

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32652

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2022

課題番号：15K05062

研究課題名(和文) 軽いヒッグスとゲージ・ヒッグス統一理論の新展開

研究課題名(英文) A light Higgs and new development of gauge-Higgs unification theory

研究代表者

林 青司 (Lim, C.S.)

東京女子大学・現代教養学部・研究員

研究者番号：80201870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子の標準模型は非常に成功した理論ではあるが、未解決な問題をいくつか持っており、これらを解決する「標準模型をこえる理論」の構築が急務である。この課題研究では、こうした新理論の魅力的な候補として、ゲージ・ヒッグス統一理論に注目した。この理論ではヒッグス粒子は、高次元の世界で力を媒介するゲージボソンの一部と見なされる。この研究では、こうしたヒッグスの起源に起因する、理論特有のヒッグス質量やヒッグス崩壊の仕方に関する特徴的な予言を導出すると共に、大きな謎であるフェルミオン質量の階層的な構造を説明する試みなどを行った。更に、この理論の位相的特性に関わるトピックについても研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この課題研究の成果は、素粒子理論の分野におけるものである。素粒子論の研究は、物質を構成する最も基本的な粒子である素粒子の諸性質を研究するもので、最もミクロな世界を理解することにより、この世界での諸々の現象を最も基礎的なレベルで説明しようとする研究であるが、一方で、非常にマクロな世界である我々の宇宙の起源や、その進化の歴史に関して、素粒子理論の研究は本質的に重要な役割を演ずることが知られている。こうした基礎科学の研究は、一見我々の日常生活とは無縁であるようにも思えるが、本来応用を意図していない基礎研究が結果的に日常生活を大きく変容させる可能性がある事は、歴史が示す通りである。

研究成果の概要(英文)：Although the standard model of elementary particles is very successful theory, it has several unsolved problems and the construction of "physics beyond the standard model" is an urgent issue. In this research supported by the grant, we focused on the gauge-Higgs unification theory as an attractive candidate of such new theory. In this theory, Higgs particle is regarded as a part of gauge boson, which mediates forces in higher dimensional world. In this research, we have driven characteristic predictions on the Higgs mass and its decay modes, which stem from the origin of the Higgs, and also have made attempts to explain the hierarchical fermion masses, which remains as a big mystery, etc. Furthermore, several research projects on the topics related to the topological property of this theory were performed.

研究分野：素粒子理論

キーワード：標準模型を超える理論 階層性問題 ゲージ・ヒッグス統一理論 ヒッグス粒子

1. 研究開始当初の背景

2012年にジュネーブにある研究所 CERN での LHC 実験によってヒッグス粒子が発見され大きな話題となったが、この粒子が標準模型のヒッグス粒子か、何らかの“標準模型を超える (physics beyond the standard (BSM))”理論が予言しヒッグスの様に振る舞う粒子なのか判然としていない。しかしながら、この実験は非常に重要なヒントを我々に与えた：得られたヒッグス質量 126 GeV は、電弱統一理論の典型的な質量スケールである“弱スケール”に近く、ヒッグスは“軽い”ことが判明したのである。これは、ヒッグスの(4点)自己相互作用の結合定数がゲージ結合定数の2乗と同程度であり、従ってヒッグスの自己相互作用がゲージ原理によって支配されていることを強く示唆しているように思える。

標準模型では、これらの結合定数は独立なパラメータであるが、標準模型のヒッグス・セクターが抱える階層性問題を解決すべく提唱されている BSM 理論の中には、自己相互作用がゲージ原理で決定されるという性質を有するものが存在する。一つは、標準模型を超対称的にした最小超対称性理論(MSSM)であり、この理論では古典レベルにおいてヒッグス質量は弱ゲージボソン Z の質量とほぼ同じである。

この課題研究では、もう一つの可能性であるゲージ・ヒッグス統一理論(Gauge-Higgs Unification (GHU))に着目する。この理論ではヒッグス粒子の起源は(高次元時空における)ゲージボソンであり、自己相互作用がゲージ原理で支配されるのは必然的帰結である。

GHU では、ゲージ場とヒッグス場は高次元ゲージ場として統一される。こうした考えは、以前から Manton や細谷によって提唱されていたが、研究代表者は 1998 年に、ヒッグス場を高次元ゲージ場の一部と見なすことで、ヒッグス質量への2次発散する量子補正を高次元ゲージ対称性によって禁止することが出来ることを示し、超対称性に頼らない新たな階層性問題の解決法を提唱した。このシナリオは、その後ゲージ・ヒッグス統一理論と呼ばれるようになり、BSM の新たな方向性として世界的規模で研究されて来た。

2. 研究の目的

LHC 実験のデータは GHU の予言する軽いヒッグスを支持しているように思えるが、ヒッグス粒子が発見された今、素粒子物理の最重要テーマの一つは、この粒子の正体を LHC や ILC における精密実験等で検証し、BSM 理論の方向性を定めることである。

この研究の主目的は、上述のような現状認識に立ち、GHU 理論が、特にヒッグスに関わる現象や物理量に関して行う様々な予言について詳細に調べ、この理論の更なる展開を図ることである。

3. 研究の方法

具体的な研究の手法としては、まずヒッグスに直接的に関わる物理量に関して GHU 理論の予言を明確に定めることから始める。

また、GHU ではヒッグスの起源が高次元ゲージボソンであり、そのフェルミオンとの湯川型の相互作用がゲージ原理に依り強く規制されるという、標準模型には無い著しい特徴があるので、この理論のフェルミオン質量に関する様々な予言を精査することが本質的に重要である

と思われる。このため、実測されるフェルミオン質量が示す印象的な階層的構造やニュートリノに特有のマヨラナ質量に関して、GHU 理論がどのような帰結をもたらすかについて調べることも重要である。

更に、GHU 理論のヒッグス場は、標準模型の場合と大きく異なり、(余剰次元の空間の)位相幾何学的(トポロジカル)な性質に由来する特徴的な性質を有する。例えば、ヒッグス場のポテンシャルは、この場に関して周期的であるという著しい特徴を有するが、その物理的解釈として、ヒッグス場は一種のアハロノフ・ボーム位相であるという理解が可能である。こうした、GHU の有する極めて特徴的なトポロジカルな性質に関係するテーマ、具体的には、例えば縮退した真空と真空との類似性、およびその帰結、といったいくつかのテーマについても、研究期間の後半の方では取り組む。

4. 研究成果

本科学研究費のサポートを得て、上述の「3. 研究の方法」で述べたような手法に依り研究を遂行し、それぞれの研究テーマについて研究成果を得ることが出来たので、以下で簡潔にまとめる。

(1) ヒッグスに直接的に関わる物理量に関する予言

まず、ヒッグス質量に関しては、GHU 理論では、MSSM の場合と同様に、弱ゲージボソンの質量を用いて不定性の無い予言が可能であることを、6次元時空(余剰次元は2次元)におけるGHU理論の枠内で具体的に示し、論文として発表した(K. Hasegawa, C.S. Lim, N. Maru, J. Phys. Soc. Japan 85(2016)7, 074101)。

また、ヒッグス粒子の崩壊モードに関しても、標準模型では許される、ある崩壊モードがGHUでは許されないという興味深い予言を導くことが出来た。より具体的には、GHUではヒッグス粒子はゲージボソンの一部なので、崩壊に関わる演算子をゲージ対称性で強く規制することが可能であり、その結果、当該の崩壊モードに係る演算子はGHUでは現れないことを確かめることが出来たのである(K. Hasegawa, C.S. Lim, Phys. Rev. D94 (2016) 5, 055021)。

(2) フェルミオン質量に関する帰結

クォークや荷電レプトンといったフェルミオンの質量については、標準模型では、その値を予言することはかなわず、単に実験的に決まる質量に合わせて、本来予言できない理論のパラメター(湯川結合定数)の値を固定しているに過ぎない。よって、標準模型の枠内ではフェルミオン質量が何故そのような値をとるのかは大きな謎として残るため、標準模型を超えるBSM理論では、この謎の解明が強く望まれる。

特に、世代によってフェルミオン質量が大きく異なり、例えば、実験的に決まるフェルミオン質量の対数を世代数の関数としてプロットすると、大まかには直線に乗っているように見える、という印象的なフェルミオン質量の階層的な構造は、その背後にBSM理論の選別につながる鍵が潜んでいることを予感させるものである。

GHU理論では湯川結合がゲージ原理に依って強く規制されることから、上記のような階層的なフェルミオン質量が示唆する規則性を自然に説明出来るのでは、と研究代表者は考えた。その結果、6次元時空上でのGHUを採用すると、余剰次元の2次元的トーラスの内部の一点にモノポー

ルを置くという配位を仮定した場合、それにより生じるゲージ場の特徴的な配位の帰結として、上述の様な印象的な階層性が自然に得られることを示すことが出来た。更に、量子化されることが知られているモノポールの磁荷の値によってフェルミオンの世代数も決まるという興味深い性質も得られた(これは、アティア・シンガーの指数定理に依り一般的に言えることではある)。この研究成果は学術誌に発表された(C.S. Lim, PTEP 2018 (2018) 9, 093B02)。

また、ニュートリノの質量に関しては、電気的に中性であるがゆえに持つことが許され、ニュートリノの極端に軽い質量を自然に説明し得るものとして注目されているニュートリノのマヨラナ質量に着目し、GHUにおいては、どのようなタイプのマヨラナ質量が可能であるかを、演算子解析を用いて分析した(K. Hasegawa, C.S. Lim, PTEP 2018 (2018) 7, 073B01)。

(3) 理論のトポロジカルな性質に関わるテーマにおける研究

既に述べたように、GHUでは、ヒッグス場の起源は高次元なゲージ理論におけるゲージ場であり、余剰次元のトポロジカルな性質(非単連結空間といった)に起因して、ヒッグス場を一種のアハロノフ・ボーム位相と見なすことも可能、という標準模型とは著しく異なる特徴的な性質がある。このため、量子効果を通じて生じるヒッグスのポテンシャルは、必然的にヒッグス場の周期関数となる。

この研究では、まず、GHUのヒッグス場が4次元時空から見ると擬スカラーとして振る舞い、そのフェルミオンとの結合が、強い相互作用の世界での“strong CP problem”と呼ばれる問題の解法において重要な役割を演じるアクシオンとよく似ているという事実に注目し、GHUにおけるヒッグス場をアクシオン場と見なすシナリオを提唱した。

アクシオンを用いたstrong CP problemの解法で重要な役割を演じるアクシオンとグルーオン場との結合項は、5次元時空上のGHUのシナリオでは、一見いわゆるチャーン・サイモン項で置き換わる様に思える。しかしながら、これではヒッグス場に関する周期性と矛盾が生じるので、具体的な計算に依り、実際にはチャーン・サイモン項はヒッグス場に関して周期的なものに置き換えられ、更に余剰次元の大きさを無限大にする極限では通常のチャーン・サイモン項に帰着することを示した(Y. Adachi, C.S. Lim, N. Maru, PTEP 2022 (2022) 5, 053B06)。

また、ヒッグス場のポテンシャルが周期的であることは、GHU理論の真空状態が無限に縮退していることを示しているが、これは強い相互作用の理論であるQCDにおける無限に縮退した真空を強く想起させる。QCDにおいては、真の真空状態は、縮退した各真空状態に適当な位相因子をかけて足し合わせる“真空”と呼ばれる状態であることが知られている。そこで、GHUでも、真の真空状態は真空の様なものではないかとの当然の疑問が生じるため、これに関して調べた。その結果、QCDの場合とは異なり、縮退した真空の異なる状態間の遷移確率は空間の体積因子で強く抑制されるため実質的にはゼロと見なせる、という結論を得た。つまり、どれか一つの真空のみを選ぶという通常採られる処方箋が正当化出来たことになる(Y. Adachi, C.S. Lim, N. Maru, PTEP 2022 (2022) 9, 093B04)。

一番最新の関連する研究としては、初期宇宙における物質創生において重要な役割を演ずるスファレロンという、半整数のトポロジカル数を有する運動方程式の古典解に関するものがある。スファレロン解は、これまで数値的にしか構成されておらず、解析的な解は発見されていない。この研究では、GHUの様な高次元ゲージ理論の枠組みを用いて、半整数のトポロジカル数を持つ解析的な解を構成する手法を提唱し、その結果をプレプリントとして発表した。ただし、この解はスファレロンの解ではあるが、スカラー場はゲージ群の随伴表現に属するものであり、スファレロン解と同等とは見なせないで、更なる研究が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yuki Adachi, C.S. Lim, Nobuhito Maru	4. 巻 2022 no.9
2. 論文標題 On the vacuum structure of gauge-Higgs unification models	5. 発行年 2022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/ptac107	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 Yuki Adachi, C.S. Lim, Nobuhito Maru	4. 巻 2022 no.5
2. 論文標題 The strong CP problem and higher dimensional gauge theories	5. 発行年 2022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/ptac070	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 K. Hasegawa and C.S. Lim	4. 巻 89
2. 論文標題 't Hooft-Polyakov monopole and instanton-like topological solution in gauge-Higgs unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	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） 10.7566/JPSJ.89.084101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Hasegawa and C.S. Lim	4. 巻 2018 no.7
2. 論文標題 Majorana neutrino masses in the scenario of gauge-Higgs unification	5. 発行年 2018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/pty072	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 C.S. Lim	4. 巻 2018 no.9
2. 論文標題 The implication of gauge-Higgs unification for the hierarchical fermion masses	5. 発行年 2018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/pty092	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 K. Hasegawa and C.S. Lim	4. 巻 D94 no.5
2. 論文標題 Few remarks on the Higgs boson decays in gauge-Higgs unification	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 55021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.055021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kouhei Hasegawa, Chong-Sa Lim and Nobuhito Maru	4. 巻 85 No.7
2. 論文標題 Predictions of the Higgs Mass and the Weak Mixing Angle in the 6D Gauge-Higgs Unification	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 74101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.074101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 C.S. Lim, N. Maru, T. Miura	4. 巻 2015 no.4
2. 論文標題 Is the 126 GeV Higgs boson mass calculable in gauge-Higgs unification ?	5. 発行年 2015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/ptv030	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 7件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 林 青司
2. 発表標題 高次元ゲージ理論と strong CP problem
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 青司
2. 発表標題 The strong CP problem and higher dimensional gauge theories
3. 学会等名 北海道大学 素粒子理論研究室 セミナー（2021年12月17日）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 Space-time dimension and the unification of forces
3. 学会等名 Seminar at National Chin-Yi University of Technology, Taichung, 台湾（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 The implication of gauge-Higgs unification for the hierarchical fermion masses
3. 学会等名 The 4th International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics"（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 Gauge-Higgs unification, topology and the hierarchical fermion masses
3. 学会等名 Seminar at DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), ハンブルク, ドイツ (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 Higgs boson decays and hierarchical quark masses in gauge-Higgs unification
3. 学会等名 Workshop on the Standard Model and Beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 Space-time dimension and the unity of forces
3. 学会等名 Colloquium at Alberta University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 Higgs physics in the scenario of gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 Workshop "Brainstorming on particle physics and astrophysics phenomenology" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 A light Higgs and gauge-Higgs unification
3. 学会等名 Seminar at National Taiwan University, Taipei, Taiwan (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 C.S. Lim (林 青司)
2. 発表標題 What the discovery of the Higgs tells us about gauge-Higgs unification
3. 学会等名 Seminar at the Instituto de Fisica Corpuscular, Valencia University (招待講演)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 林 青司	4. 発行年 2015年
2. 出版社 丸善	5. 総ページ数 396
3. 書名 素粒子の標準模型を超えて	

1. 著者名 林 青司	4. 発行年 2021年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 187
3. 書名 ニュートリノの物理学 ―素粒子像の変革に向けて―	

〔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
---------	---------