

令和 5 年 10 月 24 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14710

研究課題名（和文）小階層性問題とstrong CP問題への斬新なアプローチ

研究課題名（英文）Novel approaches to the little hierarchy problem and the strong CP problem

研究代表者

山田 敏史（Yamada, Toshifumi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・非常勤教員

研究者番号：60792421

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：Left-right対称模型を内包するSO(10)大統一理論は、素粒子物理学の標準模型の謎である「ハイパーチャージ荷量子化」と「ニュートリノ微小質量」を同時に説明する魅力的な理論である。本研究は、超対称SO(10)大統一理論の枠組みで、カラー荷を持つヒッグス粒子の超対称パートナー（colored Higgsino）が媒介する陽子崩壊の頻度と、ニュートリノ微小質量から生じるレプトンフレーバー混合の混合角・ディラックCP位相等のニュートリノ観測量、およびそれらの相関について予言を行った。これらの予言は、将来のハイパーカミオカンデ実験等で検証される可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義
物質を構成する最も微細な素粒子を明らかにすることは、人類の目標の一つである。本研究は、この目標のため、今日の素粒子物理学が抱える未解決問題である「ハイパーチャージ荷量子化」と「ニュートリノ微小質量」を手がかりとし、これらを同時に解決するSO(10)大統一理論に基づき、素粒子の微細な姿を理論的に探究した。本研究は実証可能性を重視し、SO(10)大統一理論から、陽子崩壊およびレプトンフレーバー混合について実験的検証が可能な予言を引き出した。こうした予言は将来のハイパーカミオカンデ実験等で検証される可能性があり、検証された際は、人類は現在知られているよりも微細な素粒子の知識を得ることになる。

研究成果の概要（英文）：The SO(10) grand unification theory, which incorporates the left-right symmetric model, is an attractive theory as it simultaneously addresses mysteries of the Standard Model of particle physics, "hypercharge quantization" and "the tiny neutrino mass". In this study, I have made predictions in the framework of the supersymmetric SO(10) grand unification theory on the rates of proton decay mediated by the supersymmetric partners of the colored Higgs particles (colored Higgsinos), neutrino observables such as the mixing angles and Dirac CP phase of the lepton flavor mixing induced by the tiny neutrino mass, and correlations among them. These predictions can be tested in future experiments such as the Hyper-Kamiokande experiment.

研究分野：素粒子現象論

キーワード：大統一理論 ニュートリノ 陽子崩壊

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型は、ほぼ全ての加速器実験と精密測定の結果を正しく説明するが、いくつかの理論的問題を抱えている。1つは、ヒッグス場の質量項が、精密測定から予測されるカットオフに対応する量子補正に比べ、約1桁小さい、という「小階層性問題」である。他に、QCDにおいて荷電共役+空間反転(CP)対称性を破る $\bar{\theta}$ 項が不自然に小さい、という「strong CP問題」がある。さらに、U(1)ハイパーチャージの電荷が量子化されている機構が不明である、という問題もある。こうした問題は、標準模型を超える物理の存在を示唆している。

2. 研究の目的

「小階層性問題」、「strong CP問題」、「U(1)ハイパーチャージ電荷の量子化」といった標準模型の理論的問題点を解決する理論を構築し、さらにそうした理論の実験的検証方法を解明することで、標準模型を超える物理を解明する。

3. 研究の方法

「小階層性問題」を解決する理論の候補として、Twin Higgs 模型と呼ばれる、標準模型とZ₂およびSU(4)対称性で結びついたミラーセクターが存在し、ヒッグス場質量項への輻射補正のカットオフ二乗項を打ち消す、という理論に注目する。そして、宇宙の一次相転移に伴う重力波の観測等による同理論の検証を提案する。「strong CP問題」を解決する理論の候補として、Left-right 模型と呼ばれる、標準模型ゲージ群をSU(3)×SU(2)_L×SU(2)_R×U(1)に拡大し、拡張されたパリティ対称性を課した理論に注目する。そして、ニュートリノ微小質量のパラメータの測定や、その他の精密測定などによる同理論の検証を提案する。

4. 研究成果

Left-right 対称模型のゲージ群を内包するSO(10)ゲージ群に基づく「SO(10)大統一理論」は、標準模型の理論的問題の1つである「U(1)ハイパーチャージ電荷の量子化」の機構を説明でき、さらに、標準模型では説明できない実験事実であるニュートリノ微小質量も説明できる。そこで、SO(10)大統一理論に着目した研究を行なった。

超対称SO(10)大統一理論において、GUTゲージボソンが媒介する陽子崩壊(dimension-6陽子崩壊)が将来観測できる可能性を議論した論文1篇を学術誌JHEPに掲載した。

また、超対称SO(10)大統一理論の中でも、標準模型湯川結合が10表現場と126bar表現場の湯川結合のみから導出される「最小繰り込み可能模型」に注目した研究を行った。同模型におけるカラー荷を持つヒッグス粒子の超対称パートナー(colored Higgsino)が媒介する陽子崩壊(dimension-5陽子崩壊)について、中性K中間子+ミューオンへの分岐比と、荷電K中間子+ミューオンニュートリノへの分岐比との比の予言を行った。そして、この予言がハイパーカミオカンデ実験で検証される可能性があることを示した。この成果をもとに論文1篇を作成し、これを学術誌PTEPに掲載した。

さらに、より一般的な、標準模型湯川結合が10表現場・126bar表現場・120表現場の湯川結合から導出される「繰り込み可能模型」に注目した研究も行った。同模型において、dimension-5陽子崩壊の頻度と、ニュートリノ微小質量から生じるレプトンフレーバー混合の混合角・ディラックCP位相等、およびそれらの相関について予言を行った。そして、これらの予言が、ハイパーカミオカンデ実験等での陽子崩壊探索とニュートリノ振動測定により検証可能であることを明らかにした。この成果をまとめた論文1篇を学術誌JHEPに掲載した。

関連して、超対称SO(10)大統一理論と密接に関わる「Flipped SU(5)大統一理論」について、dimension-5陽子崩壊の様々なモードの頻度の解析を行なった。その成果をまとめた論文1篇を学術誌JHEPに掲載した。

Left-Right 模型におけるLeft-Right対称性の破れの相転移に伴う重力波の研究に関連して、類似のより簡単な模型である超対称最小B-L模型を取り上げ、同模型でのU(1)_{B-L}ゲージ対称性の破れの相転移に伴う重力波の予言、および地上重力波観測実験での観測可能性の議論を行い、その成果をまとめた論文1篇を学術誌Physical Review Dに掲載した。

一方、Twin Higgs 模型を具体化するComposite Twin Higgs 模型の雛形となる、ゲージ・ヒッグス統合理論についても研究を行なった。同理論の枠組みで、ヒッグス場4点結合が消滅するエネルギースケールと、トップクォーク湯川結合とweakゲージ結合が一致するエネルギースケール

ルが同一となり、このスケールがコンパクト化スケールに同定されるモデルを構築した。この成果を論文1篇にまとめて、学術誌 Physical Review D に掲載した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 10件）

| | |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名 Haba Naoyuki, Yamada Toshifumi | 4. 巻 2022 |
| 2. 論文標題 Moderately suppressed dimension-five proton decay in a flipped SU(5) model | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 061-1, 18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2022)061 | 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 Haba Naoyuki, Okada Nobuchika, Yamada Toshifumi | 4. 巻 105 |
| 2. 論文標題 Are low-energy data already hinting at five dimensions? | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 015018-1, 11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.015018 | 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 該当する |
| 1. 著者名 Haba Naoyuki, Mimura Yukihiro, Yamada Toshifumi | 4. 巻 2021 |
| 2. 論文標題 Renormalizable S0 (10) grand unified theory with suppressed dimension-5 proton decays | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-28 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa186 | 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 Haba Naoyuki, Omija Tsuneharu, Yamada Toshifumi | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Charged lepton flavor violating processes in neutrinophilic Higgs + seesaw model | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-22 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa089 | 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 Haba Naoyuki, Mimura Yukihiro, Yamada Toshifumi | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Enhanced $\Gamma(p \rightarrow K^0 \mu^+)$ / $\Gamma(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}_\mu)$ as a signature of minimal renormalizable SUSY SO(10) GUT | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa097 | 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 Haba Naoyuki, Shimizu Yasuhiro, Yamada Toshifumi | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Muon and electron g_{22} and the origin of the fermion mass hierarchy | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa098 | 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 Haba Naoyuki, Mimura Yukihiro, Yamada Toshifumi | 4. 巻 2019, 07 |
| 2. 論文標題 Detectable dimension-6 proton decay in SUSY SO(10) GUT at Hyper-Kamiokande | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics | 6. 最初と最後の頁 155-1, 155-13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2019)155 | 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 Haba Naoyuki, Yamada Toshifumi | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Gravitational waves from phase transition in minimal SUSY U(1)B-L model | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.075027 | 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 Hagiwara Kaoru, Ishida Hiroyuki, Yamada Toshifumi, Yang Daneng | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Determining the strong phase of the a_1 meson decay amplitude using the $W(\rightarrow a_1(\rightarrow \pi\pi))$ process | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.034023 | 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 該当する |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Haba Naoyuki, Mimura Yukihiro, Yamada Toshifumi | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 23 octant measurement in 3+1 neutrino oscillations in T2HK | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.075034 | 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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之, 萩原薫, Ya-Juan Zheng |
| 2. 発表標題 Conditions for detectable heavy neutrinos |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之, 萩原薫, Ya-Juan Zheng |
| 2. 発表標題 Pseudo-Dirac Neutrinos at the LHC |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之, 岡田宣親 |
| 2. 発表標題 Compactification scale and the mass of vector-like fermions from the gauge-Higgs conditions |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之 |
| 2. 発表標題 Gravitational waves from a phase transition in the minimal SUSY U(1)B-L model |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之, 御村幸宏 |
| 2. 発表標題 23 octant measurement in 3+1 neutrino oscillations in T2HKK |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田敏史, 萩原薫, 石田裕之, Daneng Yang |
| 2. 発表標題 Determining the strong phase of a_1 decay amplitude in $W \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ($a_1 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$) process |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之, 御村幸宏 |
| 2. 発表標題 Dimension-five-friendly Yukawa couplings in $S(10)$ GUT |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之 |
| 2. 発表標題 Gravitational waves from a phase transition in Randall-Sundrum-1 model |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之 |
| 2. 発表標題 Gravitational waves from a phase transition in a SUSY left-right model |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年春季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田敏史, 波場直之 |
| 2. 発表標題 Gravitational waves from phase transitions in physics beyond the Standard Model |
| 3. 学会等名 Joint symposium of MEXT innovative area x Konan University Feb. 10-12, 2020 at Konan University (国際学会) |
| 4. 発表年 2020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 |
|---------|---------|
|---------|---------|