

氏名	長野 佳輔
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	自博甲第10号
学位授与年月日	令和7年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第846号
専攻名	創成理工学専攻
学位論文題目	45 表現ヒッグス場をもつ拡張 SU(5)大統一理論におけるゲージ結合定数の統一と陽子崩壊の解析 (Analysis of Gauge Coupling Unification and Proton Decay in an Extended SU(5) Grand Unification Theory with 45-Dimensional Higgs Field)
論文審査委員	主査 島根大学教授 山田 拓身 島根大学教授 田中 宏志 島根大学教授 影島 博之 大阪公立大学教授 波場 直之

論文内容の要旨

素粒子物理学の標準模型は、 $O(100)$ GeVのエネルギースケールでの実験結果をほぼ無矛盾に記述する。しかし、フェルミオンの質量や混合の起源、電荷の量子化、三つのゲージ相互作用の起源といったいくつかの根本的な未解決の問題が残されている。

大統一理論（GUT）は、標準模型のゲージ群をより大きな群に埋め込むことで、これらの問題の解決を目指す標準模型を超える物理の候補の一つである。標準模型を最もシンプルに拡張したGUTは、SU(5)ゲージ群を持つ、Minimal SU(5) GUTである。しかし、Minimal SU(5) GUTにはいくつかの問題が存在する。まず、GUTスケールでは、ダウントイプクォークと荷電レプトンの湯川結合が同一であることを予言するが、これは実験と合致しない。次に、三つのゲージ結合が高エネルギースケールで統一されない問題がある。これらの問題を解決するために、Minimal SU(5) GUTの様々な拡張が提案されてきた。有望なアプローチの一つとして、45次元表現のヒッグス場を導入するというものがある。この場合、クォークとレプトンに対して独立した湯川行列が生成され、観測されるフェルミオンの質量階層性と混合パターンに合致できる可能性がでてくる。さらに、45表現ヒッグスの成分に階層的な質量スペクトルを考慮することで、三つのゲージ結合定数の統一（GCU）を実現することができる。

本研究では、45表現ヒッグス場を組み込んだ超対称性を含まないSU(5) GUT(Non-SUSY SU(5) GUT)を考察する。研究の方針として、ゲージ結合定数の統一を実現し、かつ、陽子寿命の制限を満たすために、「45表現ヒッグス場の成分に階層的な質量スペクトルがある」と仮定した。また、1つ目の解析では、先ほどの仮定に加え、「45表現ヒッグス場が第2世代フェルミオンのみに結合し、Georgi-Jarlskog型の質量行列によってストレンジクォークとミュー粒子の質量比が再

現される」と仮定し、近似的な解析を行った。それに対して、2つ目の解析では、1つ目の解析で用いた仮定をなくし、45次元表現ヒッグス場がすべての世代のフェルミオンに結合する解析に拡張し、厳密な解析を行った。

その結果、1つ目の解析では、様々な階層的な質量スペクトルでくりこみ群方程式（RGE）を解くことで、GCUの条件を満たすためには45表現ヒッグス場の少なくとも2つの成分が階層的に小さな質量を持つ必要があることがわかった。加えて、45表現ヒッグス場の $S_1(\bar{3},1)$ 、 $S_3(3,3)$ 、 $S_8(8,2)$ 表現の成分がGUTスケールよりも軽い場合に注目し、カラーを持つヒッグス場の成分 $S_1(\bar{3},1)$ による陽子崩壊を概算し、Super-Kamiokande実験などの最新の実験的制限からこれらの成分の質量の下限を導き出した。これによって、 $p \rightarrow \mu^+ K^0$ が支配的な陽子崩壊過程であることと、Super-Kamiokande実験の結果から、 $S_1(\bar{3},1)$ 成分の質量 M_{S_1} が、 3.4×10^{13} GeVより重くなければならないという制限が得られた。さらに、陽子崩壊の実験的制限を満たす M_{S_1} とその他の粒子の質量のパラメータ領域を明らかにした。

2つ目の解析では、45表現ヒッグス場の成分の質量階層を設定してRGEを解くことで、ゲージ結合定数の統一を導き、陽子崩壊の実験的制限を回避するための有効なパラメータ領域を特定した。1つ目の解析と同様に45表現ヒッグス場の $S_1(\bar{3},1)$ 、 $S_3(3,3)$ 、 $S_8(8,2)$ 表現の成分がGUTスケールよりも軽い場合に注目して陽子崩壊についても解析を行った。 $S_1(\bar{3},1)$ による陽子崩壊の解析は、カラーを持つヒッグスの成分 $S_1(\bar{3},1)$ についての湯川結合行列のRGEを解析し、Super-Kamiokande実験の実験的制限から質量の下限を導出した。湯川結合行列、45表現ヒッグス場の成分の質量階層、ゲージ結合定数のRGEを解析することで、 $p \rightarrow \bar{\nu} \pi^+$ モードが M_{S_1} に最も厳しい制限を課すことが明らかになり、 1.9×10^{10} GeVより重くならなければいけないことがわかった。さらに、 $S_1(\bar{3},1)$ による様々な陽子崩壊モード間の相関を調べた結果、 $p \rightarrow \bar{\nu} \pi^+$ モードと $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ モードの相関がGUTスケールの45表現ヒッグス場の湯川行列のパラメータに最も強く依存することが明らかになった。このことは、将来の陽子崩壊実験において、これらのモードの崩壊率を精密に測定することで、モデルのパラメータ空間をより詳細に絞り込むことができる可能性を示唆している。

論文審査結果の要旨

本論文は、最小SU(5)大統一理論（Minimal SU(5) GUT）を拡張したモデルである45表現ヒッグス場を含むSU(5) GUTにおけるゲージ結合定数の統一（GCU）と陽子崩壊に関する研究をまとめたものであり、GCUに必要な条件と45表現ヒッグス場の寄与する陽子崩壊について新しい知見を与えるものである。本論文は6章から構成されており、第1章は、導入として当該研究の背景と研究目的について記した。

第2章では、本論文の基礎となるMinimal SU(5) GUTの概説を行う。この章では、Minimal SU(5) GUTについて、本論文の解析で用いるラグランジアンとGCU、陽子崩壊にのみ着目してまとめた。

第3章では、45表現ヒッグス場を含んだSU(5) GUTについて概説を行った。この章では、新たに含まれた45表現ヒッグス場についての特徴をまとめ、後の解析で用いるGeorgi-Jarlskog型の質量行列、45表現ヒッグス場が寄与する場合の陽子崩壊についてまとめた。

第4章では、研究の方針であるGCUを実現し、かつ陽子寿命の制限を満たすために、「45表現ヒッグス場の成分に階層的な質量スペクトルがある」と仮定し、様々な階層的な質量スペクトルでくりこみ群方程式（RGE）を解くことで、GCUの条件を満たすためには45表現ヒッグス場の少なくとも2つの成分が階層的に小さな質量を持つ必要があることを明らかにした。

第5章では、第4章での結果を基に、45表現ヒッグス場が寄与する陽子崩壊に関して2つの解析を行った。1つ目の解析では、「45表現ヒッグス場が第2世代フェルミオンのみに結合し、Georgi-Jarlskog型の質量行列によってストレンジクォークとミュー粒子の質量比が再現される」と仮定し、近似的な解析を行った。その結果、45表現ヒッグス場の粒子のうち3つが軽い場合に、カラーを持つヒッグス場の成分 $S_1(\bar{3},1)$ の質量 M_{S_1} が、 3.4×10^{13} GeVより重くなければならないという制限を明らかにした。また、陽子崩壊において $p \rightarrow \mu^+ K^0$ が支配的であることと、陽子崩壊の実験的制限を満たす M_{S_1} とその他の粒子の質量のパラメータ領域を明らかにした。2つ目の解析では、1つ目の解析で用いた仮定をなくし、45表現ヒッグス場がすべての世代のフェルミオンに結合する場合に拡張し、厳密な解析を行った。その結果、45表現ヒッグス場の3つが軽い場合に、 $S_1(\bar{3},1)$ 成分の質量 M_{S_1} に対して、 $p \rightarrow \bar{\nu} \pi^+$ モードが最も厳しい制限を課すことと、質量 M_{S_1} が 1.9×10^{10} GeVより重くならなければいけないことが明らかになった。さらに、 $S_1(\bar{3},1)$ による様々な陽子崩壊モード間の相関を調べた結果、 $p \rightarrow \bar{\nu} \pi^+$ モードと $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ モードの相関がGUTスケールの45表現ヒッグス場の湯川行列のパラメータに最も強く依存することを示した。

第6章では、結論として本論文のまとめを行った。

以上のように本論文は新規性の高い研究成果を多数含んでおり、その学術的インパクトは高い水準にあると判断できる。得られた成果の一部は、申請者を責任著者とする2編の関連論文として査読付きでQ1ランクの英字学術誌で発表されており、公聴会における発表と質疑応答でもその内容の新規性と重要性が認められた。以上に鑑みて、申請者の論文は博士の学位授与に値するものと審査委員が全員一致し判定した。