

氏 名	くろ さわ き いち 黒 澤 毅 一
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2287 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Heavy Squarks and Sleptons in the First-two Generations and the Flavor Problem in the Supersymmetric Standard Model (重い 1, 2 世代のスクォーク・スレプトンと超対称標準模型におけるフレーバー問題)
論文調査委員	(主 査) 教 授 静 谷 謙 一 教 授 九 後 太 一 教 授 二 宮 正 夫

論 文 内 容 の 要 旨

標準理論は多くの実験・観測により検証され、素粒子を記述する枠組みとして大きな成功を収めているが、「自然さの問題」、つまり、ヒッグス粒子の質量が非常に大きな量子補正を受けてしまうという問題がある。超対称性 (supersymmetry, SUSY) は、この問題を解決する可能性として期待されており、標準理論を越える新しい物理として様々な面から活発な研究が行われている。超対称性は、ボソンとフェルミオンを結びつける対称性であるが、クォークとレプトンの超対称パートナーであるスクォークやスレプトンは未だ発見されていない。そのため、超対称性は soft SUSY breaking term と呼ばれる相互作用により破れていると考えられている。しかし、このような相互作用には、一般に非常に大きな flavor changing neutral current を引き起こすという難点 (超対称標準模型におけるフレーバー問題) がある。

申請者は、申請論文において、第一第二世代のスクォーク、スレプトンの質量が非常に大きい (1~10TeV 程度) と考えることで、このフレーバーの問題を解決する可能性を追求した。第一、第二世代と限定するのは、第三世代のスフェルミオンはトップクォークの Yukawa coupling を通じてヒッグス粒子の質量に対し大きな量子補正を与えるので、「自然さの問題」から数100GeV 程度の質量しか持つことが許されないためである。加えて、第三世代に関係したフレーバーの破れに対する制限は比較的緩いため、第三世代のスクォーク、スレプトンの質量が数 100GeV 程度であれば実験からの制限を満たすことができる。

第一、第二世代と第三世代のスクォーク、スレプトンの間に階層的な質量を考えることは、effective supersymmetry という名前で知られているが、このような階層的な構造は新たな困難を生ずる。第一、第二世代のスクォーク、スレプトンが電弱スケールに比べ極度に重くなると、第三世代のスクォーク、スレプトンが軽くなり、場合によっては真空期待値を獲得する結果、カラーと電荷の保存が破れてしまうのである。申請者は、共同研究者と共に、この困難を解決する枠組みを提案し、具体的な模型を構築した。

提案した枠組みは、標準模型のゲージ相互作用をする超対称多重項を導入することで、第一、第二世代による 2 次のループの発散を相殺するというものである。この相殺がうまく働くためには、新たに導入した超対称多重項場の質量は、第一、第二世代のスクォーク、スレプトンの質量と同程度 (1~10TeV 程度) である必要がある。このような枠組みを natural effective supersymmetry と名付けた。そして、世代毎に異なるチャージを持つ U(1)ゲージ相互作用を用いて超対称性を破ることで、この枠組みを実現する具体的な模型を構築した。また、この U(1)ゲージ相互作用の破れから、クォーク、レプトンの質量の階層性が生じる。

Natural effective SUSY においては、2 次のループによる発散は相殺されるが、有限繰り込みの補正が残る。そこで、申請者は共同研究者と共に有限繰り込みの補正の大きさを計算し、補正が相殺される前の発散の大きさより一桁小さくなること示した。そして、この計算に基づいて、natural effective SUSY の枠組みが、自然さの問題と矛盾することなく、最も厳しいと考えられる K^0 - $\bar{K}^0$ 混合からの制限を満たしているか調べた。その結果、 K_L と K_S の質量差からの制限は満たして

いることが判明した。一方で、 $K^0-\bar{K}^0$ 混合における CP の破れからの制限については、第一、第二世代のスクォーク、スレプトンの質量が同じ場合は容易に満たされるが、それ以外の場合には理論のパラメーターの位相を微調整する必要があることを指摘した。

論文審査の結果の要旨

素粒子の強弱電磁相互作用を $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ ゲージ理論の枠組みで記述する標準模型は多くの実験事実を説明する優秀な理論である。この標準理論を越え、真の統一を図る理論的試みとして、超対称性 (supersymmetry, SUSY) をもつ大統一理論が有望視されている。超対称性はボゾンとフェルミオンを結びつける大きな対称性であり、大統一に固有なエネルギースケールの巨大な比 (ゲージ階層性) の問題、いわゆる「自然さの問題」を解決しようという利点を持つ。ただし、超対称粒子は未だ発見されないで、現実には超対称性は破れており、クォークやレプトンの超対称パートナーであるスピン 0 の粒子スクォークやスレプトンは重くなっていると考えられる。

そこで、標準模型を超対称化した極小超対称標準模型では超対称性を soft に破る相互作用を必然的に考えることになるが、実はこのような soft SUSY breaking により flavor-changing neutral current や CP の破れのようなフレーバーに関係した問題が新たに生じてしまう。この問題の解決策はいくつか知られているが、なかでも「第一、第二世代のスクォークとスレプトンが他の超粒子よりも十分に重い ($1\sim 10\text{TeV}$ 程度)」として上記のフレーバーの問題を避ける decoupling というシナリオが特に興味深い。第一、第二世代と限定するのは、第三世代のスクォークとスレプトンはトップクォークの Yukawa coupling を通じてヒッグス粒子の質量に対し大きな量子補正を与えるので、「自然さの問題」から数 100GeV 程度の質量しか持つことが許されないためである。このスクォーク、スレプトンの階層的な質量スペクトルを effective SUSY と呼ぶ。

このような背景の下に申請者は decoupling のシナリオを、(1) 模型の構築と (2) その現象論的な妥当性の両面から吟味した。申請論文は、この「decoupling のシナリオ」について、申請者のオリジナルな寄与を中心に総合的に解説したものである。

まず、模型の構築はあまり単純ではない。繰り込み群の 2 ループで全世代のスクォークやスレプトンが関わり合う結果、effective SUSY は容易には実現できない。第一、第二世代のスクォーク、スレプトンが電弱スケールに比べ極度に重くなると、第三世代のスクォーク、スレプトンが軽くなり、場合によっては真空期待値を獲得する結果、color と charge の保存が破れてしまうのである。そこで申請者と共同研究者は effective SUSY の質量スペクトルを (2 ループの) 繰り込みに対して安定化するように極小超対称標準模型の拡張を試みた。そして、この拡張を natural effective SUSY と名付けた。

模型の具体的な構成は以下のようにした。まず、第一、第二世代による 2 次のループの発散を相殺するために、標準模型のゲージ相互作用をする新たな物質場を導入する。この新たな物質場は、第一、第二世代のスクォーク、スレプトンの質量と同程度 ($1\sim 10\text{TeV}$ 程度) に重いとする。これらの重い場の質量は、ある $U(1)_X$ ゲージ相互作用の自発的な破れにより作り出すと想定する。この際、ヒッグス粒子の「自然さ」を保証する、つまりヒッグス粒子が弱相互作用スケールの質量を持つようにするために、ヒッグス粒子と強く結合する超粒子についてはその質量が弱スケールに留まるよう $U(1)_X$ 荷を 0 に選ぶ。このような構成の下で、スクォーク、スレプトンの階層を繰り込みに対して安定となるよう新たな物質場の $U(1)_X$ 荷を調整し、4 種類の模型を構築した。

次に、申請者達は軽いスクォーク、スレプトンの質量に対する有限繰り込みの補正を評価した。補正は重いスクォーク、スレプトンの質量の二乗の 1% 以下であり、effective SUSY 模型の場合に比べ $1/10$ 程度に小さくなることを示した。

さらに、 $K^0-\bar{K}^0$ 混合の実験結果 (K_L-K_S 質量差 Δm_K , CP の破れのパラメーター ϵ_K) を考慮に入れて natural effective SUSY 標準模型の現象論的な妥当性を検討した。通常の effective SUSY をもつ模型に比べてこの模型では軽いスクォーク、スレプトンの質量の下限が大きく下がり、模型の構成に際し特に厳しい微調整の必要がないことを示した。

上述したように、natural effective SUSY の考え方の提唱に始まり、それを実現する模型を構築し、その妥当性を詳しく検討したことは、申請者と共同研究者のオリジナルで重要な業績である。よって、本申請論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。

平成 13 年 1 月 16 日、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。