

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540283

研究課題名(和文) ゲージ・ヒッグス統一モデルにおけるフレーバー物理の研究

研究課題名(英文) Study of flavor physics in gauge-Higgs unification

研究代表者

丸 信人 (Maru, Nobuhito)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40448163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：最近発見されたヒッグス粒子はその起源が謎である。ヒッグス粒子を高次元ゲージ場の一部とみなすゲージ・ヒッグス統一モデルにおいてヒッグス粒子の2光子崩壊、弱い力を伝えるZ粒子と光子に崩壊する過程を調べた。

カラーを持たない新しいフェルミオン場を導入し、2光子崩壊のLHC実験データを説明できるだけでなく、観測されたヒッグス粒子の質量も説明できることを示した。新たに導入したフェルミオンの一番軽い成分が暗黒物質の候補になることもわかった。

Z粒子と光子の崩壊では、最低次の量子補正では標準モデルと変わらない他のモデルにはない著しい予言を得た。この過程を利用して他のモデルとの区別をつけられると期待できる。

研究成果の概要(英文)：The origin of Higgs particle recently discovered at LHC is still a mystery. Diphoton decay, the Z boson and the photon decay of Higgs boson have been studied in the framework of gauge-Higgs unification where the Higgs particle is identified with the gauge field in higher dimension. By introducing a color singlet fermion in the bulk, not only the diphoton decay data but also the observed Higgs mass 125 GeV can be explained. It is also pointed out that the lightest Kaluza-Klein particle of the introduced fermion might be a possible candidate of the dark matter.

We have shown that the Z boson and the photon decay of Higgs boson is not affected by the 1-loop quantum corrections. This prediction is very useful to distinguish the models of gauge-Higgs unification from the other models of physics beyond the Standard Model.

研究分野：素粒子論

キーワード：標準模型を超える物理 高次元理論 ヒッグス粒子 コライダー物理

1. 研究開始当初の背景

現在の素粒子論において、クォーク・レプトンなどの素粒子のダイナミクスを記述する標準理論は現在までのところ非常に高い精度で検証されているが、唯一の未発見粒子であるヒッグス粒子に関わる物理については、謎が残されたままである。その謎を解明するために、ジュネーブの研究所(CERN)において大型ハドロンコライダー(LHC)実験が稼働している。この実験の最大の目的は、ヒッグス粒子の発見であり、標準理論の最後の謎を解明するものとして大変注目されている。

ヒッグス粒子が発見されても、ヒッグス粒子に関わる物理現象が標準理論の予言どおりになる保証はない。標準理論は「階層性問題」をはじめとする様々な未解決問題を抱えており、究極理論とは考えにくくテラスケール以下の有効理論と考えるのが標準的な見方である。テラスケールを超えたエネルギースケールでは、標準理論に変わる新しい物理があり、その代表的なものとして超対称性理論があるが、最近では超対称性を必要としない高次元理論に基づいた新しい物理が様々提唱されている。

私はそのなかでも「ゲージ・ヒッグス統一モデル」について現在精力的に研究を行っている。このモデルは、ヒッグス場を高次元ゲージ理論におけるゲージ場の一部とみなすことによって、階層性問題を解決する。顕著な性質として、ヒッグス粒子の質量に対する量子補正が、繰り込み不可能な理論にも拘らず高次元ゲージ対称性によって有限になることである。

2. 研究の目的

(1) クォークセクターにおけるフレーバー混合：3世代間フレーバー混合である中性B中間子におけるフレーバー混合に我々のフレーバー混合の生成機構を適用し、モデルについての制限を得る。

(2) レプトンセクターにおけるフレーバー混合：レプトンセクターにおけるフレーバー混合である μ -e 転換過程、 μ \rightarrow 3e 過程、 μ \rightarrow e + 過程についての解析を行いモデルについての制限を得る。

(3) 新たなCPの破れのバリオン数生成機構への応用：今までの研究成果によりCPの破れが標準模型以外の高次元特有の効果で生じることがわかったので、電弱バリオン数生成機構に応用し小林・益川位相だけでは説明できないバリオン数非対称性を説明する可能性を研究する。

3. 研究の方法

一番簡単な5次元SU(3) \times U(1)ゲージ・ヒッグス統一モデルを用いて計算する。

(1) 中性B中間子フレーバー混合については、2世代間フレーバー混合の中性K中間子の研究経験を生かして進める。フリーパラメタが1つ増えるので数値計算の技術的な面で工夫が必要である。最終的にコンパクト化スケールの下限值を得る。

(2) レプトンセクターにおけるフレーバー混合では、まず古典過程(μ \rightarrow e 転換、 μ \rightarrow 3e)を計算する。標準模型では起こらない高次元的光子、Zボソン交換によるフレーバー混合に着目し、コンパクト化スケールの下限值を得る。次に量子過程である μ \rightarrow e + 過程を計算し、同様にコンパクトスケールの下限值を得る。

(3) プレーンに局在している複素質量項、余分な2重項場との複素混合パラメタから生じる高次元のCPの破れに関し、CP位相を計る不変量であるヤルスコーク・パラメタを計算し、現在のバリオン数非対称性の観測データを説明できるか検討する。

4. 研究成果

(1) ヒッグス粒子発見を受けて、ゲージ・ヒッグス統一モデルにおけるコライダー物理の研究を行った。ヒッグス粒子発見の主要過程である2光子崩壊について標準模型の予言からのずれを、5次元SU(3) \times U(1)ゲージ・ヒッグス統一モデルを用いて解析した。一番最小のモデルでは標準模型の予言より抑制されることをヒッグス粒子発見以前に予言していたが、実験データはむしろ増大傾向にあった。そこで、カラー1重項フェルミオンを導入することにより2光子崩壊データを説明できるだけでなく、観測されたヒッグス粒子の質量を説明することにも成功した。導入したフェルミオンのうち一番軽いフェルミオン(1TeVオーダー)の電荷がゼロであることがデータから決まれば、暗黒物質の候補となることも指摘した。また、ヒッグス粒子の光子とZ粒子崩壊過程についても標準模型の予言からのずれを解析した。驚くべき結果として、量子補正の最低次では標準模型の結果からずれないことを示した。この事実は、モデルの詳細によらず群の構造だけで決まる一般的な結論である。また他の標準模型を超える物理にはない性質であり、他のモデルと区別するよい指標になることを指摘した。2015年よりアップグレードされたLHC実験や今後計画されている国際線形加速器実験で検証されることが期待される。

(2) フレーバー混合については、まずクォークセクターにおける中性B中間子混合を解析した。標準模型では量子効果を通じて起こるが、ゲージ・ヒッグス統一モデルでは高次元のグルーオンの古典レベルでの交換過程で起こるので、モデルに厳しい制限を与える。以前解析した2世代混合の中性K中間子の場

合と比較して、フレーバー混合を抑制する機構が働かないと予想されたので、モデルパラメタに強い制限を与えることを期待した。結果は、K 中間子の場合より緩い制限となった。これは 1-3、2-3 世代混合が 1-2 世代混合に比べて小さいことに起因する。レプトンセクターにおけるフレーバー混合について、古典レベルで生じるミュー粒子の3つの電子転換と原子核中における電子転換過程を解析した。結論としては、クォークセクターに比べ厳しい制限は得られなかった。理由としては、ニュートリノ質量の世代間縮退がよく成り立つために、フレーバー混合が生じにくい状況にあることである。

(3) CP の破れについて、プレーンに局在する質量項の質量行列と余分な2重項との混合パラメタに複素数を含む場合、物理的なCP位相が残ることを示した。重要な予言として、2世代でもCPの破れが起こることがわかった。中性K中間子混合過程の虚数部分に関する実験データから1000TeVオーダーのコンパクト化スケールの下限值を得た。これはフレーバー混合からの制限より強いものとなった。

(4) 5次元ゲージ・ヒッグス統一モデルでは、ヒッグス質量が量子補正で生成されるため一般的に軽すぎる質量を予言する。観測されたヒッグス粒子の質量126 GeVを説明するには物質場をうまく選ぶ必要があり単純ではない。ある種の6次元モデルではヒッグス場の古典的4点相互作用からヒッグス質量がW粒子の2倍と予言される。量子補正によって2倍のW粒子質量から126 GeV質量を説明する可能性を探るために、まずおもちゃの6次元モデルで上記の予言からのずれが量子補正を考慮しても有限であることを示した。

(5) ゲージ・ヒッグス統一モデルにおけるヒッグス粒子はアハラノフ・ボーム位相であり、その周期性により湯川結合定数が標準模型のものと古典レベルでずれる可能性がある。フレーバー混合に不可欠なプレーン質量項が存在する現実的モデルのセットアップで、標準模型湯川結合定数からのずれの解析公式を導出した。湯川結合のずれはボトムクォークとタウレプトンで顕著に見られると予想されるので、これら2つの湯川結合のずれを数値的に解析した。実験データが示すように標準模型からのずれが小さいことがわかり無矛盾な結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

林 青司、丸 信人、三浦 貴司、Is the 126 GeV Higgs Boson Mass Calculable in

Gauge-Higgs Unification?, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有、Vol.4、2015、043B02 pp.1-23、DOI:10.1093/ptep/ptv030

丸 信人、岡田 宣親、H Z in gauge-Higgs unification、Physical Review D88、査読有、2013、037701 pp.1-6、DOI:10.1103/PhysRevD.88.037701

丸 信人、岡田 宣親、Diphoton decay excess and 125 GeV Higgs boson in gauge-Higgs unification、Physical Review D87、査読有、2013、095019 pp.1-9、DOI:10.1103/PhysRevD.87.095019

安達 裕樹、倉橋 信明、丸 信人、田邊 和也、B0-B0bar Mixing in Gauge-Higgs Unification、Physical Review D85、査読有、2012、096001 pp.1-11、DOI:10.1103/PhysRevD.85.096001

[学会発表](計13件)

丸 信人、Collider Signatures of Gauge-Higgs Unification at LHC、The 2nd Toyama International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics 2015"、2015年2月11日、富山大学(富山県・富山市)

丸 信人、Diphoton Decay Excess and 125 GeV Higgs Boson in Gauge-Higgs Unification、日本物理学会、2013年9月22日、高知大学(高知県・高知市)

丸 信人、Diphoton Decay Excess and 125 GeV Higgs Boson in Gauge-Higgs Unification、the 21st International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY2013)、2013年8月30日、アブダス・サラム国際理論物理学センター(トリエステ(イタリア))

丸 信人、Enhancement of Diphoton Decay and Higgs Mass in Gauge-Higgs Unification、Toward Extra-dimensions on the lattice、2013年3月14日、大阪大学(大阪府・豊中市)

丸 信人、ゲージ・ヒッグス統一理論におけるCPの破れ、日本物理学会、2012年9月20日、京都産業大学(京都府・京都市)

[その他]

アウトリーチ活動情報

2014/7/9、福島高専、「世紀の大発見!! ヒッグス粒子って何だろう?」

2014/5/16、大阪私学数学教育研究会 春
期講演会、大阪府私学教育文化会館、「質
量の起源：ヒッグス粒子とは何か？」

2014/4/29、数学や物理の好きな高校生の
ための市大授業、大阪市立大学、「世紀の
大発見！ヒッグス粒子って何だろう？」

2014/3/3、フロンティア物理講演会 in
山形、山形大学、「世紀の大発見!!ヒッグ
ス粒子って何だろう？」

Proceedings

Collider Signatures of Gauge-Higgs
Unification at LHC、the proceedings of
Toyama International Workshop on
Higgs as a Probe of New Physics 2015,
11-15, February, 2015

Flavor Mixing in the Gauge-Higgs
Unification、the proceedings of the
International Workshop on Grand
Unified Theories (GUT2012) held at
Yukawa Institute for Theoretical
Physics, March 15-17 2012, Kyoto,
Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸 信人 (MARU, Nobuhito)
大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：4 0 4 4 8 1 6 3