

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月16日現在

ミュオン異常磁気能率の精密測定による新物理法則の探索

Sensitive Search for New Physics Law with
Precision Measurement of Muon Anomalous Magnetic Moment

題番号：15H05742

齊藤 直人 (SAITO NAOHITO)

高エネルギー加速器研究機構・J-PARC センター・センター長



研究の概要 本研究では、素粒子ミュオンの異常磁気能率 ($g-2$) と電気双極子能率 (EDM) を精密測定することで、標準模型を超える新しい物理法則を探索する。 $g-2$ 測定値と標準模型の予言値には、3 標準偏差以上のズレが報告されている。我々は、極冷ミュオンビームを用いることで、全く新しい方法での超精密測定を提案する。この手法では、従来の実験を約 20 分の 1 のサイズで実現し、精密磁場やビーム制御のしやすさなど多くの利点がある。

研究分野：素粒子・原子核物理学

キーワード：素粒子実験、基礎物理学実験、精密測定、対称性

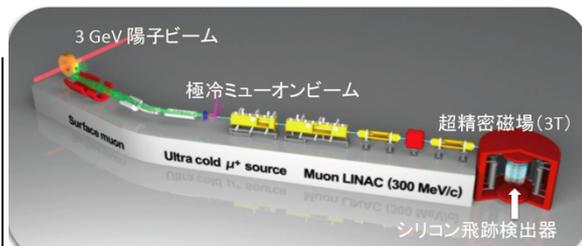
1. 研究開始当初の背景

ミュオンは、標準模型を超えた物理法則 (BSM) の存在を示唆する結果が報告されている数少ない例である。その異常磁気能率 ($g-2$) は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で 0.54 ppm の精度で測定され、標準模型に比べ 3 標準偏差以上大きな値が報告されている。この差を説明するのが超対称性などの BSM である。一方で、実験で直接測定されたのは、実は $g-2$ と電気双極子能率 (EDM) の効果の合算であり、実験値と標準模型の差の、少なくとも一部を有限な EDM に依るものと考えられる。我々は、 $g-2$ と EDM を同時測定する新手法を提案し、この実験で実現する。

2. 研究の目的

本研究では右図のように、極冷ミュオンビームを 300 MeV/c まで加速し、3T の超精密磁場に入射、シリコン飛跡検出器でスピン歳差を測る。また、同じシリコン飛跡検出器を使用して正ミュオンと電子の束縛状態であるミュオニウムの超微細分裂 (HFS) を測定する。

極冷ミュオンビームは、実験室に引き出した表面ミュオンビームを一旦物質に止めてミュオニウム (μ) を生成し、真空中に熱拡散してきた μ をレーザーでイオン化し、残った μ^+ を加速することで得られる。「停止」と「熱拡散」を用いることで、圧倒的に冷えたミュオン源を実現している。この実験の遂行



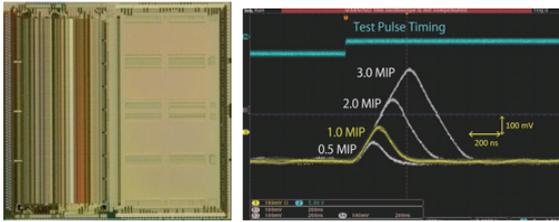
には、大強度の表面ミュオンビームが不可欠である。世界でも有数の大強度加速器施設を用いた研究であるので他の追随を許さないという意味でユニークである。

3. 研究の方法

ミュオン異常磁気能率の精密測定による新物理法則の探索を実施するためのシリコン飛跡検出器の開発を行う。ミュオン蓄積磁石 (3T) 内に入射・蓄積されたミュオンビームは $6.6 \mu\text{s}$ の寿命で蓄積中に崩壊する。崩壊で生じた陽電子飛跡を測定することで、ミュオン崩壊時刻とその時のスピンの向きを決定する。

シリコン飛跡検出器はシリコンストリップセンサーとその信号を読み出す電子回路群、検出器支持構造体で構成される。実機レベルの検出器部材の試作や性能評価試験を行い、設計を完了させる。これに基づき、量産・組立・動作確認を実施し、検出器として組み上げ、本実験に導入する。

最初のベーン構造ができた段階で、J-PARC ミュオン実験施設の既設ビームラインにおいて、ミュオニウムの超微細構造分離の精密測定に適用し、データ収集を行う。これにより、



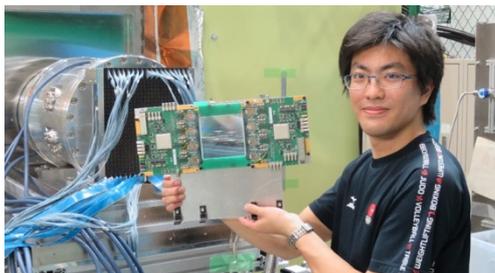
世界最高精度でミュオニウム超微細構造分離を決定する。最終的には、複数のベーンを製作し、J-PARC ミュオン実験施設の新規専用ビームライン(H ライン)において計画されている、ミュオン g-2/EDM の精密測定実験に適用する。

上記のように、シリコン飛跡検出器の建設と、解析の枠組み構築を平行して進め、新しい物理法則の探索を行う。

4. これまでの成果

シリコンストリップセンサーの設計・試験を行い、量産を開始した。フロントエンド読み出し用アナログ・デジタル混載集積回路(SliT128A)を設計・試作し、その性能を評価した(上図)。評価結果に基づいて、最終設計を行った。SliT128Aを4枚搭載した読み出し回路を設計・製作し、シリコンストリップセンサー1枚を読み出す試験機の組み立てを行い、良好な性能が得られることがわかった。並行して、支持構造体の設計、飛跡再構成アルゴリズムの開発とそれを用いた系統誤差の評価を行い、技術設計報告書(TDR)の改訂を行った。

上記の試験機をミュオニウムの超微細構造測定実験に適用した(下図)。試験機は最終的に製作する g-2 実験用検出器ベーンの小規模モデルであるが、ミュオンの崩壊から生じた陽電子の信号が、ノイズと十分に分離できていることが確かめられ、物理測定に堪える性能を有することがわかった。物理結果を得るためのデータ解析が進んでいる。



ミュオン異常磁気能率の精密測定の物理的な意義とそのインパクトを議論するための国際研究会を2016年11月と2018年2月に開催した。研究会ではこの計算に携わる70名の専門家が一堂に会し、新しい手法と計算精度の向上について意見交換を行なった。この議論の結果は、2018年末にホワイトペーパーとして取りまとめる予定である。



5. 今後の計画

当初の研究計画どおり、シリコン飛跡検出器の開発は概ね順調に進んでいる。これをミュオニウム超微細構造の精密測定に適用して、世界最高精度でミュオニウム超微細構造分離を決定する。すでに検出器試験モジュールを組み込んで測定を開始しており、今後有感領域・層数の増加を行えば、ビーム強度の増加と合わせて、目標精度が得られる見通しがたっている。

残りの研究期間で読み出し回路の量産、品質チェック・管理方法の確立、組み立てなどを実施し、実機製作を完了する。ミュオニウム超微細構造の精密測定と並行して、ミュオン g-2/EDM 実験の飛跡再構成方法の改善、系統誤差の見積もりを行い、Hラインの整備後、直ちに実験を開始できるように準備を進める。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

学術論文

- Y. Sato, *et al.*, 2017 IEEE NSS/MIC, Atlanta Georgia, USA, October, 21-28, 2017 (submitted).
- M. Abe, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **A890** 51–63 (2018).
- S. Kanda, "Direct Measurement of Muonium Ground State Hyperfine Splitting with High-intensity Pulsed Muon Beam" (学位論文), University of Tokyo (2016).
- H. Inuma, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **A832** 51–62 (2016).
- M. Otani, *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 040101 (2016).
- S. Nishimura, *et al.*, JPS Conf. Proc. **8**, 025015 (2015).

受賞

- 須江祐貴, Flavor Physics Workshop ベストトーク賞, 2017年11月
- 神田 聡太郎, 第19回高エネルギー物理学奨励賞, 2017年3月
- 北村遼, 第13回日本加速器学会年会賞, 2016年8月
- 三部 勉・石田 勝彦, 平成27年度西川賞, 2016年2月
- 大谷 将士, ビーム物理研究会 若手発表賞, 2015年11月
- 西村昇一郎, Flavor Physics Workshop ベストトーク賞, 2015年10月

ホームページ : <http://g-2.kek.jp>