, A. G. Cole, R. J. Briggs, Y. P. Chong, J. C. Clark, R. E. Hester, E. J. Lauer, R. L. Spoerlein, and K. W. Struv, "Electron Beam Guiding and Phase Mix Damping by an Electrostatically Charged Wire", [online], 29 August 1983, Phys. Rev. Lett. 51, 723, [2020年10月7日検索]、インターネット URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.51.723>

【非特許文献9】Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02", J. Nucl. Sci. Technol., 2018, 55(5 6), p.684 690

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

非特許文献1乃至3に記載の荷電粒子の輸送方法では、荷電粒子を輸送する間、輸送する距離に対応する長さの管に巻き付けられたソレノイドコイルに電流を流し続ける必要があり、ソレノイドコイルから熱が発生してしまう。このため、真空中にソレノイドコイルを配置しなければならない場合や、荷電粒子の観測で極低温の標的を使用する場合などでは、非特許文献2に記載のように、ソレノイドコイルの発熱を抑えるために高価な超伝導コイル等や、ソレノイドコイルを冷却するための大掛かりな冷却装置を使用する必要があり、設備コストが嵩むという課題があった。

【0011】

また、非特許文献4に記載の方法でも、ワイヤに1000Aの大電流を流す必要があり、ワイヤからの発熱が大きくなるため、冷却のための設備コストが嵩むという課題があった。また、非特許文献5および6に記載のような、電場や磁場によるレンズ効果を用いる方法では、粒子エネルギーに応じて各レンズの焦点距離が変化するため、実効的に輸送できる粒子エネルギーの幅が小さくなり、輸送効率が悪いという課題があった。

【0012】

また、非特許文献7および8に記載の、粒子と物質との相互作用を用いる手法では、ガスや絶縁体などをイオン化または帯電させるために、相当量のビームを予め照射しておく必要があり、電流値が小さい場合には荷電粒子を輸送することができないという課題があった。また、粒子を閉じ込めておくための電位分布は、物質との相互作用の大きさや荷電粒子の電流値に依存するため、パルス状の粒子の輸送など、電流量が変化する荷電粒子を輸送する際には、輸送効率が低下してしまうという課題があった。

10

【0013】

本発明は、このような課題に着目してなされたもので、設備コストを低減することができる、荷電粒子の量によらず、効率よく荷電粒子を輸送することができる荷電粒子輸送装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明者等は、素粒子の1つであるミュオンが水素同位体核の核融合反応を手助けするミュオン触媒核融合反応において、一度反応を手助けしたミュオンが、核融合後に一度放出されて再度他の核反応を手助けすることに着目し、固体水素標的を用いてその標的面から等方的に放出される核反応後のミュオン(再生ミュオン)を観測する装置の開発を進めていたところ、標的面から放出されるミュオンを観測機器まで運搬可能であるだけでなく、他の荷電粒子の運搬にも適用可能な新たな運搬装置についての着想を得、本発明に至った。

20

【0015】

すなわち、本発明に係る荷電粒子輸送装置は、細長い内側導体と、前記内側導体との間に間隔をあけて、前記内側導体の側面の全体または一部を覆い、前記内側導体の長さ方向に沿って伸びるよう配置された外側導体と、前記内側導体と前記外側導体との間に電位差を付与可能に設けられた電位差付与手段とを有し、前記電位差付与手段により前記電位差を付与したとき、前記内側導体と前記外側導体との間の空間で、荷電粒子が前記内側導体の周囲を旋回しながら前記内側導体の長さ方向に沿って移動可能に、前記荷電粒子に、前記内側導体に向かう力が常に加わるよう構成されていることを特徴とする。

30

【0016】

本発明に係る荷電粒子輸送装置は、以下の原理により、荷電粒子を輸送することができる。すなわち、図1に示すように、外側導体が細長い管状であり、内側導体が外側導体の内側に、外側導体との間に間隔をあけて、外側導体と同軸に配置されているものとする。このとき、外側導体は、内側導体の側面の周囲全体を覆っている。ここで、内側導体の半径を r_{in} 、外側導体の半径を r_{ex} とし、電位差付与手段により、内側導体に電位 V_{in} 、外側導体に電位 V_{ex} を加えるものとする。なお、ここでは、説明を簡単にするために、内側導体の電位 V_{in} を負とし、外側導体を接地して $V_{ex} = 0V$ とする。

40

【0017】

このとき、内側導体の中心軸からの距離を r とすると、内側導体と外側導体との間の空間には、(1)式に示す、半径方向 r に沿ったlog型の静電位の分布 $V_{ES}(r)$ が形成される。

$$V_{ES}(r) = V_{ex} - (V_{in} - V_{ex}) \times \{ \log(r / r_{ex}) / \log(r_{ex} / r_{in}) \} \quad (1)$$

正の電荷 q を有する荷電粒子に対する電位分布は、図2に示す $q \cdot V_{ES}(r)$ の分布となり、荷電粒子には、内側導体に向かう中心力が常に加わる。

50

【 0 0 1 8 】

このため、荷電粒子が内側導体の長さ方向に沿った速度成分を有する場合には、荷電粒子は、遠心力とのつりあいにより、内側導体の周囲を旋回しながら、内側導体の長さ方向に沿って一定速度で移動する螺旋軌道をとることになる。荷電粒子の質量を m 、角運動量を L とすると、周回運動の遠心力ポテンシャル $V_{ci}(r)$ は、(2) 式で表され、荷電粒子の r 方向の運動は、(3) 式に示す有効ポテンシャル $V_{eff}(r)$ で規定される。

$$V_{ci}(r) = (1/2) \times (L^2 / m) \times 1 / r^2 \quad (2)$$

$$V_{eff}(r) = q \cdot V_{es}(r) + V_{ci}(r) \quad (3)$$

10

(2) 式の遠心力ポテンシャル $V_{ci}(r)$ 、および (3) 式の有効ポテンシャル $V_{eff}(r)$ の分布の例を、図 2 に示す。

【 0 0 1 9 】

図 2 に示すように、有効ポテンシャル $V_{eff}(r)$ により、荷電粒子の r 方向の運動は、ある最小半径からある最大半径までの往復運動となり、その位置は、荷電粒子の r 方向の保存エネルギー E により決定される。また、荷電粒子の保存エネルギー E が、有効ポテンシャル $V_{eff}(r)$ の最低値よりも大きく、軌道最小半径が内側導体の半径 r_{in} より大きく、軌道最大半径が外側導体の半径 r_{out} より小さいときに、荷電粒子の継続した r 方向の往復運動が許される。このことから、内側導体に垂直な面内においては、図 3 に示すように、荷電粒子の軌道は、内側導体の周囲を周回するサイクロイド的な軌道となる。

20

【 0 0 2 0 】

このように、本発明に係る荷電粒子輸送装置によれば、荷電粒子は、内側導体の周囲を旋回しながら、内側導体の長さ方向に沿って一定速度で移動する螺旋軌道をとる。このとき、図 2 に示すように、一旦この軌道に入った荷電粒子は、内側導体や外側導体に衝突することはない。また、内側導体の長さ方向に沿った荷電粒子の運動は、単なる等速運動となるため、荷電粒子を螺旋軌道に留めたまま、無制限に輸送することができる。

【 0 0 2 1 】

なお、ここでは、内側導体および外側導体と同軸管の場合について説明したが、同様の原理が適用できるものであれば、同軸管に限らず、他の構成であってもよい。例えば、内側導体および外側導体は、1 または複数から成り、長さ方向に対して垂直な断面が、円形、楕円形、三角形、矩形、多角形、または、それらのいずれかの外形を有する環状を成しているもよい。また、内側導体および外側導体は、表面に凹凸を有しているもよい。

30

【 0 0 2 2 】

また、ここでは、内側導体の電位 V_{in} を負とし、外側導体の電位 V_{out} を接地電位に一致させているが、荷電粒子を輸送できるよう、内側導体と外側導体との間に電位差を設けていけば、各導体の電位をどのように設定してもよい。例えば、正の荷電粒子の輸送には、内側導体の電位 V_{in} を外側導体の電位 V_{out} よりも低くし、負の荷電粒子の輸送には、逆に内側導体の電位 V_{in} を外側導体の電位 V_{out} よりも高くすることにより、荷電粒子に中心力を加えることができ、上記の原理により荷電粒子を輸送可能にすることができる。

40

【 0 0 2 3 】

このように、本発明に係る荷電粒子輸送装置は、内側導体と外側導体との間に電位差を設けるだけで、荷電粒子を輸送することができる。このため、コイルやワイヤに電流を流す場合と比べて、必要な電力を少なくすることができ、熱の発生をほぼ抑えることができる。これにより、真空や極低温などの特殊な環境であっても、高価な超伝導コイルや冷却装置等が不要であり、設備コストを低減することができる。

【 0 0 2 4 】

本発明に係る荷電粒子輸送装置は、例えば、内側導体と外側導体との間の空間に荷電粒子を入射する際、内側導体および外側導体に荷電粒子が衝突せず、荷電粒子により発生する空間電荷に打ち勝つだけの電位差を、内側導体と外側導体との間に設けることにより、

50

大電流の荷電粒子であっても輸送することができる。このように、本発明に係る荷電粒子輸送装置は、あらかじめビームを照射しておく必要がなく、微小電流から大電流まで、荷電粒子の量によらず、効率よく荷電粒子を輸送することができる。また、内側導体と外側導体との間の電位差を瞬時に調整することができるため、電流量が変化する荷電粒子であっても、その電位差を荷電粒子の種類に応じて調整することにより、効率よく輸送することができる。

【0025】

本発明に係る荷電粒子輸送装置は、例えば、加速器等を利用して発生したミュオンなどの荷電粒子を、荷電粒子の発生位置から荷電粒子の観測位置まで輸送するのに使用することができる。荷電粒子の発生位置付近では、観測の妨げになるノイズも多く発生するが、本発明に係る荷電粒子輸送装置は、発生位置から離れた位置まで荷電粒子を輸送することができるため、観測時のノイズを低減することができる。

10

【0026】

本発明に係る荷電粒子輸送装置で、前記内側導体および前記外側導体は、長さ方向に沿った一部が湾曲していてもよい。この場合、その湾曲部に沿って所望の荷電粒子を輸送するために、湾曲部の内側導体と外側導体との間に、直線の部分とは異なる電位差を付与可能であることが好ましい。湾曲部は、内側導体および外側導体の伸張方向を、いかなる角度に曲げるように設けられていてもよく、任意の曲線や立体的な湾曲に沿って設けられていてもよい。湾曲部を設けることにより、所望の荷電粒子を湾曲部に沿って曲げて輸送することができる。また、その荷電粒子よりもエネルギーが高い粒子は湾曲部を曲がりきれず、外側導体に衝突するため、所望の荷電粒子を観測する際の背景ノイズを削減することができる。

20

【0027】

本発明に係る荷電粒子輸送装置で、前記内側導体および/または前記外側導体は、長さ方向に沿った所定の区間が、その他の区間とは異なる電位を付与可能に設けられた電位可変部を成し、前記電位差付与手段は、前記内側導体と前記外側導体との間に、前記電位可変部の区間とその他の区間とで異なる電位差を付与可能に構成されていてもよい。この場合、電位可変部の電位を調整することにより、荷電粒子が有するエネルギー、角運動量、またはそれらの組み合わせに応じて、荷電粒子を除去、反射または通過させるフィルター効果を得ることができる。

30

【0028】

また、この電位可変部を有する場合、前記電位差付与手段は、前記電位可変部の区間の電位差を変化可能に構成されていることが好ましい。これにより、荷電粒子に対するフィルター効果の制御性を高めることができる。さらに、前記内側導体および/または前記外側導体は、前記電位可変部を、長さ方向に沿って互いに間隔をあけて2つ以上有し、前記電位差付与手段は、各電位可変部のうちの2つの電位可変部の間に前記荷電粒子を閉じ込め可能に、各電位可変部の区間に電位差を付与可能に構成されていてもよい。これにより、各電位可変部のうちの2つの電位可変部の間の区間に荷電粒子をトラップしたり、トラップされた荷電粒子を任意のタイミングでパルスとして出射したりすることができる。

【0029】

本発明に係る荷電粒子輸送装置は、前記内側導体と前記外側導体との間の空間に磁場を印加可能に、前記外側導体の外側に設けられた磁場印加手段を有していてもよい。この場合にも、磁場印加手段で印加する磁場を調整することにより、荷電粒子が有するエネルギー、角運動量、またはそれらの組み合わせに応じて、荷電粒子を除去、反射または通過させるフィルター効果を得ることができる。また、電位可変部と併用することにより、磁場と電場との組み合わせにより、フィルター効果の制御性を高めることができる。

40

【0030】

また、この場合、前記磁場印加手段は、前記空間に印加する磁場を変化可能に構成されていることが好ましい。これにより、荷電粒子に対するフィルター効果の制御性を高めることができる。さらに、前記磁場印加手段は、前記外側導体の長さ方向に沿って互いに間

50

隔をあけて2つ以上設けられ、いずれか2つの磁場印加手段が前記空間に印加する磁場により、前記空間の中に前記荷電粒子を閉じ込め可能に構成されていてもよい。これにより、内側導体と外側導体との間の空間に荷電粒子をトラップしたり、トラップされた荷電粒子を任意のタイミングでパルスとして出射したりすることができる。

【発明の効果】

【0031】

本発明によれば、設備コストを低減することができ、荷電粒子の量によらず、効率よく荷電粒子を輸送することができる荷電粒子輸送装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図1】本発明に係る荷電粒子輸送装置の原理を示す斜視図である。

【図2】本発明に係る荷電粒子輸送装置の原理を示す、内側導体および外側導体の長さ方向に垂直な断面内での、電位分布および有効ポテンシャル分布のグラフである。

【図3】本発明に係る荷電粒子輸送装置の原理を示す、荷電粒子の軌道を投影した、内側導体および外側導体の長さ方向に垂直な断面図である。

【図4】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置を示す斜視図である。

【図5】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、外側導体に電位可変部を有する変形例を示す斜視図である。

【図6】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、内側導体および外側導体に電位可変部を有する変形例を示す（a）縦断面図、（b）横断面図である。

【図7】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、磁場印加手段を有する変形例を示す（a）縦断面図、（b）横断面図である。

【図8】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、内側導体および外側導体に電位可変部を2つずつ有する変形例を示す（a）縦断面図、（b）横断面図である。

【図9】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、複数の内側導体を、2枚の平行板から成る外側導体で挟んだ変形例を示す（a）斜視図、（b）横断面図である。

【図10】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、シミュレーションに用いたミュオン触媒核融合実験の実験装置を示す断面図である。

【図11】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、ミュオン触媒核融合実験のシミュレーションに用いたモデルを示す斜視図である。

【図12】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、外側導体の一方の端部に配置された固体水素標的から放出されたミュオンの軌道のシミュレーション結果を示す側面図である。

【図13】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、図11に示すモデルを用いたミュオンの軌道の（a）サーマルシールドがない場合、（b）サーマルシールドがある場合のシミュレーション結果を示す側面図である。

【図14】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、図11に示すモデルを用いたミュオンの軌道のシミュレーション結果から得られた、ミュオンの運動エネルギーに対する到達割合の変化を示すグラフである。

【図15】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、図11に示すモデルの内側導体および外側導体の途中に、湾曲部を有するモデルを用いた、（a）直線部および湾曲部の内側導体に同じ電位を印加した場合、（b）湾曲部の内側導体に、直線部の内側導体よりも高い電位を印加した場合の、ミュオンの軌道のシミュレーション結果を示す側面図である。

【図16】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、図11に示すモデルの外側導体に電位可変部を有するモデルを用いた、（a）ミュオンの軌道のシミュレーション結果を示す側面図、（b）電位可変部以外の外側導体と電位可変部との電位差（filterの電位）ごとの、ミュオンの運動エネルギーに対する各電位での到達割合の変化を示すグラフである。

【図17】本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置の、図11に示すモデルを用い、固体

10

20

30

40

50

水素標的の電位を変化させたときの、ミュオンの運動エネルギーに対する、固体水素標的の各電位での到達割合の変化を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0033】

以下、図面および実施例等に基づいて、本発明の実施の形態について説明する。

図4乃至図17は、本発明の実施の形態の荷電粒子輸送装置を示している。

図4に示すように、荷電粒子輸送装置10は、内側導体11と外側導体12と電位差付与手段13とを有している。

【0034】

内側導体11は、細長く、断面が円形を成している。内側導体11は、例えば、銅線から成っている。外側導体12は、細長い管状であり、内径が内側導体11の外径より大きく、内側に内側導体11を挿入して、内側導体11の長さ方向に沿って伸びるよう配置されている。外側導体12は、内側導体11との間に間隔をあけて、内側導体11と同軸に配置されている。外側導体12は、内側導体11の側面の周囲全体を覆っている。

10

【0035】

電位差付与手段13は、内側導体11と外側導体12との間に電位差を付与可能に設けられている。これにより、荷電粒子1に、内側導体11に向かう力(図4中の矢印参照)が常に加わるよう構成されている。すなわち、電位差付与手段13は、正の荷電粒子1を輸送するときには、内側導体11の電位を外側導体12の電位よりも低くし、負の荷電粒子1を輸送するときには、逆に内側導体11の電位を外側導体12の電位よりも高くするよう構成されている。図4に示す具体的な一例では、電位差付与手段13は、外側導体12を接地すると共に、内側導体11に電位Vを印加可能に設けられている。

20

【0036】

なお、荷電粒子1は、例えば、電子、陽電子、陽子、反陽子、負ミュオン、正ミュオン、荷電中間子、荷電レプトン、荷電バリオン、荷電イオン、荷電分子、荷電エアロゾル、荷電微粒子など、素粒子からマクロサイズにいたる粒子まで、粒子種を問わずいかなるものであってもよい。また、内側導体11と外側導体12との間の空間は、真空であることが好ましい。

【0037】

荷電粒子輸送装置10は、電位差付与手段13により内側導体11と外側導体12との間に電位差を付与したとき、図1~図3に示す原理に基づいて、内側導体11と外側導体12との間の空間で、荷電粒子1が内側導体11の周囲を旋回しながら内側導体11の長さ方向に沿って移動可能に構成されている。

30

【0038】

次に、作用について説明する。

荷電粒子輸送装置10は、荷電粒子1を、内側導体11の周囲を旋回する螺旋軌道1aで、内側導体11の長さ方向に沿って一定速度で移動させることができる。このため、一旦この螺旋軌道1aに入った荷電粒子1を、螺旋軌道1aに留めたまま、内側導体11や外側導体12に衝突させることなく、内側導体11および外側導体12が続く限り、無制限に輸送することができる。

40

【0039】

また、荷電粒子輸送装置10は、内側導体11と外側導体12との間に電位差を設けるだけで、荷電粒子1を輸送することができる。このため、コイルやワイヤに電流を流す場合と比べて、必要な電力を少なくすることができ、熱の発生をほぼ抑えることができる。これにより、真空や極低温などの特殊な環境であっても、高価な超伝導コイルや冷却装置等が不要であり、設備コストを低減することができる。また、あらかじめビームを照射しておく必要がなく、微小電流から大電流まで、荷電粒子1の量によらず、効率よく荷電粒子1を輸送することができる。また、内側導体11と外側導体12との間の電位差は瞬時に調整することができるため、電流量が変化する荷電粒子1であっても、その電位差を荷電粒子1の種類に応じて調整することにより、効率よく輸送することができる。

50

【 0 0 4 0 】

なお、荷電粒子輸送装置 1 0 で、内側導体 1 1 および外側導体 1 2 は、長さ方向に沿った一部が湾曲していてもよい。この場合、その湾曲部の曲率半径が外側導体 1 2 の半径よりも大きいことが好ましい。また、湾曲部に沿って所望の荷電粒子 1 を輸送するために、湾曲部の内側導体 1 1 と外側導体 1 2 との間に、直線の部分とは異なる電位差を付与可能であることが好ましい。特に、湾曲部の曲率半径が小さいほど、その電位差が大きくなるよう構成されていることが好ましい。湾曲部は、内側導体 1 1 および外側導体 1 2 の伸張方向を、いかなる角度に曲げるように設けられていてもよく、任意の曲線や立体的な湾曲に沿って設けられていてもよい。湾曲部を設けることにより、所望の荷電粒子 1 を湾曲部に沿って曲げて輸送することができる。また、その荷電粒子 1 よりもエネルギーが高い粒子は湾曲部を曲がりきれず、外側導体 1 2 に衝突するため、所望の荷電粒子 1 を観測する際の背景ノイズを削減することができる。このように、荷電粒子 1 を輸送可能な湾曲部を設けることができるため、荷電粒子輸送装置 1 0 の設計自由度を高めることができる。

10

【 0 0 4 1 】

また、図 5 に示すように、荷電粒子輸送装置 1 0 で、外側導体 1 2 は、長さ方向に沿った所定の区間が、その他の区間とは異なる電位を付与可能に設けられた電位可変部 2 1 を成し、電位差付与手段 1 3 は、内側導体 1 1 と外側導体 1 2 との間に、電位可変部 2 1 の区間とその他の区間とで異なる電位差を付与可能に構成されていてもよい。また、図 6 に示すように、電位可変部 2 1 が、内側導体 1 1 および外側導体 1 2 の所定の区間に設けられていてもよい。図 6 に示す具体的な一例では、内側導体 1 1 は、所定の区間のみ間隔をあけて設けられた外管 2 2 a と、外管 2 2 a の内部に挿入された棒状の挿入体 2 2 b とを有し、外管 2 2 a と挿入体 2 2 b とに異なる電位を付与可能に設けられており、挿入体 2 2 b が露出した所定の区間が電位可変部 2 1 を成している。なお、電位可変部 2 1 は、内側導体 1 1 のみに設けられていてもよい。

20

【 0 0 4 2 】

この電位可変部 2 1 を有する場合、例えば、電位可変部 2 1 の区間の電位差を小さくすることにより、内側導体 1 1 に引き寄せられる力を弱くして、高エネルギーの荷電粒子 1 を外側導体 1 2 に衝突させることができ（図 5 の破線の軌道 1 b 参照）、低エネルギーの荷電粒子 1 だけを選択的に輸送することができる。また、電位可変部 2 1 の区間の電位差を大きくすることにより、内側導体 1 1 に引き寄せられる力を強くして、低エネルギーの荷電粒子 1 を内側導体 1 1 に衝突させることができ、高エネルギーの荷電粒子 1 だけを選択的に輸送することができる。また、電位可変部 2 1 の区間の電位差を、その他の区間の電位差と逆符号の電位差にすることにより、荷電粒子 1 を反射させることもできる。このように、電位可変部 2 1 の電位を調整することにより、荷電粒子 1 が有するエネルギー、角運動量、またはそれらの組み合わせに応じて、荷電粒子 1 を除去、反射または通過させるフィルター効果を得ることができる。

30

【 0 0 4 3 】

また、図 7 に示すように、荷電粒子輸送装置 1 0 は、内側導体 1 1 と外側導体 1 2 との間の空間に磁場を印加可能に、外側導体 1 2 の外側に設けられた磁場印加手段 2 3 を有していてもよい。磁場印加手段 2 3 は、例えば、ソレノイドコイルから成っている。この場合にも、磁場印加手段 2 3 で印加する磁場を調整することにより、荷電粒子 1 が有するエネルギー、角運動量、またはそれらの組み合わせに応じて、荷電粒子 1 を除去、反射または通過させるフィルター効果を得ることができる。なお、磁場印加手段 2 3 は、内側導体 1 1 と外側導体 1 2 との間の空間に印加する磁場がより強くなるよう、コイルの周囲に配置された磁気ヨークを有していてもよい。また、図 5 および図 6 に示すような電位可変部 2 1 を有していてもよく、この場合、磁場と電場との組み合わせにより、フィルター効果の制御性を向上させることができる。図 7 に示す具体的な一例では、荷電粒子 1 に加わる磁場と電場とが概ね直交する、ウィーンフィルターで構成されている。このため、荷電粒子 1 の電荷と質量との比である電荷質量比に応じたフィルター機能を付加することもできる。

40

50

【 0 0 4 4 】

また、図 8 に示すように、荷電粒子輸送装置 1 0 で、内側導体 1 1 および外側導体 1 2 は、図 6 に示すような電位可変部 2 1 を、長さ方向に沿って互いに間隔をあけて 2 つ以上有し、電位差付与手段 1 3 は、各電位可変部 2 1 の区間の電位差を変化可能であり、各電位可変部 2 1 のうちの 2 つの電位可変部 2 1 の間に荷電粒子 1 を閉じ込め可能に、各電位可変部 2 1 の区間に電位差を付与可能に構成されていてもよい。図 8 に示す具体的な一例では、電位可変部 2 1 を 2 つ有している。なお、各電位可変部 2 1 は、内側導体 1 1 のみ、または、外側導体 1 2 のみに設けられていてもよい。

【 0 0 4 5 】

図 8 に示す 2 つの電位可変部 2 1 を有する場合、例えば、以下のようにして、各電位可変部 2 1 の間の区間（粒子貯留区間 2 4）に荷電粒子 1 をトラップすることができる。すなわち、まず、一方の電位可変部 2 1 を、荷電粒子 1 が通過する状態にし、他方の電位可変部 2 1 を、荷電粒子 1 が反射する状態にしておき、一方の電位可変部 2 1 から粒子貯留区間 2 4 に荷電粒子 1 を入射させる。粒子貯留区間 2 4 に荷電粒子 1 が存在している状態で、一方の電位可変部 2 1 を、荷電粒子 1 が反射する状態に切り替えることにより、荷電粒子 1 を粒子貯留区間 2 4 にトラップすることができる。荷電粒子 1 をトラップすることにより、荷電粒子 1 の存在が局在化されるため、例えば、粒子貯留区間 2 4 から放出される崩壊 2 次粒子を検出することによる荷電粒子 1 の寿命測定や、粒子貯留区間 2 4 に磁場やマイクロ波を加えること等による荷電粒子 1 のスピンや微細構造定数の測定、粒子貯留区間 2 4 に薄膜やガスなどの物質を挿入することによる荷電粒子 1 の冷却、挿入した物質等と荷電粒子 1 との繰り返し相互作用の効率的な測定などを行うことができる。

【 0 0 4 6 】

また、荷電粒子 1 が粒子貯留区間 2 4 にトラップされた状態で、任意のタイミングで、いずれかの電位可変部 2 1 を、荷電粒子 1 が通過する状態に切り替えることにより、トラップされた荷電粒子 1 をそのタイミングでパルスとして出射することができる。また、このときの荷電粒子 1 を通過させる電位可変部 2 1 の電位設定を、特定のエネルギーのみが通過するように制御することにより、トラップされた荷電粒子 1 のうち、特定のエネルギーの荷電粒子 1 を選択してパルスとして取り出すこともできる。このことから、荷電粒子 1 のパルスを周期的に出射するために、電位差付与手段 1 3 により、いずれかの電位可変部 2 1 の区間の電位差を周期的に変更可能に構成されていてもよい。

【 0 0 4 7 】

なお、荷電粒子輸送装置 1 0 は、電位可変部 2 1 ではなく、図 7 に示すような磁場印加手段 2 3 を、外側導体 1 2 の長さ方向に沿って互いに間隔をあけて 2 つ以上有していてもよい。この場合にも、荷電粒子 1 をトラップしたり、トラップされた荷電粒子 1 を任意のタイミングでパルスとして出射したりすることができる。荷電粒子 1 のパルスを周期的に出射するために、いずれかの磁場印加手段 2 3 の磁場を、周期的に変更可能に構成されていてもよい。

【 0 0 4 8 】

また、図 9 に示すように、荷電粒子輸送装置 1 0 で、内側導体 1 1 は、複数から成り、棒状または線状を成し、互いに平行に配置されており、外側導体 1 2 は、2 枚の平行板から成り、各内側導体 1 1 の長さ方向に沿って伸び、各内側導体 1 1 との間に間隔をあけて、各内側導体 1 1 を挟むよう配置されていてもよい。各外側導体 1 2 は、それぞれ各内側導体 1 1 の片方の側面を覆っている。この場合、図 9 (b) に示すように、電位差付与手段 1 3 により、内側導体 1 1 と外側導体 1 2 との間に電位差を付与することにより、内側導体 1 1 と外側導体 1 2 との間の空間で、荷電粒子 1 に対して内側導体 1 1 に向かう力が常に加わるような電位分布（図中の等電位線 2 参照）が形成され、1 本の内側導体 1 1 の周囲を巡回する軌道 1 c や、複数の内側導体 1 1 にまたがって巡回する軌道 1 d に沿って、荷電粒子 1 を輸送することができる。

【 0 0 4 9 】

[シミュレーションについて]

10

20

30

40

50

以下では、荷電粒子輸送装置 10 により輸送される荷電粒子 1 について、市販のイオン光学設計ソフトの SIMION (Scientific Instrument Services社製) を用いて、シミュレーションを行った。シミュレーションでは、固体水素標的を使用したミュオン触媒核融合実験を想定し、電圧を印加可能な電極 (内側導体、外側導体、固体水素標的) を配置して、任意の電圧を設定して電場を形成し、その電場内に荷電粒子 1 としてミュオン (Muon; 重さ 0.11 a.u.) を配置することで、その後のミュオンの軌道を求めた。

【0050】

図 10 に示すように、実際のミュオン触媒核融合実験は、以下のように行われる。すなわち、まず、直方体の箱状のサーマルシールド 31 の内部に、矩形板状の固体水素標的 32 を配置する。ここで、固体水素標的 32 は、重水素やトリチウムで表面をコートして、重水素やトリチウムを添加したものであり、極低温に冷やされている。また、固体水素標的 32 の側方に、固体水素標的 32 の表面に対して平行な方向に伸びるよう、図 4 に示す荷電粒子輸送装置 10 を設置する。このとき、荷電粒子輸送装置 10 の外側導体 12 の固体水素標的 32 の側の端部を、サーマルシールド 31 の内側に配置し、外側導体 12 の反対側の端部に、ミュオン検出用の円形の金属箔 33 を設置する。金属箔 33 は、チタン製であり、内側導体 11 に接続されており、内側導体 11 と同じ電位になっている。

10

【0051】

実験では、固体水素標的 32 の背面に、その背面に対して垂直方向から、加速器により高エネルギーの負のミュオン粒子を打ち込む。これにより、低温量子効果であるラムザウア・タウンゼント効果、および、ミュオン触媒核融合反応により、固体水素標的 32 の表面から、10 keV 程度に減速された負のミュオン粒子が等方的に放出される。放出されたミュオン粒子のうち、固体水素標的 32 の側の端部から外側導体 12 の内側に入ったものの一部が、内側導体 11 と外側導体 12 との間の空間を通過して、反対側の端部まで輸送され、金属箔 33 に当たって検出される。このミュオン触媒核融合実験をシミュレーションするために、図 11 に示すモデルを作成した。図 11 に示すモデルでは、内側導体 11 の外径を 1 mm、外側導体 12 の内径を 56 mm、金属箔 33 の半径を 58 mm、内側導体 11 および外側導体 12 の長さを約 1.1 m としている。

20

【実施例 1】

【0052】

まず、荷電粒子輸送装置 10 で荷電粒子 1 を輸送できることを確認するために、外側導体 12 の一方の端部に、内側導体 11 および外側導体 12 の長さ方向に対して垂直に固体水素標的 32 を配置し、その中心からミュオンが放出されたときの、ミュオンの軌道をシミュレーションにより求めた。シミュレーションでは、固体水素標的 32 および内側導体 11 に +10 kV の電位を印加し、外側導体 12 を接地電位 (0 V) とした。

30

【0053】

シミュレーションの結果を、図 12 に示す。図 12 には、固体水素標的 32、内側導体 11 および外側導体 12 が形成した電位分布 (図中の等電位線 2 参照)、ならびに、それを受けて運動する 10 ~ 30 keV のミュオンの軌道群の例を示している。図 12 に示すように、固体水素標的 32 から放出されたミュオンの一部は、内側導体 11 と外側導体 12 との間の空間を旋回する軌道に入り、固体水素標的 32 とは反対側の端部まで輸送されることが確認された。図中の軌道 1 e は、仰角が 15 度で放出された、10 keV の負ミュオンの軌道であり、図中の軌道 1 f は、仰角が 15 度で放出された、30 keV の負ミュオンの軌道である。

40

【0054】

なお、素粒子であるミュオンは、不安定な粒子であり、2.2 マイクロ秒の寿命で崩壊するが、その寿命内に数メートルの距離を輸送することができる。高エネルギーの粒子にさらされる固体水素標的 32 の付近には、実際には、様々なエネルギーを有する電子や陽電子、光子などのノイズとなる粒子が多数存在している。荷電粒子輸送装置 10 では、寿命以外の因子で負ミュオンが失われることはないが、ノイズとなる粒子は、距離の 2 乗に反比例して小さくなるため、数メートルの輸送により背景ノイズを大幅に低減することがで

50

きる。例えば、非特許文献9に記載のPHITSを用いて、1つのミュオンの入射による光子(ノイズ)の量を計算したところ、荷電粒子輸送装置10による輸送距離が400 mmの位置では、 2.7×10^3 個であり、輸送距離が1100 mmの位置では、 1.5×10^4 個であった。また、ミュオンの輸送距離を長くすることにより、ノイズを遮蔽するための遮蔽材を配置するための空間を増やすことができるため、さらなるノイズの低減を図ることができる。このように、荷電粒子輸送装置10により、特定のエネルギーを有する主に負ミュオンから成る粒子だけを、固体水素標的32から離れたところまで効率的に輸送することができ、ノイズの少ない環境下で、負ミュオンを用いた実験や観測を行うことができる。

【実施例2】

【0055】

ミュオン触媒核融合実験を想定した図11に示すモデルを用いて、固体水素標的32から放出されるミュオンの軌道をシミュレーションにより求めた。シミュレーションでは、内側導体11に+10 kVの電位を印加し、固体水素標的32および外側導体12を接地電位(0 V)とし、他の条件は実施例1と同じとした。シミュレーションにより求められたミュオンの軌道群を、図13に示す。固体水素標的32を保護するサーマルシールド31がない場合の軌道群を図13(a)に、固体水素標的32を保護するサーマルシールド31を追加し、より精密なシミュレーションを行った場合の軌道群を図13(b)に示す。図13(a)および(b)に示すように、固体水素標的32から放出されたミュオンの一部が、内側導体11と外側導体12との間の空間に入り、その空間を旋回する軌道1aを描いて、固体水素標的32とは反対側の金属箔33まで輸送されることが確認された。

【実施例3】

【0056】

図11に示すモデルを用い、固体水素標的32から放出される任意の運動エネルギーを有するミュオンのシミュレーションを行い、荷電粒子輸送装置10により金属箔33まで到達したミュオンの到達割合を求めた。シミュレーションの各条件は、実施例2と同じとした。シミュレーションでは、0.25~30 keVの範囲の複数の運動エネルギーのそれぞれに対して、100,000個のミュオンの軌道を求め、そのうちのいくつのミュオンが金属箔33まで到達するかを確認した。なお、シミュレーションでは、固体水素標的32の方向とは逆方向、すなわち荷電粒子輸送装置10の方向に向かう成分を有するミュオンのみを使用している。ここで、シミュレーションで得られた金属箔33まで到達したミュオンの個数を、シミュレーションしたミュオンの個数(ここでは、100,000個)で割った値を到達割合とした(以下でも、同じ)。

【0057】

ミュオンの運動エネルギーに対する到達割合の変化をまとめ、図14に示す。図14に示すように、0.25~30 keVの範囲では、ミュオンの運動エネルギーが大きくなるに従って、到達割合は低下することが確認された。また、このときの到達割合は、約0.004~約0.15程度であることが確認された。内側導体11と外側導体12との間に電位差を与えない場合、すなわち、内側導体11、外側導体12、および固体水素標的32が0 Vの場合には、到達割合は、金属箔33の表面積に対応する立体角で計算でき、約0.002程度である。このことから、荷電粒子輸送装置10により、到達割合が約2~70倍高くなっており、荷電粒子の輸送効率が高くなるといえる。

【実施例4】

【0058】

図11に示すモデルの内側導体11および外側導体12の途中に、湾曲部を有するモデルを用い、固体水素標的32から放出されるミュオンの軌道をシミュレーションにより求めた。使用したモデルでは、内側導体11および外側導体12の金属箔33の側の端部に、それぞれの伸張方向を90度曲げるよう、内側導体11および外側導体12をそれぞれ一定の曲率で湾曲させた湾曲部(曲率半径 $R = 144$ mm)を挿入した。シミュレーションでは、直線部および湾曲部の内側導体11に+10 kVの電位を印加した場合、および、直線部の内側導体11に+10 kV、湾曲部の内側導体11に+30 kVの電位を印加した場合の、

2通りの場合についてミュオンの軌道を求めた。また、ミュオンの運動エネルギーは、10 keVとした。なお、いずれの場合も、固体水素標的32および外側導体12は接地電位(0 V)とし、他の条件は実施例2と同じとした。

【0059】

各場合について、シミュレーションにより求められたミュオンの軌道群を、それぞれ図15(a)および(b)に示す。図15(a)に示す直線部25aおよび湾曲部25bの内側導体11に+10 kVの電位を印加した場合には、図15(b)に示す直線部25aに+10 kV、湾曲部25bに+30 kVの電位を印加した場合と比べて、湾曲部25bで曲がりきれず、外側導体12に衝突しているミュオンが多く、金属箔33まで到達するミュオンが少なくなっている様子が確認された。

10

【0060】

図15に示す各シミュレーションについて、金属箔33に到達したミュオンの数から、到達割合を求めた。また、湾曲部25bの曲率半径を半分($R = 72$ mm)にし、直線部25aの内側導体11に+10 kV、湾曲部25bの内側導体11に+30 kVの電位を印加した場合についてもシミュレーションを行い、到達割合を求めた。また、比較のため、湾曲部25bを設けない場合についてもシミュレーションを行い、到達割合を求めた。湾曲部25bを設けない場合の到達割合を1としたときの、湾曲部25bを有する各場合の到達割合の比率(相対的到達割合)を求め、その結果を表1に示す。なお、固体水素標的32から金属箔33までの距離(内側導体11の長さ)は、全ての場合について同じ長さになっている。

20

【0061】

【表1】

直線部の電位 [V]	湾曲部の電位 [V]	相対的到達割合
10k	-	1.000
10k	10k ($R = 144$)	0.124
10k	30k ($R = 144$)	0.496
10k	30k ($R = 72$)	0.487

【0062】

表1に示すように、湾曲部25bの曲率半径を変えても、相対的到達割合はほとんど変化せず、今回のシミュレーションでの曲率半径の範囲では、曲率半径の大小は、到達割合に大きな影響を与えないことが確認された。これに対し、湾曲部25bの内側導体11の電位を、直線部25aの電位より上げた場合、すなわち、内側導体11と外側導体12との電位差を、直線部25aよりも湾曲部25bで大きくした場合には、相対的到達割合が著しく向上することが確認された。これは、内側導体11と外側導体12との電位差を湾曲部25bで大きくすると、ミュオンが内側導体11に引き寄せられる力が湾曲部25bで強くなり、曲がり切れなくなるミュオンの数を減らすことができるためであると考えられる。

40

【0063】

湾曲部25bを有する場合、固体水素標的32と金属箔33と互いに直線的には見通せなくなるという利点が得られる。すなわち、固体水素標的32では、必要とするミュオン以外に、高いエネルギーの各種粒子やX線粒子などが副次的に放射されるが、ミュオンより高いエネルギーの荷電粒子1は、湾曲部25bではほとんど曲がらず直進し、X線粒子はそもそも電磁場では曲がらず直進する。このため、湾曲部25bを設けることにより、直進するノイズ粒子を遮蔽し、必要なミュオンのみを金属箔33に入射させることができ、観測時の背景ノイズを大幅に削減することができる。このように、湾曲部25bを有す

50

る場合には、湾曲部 2 5 b が無い場合よりも到達割合が低下しているが、背景ノイズを低下させることができるため、背景ノイズの低下割合よりも到達割合の低下割合の方が小さい場合に、湾曲部 2 5 b を挿入するのが効果的であると考えられる。

【実施例 5】

【0064】

図 5 に示すように、図 1 1 に示すモデルの外側導体 1 2 の一部に、電位を変化させることができる電位可変部 2 1 を有するモデルを用い、固体水素標的 3 2 から放出されるミュオンの軌道をシミュレーションにより求めた。シミュレーションでは、内側導体 1 1 に +10 kV の電位を印加し、電位可変部 2 1 の電位を 0 kV ~ -10 kV まで、1 kV ずつ変化させた。また、固体水素標的 3 2 および、電位可変部 2 1 以外の外側導体 1 2 は接地電位 (0 V) とし、他の条件は実施例 2 と同じとした。

10

【0065】

電位可変部 2 1 の電位が 5 kV のときのミュオンの軌道群を、図 1 6 (a) に示す。また、ミュオンの運動エネルギーを 0.5 ~ 20 keV とし、電位可変部 2 1 の電位を変化させたときの、電位可変部 2 1 以外の外側導体 1 1 と電位可変部 2 1 との電位差 (filter の電位) ごとの到達割合を求め、図 1 6 (b) に示す。図 1 6 (a) に示すように、電位可変部 2 1 に内側導体 1 1 とは逆符号の電位を印加したとき、形成された電位分布 (図中の等電位線 2 参照) により、ミュオンが内側導体 1 1 に引き寄せられる力が強くなったため、高いエネルギーを有するミュオン (軌道 1 g 参照) は、電位可変部 2 1 を通過するが、低いエネルギーを有するミュオン (軌道 1 h 参照) は、内側導体 1 1 に衝突したり、固体水素標的 3 2 の側に反射したりして、電位可変部 2 1 を通過することができない様子が確認された。図 1 6 (b) に示すように、電位可変部 2 1 の電位やミュオンのエネルギーにより、到達割合が変化し、特に、低いエネルギーを有するミュオンの到達割合が、電位可変部 2 1 の電位により大きく変化することが確認された。このことから、電位可変部 2 1 の電位を調整することにより、エネルギーの低いミュオンを除去するフィルター効果を得ることができる。また、電位可変部 2 1 の電位を変化させながら観測を行うことにより、ミュオンの運動エネルギー分布を得ることができると考えられる。

20

【実施例 6】

【0066】

図 1 1 に示すモデルを用い、固体水素標的 3 2 の電位を変化させてシミュレーションを行い、到達割合を求めた。シミュレーションでは、内側導体 1 1 の電位 (V_c) を +10 kV とし、固体水素標的 3 2 の電位 (V_T) を 0 kV、1 kV、5 kV、10 kV とした。また、外側導体 1 2 は接地電位 (0 V) とし、他の条件は実施例 2 と同じとした。

30

【0067】

ミュオンの運動エネルギーを 0.25 ~ 20 keV とし、固体水素標的 3 2 の電位を変化させたときの、各電位での到達割合を求め、図 1 7 に示す。図 1 7 に示すように、固体水素標的 3 2 の電位やミュオンのエネルギーにより、到達割合が変化し、特に、低いエネルギーを有するミュオンの到達割合が、固体水素標的 3 2 の電位により大きく変化することが確認された。このことから、固体水素標的 3 2 の電位を調整することにより、エネルギーの低いミュオンを除去するフィルター効果を得ることができる。また、固体水素標的 3 2 の電位を変化させながら観測を行うことにより、ミュオンの運動エネルギー分布を得ることができると考えられる。

40

【符号の説明】

【0068】

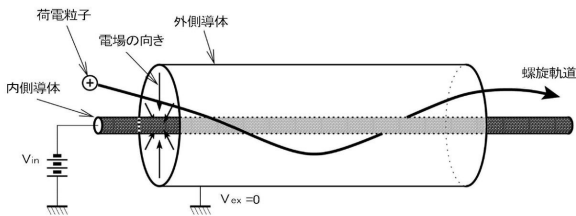
- 1 荷電粒子
 - 1 a (螺旋) 軌道
 - 1 b ~ 1 g 軌道
- 2 等電位線

- 1 1 内側導体
- 1 2 外側導体
- 1 3 電位差付与手段

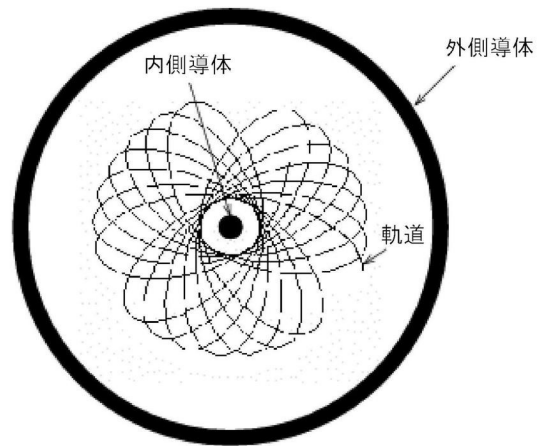
- 2 1 電位可変部
- 2 2 a 外管
- 2 2 b 挿入体
- 2 3 磁場印加手段
- 2 4 粒子貯留区間
- 2 5 a 直線部
- 2 5 b 湾曲部

- 3 1 サーマルシールド
- 3 2 固体水素標的
- 3 3 金属箔

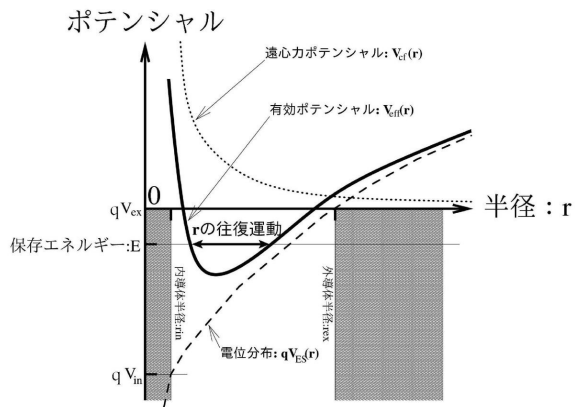
【図1】



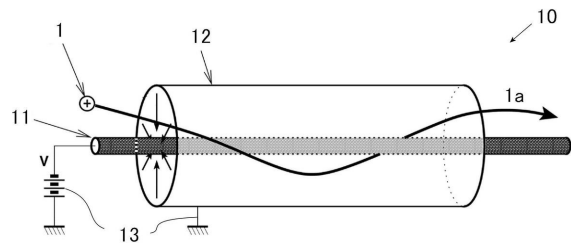
【図3】



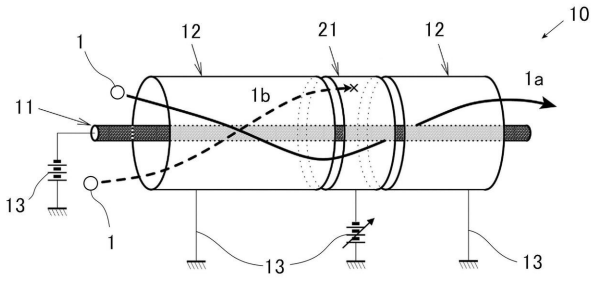
【図2】



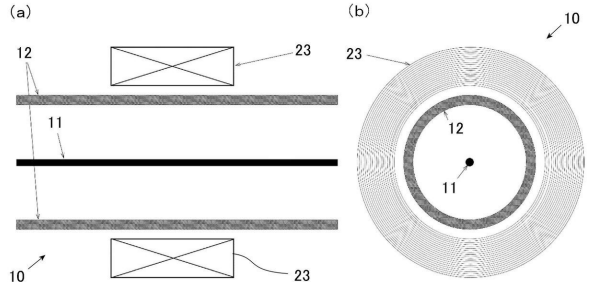
【図4】



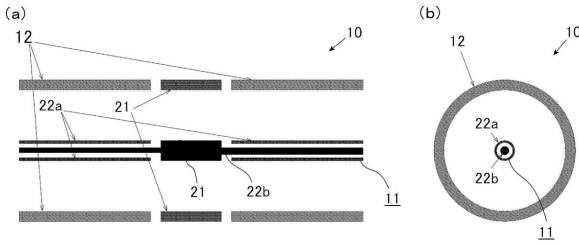
【図5】



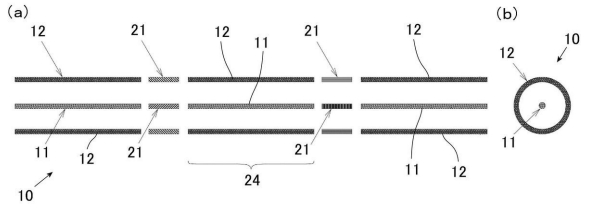
【図7】



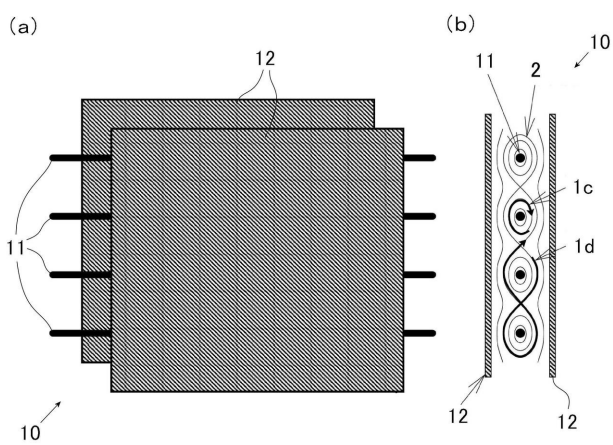
【図6】



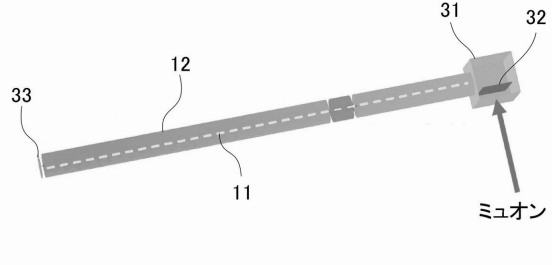
【図8】



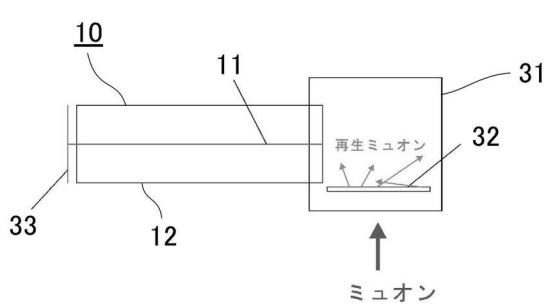
【図9】



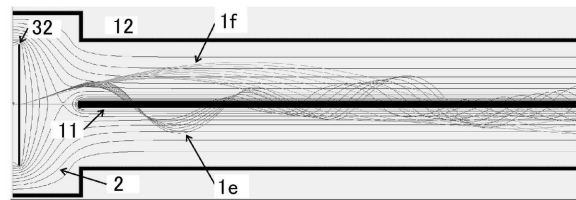
【図11】



【図10】

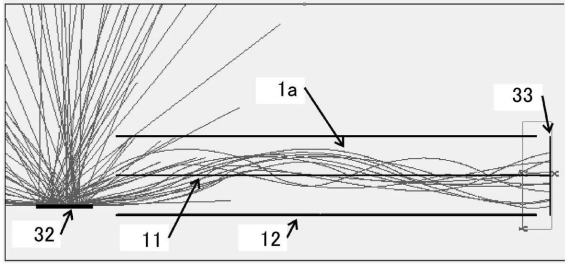


【図12】

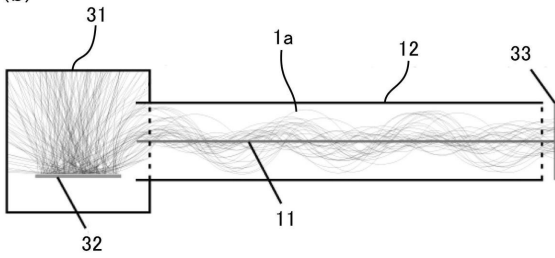


【図13】

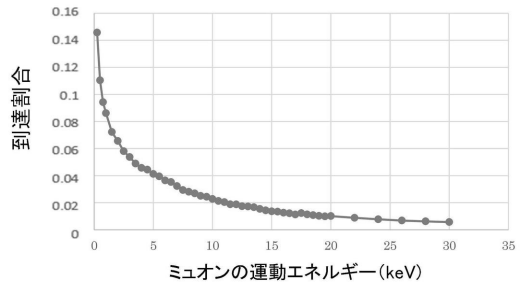
(a)



(b)

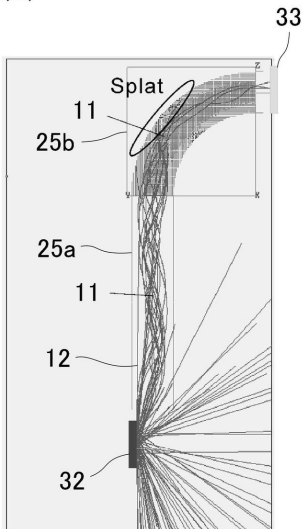


【図14】

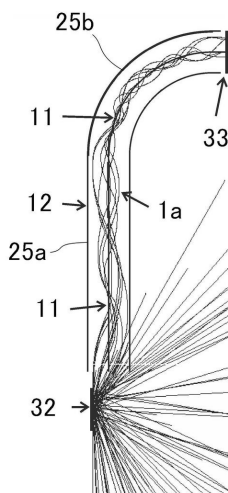


【図15】

(a)

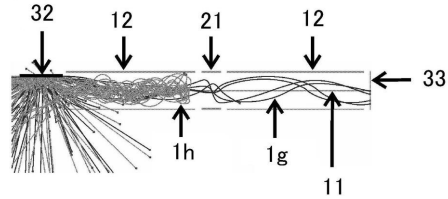


(b)

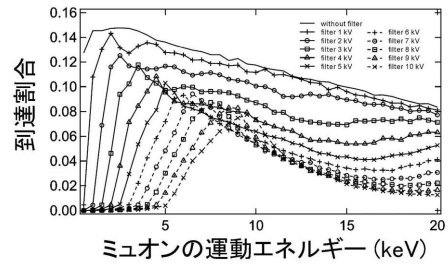


【図16】

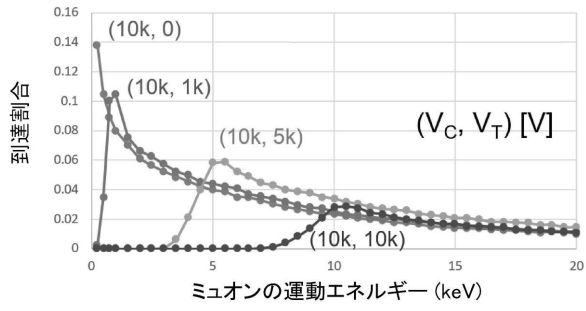
(a)



(b)



【 図 1 7 】



フロントページの続き

特許法第30条第2項適用申請有り ・ウェブサイトのアドレス：<https://jps200908.award-con.com/> ウェブサイトの掲載日：2020年(令和2年)8月28日 ・集会名：一般社団法人日本物理学会 2020年秋季大会(物性) 開催日：2020年(令和2年)9月8日~11日 ・ウェブサイトのアドレス：<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112712> ウェブサイトの掲載日：2021年(令和3年)6月14日

- (72)発明者 パトリック ストラッサー
茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内
- (72)発明者 三宅 康博
茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内
- (72)発明者 奥津 賢一
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
- (72)発明者 木野 康志
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
- (72)発明者 山下 琢磨
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
- (72)発明者 宮下 湖南
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
- (72)発明者 中島 良太
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内