

# 科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料

〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究課題	期間	：2020年度～2024年度
研究課題番号	号	：20H05646
研究課題名	名	：電磁トラップを利用したミュオン粒子の質量と磁気モーメントの精密測定と新物理探索
研究代表者氏名（ローマ字）	：	下村 浩一郎（Koichiro Shimomura）
所属研究機関・部局・職	：	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授
研究者番号	号	：60242103

研究の概要：

ミュオンにかかわる相互に関連した①2体束縛系であるミュオニウムの磁場下でのゼーマン副準位を高精度で測定、②超低速ミュオンビームとペニングトラップの手法を組み合わせ、単一粒子ミュオンの測定を実施する。両者は磁気モーメント ( $\mu_{\mu}$ ) と質量を最高精度にかつ独立に決定できる。これらの結果を総合し、素粒子標準理論を超えた新物理の探索を行う。

研究分野：大区分B、素粒子・原子核実験分野

キーワード：ミュオン、ミュオニウム、超微細構造、超低速ミュオン、ペニングトラップ

## 1. 研究開始当初の背景

ミュオンは、素粒子標準模型では、電子の仲間（第2世代荷電レプトン）と位置づけられ、質量をのぞけば性質が電子と酷似する。電子では軽すぎて新物理への感受性が弱く、第3世代のタウ粒子では寿命が短すぎて精密測定ができない。ミュオンはほどほどの質量と寿命を持ち、標準模型の最高度の検証そして何より新物理を探索するプローブとして最適である。実際、長年に渡り研究が世界各地で行われているが、現在、ミュオン自身そしてミュオンを含む物理現象に、素粒子標準模型では説明がつけ難いものが複数観測されている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では究極の目標として、ミュオンにかかわる相互に関連した二つの精密測定研究を実施する。一つは2体束縛系であるミュオニウム（正ミュオンと電子の束縛系）の磁場下でのゼーマン副準位を高精度で測定することで、従来より一桁以上高い精度でミュオニウムの超微細構造(1ppb)および、ミュオンの磁気モーメント ( $\mu_{\mu}$ ) と質量を（約5ppb）を決定する。もう一つは、超低速ミュオンビームとペニングトラップの手法を組み合わせることにより、単一粒子ミュオンの測定を新たに開始し、ミュオンの磁気モーメント ( $\mu_{\mu}$ ) と質量をミュオニウムとは全く独立に、最高精度（2ppb）で決定する。これらの結果を総合し、様々な実験・理論との照合によって、素粒子標準理論を超えた新物理の探索を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では究極の目標として、ミュオンにかかわる相互に関連した二つの精密測定研究を実施する。一つはこれまでの実績の発展として、2体束縛系であるミュオニウム（正ミュオンと電子の束縛系）の磁場下でのゼーマン副準位を高精度で測定を実施することで、一桁以上高い精度でミュオニウムの超微細構造(1ppb)およびミュオンの磁気モーメントと質量を（約5ppb）で決定する。もう一つは、超低速ミュオンビームとペニングトラップの手法を組み合わせることにより、単一粒子ミュオンの測定を新たに開始し、ミュオンの磁気モーメントと質量をミュオニウムとは全く独立に、最高精度（2ppb）で決定する。この測定ではJ-PARCにおいて開発されてきた超低速ミュオンを利用する。。

## 4. これまでの成果

ミュオニウム超微細構造精密測定においてゼロ磁場における精密測定に関する成果がまとまり、マイクロ波蓄積容器の設計と評価、ゼロ磁場実験全体のセットアップ、共鳴信号を導出する新しい解析方法についての査読付き論文、合計3本が出版された。

高磁場実験に向けた準備も順調に進んでいる。まず実験エリアであるMLF Hラインの建設が進んでいつでもビームが出せる状況になっており、最適なビーム条件を探すビームコミッションを進めている段階である。

またゼロ磁場実験とは異なり、高磁場実験では精密で一様な磁場が必要である。磁場を発生するための超伝導電磁石はすでにあり、さらに高精度磁場測定機の開発と一様磁場を達成するための磁場シミングの計算が順調に進行している。磁場を測定する磁気プローブについては単一プローブで15 ppbの精度に到達している。ここから目標とするラグビーボール球サイズの領域を高速に磁場スキャンするため、多チャンネル化に向けた研究が進行し、完成までの目処がたった。一様磁場を達成するための磁場シミングは実際の測定で0.27 ppmの一様性が確認された。並行して進めている磁気測定精度2ppb達成に向けた<sup>3</sup>Heプローブの開発も順調に軌道に乗っており、ガラスセルの選定が進むなど開発が継続中である。

本実験に用いる磁場は実験1)と同じものを使う予定で、上記の通り開発は順調である。

ミュオンペニングトラップを行う上で重要な技術の一つである、超低速ミュオン生成レーザーの開発において大きな進展があった。ミュオニウム1s-2s実験と共同開発を進めてきたレーザーを使って、超低速ミュオンの引き出しに成功し、共鳴スペクトルを測定することに成功した。

また、ミュオンペニングトラップ実験のコンセプトデザインの検討を進めた。従来のペニングトラップ実験で用いられていた双曲線形状の四重極電極ではなく、直方体形状のトラップ電極を用いる方法を考案し、電極の設計を進めた。

## 5. 今後の計画

Hラインは2022年1月には無事、本研究を遂行する実験エリアにビームを取り出すことが可能となった。ビームラインコンポーネントで残るものは、ミュオンと陽電子を分離するDCセパレータのみであるが、本年度夏季シャットダウン中に設置し、11月には運用開始の予定である。同実験エリアは他実験との交互の利用が予定されているが、本年度中には本格的測定にはいり、調整運転を含む約1か月程度のビームタイムで先行実験の精度を数倍上回る測定結果を得ることとなる。データ取得後はこれまで培ってきた我々独自の解析手法を用いて速やかに論文発表できることを目指す。

一方、トラップについては2021年度までに概念設計を終了し、2022年度はいよいよ実機の製作に取り掛かる。またレーザーはすでに基本ユニットは完成したがより大強度化を目指してアンプ系の増強等を行っていく。また<sup>3</sup>Heプローブは引き続き開発を行うが、当面はいままでに確立しているH<sub>2</sub>Oプローブを使って実験を進める。2023年度中にはこれらのシステムを統合して世界発のミュオントラップを実現し、それ以降の高精度化につなげていく。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

### <査読付論文>

- [1] S. Nishimura, H. A. Torii, Y. Fukao, T. U. Ito, M. Iwasaki, S. Kanda, K. Kawagoe, D. Kawall, N. Kawamura, N. Kurosawa, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, N. Saito, K. Sasaki, Y. Sato, S. Seo, P. Strasser, T. Suehara, K. S. Tanaka, T. Tanaka, J. Tojo, A. Toyoda, Y. Ueno, T. Yamanaka, T. Yamazaki, H. Yasuda, T. Yoshioka, K. Shimomura, “Rabi-oscillation spectroscopy of the hyperfine structure of muonium atoms”, Phys. Rev. A **104**, L020801 (2021)
- [2] S. Kanda, Y. Fukao, Y. Ikedo, K. Ishida, M. Iwasaki, D. Kawall, N. Kawamura, K.M. Kojima, N. Kurosawa, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, S. Nishimura, N. Saito, Y. Sato, S. Seo, K. Shimomura, P. Strasser, K.S. Tanaka, T. Tanaka, H.A. Torii, A. Toyoda, Y. Ueno, “New precise spectroscopy of the hyperfine structure in muonium with a high-intensity pulsed muon beam”, Phys. Lett. B, **815**, 136154, (2021)
- [3] K. S. Tanaka, M. Iwasaki, O. Kamigaito, S. Kanda, N. Kawamura, Y. Matsuda, T. Mibe, S. Nishimura, N. Saito, N. Sakamoto, S. Seo, K. Shimomura, P. Strasser, K. Suda, T. Tanaka, H. A. Torii, A. Toyoda, Y. Ueno, and M. Yoshida, “Development of microwave cavities for measurement of muonium hyperfine structure at J-PARC”, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2021** (2021)

## 7. ホームページ等

[ミュオン科学研究系 - KEK IMSS MSL](#)