

## 論文内容要旨

氏 名	殷 文	提出年	平成 27 年
学位論文の 題 目	微調整問題の考察に基づく超対称標準模型の解析		

2012 年 7 月に LHC でのヒッグス(らしき)粒子の発見により、低エネルギー有効理論としての素粒子標準模型 (SM) はほぼ確立された。しかし、大統一理論 (GUT) スケール、右巻きニュートリノスケール、ペッチェイクィーンスケールなどが現象及び自然さの説明に必要であり、それらは量子効果を通じて、ヒッグス粒子の質量(ヒッグス質量)を微調整する。

微調整問題に対してトフーフトは、ヒッグス質量の代表するスケールを 0 にするときに対称性が回復する、ナチュラルネスという概念を提唱した。SM にヒッグス質量を禁止する対称性はないので、新粒子が必要である。新粒子スケールとの微調整問題をさけるため、ナイーブには新粒子質量はヒッグス質量スケール以下にいたる必要がある。しかし、LHC ではヒッグス(らしき)粒子の発見以降、新粒子は見つかっていない。従って、自然はナチュラルではない兆候を示している。

ナチュラルではない、すなわち微調整を有する場合、量子効果はヒッグス質量、故に電弱スケールに対して支配的に働き、現象論の本質的役割を果たすこともある。従って、微調整を持つ模型の解析には、量子効果を正確に見積もる手法が必要である。

ヒッグス機構が構造を持たない素粒子で引き起こされる場合、ナチュラルネスの要請から最も有力な対称性は超対称性である。ナチュラルネスの破れはそれほど大きくないとすると、やはり超対称性が好まれるであろう。

本論文では、微調整された超対称模型 (Fine-Tuned Supersymmetric Models: FT-SUSY) の解析を目的とした「RECC による解析手法」を考案する。

本論文での基本的戦略は、マクロの制限をミクロに写像することである。

超対称模型には、超高エネルギースケール(ミクロ)の制限と電弱スケール(マクロ)の制限がある。ミクロでは、対称性や機構によるパラメータの制限があり、マクロでは実験による制限がある。二つのスケールでのパラメータは、繰り込み群方程式 (RGE) で結ばれている。ミクロの制限の下で独立なパラメータを基本パラメータと呼ぶ。

マクロの制限もクリアしている基本パラメータ空間をパラメータ領域と呼ぶ。

本論文で提唱する Running Equation for Coefficients of Constraints (RECC) は実験からの制限を表す制限関数を写像するための微分方程式である。ここでの写像とは、元々あるスケールでのパラメータで書かれた関数を、RGE で結ばれている別のスケールでのパラメータの関数に書き直すことである。RECC を用いれば、実験の制限を基本パラメータについて直接解くことが出来る。写像された制限関数は微分を含まないため、単純な連立 (不) 等式となる。従って、基本

パラメータについての (不) 等式の解が全パラメータ領域となる。

本手法では、視覚的に「面白い」領域を見つけることが出来る。「面白い」領域は、短いスパンで現象論的に確かめることが出来る領域のことである。パラメータ領域の境界は実験の制限に対応することが多い。実験の技術、精度などの向上により制限は更新される。

従って、境界付近では確かめられる物理が多いのである。本手法では制限を写像しているため、境界の対応するマクロの情報(プロファイル)が分かる。境界のプロファイルから「面白い」領域を「見」つけることが出来るのである。

パラメータ領域を調べる従来の手法は、スキッタープロットと呼ばれる。この手法では、基本パラメータ空間からサンプル点を多数とり、量子補正を組み込み、それぞれの点について実験の制限を満たすかを調べる。量子補正を含める為に、サンプル点の数だけ連立微分方程式である、繰り込み群方程式(RGE)を解く必要がある。

本手法は FT-SUSY の解析において、スキッタープロットより効率的である。興味あるパラメータ領域がどこにあるかわからない為、スキッタープロットでは量子効果のオーダー以上の基本パラメータ空間に点をとる必要がある。一方で「面白い」パラメータ領域は現象論的な低いスケールの場合が多い。広い領域に点を振り、狭い領域に当てるには、スキッタープロットでは多大の点数が必要である。そのため、多大な演算時間と当てるための運が必要である。従って、制限数分の連立微分方程式を解く、本手法がより効率的である。

本手法に基づき、超対称性模型である Non-Universal-Higgs masses 模型 (NUHM) を解析した。NUHM は GUT を視野に入れた模型である。ミクロ (GUT スケール) で NUHM は、スフェルミオン質量、2 つのヒッグス質量、ゲージノ質量、A 項、 $\mu$  項、 $B\mu$  項の 7 つの基本パラメータを持つ (実と虚は分別していない)。ヒッグス質量をスフェルミオン質量と区別しているのが、NUHM の特徴である。マクロのヒッグス質量を説明するための大きな量子補正は、 $0(6)\text{TeV}$  のストップを要求するのが普通である。よって、FT-SUSY である。

簡略化された制限の下で、 $\tan\beta$  が一定の 全パラメータ領域をスキャンした。  
また、境界のプロファイルから、

「面白い」領域である Inverted Light Squark (ILSQ) 領域を発「見」した。ILSQ 領域は 1、2 世代のスクォークが軽い、今まで詳しく調べられていない新しい領域である。

RGE の考察から、ILSQ 領域は NUHM の典型的な領域であり、FT-SUSY だからこそ実現可能であることが分かる。ミクロでは同じ質量であったのに、マクロのストップと ILSQ に質量階層性が出来ている。つまり量子補正が本質的に働いているのである。具体的には、負のヒッグス質量二乗項が RGE のトップ湯川項を通してストップを重くしているのである。

ヒッグス質量とスフェルミオン質量が異なることが重要であるため、ILSQ 領域は NUHM の特徴を生かした典型的領域である。

更に現象論的アプローチも考案した。現象論的アプローチでは、欲しい現象が実現する条件を実験の制限に加え、上記のプロセスを実行する。パラメータ領域の存否は欲しい現象が実現するかに対応し、境界のプロファイルは付随することのできる現象に対応する。

現象論的アプローチから、NUHM で以下の現象の実現、及びその場合に付随できる軽い粒子を示した。

- a. ILSQ の存在が LHC で確かめられる領域
- b. ミューオン  $g-2$  を  $1\sigma$  で説明する領域
- c. ビーノ暗黒物質が ILSQ との Coannihilation で実現される領域
- d. グラビティーノ LSP が BBN と無矛盾である領域

特に b は、スキッタープロットでの先行研究から、棄却されていた。しかし、RECC による解析手法を用いてその存在を明らかにしたのである。

このように、RECC による解析手法は、FT-SUSY に有効的で、既存の手法では見落とされていた重要な物理を見つけることが出来ることを具体的な例を用いて示した。

## 論文目次

1. 導入
2. 素粒子理論の基本原則及び理論体系のレビュー
3. 場の量子論の量子補正とユニバーサルティ
4. 微調整問題とナチュラルネス
5. Beyond SM のヒント
6. ナチュラルネスとヒッグス質量からの示唆:超対称性
7. 最小超対称標準模型
8. 現象論的示唆
9. FT-SUSY へのアプローチ
10. Running Equation for Constraints of Coefficients(RECC)
11. RECC による解析手法
12. RECC による解析基本編の具体例: NUHM
13. RECC による解析応用編の具体例: NUHM
14. 結論

## 論文審査の結果の要旨

2012 年 7 月のヒッグス粒子の発見とその後の研究により、電弱ゲージ対称性の破れが標準理論により記述されることが分かってきた。一方、標準理論は電弱スケールと基本的なエネルギースケールとの大きな乖離という問題を内包しており、その解決のため超対称性等の新たな物理原理の存在が期待されている。

ヒッグス粒子の質量を最小超対称標準模型で説明しようとする、トップクォークの超対称対であるストップ粒子の質量が 6 TeV 以上であることが必要となる。この事と、超対称粒子が未発見であることを合わせると、超対称理論においても、超対称粒子の質量スケールと電弱スケールの間に階層があることになり、電弱スケールの実現には超対称理論のパラメータ間の微調整が必要になる。

殷文提出の博士論文は、このように微調整が必要な場合において、許容されるパラメータ領域を研究する新たな手法を提唱した。従来超対称理論のパラメータ領域の研究では散布図法というデータをパラメータ空間の離散な点の集合として記述する方法がよく用いられてきた。しかしこの方法は、微調整が必要な場合においては、有効な点を逃すとともに、計算機を用いた解析に膨大な時間を要する等の問題がある。本論文では、パラメータ空間に対する制限方程式を、繰り込み群的手法を用いて、あるエネルギースケールから異なるエネルギースケールへと写像する方程式 (Running Equation for Constraints of Coefficients: RECC) を開発し、それを用いて電弱スケールでの実験的制限等を基本的スケールに写像し、基本的スケールにおいて許容されるパラメータ領域を効率よく同定する方法を提唱した。さらにこの方法を Non Universal Higgs Model と呼ばれる模型に適応し、幾つかのこれまで知られていなかった超対称粒子の質量スペクトルのパターンを見出すとともに、ミューオンの異常磁気能率の標準模型とのずれをこの模型で説明できると事等を示した。本論文で提唱された方法論は独創的であり、また模型に関する解析で得られた知見は近い将来実験的に検証される可能性があり、ともに高く評価できるとともに、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、殷文提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。