

論文の内容の要旨

Prospects for Slepton Searches in Future Experiments

(将来実験におけるスレプトン探索の展望)

氏名 吉永 尊洸

素粒子物理学では、標準模型が確立している。2012年には最後の未発見粒子であったヒッグス粒子が ATLAS、CMS 実験により発見された。しかし、標準模型には様々な理論的、観測的な問題が存在しており、標準模型は究極の素粒子模型であるとは考えられていない。そのため、標準模型を超えた新しい物理の存在が期待されており、その探索は素粒子物理学における次の重要課題である。

新しい物理を探索するための有効な指針の一つに、ミュオン粒子の異常磁気モーメント ($\mu\text{on } g - 2$) がある。これは、理論値と実験値の間で 3σ 程度の不一致が報告されている物理量である。 $\mu\text{on } g - 2$ の不一致を説明する模型の有力な候補の一つに、超対称模型がある。この模型では、標準模型に存在していた様々な問題を解決するだけでなく、ミュオン粒子と結合する超対称粒子の質量が $\mathcal{O}(100)\text{ GeV}$ である場合に、 $\mu\text{on } g - 2$ の不一致を説明することができる。そのため、超対称模型の検証は重要な研究課題の一つである。

上記の質量領域は、現在の LHC 実験からの制限とは矛盾しない。LHC 実験ではスクォーク、グルイーノのようなカラー電荷を持つ超対称粒子が主に探索されており、約 1 TeV 以下の質量領域が制限されている。一方で、 $\mu\text{on } g - 2$ で重要な役割を持つ超対称粒子はカラー電荷を持っていない。そのため、カラー電荷を持つ超対称粒子と比べて生成断面積が小さく、現在の LHC 実験における制限はまだ弱い。しかし、将来の LHC、ILC 実験の探索可能領域に含まれているため、今後より重要性が増すと期待される。加えて、Fermilab や J-PARC で新しい $\mu\text{on } g - 2$ 実験も計画されており、近い将来 $\mu\text{on } g - 2$ の感度の向上も見込まれる。そのため、「今」 $\mu\text{on } g - 2$ の不一致を説明する超対称模型を精査しておくことは非常に重要である。本論文では、 $\mu\text{on } g - 2$ に寄与する超対称粒子を模型によらない方法により研究する立場を採用する。

超対称模型による典型的な $\mu\text{on } g - 2$ への寄与は (1) Chargino contribution と (2) Neutralino contribution の2つに分類される。特に、本論文では (2) が $\mu\text{on } g - 2$ の不一致の起源である場合に着目する。この場合は、ビーノとスレプトンのみが軽いことが要求される。これは、現在の LHC 実験による制限を回避しつつ、 $\mu\text{on } g - 2$ の不一致を説明する「最小の」超対称模型の枠組みとなっている。

本論文では、ビーノとスレプトンのみが軽い「最小の」超対称模型の現象論を研究する。この模型の大きな特徴は、大きな右巻きと左巻きスレプトンの混合である。この模型では、ビーノとスミューオンがループを回るファインマン図が重要である。この寄与は右巻きと左巻きスミューオンの混合に比例しており、 $\mu\text{on } g - 2$ の不一致を説明するためには大きな混合が要求される。加えて、上記のファインマン図はスミューオンの質量の2乗に反比例している。そのため、 $\mu\text{on } g - 2$ の不一致を説明するという目的のもとでは、 $\mathcal{O}(1)\text{ TeV}$ の質量を持つスミューオンを要求すれば極端に大きな混合をとることが可能である。従って、もし混合が任意の大

きさをとれるならば、LHC、ILC 実験の探索領域を超える質量を持つスレプトンが許されてしまう。

しかしながら、そのような大きなスレプトンの混合はスカラーポテンシャルの安定性条件により制限される。左巻き、右巻きスレプトンとヒッグスの相互作用はスレプトンの混合に比例している。混合が極端に大きくなると、正しく電弱対称性を破る真空よりも、 $U(1)_{EM}$ 対称性を破るような望ましくない真空の方が深くなってしまい、電弱対称性を破る真空が不安定になる。この真空の寿命が宇宙年齢よりも長いことを要求することで、スレプトンの混合の大きさには上限が与えられる。本論文では、この制限に加え、 $\text{Muon } g-2$ の不一致を説明することを要求することで、スレプトンの質量に上限が付くことを示した。

さらに本論文では、スレプトンの質量の制限を基にした将来実験における探索法も議論する。スレプトン探索の手法は、その質量スペクトルに依存する。まず、3 世代全てのスレプトンの質量が縮退している場合、スタウに関する真空の安定性条件によりスミューオンの質量は強く制限される。本論文では、 $\text{Muon } g-2$ の実験値を 1σ (2σ) で説明する場合にスミューオンの質量が 330 (460) GeV 以下に予言されることを示した。加えて、一部の質量領域は現在の LHC 実験のデータにより排除されていることを示し、将来の LHC および ILC 実験での探索に関する議論を行った。

一方で、スタウが他のスレプトンより重い場合、スタウによる真空の安定性条件は緩くなる。スミューオンの質量はスミューオンに関する真空の安定性条件により制限される。本論文では、まず $\text{Muon } g-2$ の実験値を 1σ (2σ) で説明する場合に、スミューオンの質量が 1.4 (1.9) TeV 以下に制限されることを示した。このような質量のスミューオンは将来の LHC および ILC 実験で探索不可能である。代わりに、このような質量スペクトルの場合には、super-GIM 機構が働かなくなるため、一般に大きなレプトンフレーバーおよび CP の破れが予言される。本論文では、さらに将来のレプトンフレーバー実験による感度を調べ、スタウが他のスレプトンより重い場合には、レプトンフレーバー実験による高感度の検証が可能であることを示した。

加えて、軽いスタウに関する現象論の議論する。スレプトンが縮退した質量スペクトルをもつ場合、軽いスタウが予言される。この場合、 $\text{Muon } g-2$ だけでなく、ヒッグスと光子の結合にも大きな影響を及ぼす。現在、ヒッグスと光子の結合の測定感度はスタウの寄与を検証できるほど高くはないが、HL-LHC と初期の ILC 実験により感度の向上が期待されている。本論文では、真空の安定性条件からヒッグスと光子の結合に大きな寄与を及ぼすスタウの質量領域を特定し、それを基に ILC におけるスタウの現象論を系統的に議論した。結果、2 つのスタウと混合が初期の ILC 実験で測定されている場合、スタウのヒッグスと光子の結合への寄与を再構成可能であること、また、 $\sqrt{s} = 500$ GeV の段階で ILC 実験で軽いスタウと混合が測定されている場合、ヒッグスと光子の結合の情報を用いて重いスタウの質量を予言可能であることを示した。このような重いスタウは $\sqrt{s} = 1$ TeV での ILC による発見が期待される。

本論文では、ビーノとスレプトンのみが軽い「最小の」超対称模型の現象論を系統的に研究し、このような模型は将来の LHC/ILC 実験およびレプトンフレーバー実験で相補的に検証可能であることを示した。本博士論文は、 $\text{Muon } g-2$ の不一致を軸にした超対称模型の検証に関して、一つの指針を与えるものである。