

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18630

研究課題名（和文）サイクロトロン共鳴によるミュオン加速のための基礎研究

研究課題名（英文）Developments for muon acceleration with cyclotron resonance

研究代表者

大谷 将士（Otani, Masashi）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：90636416

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：2マイクロ秒の寿命を持つミュオンを迅速に加速するために注目されているサイクロトロン共鳴加速の実現可能性について、シミュレーションと試作機の制作を通じて検証した。シミュレーション結果によると、長さ29cmの加速空洞と約7テスラのソレノイド磁石を用いることで、約20MeVまでの加速が可能であることが確認された。これは、現在建設中の加速器に比べて数十分の一の長さでの加速が可能であることを示している。また、シミュレーションを基に設計・製作された加速空洞の試作機について、製作段階での基本性能評価を行った結果、予想通りの性能が得られていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、申請者が実現したミュオンの加速技術は、新たな量子ビームの可能性を世界に示すものであり、ミュオン精密測定を足掛かりにした素粒子統一理論の解明をはじめ、新たな科学的発見のための起爆剤として期待されている。加えて、ミュオンを利用したピラミッドや火山の透視技術は、宇宙線を加速ミュオンビームに置き換えることで、非常に短時間で高精度のイメージングが実現できることから、多様な応用が議論されている。本研究では、ミュオン加速器の更なる高度化を目指したサイクロトロン共鳴加速の原理実証を行った。

研究成果の概要（英文）：The feasibility of cyclotron auto-resonance acceleration, which is gaining attention for quickly accelerating muons with a lifespan of 2 microseconds, was verified through simulations and the creation of a prototype.

According to the simulation results, using an acceleration cavity 29 cm in length and a solenoid magnet of approximately 7 Tesla, it is possible to accelerate up to about 20 MeV. This demonstrates that acceleration can be achieved in a fraction of the length compared to accelerators currently under construction.

Furthermore, a basic performance evaluation conducted during the production stage of the prototype acceleration cavity, which was designed based on the simulations, revealed that the expected performance has been achieved.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：ミュオン ミュオン 自動サイクロトロン共鳴加速

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ミュオンは第二世代の荷電レプトンで電子よりも約 200 倍重い素粒子である。電子や陽子といった他の粒子と比べて透過力が高く、宇宙線を用いたピラミッドや火山などの大規模構造物の透過イメージングが行われている。しかし、宇宙線ミュオンは数 100 MeV 以上のエネルギーが得られるものの、フラックスは 10^{-2} 個/cm²・s と低く、エネルギーが単色でないという難点があり、測定時間とイメージング分解能の律速となっていた。一方で J-PARC などの加速器施設では $\sim 10^8$ 個/cm²・s のフラックスが得られる一方、エネルギーは \sim 数 10 MeV と低くイメージングには適していない。人口ミュオンを加速できれば、宇宙線ミュオンの 6 桁上のフラックスと単色なペンシルビームという特長を活かした革新的な透過イメージング手法が確立し、様々な応用が可能になる。

近年、ミュオンオニウムレーザーイオン化(室温エネルギー 30~200meV まで減速)による冷却の確立によって、冷却後のミュオン加速手法の開発が盛んである。例えば既に初段加速が実現している高周波線型加速器 [PRAB, 21, 050101 (2018).]、電界集中型加速器[Proc. of IPAC2015, p2532-2534.], サイクロトロン加速器 [Proc. of the 16th PASJ, p121-125.]などがある。しかし、いずれの手法も数 MeV まで加速するのに 1 マイクロ秒程度を要し、約 3 割程度の崩壊損失が生じる。そこで、生成したミュオンを効率良く利用するためには、より素早く加速する必要がある。

2. 研究の目的

ミュオンを素早く加速するための手法として着目したのがサイクロトロン共鳴加速である。

サイクロトロン共鳴加速は一様磁場中でのサイクロトロン運動と横方向電場を持つ TE モードなどの高周波電場を同期させることで粒子を加速する方式である。既に電子加速で高効率加速の実績があるが [PRL 76, 2718 (1996).]、電子の場合は相対論的效果によって到達エネルギーに限界がある。陽子加速も検討されてきたが、質量が重たい分大口径の強磁場ソレノイド磁石がボトルネックとなる。以上の経緯を考慮すると、電子と陽子の中間質量をもつミュオンはサイクロトロン共鳴加速に適した粒子であり、冷却手法が成熟した今こそ、この手法によるミュオン加速の検証の 때가来たといえる。本研究で、本原理でミュオン加速が可能か検証する。

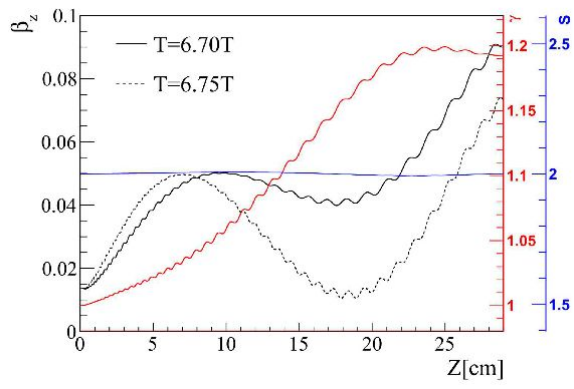
3. 研究の方法

サイクロトロン共鳴加速によってミュオン加速が可能か検証するために、シミュレーションによるミュオンビームダイナミクスの理解と、試作空洞の製作・試験を行った。

4. 研究成果

シミュレーションによる検討では、まず、現実的なソレノイド磁場強度・口径を考慮して高周波空洞の形状を決め、電磁場分布を計算した。次に、有限要素法によって計算した電磁場分布をもとに、ルンゲ・クッタ法でミュオンの軌道計算を行った。次ページ左図は共振周波数 850MHz、空洞内径 13cm、長さ 29cm の空洞と約 7 テスラのソレノイド磁石を用いて計算した結果である。赤色がエネルギーに対応するガンマファクターを表しており、約 20MeV まで加速が出来ていることが分かる。

次ページ右図は、シミュレーション検証に基づいて設計した試作空洞の 3 次元図面の断面図である。将来の大電力試験を見据えて、共振周波数 324MHz で製作した。側面には周波数調整のためのチューナーポートやパワー入力のためのカプラーポートが備え付けられている。製作段階での基本性能は測定済で、今後、電磁場分布測定や大電力試験を進める予定である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Otani Masashi	4. 巻 67
2. 論文標題 First muon acceleration and muon linear accelerator for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Otani Masashi	4. 巻 32
2. 論文標題 Muon cooling and acceleration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AAPPS Bulletin	6. 最初と最後の頁 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s43673-022-00035-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 4件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 素粒子現象から巨大構造物まで透視するミュオン加速技術
3. 学会等名 総研大高エネルギー加速器科学研究科2021年度 第3回大学院説明会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 小型ミュオン加速器による革新的イメージング技術の実現
3. 学会等名 超異分野学会 大阪大会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 革新的なイメージング技術実現にむけたミュオン線型加速器の実現と小型化
3. 学会等名 中間子科学の将来討論会（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 小型ミュオン加速器による革新的イメージング技術の実現
3. 学会等名 茨城テックプランター2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 Muon acceleration and its future
3. 学会等名 5th International School on Beam Dynamics and Accelerator Technology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 加速器の仕組みとその利用～素粒子現象から巨大構造物まで透視するミュオン加速技術～
3. 学会等名 北海道大学・KEK-day2022 ～加速器を利用するような先端計測研究者を目指すには～（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 小型ミュオン加速器による革新的イメージング技術の実現
3. 学会等名 ROISクロストーク2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 社会実装を見据えたミュオン加速技術の高度化
3. 学会等名 研究シーズマッチングイベント ~企業との共同研究・開発を目指す、若手研究者の61の技術シーズ公開！~ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 Simulation of imaging using accelerated muon beams
3. 学会等名 12th Internatinal Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 Tomography and Radiographic Imaging using Accelerated Muon Beam
3. 学会等名 Optical Sensors and Sensing Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 ミュオン加速器で探る未知の素粒子現象
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 ミュオンビームを用いた革新的な透過イメージング
3. 学会等名 茨城テックプランター2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷将士
2. 発表標題 素粒子現象から巨大構造物まで透視するミュオン加速技術
3. 学会等名 総研大高エネルギー加速器科学研究科2021年度 第3回大学院説明会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	近藤 恭弘 (Kondo Yasuhiro) (40354740)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 J - P A R Cセンター・主任研究員 (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------