

Phenomenological Aspects of Non-universal Soft Supersymmetry Breaking

メタデータ	言語: eng 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山岸, 芳夫 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16017

氏名	山岸芳夫
生年月日	
本籍	新潟県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第174号
学位授与の日付	平成8年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	Phenomenological Aspects of Non-universal Soft Super-symmetry Breaking (普遍的でない軟らかな超対称性の破れの現象論的側面)
論文審査委員	(主査) 青木健一 (副査) 木村 實, 鈴木恒雄 久保治輔, 田村博志

学位論文要旨

In this thesis the author discusses various phenomenological aspects of non-universal soft SUSY breaking. Usually MSSM has been studied in the framework based on the $N=1$ minimal supergravity in which the universal soft breaking terms appear automatically. Although its simplicity and rich predictability, such situation is special and seems to be unnatural since superstring, which is currently known as the unique candidate of the unified theory including gravity, often yields the non-universal soft SUSY breaking.

We found that a fair non-universality among the soft scalar masses often raises the gauge coupling unification scale. We checked that such large non-degeneracy between soft scalar masses could be realized in certain superstring models. Also we reconsidered the Electric Dipole Moment of Neutron in the framework of non-universal SUSY breaking. The contribution to the EDMN from SUSY particle could be suppressed without contradicting the naturalness if there is a discrepancy between the left-handed squark mass and right-handed squark mass. The contributions from dangerous CP phase are also examined and it also could be suppressed if certain conditions are satisfied. Similarly, we investigated the effects of decoupling of SUSY particle on Quasi Yukawa Fixed Points. It is shown that the decoupling of SUSY particles strongly affects the QFP of top Yukawa coupling. Some cases of non-universality in soft masses are favored in order to realize the value consistent with measured top quark mass. We could obtain some useful constraints for the underlying theory from QFP analysis if the top quark mass is measured more precisely.

筆者は本論文に於いて、超弦理論からの帰結である普遍的ではない超対称性の破れに焦点を絞り、その様々な現象論的側面を考察した。

素粒子の標準模型は、ゲージ群 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ のゲージ対称性をもち、物質を形作っているクォーク・レプトンと呼ばれるフェルミ粒子と、力を媒介するゲージ粒子、そ

してそれらの質量を与える Higgs 粒子とで構成されている。

標準模型は、理論的な計算が実験と素晴らしい精度で一致し、非常に良い理論とされている。特に、最近、標準模型で予言されていたトップクォークがアメリカのフェルミ国立加速器研究所で発見され、標準模型の妥当性は疑いようのないものとなっている。しかしながら、標準模型にも多くの問題があり、その一つとして、Higgs 質量の階層性から理論に微調整が必要になってくるという難点がある。微調整が必要な理論は理論的に完全であるとは考えにくく、この問題を解決するためには、標準理論を超える何か新しい理論が必要である。

現在その最も有力な候補として、超対称性が挙げられている。これは、スピンの異なる粒子の間の対称性であり、標準模型に超対称性を導入すると、各成分にそれぞれスピンの $1/2$ だけ異なるスーパーパートナーと呼ばれる粒子が存在することになる。

超対称性が破れていないとすると、通常の粒子と同じ質量を持つスーパーパートナーがそれぞれ存在するはずだが、現実にはそのような粒子は未だ観測されていない。これは、現実の世界では超対称性は破れていて、スーパーパートナーが現在の実験で観測できないくらい大きな質量を持っていると考える事によって説明される。特に、局所化された超対称な理論である $N=1$ 最小超重力理論に於いては、通常物質場と重力でしか相互作用しない隠れたセクターの粒子が真空期待値を持つ事によって、超対称性が破れ、スーパーパートナーが種類によらない（普遍的な）質量を持つというシナリオが考えられている。これによってスーパーパートナーが大きな質量を持つことが自然に説明できる。さらにこのシナリオは単純であり、しかもパラメータを少なくできることから、予言能力が大きく、現在多くの研究者がこれらに基づいた研究を行なっている。

このようなシナリオに基づき、標準模型に必要な最小限の超対称な拡張を行なった最小超対称標準模型は、ゲージ結合定数の統一や、輻射補正による自発的対称性の破れなど、様々な理論的成功をおさめてきた。しかし最小超対称標準模型は、 μ 問題や中性子の電気双極子モーメントの問題など、いくつかの困難も含んでいる。

一方、重力をも無矛盾に包含できる現在知られている唯一の統一理論として、超弦理論が考えられている。これは、物質の究極的な構成要素は点粒子ではなく、一次元的な弦であると考えられるもので、くりこみ不可能な重力相互作用を含んでいるにもかかわらず有限な理論である。

しかし超弦理論は超弦に固有のスケール $M_{st} \sim 10^{17} \text{ GeV}$ 近傍の物理を記述するもので、現在実験的に実現できるエネルギーで直接的に検証することは到底不可能である。しかし、超弦理論が与える結果を低エネルギーの理論に取り入れ、現象との比較を行なうことで、超弦理論を間接的に検証することは可能である。我々のグループはこのような考えの下に、超弦理論の低エネルギー有効理論を研究してきた。特に筆者は現象から得られる結果に基づき、低エネルギー側から超弦理論に対し与えられる制限を調べるといった役割を果たしている。

我々はまずゲージ結合定数の統一について考察した。最小超対称標準模型においては、 $SU(3)_C, SU(2)_L, U(1)_Y$ の 3 つの相互作用の結合定数が、 10^{16} GeV のエネルギースケールで厳密に一致し、相互作用の大統一が示唆されることが示されているが、この結果は超対称性の破れが普遍的である事を仮定している。

しかし、一般に超弦理論にに基づく超対称性の破れが普遍的に現れないため、 M_Z から M_S の間の結合定数の振舞いが普遍的な超対称性の破れの場合と異なり、その結果として結合定数の統一されるスケールが変化することが予想される。

我々は超対称粒子を簡単に二つのグループに分類した。一つは M_S の質量を持つもので、これは M_S 以降は分離してしまうために、 M_S 以降のくりこみ群方程式の計算には入ってこない。もう一つは M_Z の質量を持つもので、これらは分離することなくくりこみ群方程式に寄

与する。

我々は超対称性粒子の分け方によって異なるいくつかのパターンを考え、それぞれの場合にゲージ結合定数のくりこみ群方程式を導出し、結合定数の統一スケールを計算した。その結果を図1に示す。

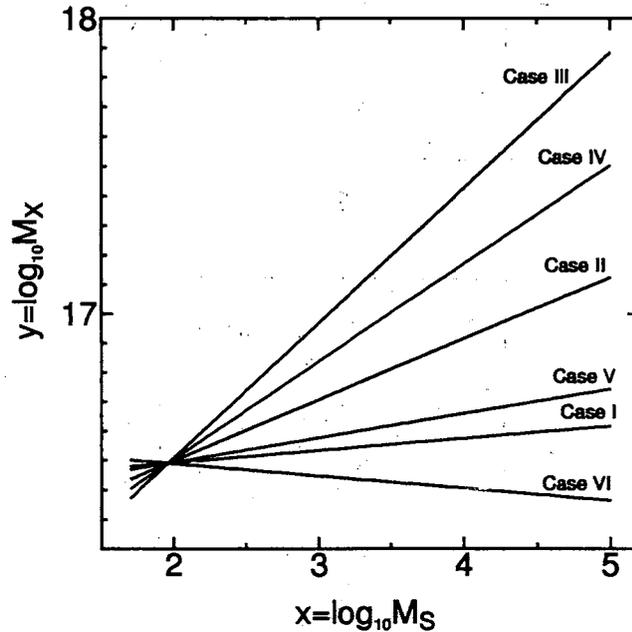


図1: 普遍的でない超対称性の破れにおけるゲージ結合定数の統一スケール M_X と超対称性の破れのスケール M_S との関係。各 case は我々が本論文で与えた普遍的でない超対称性の破れのいくつかのパターンに対応する。

図1から明らかなように、非普遍的な超対称性の破れは、結合定数の統一するスケールを多くの場合に若干引き上げられることがわかる。

これは超弦理論の典型的なスケール ($\sim 10^{17}$ GeV) に結合定数の一致するスケールが近づくという事を意味しており、理論的に大きな閾値補正を必要とせず、望ましい結果である。

しかし、そのような現象が有効に起こるためには、我々が先にあげたように、オーダーの違う二つの超対称性の破れのスケールが理論に存在しなくてはならない。我々は、オービフォールド模型と呼ばれる、超弦理論のある種の非常に多く用いられる模型のいくつかの場合において、このようなオーダーの違う二つの超対称性の破れのスケールが実現できることを示した。

我々はさらに現象論的に非常に興味深い、中性子の電気双極子モーメントの問題を普遍的でない超対称性の破れの枠組の中で再考察した。中性子の電気双極子モーメントの測定は標準模型を越える物理を探る上で非常に重要にである。しかし、普遍的な超対称の破れに基づく最小超対称標準模型では、超対称性の破れに伴う複素位相が不自然なくらい小さいか、超対称粒子の質量が不自然なくらい大きくないかぎり、中性子の電気双極子モーメントが実験からの制限値よりも大きくなってしまふという問題が指摘されていた。

しかし我々は、超対称性の破れが普遍的でない場合、超対称性の破れに伴う複素位相が十分小さくなくても中性子の電気双極子モーメントが実験の制限値内に納まる事を指摘した。これらの結果の一部を図2に示す。

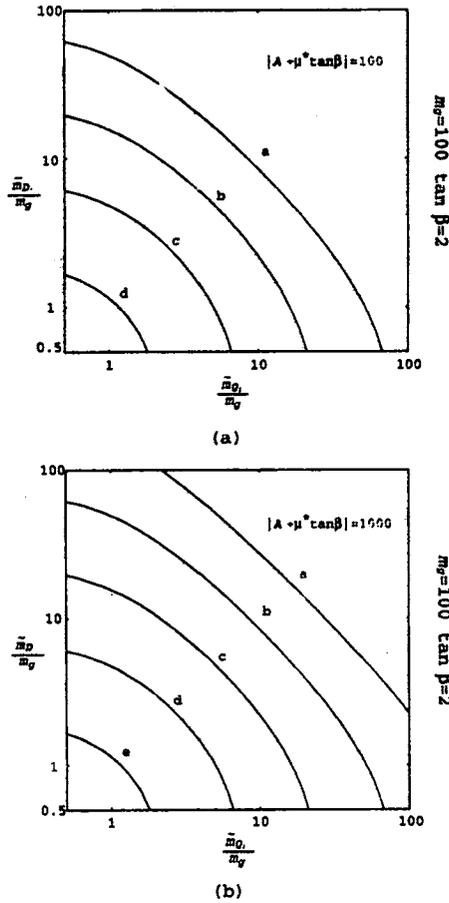


図 2: (\tilde{m}_{D_R}/m_g) - (\tilde{m}_{Q_L}/m_g) 平面における $F_D \equiv d_D^g/e \sin \gamma_D$ の等高線。ここで $m_g = 100$ GeV, $\tan \beta = 2$ である。 $|A_D + \mu^* \tan \beta|$ は図 2(a) と (b) においてそれぞれ 100 GeV と 1000 GeV である。等高線はそれぞれ a) 10^{-26} cm, b) 10^{-25} cm, c) 10^{-24} cm, d) 10^{-23} cm and e) 10^{-22} cm. である。

さらに我々は、ある種の複素位相の電気双極子モーメントへの寄与が十分に小さくなり、なおかつ現象論的に矛盾の無いパラメータ空間を発見した。

最後に我々は、トップクォークの湯川結合定数の近似的赤外固定点を、普遍的でない超対称性の破れの枠組の中で議論した。これは、近年トップクォークの質量が実験的に確認されたことから、注目を浴びつつある分野である。一般に、湯川結合定数の近似的赤外固定点は、 $m_t^{\text{QFP}} \sim 200$ GeV と実験値よりも大きめの値を導くことが多い。

我々は、超対称粒子の分離が近似的な湯川赤外固定点に対し無視できない影響を与えることを示した。超対称性の破れのスケール M_S が 1 TeV よりも大きい場合、湯川結合定数そのもののくりこみ群の効果が支配的であり、その場合、Higgs 粒子のスーパーパートナー (Higgsino) とクォークのスーパーパートナーが同時に軽いとすると、普遍的な超対称性の破れの場合よりも、湯川赤外固定点で予言されるトップクォークの質量を、実験と無矛盾な値に近付けることが可能であることがわかった。

さらに我々は、 M_S が 1 TeV よりも小さい場合、もしグルーオンのスーパーパートナーであるグルーイノが軽ければ、質量が赤外固定点によって予言されるトップクォークの質量も軽くなることを示した。これらの結果の一部を図 3 に示す。これらの結果から、将来トップ

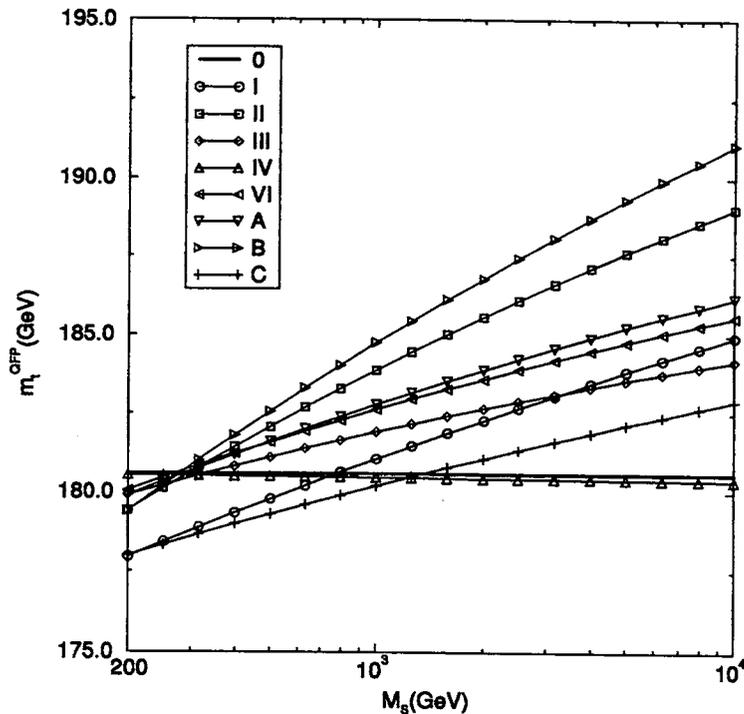


図 3: Higgsino が軽い場合の湯川赤外固定点から予言されるトップクォークの質量。各 case は本論文中に与えられている普遍的でない超対称性の破れのそれぞれのパターンに対応している。

クォークの質量がより精密に測定された場合、いくつかの普遍的でない超対称性の破れのパターンを排除することが可能であり、理論に有効な制限を与えることができるようになる。

また、我々は近似的赤外固定点への強い相互作用の結合定数の不定性の影響や、湯川結合定数の統一された場合などについても考察を行なった。

学位論文の審査結果の要旨

素粒子の標準模型を越える統一理論として、超対称性を持つ統一ゲージ理論が有望である。これは、重力の量子論が必要になる領域 (10^{-33}cm) での理論の候補である超弦理論から導かれる有効理論であると期待されている。超対称性は未だ直接には観測されていない対称性で、全ての素粒子に同じ質量でスピンの異なる相棒が存在する事を要求する。この様な相棒は未だ観測されていない故、超対称性はなんらかの機構で破れており、その破れ方と破れの大きさが理論のパラメータとなり、種々の素粒子現象や宇宙の歴史の中で試され、統一理論を絞り込む努力が行われている。

申請者らの研究は、この破れ方について、通常仮定される「普遍性」と呼ばれる性質をはずすことにより、理論の予言がどう変わるかを詳細に調べたものである。特に、現在確認されている重力以外の3つの相互作用が統一されるエネルギーが更に高くなり得て超弦理論とのつながりが良くなること、中性子の電気2重極モーメントが自然に小さくできて、実験と両立し易いこと、繰り込み群の議論での赤外固定点から予想されるトップクォークの質量を実験値に近づけられること等が明らかにされた。

「普遍性」を持たない超対称性の破れの効果は、素粒子の統一理論を組み立てていく上で今後重要な研究課題となるべきもので、申請者らの研究はその課題を先駆けて取り扱っている貴重なものである。研究グループの中で、申請者は理論解析及び数値計算全般を中心的に進めてきた。博士論文では更に、超対称性と統一理論に関する綿密なレビューが加えられ、申請者が博士の学位を取得するにふさわしい学識を有している事を示している。