

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05420

研究課題名(和文) ゲージ・ヒッグス統一模型からの宇宙物理への予言とプランクスケール物理への拡張

研究課題名(英文) Predictions to cosmology from gauge-Higgs unification and its extension to Planck scale physics

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)：素粒子標準模型の未解決問題のうち、暗黒物質、物質生成機構、電弱スケールの起源、フェルミオン質量階層性について、ゲージ・ヒッグス統一模型から研究した。ヒッグス粒子質量の半分のマヨラナフェルミオンとヒッグス粒子と同じ量子数をもつゲージ場の第1励起モードが暗黒物質の候補になり得ることを示した。電弱スケールで物質生成する可能性を解析し、我々の模型では物質生成のエネルギーが電弱スケールより低くなることが判明した。余剰空間に磁場が入ると、新物理スケールがプランクスケールでも電弱スケール自然に導ける可能性を指摘した。ゲージ・ヒッグス大統一理論においてフェルミオン階層性を再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理、宇宙物理の謎である暗黒物質の起源について、素粒子に質量を与えるヒッグス場と電弱力を伝えるゲージ場を高次元時空で統一する模型の枠組みで、候補の1つを示せたことは意義があり、暗黒物質探索実験において発見される可能性を残した。標準模型を超える新物理の兆候がない現状に鑑み、新物理スケールがプランクスケールのような高いスケールの場合でも、余剰空間に磁場が入る場合は、電弱対称性のスケールが自然に導出できる可能性があり、新物理の新たなアプローチを提供するインパクトが期待される。

研究成果の概要(英文)：We have studied the origin of dark matter, baryon asymmetry in the universe and the origin of the electroweak scale of unsolved problems in the Standard Model of particle physics from the viewpoint of gauge-Higgs unification model as one of the extension of the Standard Model.

On the dark matter, we have shown that Majorana fermion with a half of Higgs mass and the first Kaluza-Klein mode of the gauge field with same quantum number as Higgs field could be a dark matter.

On baryogenesis, a possibility of electroweak baryogenesis has been analyzed. As a result, it was turned out that the temperature where baryon is generated is lower comparing to the weak scale, which implies a requirement for corrections of our model. In models of magnetic flux compactification, the electroweak scale can be derived even if the new physics scale is Planck scale. We have succeeded in reproducing fermion mass hierarchy in grand gauge-Higgs unification.

研究分野：素粒子論

キーワード：高次元理論 ゲージ・ヒッグス統一模型 暗黒物質 バリオン数生成 電弱対称性の破れ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2012年のヒッグス粒子発見により、素粒子標準模型は一応の完成となった。しかし、暗黒物質の正体は何か？物質反物質非対称性の起源、暗黒エネルギーの正体は何か？などに代表される未解決問題が依然として残っている。新物理の兆候がないために、電弱スケールと新物理スケールの乖離が進み、不自然なパラメタ微調整が不可避になる傾向があり、階層性問題について再考する機会が到来している。

2. 研究の目的

標準模型を超える理論の1つであるゲージ・ヒッグス統一模型を採用し、標準模型における未解決問題について検出可能な予言を抽出するのが目的である。標準模型ヒッグス場とゲージ場を高次元ゲージ場として統一するゲージ・ヒッグス統一模型では、ヒッグス場への質量補正が有限になり、階層性問題が解決される。また、クォーク・レプトンあるいは追加で導入される新粒子とヒッグス場との相互作用がゲージ相互作用で記述される特徴があり、標準模型では決められないその相互作用の大きさがゲージ相互作用でコントロールされ予言能力が高まる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の標準模型における未解決問題について取り組んだ。

(1) 暗黒物質

ゲージ・ヒッグス統一模型では、軽くなりすぎる傾向のあるヒッグス粒子の質量および標準模型に比べ抑制傾向にある2グルーオン生成・2光子崩壊の分岐比を説明するために、クォーク・レプトンを含まない新フェルミオンを追加で導入する必要がある。このフェルミオンが暗黒物質の候補にもなることを示すことは興味深い。そのことを実証するために、暗黒物質残存量の再現、直接探索実験からの制限を満たすパラメタ領域を探索する。これとは別の暗黒物質の可能性として、任意のゲージ・ヒッグス統一模型に必ず存在するヒッグス場と同じ量子数をもつ第1励起高次元ゲージ場についても暗黒物質になる可能性を検討する。

(2) 物質反物質非対称性の起源

電弱スケールでバリオン数が生成される機構により現在の物質量を説明できるか解析を行う。より具体的には、まず電弱対称性の破れ、ヒッグス粒子の質量、フェルミオン質量階層性を説明できる現実的ゲージ・ヒッグス統一模型を、第3世代クォーク・レプトンをオービフォルド境界に局在させ、第1,2世代クォーク・レプトンを5次元場とするセットアップで更生することを試みる。その模型が構成できたら、有限温度効果を取り入れたヒッグスポテンシャルを計算し、強い1次電弱相転移が実現可能か解析する。

(3) フラックスコンパクト化を持つ高次元理論

余剰空間に磁場が入ったゲージ・ヒッグス統一模型では、高次元ゲージ場の余剰成分スカラー場(WLスカラー場と呼ぶ)のゼロ質量モードが余剰空間並進対称性の南部・ゴールドストーン(NG)ボソンになるために、その質量に対する量子補正が相殺される。素粒子現象論、宇宙論への応用を考えるとゼロ質量スカラー場は現実的でないので、質量を生成させる必要がある。余剰空間並進不変性がコンパクト化スケールとは異なるスケールで陽に破れる相互作用が生成されることにより、擬NGボソンになったWLスカラー場が量子補正により質量を獲得することを示す。

(4) ゲージ・ヒッグス大統一理論におけるフェルミオン質量階層性

ゲージ・ヒッグス統一模型では、強い相互作用が統一されていないので、5次元SU(6)ゲージ群へのゲージ・ヒッグス大統一理論へ拡張し、ヒッグス粒子の質量、電弱対称性の破れ、コンパクト化スケールにおけるフェルミオン質量階層性をすべて再現可能な模型構築する。特に、追加で導入する5次元フェルミオン場をできる限り簡単にする模型構築の可能性を探る。

4. 研究成果

(1) まず、追加で導入されるマヨラナフェルミオンの一番軽いモードがパリティ対称性により安定性が保証され、ヒッグス粒子の半分の質量で暗黒物質の残存量を説明でき、直接探索実験からの制限を満たすパラメタ領域が存在し、暗黒物質の候補なりうることを示した。もう1つの高次元ゲージ場の第1励起モードを暗黒物質と同定する可能性については、標準模型における弱混合角を再現するためにオービフォールド固定点上にゲージ運動項を導入し、量子効果まで考慮すると一番軽くなることを示した。このモードはコンパクト化する際の Z_2 パリティについて奇であるため安定性が自動的に保証される。一番簡単な対消滅反応による残存量評価により、テラ電子ボルトの質量で暗黒物質残存量が説明できることがわかった。それぞれの研究成果を3本の論文にまとめ、学術雑誌に掲載した。研究会・学会においても講演発表を行った。

(2) 現実的模型構築については、SU(3)ゲージ・ヒッグス統一模型で基本表現と4階対称テンソルに属するフェルミオン場のみの非常にシンプルな模型構築に成功した。このシンプルなフェルミオン構成で、電弱対称性の破れ、ヒッグス粒子の質量、フェルミオン質量階層性を再現できたことは驚きである。この模型において、有限温度効果を取り入れたポテンシャルを計算し、強い1次相転移が生じる臨界温度を解析した結果、電弱スケールより3桁小さいQCDスケールになることが判明し、我々の模型では電弱スケールでのバリオン数生成が実現できないことがわかった。これにより我々の模型の修正、あるいは別のバリオン数生成機構による解析が必要になった。以上の研究成果について2本の論文にまとめ、学術雑誌に掲載された。学会において共同研究者により講演発表が行われた。

(3) まず、先行研究において6次元QEDにおいてWLスカラー場に対する質量補正が相殺されることが示されていた。この結果を非可換ゲージ理論へ拡張することは興味深く、現象論の応用の面でも望ましい。そこで、SU(2)ヤン・ミルズ理論においても、WLスカラー場の質量補正が相殺することを示した。さらに有効理論の立場では対称性に矛盾しない高次元演算子を取り込む必要がある観点から、ゲージ不変な高次元演算子まで含めた6次元SU(2)ヤン・ミルズ理論においても、WLスカラー場質量に対する量子補正を計算した結果、相殺されることを示した。現象論的応用においては、WLスカラー場が擬NGボソンとなり質量を獲得することが望ましい。そこで、より系統的に擬NGボソンを実現させるために、質量量子補正に現れる運動量積分が有限になる条件を導出し、その条件から予想される余剰空間並進不変性を陽に破る相互作用を分類した。その中で一番簡単な相互作用に着目し、6次元スカラーQEDにおいてWLスカラー場質量が実際に有限になることをファインマンダイアグラムによる計算と有効ポテンシャルによる計算により示した。このことはスカラー場が本質的な役割を果たす様々な素粒子現象論及び宇宙論に波及効果をもたらすものと期待できる。これらの研究成果について3本の論文にまとめ、2本は学術雑誌に掲載され、もう1本は査読中である。学会・研究会において、主に共同研究者である指導院生により講演発表がなされた。

(4) 5次元SU(6)ゲージ・ヒッグス大統一模型で、標準模型フェルミオンをオービフォールド境界上に局在させ、重い5次元フェルミオン場との結合を仮定し、その重いフェルミオン場を積分することにより生成される湯川結合を用いて、電弱対称性の破れ、ヒッグス粒子の質量、トップクォークを除くフェルミオン質量階層性を再現することに成功した。模型の改良として、トップクォーク質量を再現するために、標準模型ゲージ運動項を境界上に導入することにより、湯川結合定数が増大し、トップクォーク質量も含めフェルミオン質量階層性を再現するパラメタ領域を見つけた。この境界上のゲージ運動項の効果によりゲージ結合定数普遍性が破れる。この破れの効果が制限にかからないことも考慮に入れた。以上の研究成果を、2本の論文にまとめ、学術雑誌に掲載された。学会・研究会において、主に共同研究者である指導院生により講演発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 廣瀬拓哉、丸信人	4. 巻 48
2. 論文標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Flux Compactification with Higher Dimensional Operators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics G	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 丸信人、矢田貝祥貴	4. 巻 80
2. 論文標題 Improving Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification with Localized Gauge Kinetic Terms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 339-1,339-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-020-08485-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 丸信人、矢田貝祥貴	4. 巻 8 083B03
2. 論文標題 Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 廣瀬拓哉、丸信人	4. 巻 08 054
2. 論文標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP08(2019)054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 安達裕樹、丸信人	4. 巻 101 036013
2. 論文標題 Strong First Order Electroweak Phase Transition in Gauge-Higgs Unification at Finite Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.036013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maru Nobuhito, Okada Nobuchika, Okada Satomi	4. 巻 98
2. 論文標題 SU(2)L doublet vector dark matter from gauge-Higgs unification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 075021-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.075021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Adachi Yuki, Maru Nobuhito	4. 巻 98
2. 論文標題 Revisiting electroweak symmetry breaking and the Higgs boson mass in gauge-Higgs unification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 015022-1, -11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.015022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nobuhito Maru, Takashi Miyaji, Nobuchika Okada, Satomi Okada	4. 巻 7
2. 論文標題 Fermion Dark Matter in Gauge-Higgs Unification	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1, 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2017)048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nobuhito Maru, Nobuchika Okada, Satomi Okada	4. 巻 96
2. 論文標題 Fermionic Minimal Dark Matter in 5D Gauge-Higgs Unification	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 115023-1, -19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.115023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 廣瀬拓哉、丸信人
2. 発表標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Flux Compactification with Higher Dimensional Operators
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Yatagai and Nobuhito Maru
2. 発表標題 Fermion mass hierarchy in grand gauge-Higgs unification with localized kinetic terms
3. 学会等名 Higgs as a Probe of New Physics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢田貝祥貴、丸信人
2. 発表標題 局在するゲージ場の運動項込みのゲージ・ヒッグス統一模型とフェルミオンの質量階層性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬拓哉、丸信人
2. 発表標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢田貝祥貴、丸信人
2. 発表標題 大統一ゲージ・ヒッグス統一模型におけるフェルミオンの質量階層性
3. 学会等名 ニュートリノ振動とフレーバー物理
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬拓哉、丸信人
2. 発表標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢田貝祥貴、丸信人
2. 発表標題 大統一ゲージ・ヒッグス統一模型におけるフェルミオンの質量階層性
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬拓哉、丸信人
2. 発表標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification
3. 学会等名 基研研究会 String and Fields 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢田貝祥貴、丸信人
2. 発表標題 大統一ゲージ・ヒッグス統一模型と質量階層性問題
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬拓哉、丸信人
2. 発表標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification
3. 学会等名 素粒子現象論研究会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢田貝祥貴、丸信人
2. 発表標題 Improving Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification with Localized Gauge Kinetic Terms
3. 学会等名 素粒子現象論研究会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬拓哉、丸信人
2. 発表標題 Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸信人、岡田宣親、岡田里見
2. 発表標題 SU(2) _L Doublet Vector Dark Matter from Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安達裕樹、丸信人
2. 発表標題 より単純なゲージ=ヒッグス統一模型について
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丸信人、矢田貝祥貴
2. 発表標題 大統一ゲージヒッグス統一模型におけるフェルミオンの質量階層性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸 信人
2. 発表標題 Fermion Dark Matter in Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸 信人
2. 発表標題 Minimal Dark Matter in Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関