

学位申請論文公開講演会

日時：2025 年 1 月 30 日(木) 13:00~

申請者：鷺見 一路 (N 研)

場所：理学南館セミナールーム

題目：Study of Low-Emittance Muon Beam Acceleration for the J-PARC Muon $g-2$ /EDM Experiment
(J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験のための低エミッタンスミューオンビーム加速に関する研究)

主論文の要旨

素粒子標準模型は、これまでに知られている素粒子の相互作用を正確に記述するが、暗黒物質の存在や物質優勢宇宙を説明できないなどの問題が存在する。そのため、標準模型を超える新しい物理理論を探索し、究極の物理法則を解明することは、素粒子物理学における重要な課題である。ミューオンの異常磁気能率 ($g-2$) の精密測定とミューオン電気双極子能率 (EDM) の探索は、新しい物理理論の探索手法として高い感度を持つ。

ミューオン $g-2$ は、理論値と実験値の双方が 0.5 ppm 以下の精度で得られているが、両者の乖離が報告されており、新しい物理理論の兆候である可能性がある。一方、ミューオン EDM は、標準模型の予測が $O(10^{-38}) e \cdot \text{cm}$ と極めて小さく、実験上限値 $O(10^{-19}) e \cdot \text{cm}$ 付近で観測されれば物質と反物質の対称性を破る未知の相互作用の証拠となる。これらの測定量は、磁場中に閉じ込めたミューオンのスピン歳差運動から求まるが、先行実験には、ミューオンビームの位相空間での広がり (エミッタンス) に起因する約 0.5 ppm の補正と、磁場の不均一さによる誤差が存在する。大強度陽子加速器施設 (J-PARC) では、低エミッタンスミューオンビームとより均一な磁場を用いて、先行実験とは異なる手法による $g-2$ の独立な検証と EDM 探索の 2 桁の精度向上を目指している。このミューオンビームの実現には、ミューオンビームのエミッタンスを低減する冷却の技術と、光速 c の 0.1 倍の低速域から 0.9 c の高速域までの速度変化に応じた計 4 段からなるミューオン専用加速器の開発の双方が必要不可欠である。

申請者は、新規に開発した熱ミューオニウムのレーザー共鳴イオン化によるミューオン冷却手法と高周波四重極 (RFQ) 線形加速器による高周波 (RF) 加速を組み合わせ、従来にない加速ミューオンの生成を実現した。本実験では、冷却で得られた運動エネルギー 30 meV の超低速ミューオンを 5.7 kV の静電場で引き出し、RF 加速後に磁場による収束および運動量選別、飛行時間測定による信号特定を行った。エミッタンスの測定に収束力を走査した際のビーム径の応答から求める手法を採用し、構築したシミュレーションを用いた結果の予測および測定精度の検証を遂行した。この手法による測定結果として、水平方向および垂直方向の規格化 RMS エミッタンスを、それぞれ $(0.85 \pm 0.25(\text{stat.})^{+0.22}_{-0.13}(\text{syst.})) \pi \text{ mm-mrad}$ 、 $(0.32 \pm 0.03(\text{stat.})^{+0.05}_{-0.02}(\text{syst.})) \pi \text{ mm-mrad}$ と得た。これは、冷却前からそれぞれ 200 分の 1、400 分の 1 程度までエミッタンスを低減したことに相当する。

次に、申請者は、ミューオン加速器の最終段で 0.70 c から 0.94 c までの加速を担い、最終的なビーム品質を決定する円盤装荷型進行波加速管 (DLS) を設計し、実験的に実現可能であることを示した。電子加速に用いられる DLS によるミューオンの加速には、RF 電場の位相と変化し続けるビーム速度の厳密な同期が重要となる。本研究では、ミューオン専用 DLS 全体の設計を最適化し、シミュレーションにより理想的な状況下でビームエミッタンスの増加を十分抑制した加速が可能であることを示した。さらに、RF 電源由来の誤差や製作誤差に起因する各位置 (セル) ごとの誤差を考慮した計算を遂行した。その結果、RF 振幅誤差 0.5%、RF 位相誤差 1 度、セル振幅誤差 2%、セル移相誤差 3 度の範囲内であれば、ビーム品質への影響が十分に小さいことを明らかにした。加えて、これらの知見を基に製作した試作機の高周波特性を評価し、要求精度を満たすことを示した。

以上のとおり、本研究では、低エミッタンスミューオンビームの加速に向けた低速域と高速域の開発として、冷却と初段加速によるミューオンビームのエミッタンス低減を実証し、ミューオン専用 DLS の実現性を検証した。本研究をもとに実機 DLS の製作が進行し、初段から最終段までを連結することでさらに高エネルギーの低エミッタンスミューオンビームの生成が実現する。このビームを用いることで、J-PARC における新手法を用いたミューオン双極子能率の精密測定が可能となる。