

	研究代表者	岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授 植竹 智 (うえたけ さとし)	研究者番号：80514778
	研究課題情報	課題番号：24H00023 キーワード：ミュオニウム、精密レーザー分光、素粒子標準理論、新物理探索	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

● 研究の全体像

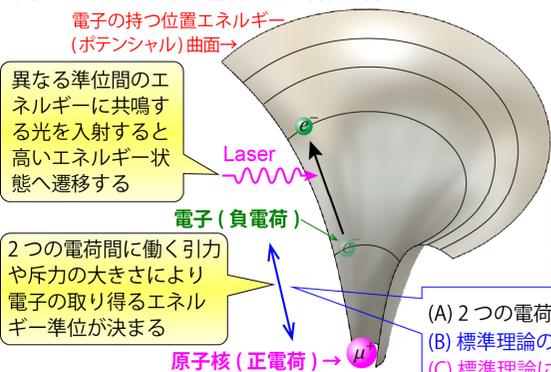
我々の宇宙で起こるほぼ全ての物理現象は素粒子標準理論により記述可能である。現代物理学の到達点として非常に強力な理論である一方、宇宙における暗黒物質の正体や物質・反物質の不均衡などは説明できないため、究極の理論とは考えられていない。標準理論を超えた究極の理論を構築すること、そのための手がかりとなる現象 (新物理) を発見することが、基礎物理分野の次なる大きな目標である。

物理学の歴史において**新たな理論の構築と精密計測技術の発展は表裏一体**となって進んできた。例えば素粒子標準理論は1947年のラムシフト(\*) 発見が引き金となり発展した「量子電気力学」が源流であり、1970年代にかけて理論の構築が進められた。鍵となったラムシフトの発見は精密マイクロ波分光技術の発達によりもたらされたものである。

**素粒子標準理論を超えた究極の理論構築**に向けてどのようなアプローチで研究を進めていくか。本研究では、**最先端のレーザー分光技術を駆使した精密計測から迫っていく**。具体的には、純レプトン原子「ミュオニウム」のエネルギー準位をレーザーを用いて精密に測定し、標準理論で予想される値と比較する。これにより標準理論を精密に検証し、新物理の探索へとつなげていくことを目標としている。

(\*) ラムシフト：水素原子の2S-2P準位間のわずかなエネルギーシフト

原子のエネルギー準位精密測定と新物理探索

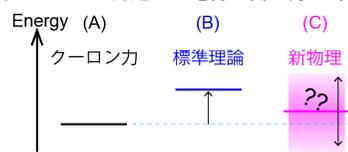


研究のポイント (1)

非常に高い精度 (12 桁以上) で周波数 (エネルギー) を測定可能なレーザーを使う  
→ 原子の共鳴エネルギーを正確に測定できる

研究のポイント (2)

共鳴エネルギー測定 → 二電荷に働く力の詳細がわかる



(A) 2つの電荷間に働く電気的な力 (クーロン力) のみ考慮した場合  
(B) 標準理論の予想 (弱い相互作用なども働く) は (A) からずれる  
(C) 標準理論にない未知の力 (新物理) が働くと、観測されるエネルギー準位はさらにずれている可能性がある

図1 本研究の概要

● 研究の鍵を握るミュオニウム

ミュオニウムとは正のミュオン (第2世代レプトン) に電子 (第1世代レプトン) が束縛された原子で、水素原子の同位体である。ただしその寿命は約2マイクロ秒と短いため天然には存在せず、ミュオンを生成可能な施設のみで作ることのできる「人工原子」である。その最大の特徴は点電荷と見なせる素粒子のみから構成される、最もシンプルな構造となっていることにある。この特徴ゆえ、ミュオニウムはそのエネルギー準位を標準理論により正確に予言することが可能である。実際、ミュオンと電子の間には、電気的なクーロン力だけでなく弱い相互作用なども働くため、クーロン力だけを想定した場合に比べてエネルギー準位がずれる (図1(B))。このずれは実験で十分観測可能な大きさとなることがすでにわかっている。もし標準理論の予想よりも大きなずれが観測された場合、それは新物理の影響を強く示唆するものとなる (図1(C))。すなわち、ミュオニウムのエネルギー準位測定は標準理論の精密検証と標準理論を超えた新物理探索に直結する。

● 研究の手法と特徴

過去に他国で行われたミュオニウムのレーザー分光実験では、大量のミュオニウム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。本研究では、以下の2点により大量のミュオニウムを生成することに成功している。

1. 日本が誇る世界最先端技術であるJ-PARCで利用可能な世界最高強度の Pulsed Muon Beam を用いる
2. 新たに開発したミュオニウム生成ターゲットである多孔質化したシリカエアロゲル (図2,3) を使う  
さらに、我々が開発した高性能レーザー (図3) を用いることで、すでに先行研究の数倍の信号レートでレーザー分光可能な環境を整えている。

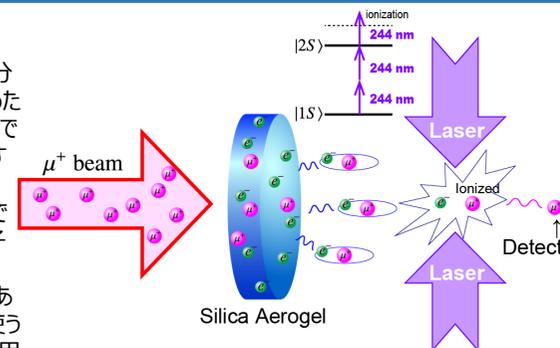


図2 ミュオニウム生成から検出までの流れ。エアロゲルに入射したミュオン粒子ビームは電子と結合してミュオニウムとなり放出される。そこへレーザーを入射し、レーザーが共鳴するとミュオニウムはイオン化されて再度ミュオンに戻り、検出される。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

● 基礎物理定数「ミュオン質量」の精密決定

ミュオニウムのエネルギー準位測定から標準理論を検証するには、まず基礎物理定数であるミュオン質量を正確に知っておく必要がある。これはミュオン質量の値がエネルギー準位の理論計算に必要なためである。ミュオン質量の現在の実験不確かさは120 ppb (ppbは 10<sup>-9</sup>) となっているが、これは同じ素粒子である電子の質量不確かさ (0.3 ppb) に比べると3桁近く悪い値となっている。図1(B)に示した標準理論に基づくエネルギーシフト (約38 ppb) は質量不確かさに埋もれてしまい、現状では検証不可能である。

ミュオン質量はミュオニウムの1S-2S準位間のエネルギー差をレーザーにより精密測定することで、高い精度で決定できる。これは1S-2S準位間のエネルギー差にミュオン質量が与える影響が非常に大きいためである。実験からエネルギー差を精密に決定すると、逆にミュオン質量の決定精度を高めることができる。

本研究はミュオニウムの1S-2S準位間のエネルギー差をレーザーにより精密測定することで、質量の精度を大幅に改善する。その結果、標準理論で予想されるエネルギー準位と実験値を比較できるようになるため、標準理論の精密検証が可能となる。

基礎物理定数は、関連するすべての科学計測の基準となる物理量のため、十分に高い精度で決まっていることが望ましい。本研究の進展により、現在ミュオン質量不確かさで制限されている様々な物理量の理論精度が向上するため、大きな学術的波及効果が期待できる。

実験装置の全体図

ミュオニウム生成およびレーザー励起・検出を行う

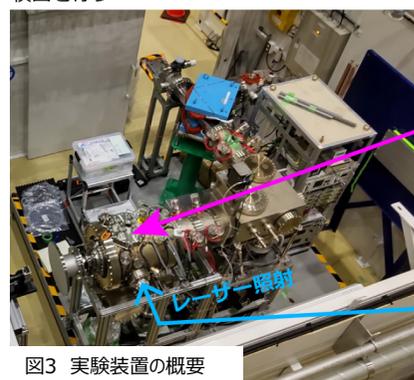


図3 実験装置の概要

ミュオニウム生成ターゲット

レーザーアブレーションで多孔質化したシリカエアロゲル

