

## 論文の内容の要旨

論文題目 A Solution to the Flavor-Changing Neutral Current Problem  
in the Supersymmetric Standard Model  
(超対称標準模型におけるフレーバーを変える中性カレント  
問題の一つの解法)

氏名 野村 泰紀

素粒子の標準理論は、加速器の精密実験によりその正当性が摂動の高次のオーダーまで確かめられている。この標準模型では、 $100\text{ GeV}$ 程度の質量を持つヒッグスと呼ばれるスカラー粒子が電弱ゲージ対称性の自発的破れを担っている。しかしながら、一般にはスカラー場は量子効果により $100\text{ GeV}$ に比べて極めて大きな質量を持ってしまうため、その質量を $100\text{ GeV}$ 程度に抑えるためには何らかの機構が必要であると考えられる。この問題は、理論に超対称性と呼ばれるボソンとフェルミオンの間の対称性を導入することにより自然に解決される。そのため超対称標準模型は、電弱スケールを越える高エネルギーで標準模型に変わる理論として幅広く考察されている。

超対称標準理論は、クォーク、レプトン、ゲージ場の超対称パートナーである新粒子を预言する。その質量は数 $100\text{ GeV}$ 程度と考えられ、それらの粒子を発見することは次期の高エネルギー加速器実験の重要な目標にもなっている。しかしそれらの超対称粒子は、一般に摂動の高次のオーダーで実験的上限值をはるかに越えるフレーバーを変える中性カレントを生み出す。そのため、超対称粒子の質量行列はこの中性カレントの問題を避けるために特定の構造を持っていなければならない。

いくつかの可能な解決策のなかで最も簡単なものは、第1、2世代に属するクォークとレプトンの超対称粒子(スクォーク、スレプトン)と第3世代に属するものとの間に

大きな質量ギャップを仮定する方法である(デカップリング解)。この方法では、第1、2世代に属するスクォーク、スレプトンが重たい事と、第1、2世代に属するクォーク、レプトンが軽い事を関係させ、標準模型の粒子とその超対称パートナー粒子の質量構造の起源を統一的に理解できる可能性が存在する。実際に、弦理論に現れるアノーマラスなU(1)ゲージ理論を用いたモデルでは、U(1)対称性をフレーバー対称性と同一視することにより、実験的に決定されたクォーク、レプトンの質量行列を与えることと、デカップリング解を実現することが一つの機構により達成される。

しかしながら、上記のようないくつかの望ましい性質にもかかわらず、デカップリング解には一般に繰り込み群に対する安定性の問題が存在する。このシナリオでは、第1、2世代に属するスクォーク、スレプトンが他の超対称粒子に比べて桁程度重たいため、2ループの繰り込み群を通して第3世代のスクォークの二乗質量が負の寄与を受ける。その結果、カラーゲージ対称性を持つ正しい真空が不安定になり、現象論的に妥当なモデルとして受け入れることが出来なくなってしまう。また、この問題を避けるために第3世代のスクォークに正の裸の二乗質量を導入した場合には、ヒッグス粒子の二乗質量が1ループで繰り込み群の補正を受け、その真空期待値が実験値よりはるかに大きくなってしまう。これは、電弱相互作用の破れのスケールが量子効果の下で不安定であることを意味する。

我々は、この理論に数TeVの質量を持つゲージ群の実表現の粒子(エクストラ粒子)を持ちこめば、真空の不安定性を回避できることを発見した。エクストラ粒子の質量は、

$$\sum_r T_r^A m_r^2 = 0, \quad (1)$$

$$\sum_r Y_r m_r^2 = 0, \quad (2)$$

$$\sum_r Y_r C_r^A m_r^2 = 0, \quad (3)$$

という関係式を満たすよう定められる。ここで、 $A$ は標準模型のゲージ相互作用( $A=1-3$ )を表し、 $T_r$ 、 $Y_r$ 、 $C_r$ はディンキン指数、ハイパー電荷、カシミア係数を表す。また、和は第1、2世代のスクォーク、スレプトンとエクストラ粒子についてとる。これらの条件の下では、第3世代のスクォークの二乗質量に対する2ループ繰り込み群の寄与は、第1、2世代のスクォーク、スレプトンからの負の寄与とエクストラ粒子から

の正の寄与の間で完全に相殺する。また繰り込み群の寄与の相殺は、非可換ゲージ相互作用を通じて生じる部分に関する限り、摂動論の全てのオーダーで成り立つことも証明できる。この場合、第3世代のスクォークの二乗質量に対する主な寄与は、有限な繰り込み効果の部分からくることになる。

我々はさらに、アノーマラスな  $U(1)$  ゲージ理論を用いてこの機構が有効に働く具体的な素粒子の統一モデルを提案し、その現象論的な解析を行なった。我々は有限な繰り込み効果に対する2ループでの完全な表式を与え、それをもとに摂動の2ループのオーダーまでの完全な解析を実行した。その結果、エクストラ粒子を含むモデルでは、実験の制約の下でカラー対称性を保ちながら正しく電弱ゲージ対称性の自発的破れが起こり得ることが数値的に示された。

具体的には、フレーバーを変える中性カレントの実験のうち最も厳しい制限を与える  $K^0-\bar{K}^0$  振動を考え、以下に示す4通りの典型的な質量パターンについて解析を行なった。

Model	I	II	III	IV
$Q_{10_1}^X$	1	2	2	2
$Q_{10_2}^X$	1	1	1	1
$Q_{10_3}^X$	0	0	0	0
$Q_{5^{*1}}^X$	1	1	1	2
$Q_{5^{*2}}^X$	1	1	1	1
$Q_{5^{*3}}^X$	0	1	0	1
$Q_{5^{ex}}^X$	-4	-6	-6	-6
$Q_{5^{*ex}}^X$	-4	-6	-5	-7

ここで、表に与えた数字はそれぞれの場のアノーマラス  $U(1)$  電荷であり、これは超対称性を柔らかく破る二乗質量に比例する。 $Q^X$  の添字が  $SU(5)$  の表現で書かれた標準モデルの粒子、及びエクストラ粒子を表わす。

解析の結果、我々のモデルでは Model (IV) を除く全ての場合について、 $K_L$  と  $K_S$  の質量の差  $\Delta m_K$  からくる実験的制限と矛盾せずに正しく電弱ゲージ対称性の破れのスケールが導かれることが分かった。超対称性の破れのスケールでいうと、エクストラ粒子を含むモデルでは軽い超対称パートナーの質量は  $400 \text{ GeV}$  以下に抑えられるのに対し、それを含まないモデルでは  $1 \text{ TeV}$  近くにまで跳ね上がってしまうことが示された。また、モデルにオーダー1の複素位相が存在する場合には、CPの破れを表すパ

ラメーターである  $\epsilon_K$  からの厳しい制限が存在するが、その場合でも Model (I) は実験からの制限を逃れることが出来る。一方 Model (II) 及び (III) では、 $\epsilon_K$  の制限から、複素位相は  $10^{-2}$  以下でなければならない。

我々は以上の解析から、エキストラ粒子を含むモデルでは真空の不安定性は回避され、デカップリング解は現象論的困難を持ち込むことなくフレーバーを変える中性カレントの問題を解くことが出来ると結論した。我々の導いた2ループの有限繰り込みの表式はゲージ相互作用の部分に関する限り最も一般的なものであり、我々の解析はアノーマラス  $U(1)$  を用いたモデルに限らずデカップリング解を採用するモデル一般に適用出来るものである。また、この論文ではモデルに特有の実験的特徴や宇宙論についても考察した。