

研究課題名 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

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

うえたけ さとし  
植竹 智

研究課題番号： 19H05606 研究者番号： 80514778

キーワード： ミューオニウム、精密レーザー分光、電弱統一理論、新物理探索

【研究の背景・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、最新の原子分光技術を駆使し、レプトン(素粒子)のみからなる「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、標準理論の一部をなす電弱統一理論の精密検証および電子とミュオン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。

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なため検証が進んでいない。これは通常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。

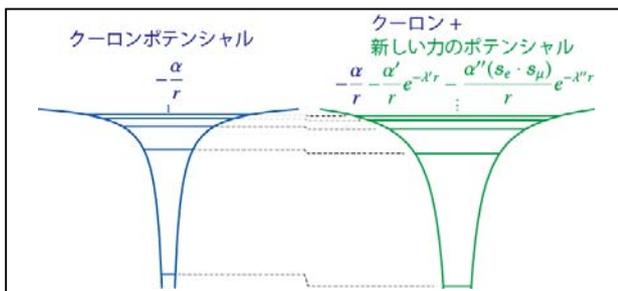


図1：荷電束縛系のポテンシャルとエネルギー準位

【研究の方法】

通常の原子が持つ本質的な困難を、レプトンのみで構成される純レプトン原子：ミュオンオニウム(Mu:  $\mu^+e^-$ )を用いて解決することが本研究の特徴である。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。過去に行われたMuの分光では、大量のMu生成が困難だったため十分な統計量の測定ができなかった。ところが、この状況はJ-PARCにおける大強度陽子加速器の成功と、それにより大量の高品質ミュオン粒子が得られ

るようになったことで一変した。

本研究では最新の原子分光技術と高品質ミュオン粒子生成技術、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、「純レプトン原子」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の計算値と比べることで新物理の影響の有無を調べる。

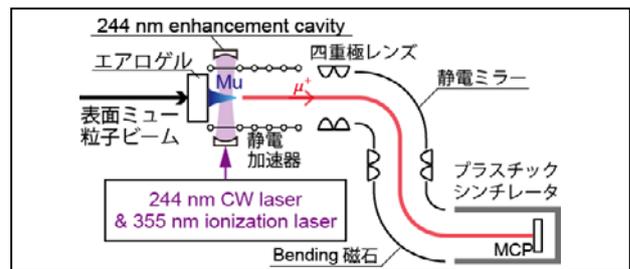


図2：1S-2S レーザー分光システム

【期待される成果と意義】

Muの1S-2S分光の実験精度を先行研究で得られた値より大幅に向上することで、基礎物理定数であるミュオン粒子質量の精度を現在のCODATA推奨値より大幅に改善する。その結果、現在ミュオン粒子質量の不確かさで制限される様々な物理量の理論精度が向上するため、学術的波及効果が大きい。同時にMuの束縛エネルギーの理論計算精度も向上するため、電弱効果によるエネルギーシフト(-65Hz)の検証が可能となる。もし-65Hzからのずれが観測されれば新物理の影響強く示唆するものとなり、今後の素粒子研究の方向性に大きな影響を与える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- A. Yamaguchi, S. Uetake, S. Kato, H. Ito, Y. Takahashi, "High-resolution laser spectroscopy of a Bose-Einstein condensate using the ultranarrow magnetic quadrupole transition", *New. J. Phys.* 12, 103001 (2010)
- Y. Miyamoto, S. Uetake, M. Yoshimura *et al.*, "Externally triggered coherent two-photon emission from hydrogen molecules", *PTEP*2015, 081C01 (2015)

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度  
154,300千円

【ホームページ等】

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