

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03666

研究課題名(和文)素粒子物理の新時代を切り拓くミュオン線型加速器の開発

研究課題名(英文)Muon linac development to open new era of particle physics

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) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオン異常磁気能率($g-2$)は素粒子標準模型と3標準偏差以上の乖離があるが、10年以上もの間これを検証する測定結果がない。そこで我々はミュオン線型加速技術を用いた新原理によるミュオン $g-2$ 測定を行い、この乖離に決着をつけ素粒子物理の新しい時代を開拓する。一方でミュオン線型加速技術はこれまでに前例がなく、実験実現の大きな壁となっていた。本研究では以下の3つを実現した。(1)前例のないミュオン線型加速器(25meVから212MeVまで加速)の設計を完了(2)1個の低エネルギーミュオンに感度のある高感度ビームプロファイルモニターの開発(3)世界初のミュオン高周波加速の実証

研究成果の概要(英文)：A difference of more than three standard deviations exists between the Standard Model prediction and the measured value in muon anomalous magnetic moment ($g-2$). Because there has been no measurement for a decade or more, we are developing muon linear accelerator to realize new measurement with new scheme. The muon acceleration, however, had not been realized. We completed following three developments: (1) Complete of the muon linac design to accelerate muon from 25 meV to 212 MeV; (2) Development of the muon beam profile monitor which is sensitive to low energy and single muon; (3) Demonstration of the muon linear acceleration, which is the first time in the world.

研究分野：加速器科学

キーワード：素粒子 ミュオン 線型加速器 異常磁気能率 プロファイル IH RFQ J-PARC

1. 研究開始当初の背景

2006年、ブルックヘブン研究所で行われたミュオン異常磁気能率($g-2$)の精密測定実験によって、測定値と素粒子の標準理論予想値との間に3標準偏差以上の乖離があることが分かった。この乖離は標準理論を超える暗黒物質や新しい相互作用の兆候であると考えられるが、10年以上もの間これを検証する測定結果がない。この乖離を検証して新物理の存在を確立し素粒子物理の新しい地平を切り開くには、先行実験とは独立した手法により高精度測定を行う必要があるのは明白であった。

そこで我々はビームの指向性を表すエミッタンスが従来のミュオンビームより3桁以上向上した革新的なミュオンビームによって、ミュオン $g-2$ の測定を計画している。低エミッタンスのミュオンビームにより、先行実験で主要な系統誤差になっていたビーム由来の不定性を排除し、 $g-2$ 高精度測定が可能になる。この実験を実現するには、エネルギー $\sim 4\text{MeV}$ の表面ミュオンビームを室温ミュオニウム生成及びレーザー乖離により熱エネルギー(25meV)まで減速した後(ミュオン冷却)、エネルギー 212MeV まで加速する必要がある。ミュオンの崩壊損失を抑えるためには、これまでに前例のないミュオン専用的高周波加速器によって加速を実現する必要がある。

それまでの研究によって高効率の室温ミュオニウム生成標的の開発に成功し、先行実験を超える精度で測定できる見通しがついた[G. A. Beer et al., PTEP 2014 (2014) 091C01]。一方で、世界初のミュオン線型加速器の設計と、前例のないミュオン高周波加速の実証が実験実現の大きなマイルストーンであった。

2. 研究の目的

本研究はJ-PARCミュオン $g-2$ 実験のためのミュオン線型加速器の実現にむけた以下の3つである。

A) ミュオン線型加速器の設計

ミュオンは約2マイクロ秒で崩壊するため、高効率で素早く加速する必要がある。そ

こで高周波線型加速器によってミュオンを加速する。粒子に同期して高周波加速電場を印加させて加速するために、速度変化に応じて空洞の構造を変える必要がある。ミュオンは陽子と電子の中間質量を持つために、電子・陽子とミュオンでは同じ加速エネルギーでも速度変化が異なる。そこで、前例のないミュオン専用の加速空洞の設計が必要になる。

さらに設計した加速空洞に関してプロトタイプを製作し、基本性能を測定することで、設計の妥当性・更なる設計精度の向上を目指す。

B) ミュオンビームモニターの開発

ミュオン線型加速器において、加速中にエミッタンスが増加する主要な原因はビーム形状のミスマッチである。そこで、目標エミッタンスを達成するためには、ビームプロファイルを精度数百マイクロメートルで測定し、四極電磁石などによりビーム整形を行って加速空洞に入射する必要がある。しかし、前例のない低エネルギー・低エミッタンスのミュオンビームを観測するためには、新規に高感度・高精度のビームモニターを開発する必要がある。

C) ミュオン高周波加速の実証

ミュオンの高周波加速は前例がない。そこで、世界初となるミュオンの高周波加速を実証する。

3. 研究の方法

A) ミュオン線型加速器の設計

これまで陽子加速器・電子加速器で培われてきた加速技術を応用し、ほぼ静止したミュオンを 212MeV まで加速するミュオン専用の線型加速器の基本設計を行う。

加速空洞の中でも空洞設計に対する要求が最も厳しい低速部加速空洞IH-DTLのプロトタイプを製作し、基本性能を測定して設計の妥当性・更なる設計精度の向上を目指す。

B) ビームモニターの開発

実験初期にはビーム強度が低いことが予想されるため、ミュオン1個に感度があるビームモニターが必要となる。そこで、低速イオン等の測定で実績のあるマイクロチャ

ンネルプレート(MCP)と蛍光板・CCD カメラで構成されるプロファイルモニターを開発する。

まず冷却・加速の必要がない表面ミュオンビームによって性能評価試験を行い、冷却後・加速後のミュオンビームによって性能評価を行う。

C) ミュオン高周波加速の実証

世界初となる高周波加速を早期に実現するために、室温ミュオニウム・レーザー乖離よりも簡易的・低コストな手法でミュオンを冷却する。ここで我々は金属薄膜によるミュオニウム負イオン(正ミュオンと電子2個の複合粒子、Mu)の生成に着目した。この手法では表面ミュオンビームを金属薄膜に入射するだけで1keV以下まで減速することが可能である。一方で、Muは1980年代後半の初観測以降[D.R.Harshman et al., PRL 56, 2850, 1986; Y. Kuang et al., PRA 35, 3172, 1987]、再測定の例が無く、十分な強度が得られるか未知であった。

そこでまずMuの測定を行う。結果に基づいて加速試験をデザインし、ミュオン高周波加速に調整する。

4. 研究成果

A) ミュオン線型加速器はRFQ、IH-DTL、DAW CCL、DLSの4つの加速空洞からなる。以下の通り、ミュオン線型加速器の全体設計を完了した。

まず、線型加速器に入射するミュオンビームの形状を見積もった。我々が行った室温ミュオニウム生成実験の実測データ[PTEP 2014 (2014) 091C01]に基づいたシミュレーションを構築し、信頼度の高い見積もりに成功した [論文 2]。

実験の早期実現のために、初段加速器RFQはJ-PARCリニアックで負水素イオン用に製作されたものを質量比で電力をスケールすることにより再利用する。シミュレーションによってミュオンに対しても95%と高い加速効率を持っていることを実証した[発表 26]。

低速加速には通常のアルパレ型より高い加速効率を持つIHタイプを採用した。さら

に加速効率を目指し、高周波電場のみでビームの収束を行うAPFを採用した。これによって、四極電磁石などの構造を排除し、高効率・短距離で効率よくミュオンを加速することが可能になる。一方で空洞のデザインで決まる高周波電場のみで加速・収束の両方を両立しなければならないため、デザインが難しい。CST MW Studio や GPT などのソフトウェアを用いた設計自動化ツールを製作して設計を完了し、十分低いエミッタンス増加(x方向6%, y方向16%)[論文9]。さらに高い加速効率を持つCH型に関する設計を完了した [論文 5]

中速部加速には、CCLの中でも特に高い高周波結合度を持ち製作コストの低減が見込まれる DAW CCL を採用した。CST MW Studio などの電磁場解析ソフトウェアならびに PARMILA などのビームダイナミクス設計ソフトウェアを用いて設計を完了し、エミッタンス増加が数パーセント以下で高い輸送効率を実現した[発表 19]。

高速部加速には電子加速器で用いられている DLS を採用し、高加速勾配によって速やかに加速を行う。電子用と異なり、速度変化に応じて加速構造も変化する必要があった。シミュレーションによって設計を完了し、エミッタンス増加が数パーセント以内であることを実証した[論文 6]。

以上より、ミュオン線型加速器の全体設計を完成した。得られるミュオンビームの規格化エミッタンスは0.33(x), 0.21(y) mm mrad、運動量分散は0.04%でg-2実験の要求値を満たしている。輸送効率は80%以上、線型加速器における崩壊損失は25%程度で、先行実験を超える統計精度が可能である。

設計の妥当性を確認するために、IHプロトタイプを製作した。共振周波数及び無負荷Q値が設計値通りであることを確認した [国際会議 linac2018 で発表予定]。これにより設計の妥当性を確認することができた。

B) MCP・蛍光板・CCDカメラからなるビームプロファイルモニター (BPM)を開発し、紫外光によるテストベンチ試験、表面ミュオンビームの照射試験によって、1個のミュオンに感度を持ち、位置分解能が200um

以下で十分な性能を持っていることを実証した[論文 4、論文 8]。

C) Muの観測に成功し、測定結果に基づき加速試験をデザインし、十分実験が可能であることを実証した [論文 7]。

実際に RFQ プロトタイプを用いた加速試験を行い、世界初のミュオン高周波加速を実証した [論文 1]。

さらに開発した BPM を用いて RFQ で加速した後のプロファイルを測定し、シミュレーションによる予想と無矛盾であることを確認した [論文 3]。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

1. M. Otani, Y Kondo, et al. (他 24 名), “First muon acceleration using a radio frequency accelerator”, Phys Rev. AB, 21, 050101, 2018, 査読有
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101>
2. M. Otani et al. (他 5 名), “Simulation of surface muon beamline, ultra-slow muon production and extraction for the J-PARC g-2/EDM experiment”, to be published in J. Phys.: Conf. Ser. 査読有
3. M. Otani et al. (他 5 名), “Muon profile measurement after acceleration with a radio-frequency quadrupole”, J. Phys.: to be published in Conf. Ser. 査読有
4. B. Kim, S. Bae, H. Choi, S. Choi, N. Kawamura, R. Kitamura, H. S. Ko, Y. Kondo, T. Mibe, M. Otani, G. P. Razuvaev, E. Won, “Development of a Microchannel Plate Based Beam Profile Monitor for Re-accelerated Muon Beam”, to be published in Nucl. Instr. Meth. A.
5. M. Otani et al. (他 5 名), “Crossbar H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon linac”, J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 874, 012038, 2017. 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/174>

2-6596/874/1/012038

6. Y. Kondo et al. (他 6 名), “Beam dynamics design of the muon linac high-beta section”, J. Phys.: Conf. Ser. Vol.874,01254,2017. 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/874/1/012054>
 7. R. Kitamura, M. Otani et al. (他 12 名), “First trial of the muon acceleration for J-PARC muon g-2/EDM experiment”, J. Phys.: Conf. Ser. Vol.874,01255,2017、 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/874/1/012055>
 8. G. P. Razuvaev, S. Bae, H. Choi, S. Choi, H.S. Ko, B. Kim, R. Kitamura, T. Mibe, and M. Otani, “The low energy muon beam profile monitor for the muon g-2/EDM experiment at J-PARC”, Jour. Instr. 12, C09001-C09001, 2017, 査読有、
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/09/C09001>
 9. M. Otani et al., “Interdigital H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon linac”, Phy. Rev. AB, 19, 040101, 2016, 査読有、
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.040101>
- [学会発表](計 26 件)
1. M. Otani, “Simulation of surface muon beamline, ultra-slow muon production and extraction for the J-PARC g-2/EDM experiment”, 9th International Particle Accelerator Conference, 2018, Vancouver, British Columbia, Canada.
 2. M. Otani, “Muon profile measurement after acceleration with a radio-frequency quadrupole”, 9th International Particle Accelerator Conference, 2018, , Vancouver, British Columbia, Canada.
 3. Y. Kondo, “Re-acceleration of ultra cold muon in J-PARC muon facility”, 9th

- International Particle Accelerator Conference, 2018, Vancouver, British Columbia, Canada.
4. 大谷将土, “遂に実現したミュオン高周波加速の展望”, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年, 東京理科大学 野田キャンパス、千葉
 5. 大谷将土, “遂に実現したミュオン高周波加速”, 第8回 Muon 科学と加速器研究, 2018年, KEK, Tsukuba.
 6. 大谷将土, “RFQを用いたミュオン加速の準備状況”, 日本物理学会2017年年度大会, 2017年. 宇都宮大学, 峰キャンパス, 栃木
 7. 大谷将土, “世界初、ミュオンを加速するライナック”, SAT テクノロジー・ショーケース2017, 2017年, つくば
 8. M. Otani, “Crossbar H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon linac”, 8th International Particle Accelerator Conference, 2017, Copenhagen, Denmark.
 9. Y. Kondo, “Beam dynamics design of the muon linac high-beta section”, 8th International Particle Accelerator Conference, 2017, Copenhagen, Denmark.
 10. R. Kitamura, M. Otani, “First trial of the muon acceleration for J-PARC muon g-2/EDM experiment”, 8th International Particle Accelerator Conference, 2017, Copenhagen, Denmark.
 11. M. Otani, “APF IH-DTL Design for the Muon LINAC in the J-PARC Muon g-2/EDM Experiment”, 7th International Particle Accelerator Conference, 2016, Busan, Korea.
 12. 大谷将土, “ミュオン線型加速器 APF 方式 IH-DTL デザイン”, 第13回日本加速器学会年会, 2016年, 幕張メッセ
 13. 近藤恭弘, “J-PARCにおけるミュオン g-2/EDM 精密測定実験のためのミュオンリニアック”, 第13回日本加速器学会年会, 2016年, 幕張メッセ
 14. 北村遼, 大谷将土, “ミュオン g-2/EDM 実験のための RFQ を用いたミュオン初期加速の現状”, 第13回日本加速器学会年会, 2016年, 幕張メッセ
 15. M. Otani, “Development of Muon LINAC for the Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC”, 7th International Particle Accelerator Conference, 2016, Busan, Korea.
 16. M. Otani, “Development of a muon linac for the g-2/EDM experiment at J-PARC”, The international workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics (HINT2016), 2016, Tokai, Ibaraki, Japan.
 17. M. Otani, “Development of a Muon Linac for the g-2/EDM Experiment at J-PARC”, 28th LINEAR ACCELERATOR CONFERENCE, 2016, Michigan State University, Michigan, US.
 18. 大谷将土, “ミュオン異常磁気能率精密測定(J-PARC E34)を目指したミュオン線型加速器の開発”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年, 東北学院大, 宮城
 19. M. Otani, “Design of a bi-periodic DAW for Muon linac”, World Research Unit for Heavy Flavor Particle Physics Symposium 2016, 2016, Nagoya University, Aichi, Japan.
 20. 大谷将土, “世界初のミュオン線型加速器の開発”, 第五回超異分野学会, 2016年, 東京 【学会賞受賞】
 21. M. Otani, “Development of the Muon LINAC for the J-PARC E34 Experiment”, The international workshop on future potential of high intensity proton accelerator for particle and nuclear physics (HINT2015), 2015年
 22. 大谷将土, “J-PARC g-2/EDM 実験ミュオン線型加速器のための APF IH-DTL の設計”, 2015年, ビーム物理研究会2015, 茨

城【若手発表賞受賞】

23. M. Otani for the J-PARC E34 collaboration, “g-2 J-PARC”, XVII International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities, 2015, Centro Brasileiro de Pesquisas Fisicas, Brazil.
24. 大谷将士, “ミュオン g-2 精密測定にむけたミュオン加速の原理実証”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年.
25. 大谷将士, “素粒子物理の新時代を切り拓くミュオン加速”, ROIS H27 若手クロストーク, 2015 年, 八ヶ岳ロイヤルホテル, 山梨.
26. 大谷将士, “J-PARC E34 実験ミュオン線型加速器の原理実証及び空洞設計”, 第 12 回日本加速器学会年会, 2015 年,

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

J-PARC E34 実験 HP:

<http://g-2.kek.jp/portal/index.html>

東大学際理学齊藤研究室/総研大ミュオン精密測定研究室 HP:

<http://g-2.kek.jp/gakusai/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大谷 将士 (OTANI, Masashi)
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

(2)研究分担者

近藤 恭弘 (KONDO, Yasuhiro)
日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARC センター・副主任研究員
研究者番号：40354740

(3)研究分担者

岩下 芳久 (IWASHITA, Yoshihisa)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号：00144387

(4)連携研究者

()

研究者番号：

(5)研究協力者

北村 遼 (KITAMURA Ryo)
東京大学・理学研究科・博士課程学生