

【基盤研究(S)】  
大区分B



研究課題名 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

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授  
しもむら こういちろう  
下村 浩一郎

研究課題番号： 20H05646 研究者番号：60242103

キーワード： ミュオン、ミュオニウム、ペニングトラップ、スピン

【研究の背景・目的】

素粒子標準模型は物質の基本構成要素とそれらの力学を記述するもので、ヒッグス粒子の発見により理論的だけでなく実証的にも完成した。しかし、模型のパラメタが多すぎることや、暗黒物質の担い手となる粒子が含まれていないことなど、数多くの問題を内包している。それらを解決する素粒子標準模型を超える新物理は必ず存在する。その兆候を探す有効な手段として、本研究では、測定の精度を究極まで高めるといふ実験手法を採用する。

ミュオンはほどほどの質量と寿命を持ち、標準模型の検証、そして新物理を探索するプローブとして最適である。長く、世界各地でミュオン研究が行われているが、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困難なものが複数観測されている。

本研究では、ミュオン、特にそのスピンに関する周波数精密測定を複数の物理系で行い、ミュオン粒子そのものの実験的理解を究めることで、新物理探索を目指す。

【研究の方法】

本研究では、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。

ミュオニウム

これまでの実績の発展として、ミュオニウム（正ミュオンと電子のクーロン束縛系）の磁場下でのゼーマン副準位の高精度測定を実施する。すでに磁場のない状態での基底状態超微細構造測定において、最高精度を達成している。さらに磁場のある状態での測定を実施することで、一桁以上高い精度での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(ともに5ppb)を決定する。

ミュオントラップ

ミュオンを電磁トラップ(ペニングトラップ)で捕獲し、トラップ内でのミュオンの運動を観測する。ミュオンペニングトラップは世界初の挑戦で、超低速ミュオンビームを大量に生成できる日本のJ-PARCでのみ可能な実験である。ミュオンの磁場下での周回周波数を測定することで、ミュオンの磁気モーメントと質量を最高精度(2ppb)で決定する。

ミュオントラップ実験では、ミュオンの発生・輸送を、高磁場下で行うため、100%偏極したビームを準備できる。ミュオニウム実験で使用する超伝導磁石は2.9Tまでの均一静磁場を供給でき、超低速ミュオン生成時のスピン偏極ならびにトラップ用静磁場と

しても使用する(図1)。また、超低速ミュオン発生源から測定エリアまでの距離が50cm程度と短く、5keV程度の低い加速電圧でビームロスなく輸送でき、捕獲に必要な電位も5keV程度ですむ。

測定には、ミュオニウム実験と同様に、崩壊陽電子をミュオンのスピンのシグナルとする手法を採用する。陽電子の統計量を確保し高精度を担保する。シミュレーションの結果では、 $10^{12}$ 個のミュオンを観測した場合、統計精度のみで、磁気モーメントを1ppbの精度で決定できる。ミュオンスピンを $180^\circ$ 反転する操作を加えることで、ミュオンの質量を同様の精度で測定できる。これらはいずれも100日程度のオペレーションで達成可能である。

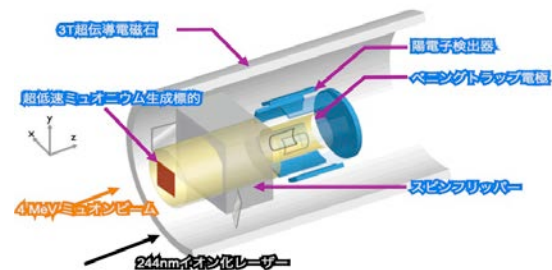


図1 ミュオントラップの実験装置

【期待される成果と意義】

これらの結果を総合し、進行中のミュオニウム $1s$ - $2s$ エネルギー準位差測定、ミュオン異常磁気能率(Muon g-2)測定との比較、様々な理論モデルとの照合によって、素粒子標準理論を超えた新物理の探索を行う。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Shimomura, *Muonium in J-PARC; from fundamental to application* Hyperfine Interactions 233,89-95 (2015)
- ・ H. A. Torii, S. Kanda, K. Shimomura, P. Strasser *et al.* *Precise Measurement of Muonium HFS at J-PARC MUSE*, JPS Conf. Proc. 8 (2015) 025018(1-6).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 151,100千円

【ホームページ等】

<https://www2.kek.jp/imss/msl/>