

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14746

研究課題名（和文）高磁場中ミュオニウム超微細構造測定高精度化のための新解析手法の研究

研究課題名（英文）Development of New Analysis Method for the Precision Measurement of Muonium Hyperfine Structure

研究代表者

西村 昇一郎 (Shoichiro, Nishimura)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別助教

研究者番号：20836431

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はミュオニウム超微細構造の精密測定実験において、測定精度向上を目指した研究開発を進めてきた。まず、標準的な分光に比べて系統的不確かさの影響が小さいラビ振動分光の開発に成功した。ゼロ磁場では実際に得られた実験データに適応し、その有効性を確認した。また高磁場実験でもゼロ磁場と同様に定式化を進め、高精度化の準備を整えた。

また、ビームに起因する不確かさを調べるための前置検出器の開発を進めた。ファイバーシンチレーターを使った検出器仕様の最適化を進め、実際に検出器を製作した。検出器の性能評価を行って問題なく動作することが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ここ近年の素粒子物理学において、標準模型を超えた新物理の発見が待ち望まれている。新物理探索の一つの手法として、素粒子の性質を高精度測定して、理論との比較により標準模型の綻びを見つける研究が進められている。電子の仲間である素粒子ミュオンと電子が束縛した状態のミュオニウムは水素原子に類似しており、その超微細構造の精密測定は標準模型の検証と深く関わっている。本研究によってミュオニウム超微細構造の測定精度はさらに向上し、標準模型を超えた新物理探索に貢献している。またその過程で開発したラビ振動分光はミュオニウム以外の短寿命原子分光にも応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：This research has been conducted to improve the precision of muonium hyperfine structure measurement. First, we have successfully developed Rabi-oscillation spectroscopy, which has a smaller effect of systematic uncertainty than standard spectroscopy. For zero-field measurement, we adapted it to actual experimental data. In high-field experiments, as in the zero-field case, the formulation was also developed, and preparations were completed to achieve high precision.

In addition, a new forward detector was developed to investigate uncertainties due to the stability of the muon beam. The specifications of detector with a fiber scintillator was proceeded, and then, the detector was fabricated. The performance of the detector was evaluated and confirmed to work as expected.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ミュオン ミュオニウム 精密分光 超微細構造 ラビ振動分光

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学における標準模型は現在観測されているほとんどの物理現象の説明に成功しているが、物質優勢宇宙の謎など残された課題もあり、標準模型を超えた新物理があると期待されている。ミュオンは電子と同じレプトンに属する素粒子の一種であり、その性質を精密に測定し、標準模型から得られる理論値と比較することで、標準模型の精密検証が可能である。例えばミュオンの異常磁気モーメントは実験値と理論値に 4.2 の乖離が見られており、新物理の兆候と期待されている [1, 2]。

ミュオニウムは電子と正ミュオンの束縛系であり、水素様原子の一種である。ミュオニウム超微細構造の精密測定もまた、標準模型の中の束縛系量子電磁力学の精密検証が可能である。また理論との比較によりミュオンの質量を高精度で決定可能で、現在ミュオン質量を最高精度で決定している。さらに、ミュオン異常磁気モーメントの実験値にはミュオニウム超微細構造の測定で得られるミュオンと陽子の磁気モーメント比が使われていたり [1]、他の準位の遷移エネルギーの測定と組み合わせる別の方法で異常磁気モーメントの値が得られたりなど、標準模型を超えた新物理探索において重用な役割を担っており、さらなる高精度測定が求められている。

2. 研究の目的

上記のような背景の中で、茨城県東海村にある J-PARC 物質生命科学実験施設(MLF)では、ミュオニウム超微細構造精密測定が計画されている。実験は主にゼロ磁場と高磁場下での測定に分かれており、最初にゼロ磁場測定で様々な原理検証を進める。そして、ゼロ磁場測定で培った技術を元に高磁場測定を開始し、先行研究の 5 倍の測定精度を達成する。高精度化に向けた開発を進める上で、本研究の目的は下記の 2 つである。

(1) 新しい解析手法である時間微分法(後にラビ振動分光と命名)を開発することで、測定精度の向上を図る。

(2) ビームライン上流側に増設する検出器を開発し、ビームの不安定性に起因する系統的な不確かさの対策を行う。

3. 研究の方法

(1) 標準的な分光では、外部から与えるマイクロ波周波数を掃引して共鳴曲線を描き、共鳴曲線の中心から遷移エネルギーに相当する共鳴周波数を決定する。しかし、マイクロ波強度が変化すると共鳴曲線が上下するため、周波数掃引中のマイクロ波強度の変動が共鳴曲線を非対称にする効果が大きな系統的な不確かさとなる。一方の新しいラビ振動分光では、あるマイクロ波周波数の測定時のラビ振動をフィットすることで共鳴周波数とマイクロ波強度が同時に得られる。つまり周波数掃引せずに共鳴周波数が得られる。これにより、マイクロ波強度の不安定性に起因する系統的な不確かさを抑制できる。また、ミュオニウム超微細構造の遷移周波数の決定精度はマイクロ波の周波数にも依存するため、より感度の良いところに測定を集中し、効率的な測定が可能となる。

ラビ振動分光を確立するためには、まずラビ振動がそもそもどのような形になるかを定式化する必要がある。高磁場測定ではゼロ磁場での縮退が解けて遷移が単純になり、マイクロ波周波数・強度で表すラビ振動の式が異なるため、それぞれで定式化する。ミュオンの停止位置は空間分布を持っており、また同様にマイクロ波強度も分布を持っているため、それらを合わせたラビ振動の様子をシミュレーションにより見積もる。またシミュレーションを使ってラビ振動分光の特徴の調査を進める。その後、ゼロ磁場測定で得られたデータに対してラビ振動分光を適用し、共鳴周波数が得られることを実証する。

(2) 測定中のビーム位置や運動量の変化によって、ミュオニウムの生成位置分布は変化し、それによって信号の様子も変化する可能性がある。既存の下流側検出器のみを使った場合は、その信号の変化がビームに起因するものなのか、あるいは測定条件を変化させたことによるものなのか切り分けることが不可能である。さらに上流の検出器を設置して下流側との比を取れば、その変化を切り分けることが可能となる。しかし、上流側の限定されたスペースに設置、かつ大強度パルスビームに対応した高計数率でも数え落としの少ない検出器を用意する必要がある。これを解決するために、ファイバーシンチレータとシリコンフォトマルチプライヤー(SiPM)を組み合わせた検出器を設計・製作し、その性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) まず、ゼロ磁場測定、高磁場測定でのラビ振動の定式化を完了した。大きな特徴の違いはゼロ磁場測定において、振動周波数成分は 2 つあるが、高磁場測定では 1 つのみである。次にそれぞれについてシミュレーションによりラビ振動によって得られる信号を計算した。シミュレーションから明らかになったラビ振動の特徴として、標準的な分光において最も中心周波数決定精度を上げられる測定マイクロ波周波数は共鳴曲線が急峻な半値半幅付近であるが、ラビ振動のそれは半値半幅よりも共鳴周波数に近いことが分かった。さらに、その最も感度の良い周波数を集中的に測定することによって、統計的不確かさを 2 倍近く改善できることが分かった。つぎにゼロ磁場測定で得られたデータにラビ振動分光を適用した。図 1 はその結果である。マイクロ波周波数の変化に応じてラビ振動の形の変化が見られ、複数の周波数において共鳴周波数を得ることに成功した。さらに複数のデータで得られた共鳴周波数を統合することにより、最終

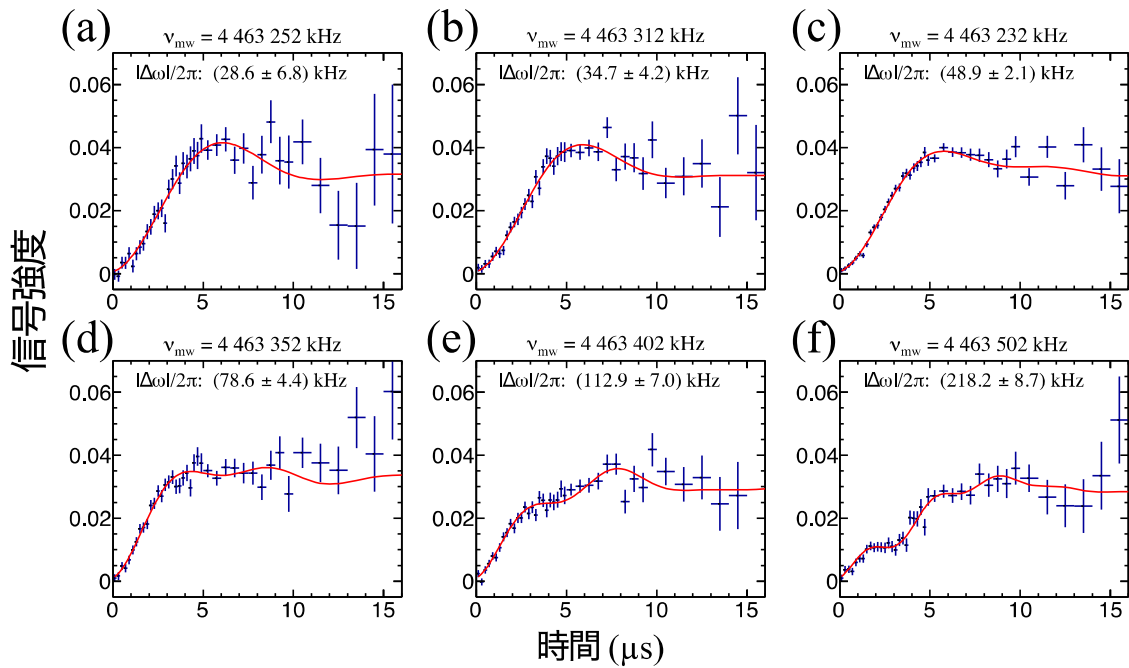


図 1 ゼロ磁場測定で得られたデータに対してラビ振動分光を適用した結果

的にゼロ磁場の測定において世界最高精度に到達した[3]。

(2) 前置検出器については、まずシンチレーションファイバーの長さや配置等の最適化を進め、仕様を決定した。ファイバー長は長くすると高計数率の数え落としが増大し、短くすると立体角が減少する。検出器配置は主にビーム軸からの距離で、ミュオンビームに影響を与えない距離まで近づける。シミュレーションツールによりこれらの最適化を進め、ファイバー長は50mmに決定した。次に決まった仕様を元に検出器1台を製作した。ファイバー固定には3Dプリンターを用いて作成したジグを用いた。図2の小枠にある写真は完成した検出器である。次にJ-PARC MLFのミュオンビームを用いて実際に陽電子信号を測定し、その性能を確かめた。図2は得られた時間ヒストグラムである。J-PARC ビームのダブルパルス構造とミュオンの寿命が確認でき、要求通り動作することが確認できた。

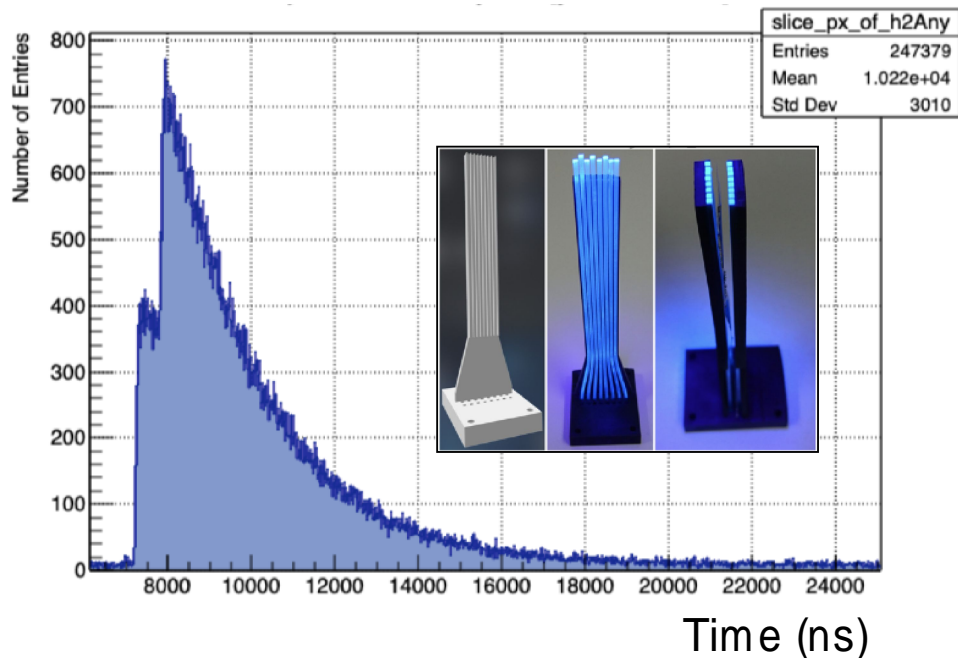


図 2 製作したファイバーシンチレーション検出器(小枠)と検出器で測定したミュオン崩壊陽電子の時間スペクトル。

- [1] M. Abi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 141801 (2021)
- [2] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 053C02 (2019)
- [3] S. Nishimura *et al.*, Phys. Rev. A **102**, L020801 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Nishimura et. al. (MuSEUM Collaboration)	4. 巻 104
2. 論文標題 Rabi-oscillation spectroscopy of the hyperfine structure of muonium atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.104.L020801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 S. Nishimura et. al. (MuSEUM Collaboration)
2. 発表標題 Zero-Field and High-Field Measurements of Muonium Hyperfine Structure with Rabi-Oscillation Spectroscopy
3. 学会等名 EXA2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tada, S. Nishimura et. al. (MuSEUM Collaboration)
2. 発表標題 Precision measurement of muonium hyperfine structure at J-PARC
3. 学会等名 PANIC2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 昇一郎（他14名）
2. 発表標題 ミュオニウム超微細構造精密測定のためのブラインド解析法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福村省三, 多田紘規, 西村昇一郎, 神田聡太郎, 北口雅暁, 下村浩一郎
2. 発表標題 J-PARCにおけるMuSEUM実験のための前置陽電子検出器のシミュレーションによる形状最適化
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 多田紘規, 福村省三, 神田聡太郎, 西村昇一郎, 北口雅暁, 下村浩一郎
2. 発表標題 J-PARC におけるミュオニウム超微細構造精密測定のためのシンチレーションファイバーと SiPM を用いた陽電子検出器開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 多田紘規, 福村省三, 神田聡太郎, 西村昇一郎, 北口雅暁, 下村浩一郎
2. 発表標題 J-PARCにおけるミュオニウム超微細構造精密測定に向けた前置陽電子検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 Muonium Hyperfine Structure Measurement in a Zero/High Magnetic Field at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 Muon Spin Resonance Experiment in the High Magnetic Field at J-PARC
3. 学会等名 MRM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 J-PARCミュオニウム超微細構造測定の実験状況
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田紘規
2. 発表標題 高磁場におけるミュオニウム超微細構造測定のための時間微分法開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福村省三
2. 発表標題 J-PARCでの高磁場ミュオニウム超微細構造の精密分光に向けた前置検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福村省三
2. 発表標題 Development of forward detector for measurement of muonium hyperfine structure in high magnetic field at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福村省三
2. 発表標題 高磁場下におけるミュオニウム超微細構造精密測定に向けた前置検出器開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

逆転の発想「ラビ振動分光」でミュオニウム原子を精密に測定 https://www.kek.jp/ja/press/202108100000/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------