

純レプトン原子のレーザー分光による電弱統一理論精密検証と新物理探索
Precision test of electroweak theory and search for new physics beyond the Standard Model by laser spectroscopy of purely leptonic atoms

課題番号：19H05606

植竹 智 (UETAKE Satoshi)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、最新の原子分光技術と高品質ミュー粒子生成技術、そして電弱統一理論の精密計算技術の3つを最大限に活用し、素粒子であるレプトンのみから構成される「純レプトン原子」のエネルギー準位を精密に測定する。これにより、標準理論の精密検証および電子とミュー粒子に結合する未発見の素粒子（力を媒介する粒子）探索を目指す。

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：ミュオニウム、精密レーザー分光、電弱統一理論、新物理探索

1. 研究開始当初の背景

単純な構造の水素原子を用いた原子物理学実験は、20世紀の現代物理学発展において最も重要な役割を果たしてきた。また1999年の光コム開発により、レーザー分光で水素原子のエネルギー準位を精密に測る技術が急速に発展し、水素原子の1S-2S遷移周波数(約 10^{15} Hz)は誤差10 Hzという驚異的な精度で測定できる時代となった。一方、残念ながら水素原子の高精度な理論計算は非常に困難で検証が進んでいない。これは通常の原子核がハドロン(複合粒子)で構成されることが理由である。最も単純な構造の水素原子でさえ、陽子半径を正確に計算できないことによるエネルギー準位の不定性は100 kHzもあり、実験精度と4桁も乖離している。

通常の原子が持つ本質的な困難は、レプトンのみで構成される純レプトン原子：ミュオニウム(Mu: μ^+e^-)を用いて解決できる。Muは水素原子の同位体と見なせるが、最大の違いは構造のない素粒子のみで構成されることにある。そのため理論と実験の高精度比較・検証が可能である。実際Muのエネルギー準位には、電弱相互作用によるシフトが実験で十分検出可能な大きさ(-65 Hz)で現れることが理論計算でわかっている。J-PARCにおいて大量の高品質ミュー粒子が得られるようになった現在、統計量で制限されていた過去の研究を大幅に上回る精度の実験が可能となり、それによる素粒子標準理論の精密検証が可能時代が到来した。

2. 研究の目的

素粒子の標準理論を超える新物理探索は、基礎物理学の最重要課題である。本研究ではレプトンのみから構成される最も単純な荷電束縛系：ミュオニウムのエネルギー準位を精密に測定する。そして電弱統一理論に基づく精密計算と比べることで新物理の影響の有無を調べる。また、エネルギー準位の精密測定は基礎物理定数であるミュー粒子質量の精度向上に直結する。ミュー粒子に関する基礎物理定数の精密決定に、世界最高強度のパルスミュー粒子ビーム発生装置を有する日本が積極的に関与し、世界へ発信していくことも目的とする。

3. 研究の方法

ミュオニウムの精密レーザー分光システムの概略図を図1に示す。実験システムは主にミュオニウム生成標的、狭線幅・高出力244nmレーザーシステム、2S励起ミュオニウム検出システムの3つから構成される。

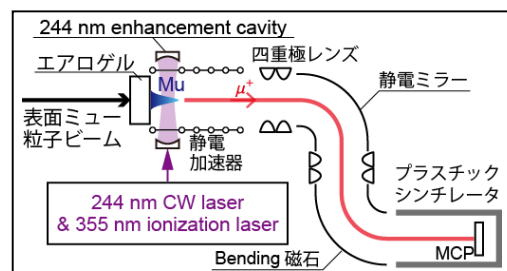


図1：1S-2Sレーザー分光システム全体図

研究期間前半でこれらシステムの独自開発・改良を進め、後半からミュオン粒子ビームを使った実験を進める。

また、基底状態の超微細分裂マイクロ波分光実験では、J-PARCの大強度パルスミュオン粒子ビームを用いたゼロ磁場での分光実験を研究期間前半で進める。並行して数テスラの磁場を印加可能な超伝導電磁石や、大強度ミュオン粒子ビームに対応した高レート耐性検出器の独自開発を進める。研究期間後半で高磁場下での分光実験を進め、超微細分裂周波数の測定精度の世界記録更新を目指す。

4. これまでの成果

ミュオン生成標的の開発では、レーザー加工を施したシリカエアロゲルの形状最適化を進め、長時間安定に高効率のミュオン生成が可能な標的の開発に成功した。

狭線幅・高出力レーザーシステム開発では、出力 30mW 程度の狭線幅マスターレーザーを数段の光パワーアンプで増幅する方式を採用した連続波発振 (CW) レーザーシステムの開発、アンプした CW 光をパルス増幅する Ti:Sapphire パルスレーザーシステム開発、マスターレーザーの光周波数計測および周波数安定化を行うエルビウムドープ光ファイバコムシステム開発、ファイバコムへマスターレーザー周波数を位相同期させる光位相同期システム開発、などを進めた。光パワーアンプの出力は目標とする 5W 以上を達成した。Ti:Sapphire パルスレーザーシステムでは、9mJ という高いパルスエネルギーを得られている。出力光の周波数線幅はほぼフーリエ限界の約 5MHz であり、過去の研究で用いられたレーザーよりも狭線幅を実現した。2021 年度から開始予定のレーザー分光実験に十分な出力・線幅が達成できている。ファイバ光コムシステムは 1 ヶ月以上にわたり安定してコム発振が可能であることを確認しており、長時間の連続運転が必要なレーザー分光実験で問題なく使えることを示した。

2S 励起検出システムでは、真空装置のアライメント微調整を進めることで、従来よりも 33% 検出効率を向上することに成功した。実験精度の向上に大きく貢献する成果である。

基底状態超微細分裂のマイクロ波分光実験では、ゼロ磁場の分光実験およびデータ解析を進めた。得られた結果に基づいてシミュレーションを行い、今後 J-PARC で運用が始まる高強度ミュオン粒子ビームラインを用いることで、過去の実験で得られた超微細分裂周波数測定精度の世界記録を一桁上回る精度で測定できる見込みが得られた。

以上、2021 年度から始まる分光実験に向けた準備は着実に進展しており、当初の期待通りの成果を上げる見込みが得られている。

5. 今後の計画

2021 年度からミュオン粒子ビームを用いた精密レーザー分光実験を開始する。クラス 4 レーザーを用いた実験を遂行するための環境を新たに J-PARC で整えており、実験開始後はまずミュオン粒子ビームの評価を行う。その後ミュオン生成標的・2S 励起検出システムの設置を行い、レーザー分光実験を開始する。

基底状態超微細分裂のマイクロ波分光実験では、実験装置の開発を引き続き進め、2021 年度後半以降から高磁場下の分光実験を進める予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] “Simulation Study of Laser Ionization of Muoniumby 1S-2S Excitation for the Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC”, C. Zhang, H. Hara, T. Hiraki, Y. Ikedo, Y. Imai, K. Ishida, S. Kamal, N. Kawamura, A. Koda, Y. Mao, T. Masuda, T. Mibe, Y. Miyake, Y. Miyamoto, Y. Oishi, M. Otani, P. Strasser, K. Shimomura, K. Suzuki, S. Uetake, T. Yamazaki, S. Yamamoto, K. Yoshimura, M. Yoshida, JPS Conf. Proc. **33**, 011125 (2021)
- [2] “New precise spectroscopy of the hyperfine structure in muonium with a high-intensity pulsed muon beam,” 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, and Y. Ueno, Phys. Lett. B **815** (2021) 136154(1-7)
- [3] “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. Theo. Exp. Phys., **2020**, 123C01 (2020)
- [4] “ミュオン生成標的の精密レーザー分光実験 @J-PARC”, 植竹智, 平木貴宏, 鈴木一仁, 吉田光宏, 高エネルギーニュース **39**, 170 (2021)

7. ホームページ等

<http://www.xqw.okayama-u.ac.jp/>