

論文内容の要旨

論文題目: "Phenomenological analysis of no-scale supersymmetry breaking models"

(「ノースケール型超対称モデルの現象論的研究」)

氏名: 鈴木 功至郎

超対称性はスカラー場の力学を制御する対称性として重要な地位を占めている。具体的には、素粒子の標準模型に含まれるヒッグス場の振舞いや宇宙論のインフレーションモデルに含まれるスカラー場の振舞いを制御するのに応用されている。特に前者の場合、超対称標準模型 (Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM) を考えることになるが、超対称性はクォーク・レプトンと同じ質量とゲージ量子数を持つスカラー粒子の存在を预言する。このような粒子は実験的に見つかっていないので、超対称性は「わずかに」破れていると考えられる。そこで超対称性の破れのモデルを考えることになる。

現在までに幾つかのモデルが提案されているが、その一つに「ノースケール型モデル」 ("no-scale model") がある。歴史的には、このモデルは超重力理論の枠組みで超対称性が破れていてかつ宇宙項が常にゼロになるモデルとして発見された。この背後には、スカラー場の運動項が $SU(1, 1)$ 非コンパクト対称性を持つことがある。しかし、超対称性の破れの秩序パラメータであるグラヴィティーノの質量項がこの対称性を破っているため、残念ながら現実的にはこの対称性は破れていると考えざるを得ない。その結果、宇宙項は一般に補整を受け、これをゼロにするパラメータ調整が依然として必要になる。この性質は MSSM の場を含めても同じだが、このモデルのケーラー・ポテンシャルの特殊性により、MSSM のスカラー場のポテンシャルは tree-level ではゼロになることが従う。つまりスカラー場に関する超対称性の破れのパラメータは tree-level では全てゼロになる。一方、ゲージノの質量は、超対称性を破るゲージ重項の場が存在してそれがゲージ場の運動項と相互作用するならば tree-level で値を持つ。(これらの破れのパラメータの条件を「ノースケール条件」と呼ぶことにする。) MSSM のスケール (電弱スケール) では、スカラー場に関する破れのパラメータは主に tree-level のゲージノの質量を通じたゲージ相互作用からのくりこみにより正の値を持つ。これは現象論的には望ましい性質だが、その議論の前にノースケール型モデルの起源を探ってみる。

理論的には、ケーラー・ポテンシャルは $N = 4$ の超対称性があるときに厳密に定まる。高い超対称性を持つモデルからノースケール型モデルを導くことは出来るだろうか。歴史的には Witten がヘテロ型弦理論のカラビ・ヤウ多様体上へのコンパクト化によりノースケール型モデルが導かれることを示した。もう一つの候補は M-理論をオービフォールド上にコンパクト化した場合である。一般にはノースケール型は導かれないようにみえるが、特殊な条件下では導かれる可能性がある。さらにもう一つの候補は五次元超重力理論をオービフォールド上にコンパクト化した場合である。五次元超重力理論は $N = 2$ の超対称性しか持たないが、このモデルの特殊性によりノースケール型モデルが導かれる。

次に現象論的側面から超対称モデルを考察してみる。超対称モデルで最も問題になるのは、一般に「超対称フレーバー問題」と呼ばれるものである。標準模型で世代間遷移が非常に小さいのは GIM 機構が働くからであった。フレーバーを破る要素は小林・益川行列にのみ含まれる。しかし、スカラー場の基底をクォークの基底と同じに選んでも、スカラー場の質量項と A-term それぞれの非対角項は一般に小さくならない。以下の二つの条件、(1) スカラー場の質量項が単位行列に比例するか、湯川結合定数行列に比例する、(2) A-term がゼロであるか、湯川結合定数行列に比例する、が満たされないとフレーバーを破るプロセスの起こる確率が実験値よりもはるかに大きく予言されてしまう。これが「超対称フレーバー問題」である。逆に、上記の (1),(2) の条件を充たすことが超対称モデルの構成原理だとも言える。ノースケール型モデルを含め、現在までに提案されている超対称モデルはいずれもこの原理にかなっている。超対称粒子のスペクトルに関しては一般的にそれぞれのモデルに特徴があり、超対称粒子が発見された暁にはどのモデルが自然界で実現しているかはっきりする可能性が高い。しかし中には類似したスペクトルを持つモデルもある。例えば、gaugino mediation モデルでは破れのパラメータはコンパクト化のスケールで近似的に「ノースケール条件」を充たしている。

以上で見て来たように、ノースケール型モデルは理論的にも現象論的にも極めて興味深いモデルであると言えるが、さらに現象論的にこのモデルを探究するには何を現象論的制限としてモデルに課すかを決めなくてはならない。この論文では次の三つの条件を課すことにする。(a) モデルは粒子探索実験から分かっている未発見粒子 (ヒッグス粒子と超対称粒子) の質量の下限を充たす (b) モデルはフレーバーを破る次のプロセスの分岐比 $BR(b \rightarrow s\gamma)$ の実験値と矛盾しない (c) モデルの LSP (最も軽い超対称粒子) は $SU(3)_C \times U(1)_{em}$ ゲージ対称性の量子数を持たない。(a) については、LEP 実験から分かっている下限値、例えばヒッグス粒子なら $m_h \geq 114.1$ GeV、スカラー電子なら $m_{\tilde{e}} \geq 99$ GeV などを採用する。(b) については、CLEO 実験から分かっている値、 $2.5 \times 10^{-4} \leq BR(b \rightarrow s\gamma) \leq 4.0 \times 10^{-4}$ (95% C.L.) を採用する。(c) は宇宙論的な要請である。R-パリティが保存する超対称モデルでは LSP は安定であり、従って現在の宇宙にも存在するはずである。特に地球上、例えば海底などで発見できるはずである。しかし、 $SU(3)_C \times U(1)_{em}$ のゲージ量子数を持つ粒子は発見されていないので、LSP はこの量子数を持ってはいけなことになる。

最近、MSSM で超対称性の破れの伝播スケールを大統一理論 (GUT) のスケールに取ると、ノースケール型モデルは上記の現象論的要請 (a),(b),(c) を充たしていないことが認識されるに至った。特に問題なのは、ヒッグス粒子の質量の下限 $m_h \geq 114.1$ GeV と LSP が中性であるという要請が矛盾することである。ノースケール型モデルのスペクトルの特徴に、最も軽いニュートラリーノ (χ_1^0 と書く、ほとんど bino) と軽いスカラー・タウ・レプトン ($\tilde{\tau}_1$ と書く、主に右巻き) の質量がほぼ縮退していることが挙げられる。ゲージノの質量を大きくして行くと χ_1^0 の方が $\tilde{\tau}_1$ よ

りも重くなってしまうので、(c) からゲージノの質量の上限がつくことが分かる。一方、ヒッグス粒子は間接的に $SU(3)_C$ ゲージノから質量をもらうので、(a) からはゲージノの質量の下限がつく。これらの上限と下限が矛盾するのが問題なのである。

この論文では、MSSM を拡張して MSSM に含まれるグローバル対称性である $U(1)_{B-L}$ をゲージ化したモデルを提案し、上記の問題が解決されるかを詳細に解析した。特に GUT を考え、ゲージ群が $SU(5) \times U(1)_5$ であるモデルを考えた。ここで、 $U(1)_5$ は標準模型の $U(1)_Y$ とゲージ化した $U(1)_{B-L}$ の線型結合で、 $SU(5)$ と直交するものである。 $U(1)_{B-L}$ 対称性のゲージ化はニュートリノの質量や R -パリティの保存を説明できるなど物理的に豊かな内容を持つものであり、恣意的な選択ではない。以上の枠組みでは複数の $U(1)$ ゲージ群が存在するために $U(1)$ 間の混合があるが、MSSM の三つのゲージ結合定数が摂動論で統一するという性質は保たれる。また、GUT モデルで摂動論的に成り立つゲージノ質量関係式も従う。よって、GUT スケールで三つのゲージ結合定数と三つのゲージノの質量がそれぞれ等しいとおくのが自然である。このとき、 $U(1)_5$ のゲージ結合定数とゲージノの質量は必ずしも統一されていなくて良い。この論文では次の各場合を解析した。(I) $U(1)_5$ のゲージ結合定数とゲージノの質量も GUT スケールで統一されている、(II) $U(1)_5$ のゲージ結合定数とゲージノの質量は統一されていない、(III) ノースケール条件を若干緩めて $U(1)_5$ 対称性を破るヒッグス場の質量項のみを GUT スケールで許す。その結果、次のことが分かった。まず、(I) の場合は MSSM の場合とほとんど同じ結果であった。(II) の場合は、 $U(1)_5$ のゲージノの質量が MSSM のゲージノに比べて数倍重ければ全ての現象論的要請を充たし得ることが分かった。(III) の場合は、(I) の条件であっても全ての現象論的要請を充たし得ることが分かった。次にこの結果の分析をする。

$U(1)_{B-L}$ 対称性をゲージ化した効果を考えてみる。MSSM のゲージノとヒッグス粒子の質量は殆ど影響を受けない一方、スカラー場の質量は影響を受ける。一つは (イ) $U(1)_5$ のゲージノから受けるくりこみの効果、もう一つは (ロ) $U(1)_5$ の自発的破れにより生じる D -term の効果である。しかし、(I) の場合、(イ) と (ロ) 両方共 $\tilde{\tau}_1$ の $U(1)_5$ 量子数 $(-1/2\sqrt{10})$ が小さすぎるために $\tilde{\tau}_1$ の質量に対してほとんど影響を与えない (2% ほど大きくなる)。($U(1)_5$ 量子数の規格化は $SU(5) \times U(1)_5$ を $SO(10)$ に埋め込むことによって群論的に決まっているものである。) 次に、(II) の場合は (イ) の効果が大きくなるので $\tilde{\tau}_1$ の質量は大きくなる。(III) の場合は GUT スケールで大きな D -term が生じるので、(ロ) の効果を正に大きく効かせることが出来る。よって、(II) と (III) の場合は全ての現象論的要請を充たし得るのである。結局、以上の解析から、ノースケール型モデルは $U(1)_{B-L}$ 対称性をゲージ化したモデルでは全ての現象論的要請を充たし得るが、それを包含する大統一理論の枠組みとしてはゲージ群が $SO(10)$ よりも $SU(5) \times U(1)_5$ のような直積群であるか、あるいは「超対称フレーバー問題」に抵触しないスカラー場の質量項 (例えば $U(1)_5$ を破るヒッグス場) が存在することを示唆しているといえる。