

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間	2020～2025
課題番号	20H05625
研究課題名	ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定
研究代表者氏名（ローマ字）	三部 勉 (MIBE Tsutomu)
所属研究機関・部局・職	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号	80536938

研究の概要：

素粒子標準理論は、様々な素粒子現象を定量的に説明する極めて堅牢な理論である。ミュオン異常磁気能率( $g-2$ )は素粒子標準理論よりも大きな値を持つことが示唆されており、新しい測定が求められている。本研究では従来とは異なる新しい実験技術を開発し $g-2$ および電気双極子能率(EDM)の超精密測定を行い、素粒子標準理論を超える新物理の存在に迫る。

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ミュオン、異常磁気能率、電気双極子能率

1. 研究開始当初の背景

ミュオン  $g-2$  や EDM は未知粒子や相互作用の効果が顕著に現れ得る物理量である。ミュオン  $g-2$  は、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)で 540ppb の相対精度で測定され、標準理論の予想から誤差の3倍以上大きな値を持つと報告された。その後、実験装置を BNL からフェルミ国立研究所(FNAL)へ移設し、新たなデータ収集が行われている。2021年4月に最初の結果発表があり、BNLの結果を追認するものであった。標準理論の計算精度を向上する研究はさらに精力的に進められており、格子QCD計算を用いた新たな取り組みや、電子・陽電子衝突実験から新しい実験データも出てきている。一方、このような精度で $g-2$ を測定したのはBNLとFNALの先行実験のみであり、独立な検証が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、ミュオンを冷却・加速することにより世界初の低エミッタンスビームを実現し、3次元らせん入射・コンパクトな蓄積磁石・高安定度飛跡検出器を用いて従来と全く違う手法を用いて、 $g-2$ とEDMの超精密測定を行う。これにより $g-2$ に新物理の効果が見えているのかに決着をつけるとともに、EDMを世界最高精度で探索することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

ミュオンビームは陽子加速器からのビームが標的で原子核反応を起こしてパイオンを生成し、その崩壊により生じるミュオンを捕獲・輸送することにより得られる。これらの過程でビームエミッタンス(位相空間体積)は大きく広がる(1,000  $\pi$  mm $\cdot$  mrad)ため、高輝度なビームを得ることができない。従来研究ではビームに起因する系統誤差が支配的であった。本研究では、ミュオンを冷却・加速することにより得られる低エミッタンス(1  $\pi$  mm $\cdot$  mrad)のビームを生成し、これを抜本的に解決する。すなわち、従来は不可能であった高効率入射・収束電場の排除・高い磁場一様性・陽電子飛跡の完全再構成を実現し、従来の系統誤差要因を完全に払拭する。

本研究は現在建設中のJ-PARCの物質生命科学実験施設(MLF)のミュオンビームライン(Hライン)にて行う。陽子加速器から取り出された3 GeVの陽子ビームがミュオン生成標的に照射されると、標的中でパイオンが生成・静止し、その2体崩壊によって100%偏極した運動エネルギー4 MeV(運動量約30 MeV/c)の正電荷を持つミュオン(表面ミュオン)が生成される。これを捕獲ソレノイドとビームラインによって輸送し、ミュオニウム生成標的で静止させる。ここでミュオンは熱エネルギー程度まで減速され、電子を捕獲しミュオニウムとなり、標的外へ放出される。共鳴イオン化レーザー(122 nm/355 nm)を用いてミュオニウムから電子を解離すると、熱エネルギー(25 meV)程度の超低速のミュオンができる。これを直線加速器で運動エネルギー212 MeVまで3段階に分けて加速することで非常に指向性の良い( $p_T/p \sim 10^{-5}$ )「低エミッタンスミュオンビーム」が得られる。ビームエミッタンスは通常のミュオンビームに比べて1/1000程度小さい。このビームを3 Tの超伝導蓄積磁石へ入射する。均一度が極めて高い蓄積磁場でミュオンビームを蓄積し、崩壊で生成した陽電子をシリコン飛跡検出器で測定することにより、ミュオンのスピン歳差運動を測定し、 $g-2$ とEDMを精密測定する。

4. これまでの成果

以下の通り、本研究計画の申請時に設定したマイルストーンを予定通り達成した。

ミュオンビームの冷却する実験装置の設計・製造を行い、2023年2月からビーム冷却の実証試験を開始することができた。関連するミュオン冷却に関する論文を出版した(論文3,5)。ミュオンを4 MeVまで加速するための高周波加速空洞(IH-DTL)を製作し、その特性の評価を完了した(論文1)。ミュオンを10 MeV

まで加速する空洞(DAW-CCL)の設計と要素試作と評価を行い、製作方法を確立した。加速後のミュオンを蓄積磁石へ入射するためのビームラインの設計を完了し、電磁石の製作・評価を行なった(論文4)。加速ミュオンの診断装置を開発した。

実験で要求される仕様を満たすミュオン蓄積磁石の設計を完了した。また、磁場の調整のための磁場測定プローブの開発と磁場調整手法の実証を行い、要求される一様性が得られることを示した(論文2)。陽電子飛跡検出器に用いる専用のASICの開発を完了し、量産を行なった。試験モジュールを製作し陽電子を用いて評価を行い、要求される性能が満たされることを確かめた。ASICを全数検査し、品質保証するシステムの構築を行なった。検出器の組み立てラボを立ち上げ、プロトタイプの製作を行ない、組み立て方法を確立した。

世界初の冷却ミュオンの高周波加速の実証を開始する準備が整い、2023年度からはミュオン加速器を設置し、加速を段階的に実証する段階に移る。また、磁場測定装置と陽電子飛跡検出器は要素部品の開発とプロトタイプ製作・評価を終え、実機製作・量産の段階へ進む準備を整えることができた。

## 5. 今後の計画

今後は引き続き、ミュオン冷却、ミュオン加速、3次元らせん入射技術による「高輝度ビーム」を完成させるとともに、超高感度磁場測定装置と極めて安定に動作する陽電子飛跡検出器の製作やデータ収集・解析システムの構築を行い「超高精度測定器」の開発を完了し、新しい手法による実験を完成させる。本研究で取り組む技術開発目標のうち、低エミッタンスビームの実現、超精密磁場測定手法の開発、飛跡検出器と飛跡再構成の開発、については別途整備が進んでいる基盤設備の全体を必要としないため、当初の計画通りの成果が得られる予定である。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[論文](全て査読付)

1. “High-power test of an interdigital H-mode drift tube linac for the J-PARC muon g-2 and electric dipole moment experiment”, \*Nakazawa, Y. and Cicek, E., Futatsukawa, K., Fuwa, Y., Hayashizaki, N., Iijima, T., Iinuma, H., Iwata, Y., Kondo, Y., T.Mibe., Mizobata, S., Morishita, T., Otani, M., Sue, Y. and Takeuchi, Y. Tojo, J., Phys. Rev. Accel. Beams, Volume: 25, Issue: 11, p. 110101.
2. “Evaluation of the magnetic field error due to manufacturing tolerance of superconducting magnet for J-PARC muon g-2/EDM experiment”, \*S. Oyama, M. Abe, H. Iinuma, T. Mibe, K. Sasaki, N. Saito, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 33, Issue: 5, p1-5, 2023.
3. “Modeling the diffusion of muonium in silica aerogel and its application to a novel design of multi-layer target for thermal muon generation”, Ce Zhang, T. Hiraki, K. Ishida, S. Kamal, S. Kamioka, T. Mibe, A. Olin, N. Saito, K. Suzuki, S. Uetake, Y. Mao, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1042 (2022) 167443, p1-8.
4. “Design of a Strong X-Y Coupling Beam Transport Line for J-PARC Muon g-2/EDM Experiment”, \*H. Iinuma, H. Nakayama, M. Abe, K. Sasaki, T. Mibe, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 32, Issue: 6, p1-5, 2022.
5. “Study of muonium emission from laser-ablated silica aerogel”, J. Beare, G. Beer, J. H. Brewer, T. Iijima, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kamal, K. Kanamori, N. Kawamura, R. Kitamura, S. Li, G. M. Luke, G. M. Marshall, T. Mibe, Y. Miyake, Y. Oishi, K. Olchanski, A. Olin, M. Otani, M. A. Rehman, N. Saito, Y. Sato, K. Shimomura, K. Suzuki, M. Tabata, H. Yasuda, Prog. Theor. Exp. Phys., 2020 123C01, p1-24.

[受賞]

1. “HIGH-POWER TEST OF AN APF IH-DTL PROTOTYPE FOR THE MUON LINAC”, Y. Nakazawa, LINAC 2022 Student Poster Session Second Prize
2. J-PARC muon g-2/EDM 実験のための3次元らせん入射実証実験, 松下凌大, 2022年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞
3. ミューオン加速用円盤装荷型加速管におけるカプラーセルの設計, 鷲見 一路, 第19回加速器学会年会(PASJ 2022) 年会賞
4. ミューオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL プロトタイプの大電力試験, 中沢 雄河, 第19回加速器学会年会(PASJ 2022) 年会賞
5. 「ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の同時観測法の開発」, 飯沼裕美, 2022年度「第10回湯浅年子賞」
6. 「For his development of the muon linac, and demonstration of the muon acceleration for the first time in the world」, 大谷将士, AAPPS-APCTP C.N. Yang Award (2020)
7. 「J-PARC ミューオン g-2/EDM 実験での超低速ミュオンの高周波加速実証に向けた入射ビームラインの設計」, 四塚 麻衣, 2021年秋季大会 学生優秀発表賞(素粒子実験領域)
8. 「ミュオン線形加速器のための Disk-and-Washer 空洞の詳細設計」, 竹内 佑甫, 第18回加速器学会年会(PASJ 2021) 年会賞

## 7. ホームページ等

<https://www.g-2.kek.jp>