

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32652

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2014

課題番号：23654090

研究課題名(和文) 標準模型を超える理論の統一に向けて

研究課題名(英文) Toward the unification of the physics beyond the standard model

研究代表者

林 青司 (LIM, C.S.)

東京女子大学・現代教養学部・教授

研究者番号：80201870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子の標準模型を超える理論である、互いに密接に関係するゲージ・ヒッグス統一理論(GHU)、dimensional deconstruction (DD)およびリトル・ヒッグス(LH) という三つのシナリオの統一的理解を目指す研究を行った。

まず、DDシナリオは余剰次元が格子点に離散化されたGHUシナリオと見なせる事、DDシナリオから触発され登場したLHシナリオもGHUと密接に関係していることを論じた。また、こうしたタイプのシナリオでは、標準模型の予言から逸脱する“異常ヒッグス相互作用”が生じることを指摘し、GHUおよびDDシナリオにおいて具体的にずれを求めると共にその本質的要因を分析した。

研究成果の概要(英文)：The research supported by this grant aimed to get an unified understanding of the three mutually closely related scenarios of “physics beyond the standard model” of elementary particles, i.e. gauge-Higgs unification (GHU), dimensional deconstruction (DD) and little Higgs (LH) scenarios.

I first argued that DD scenario can be regarded as a theory of GHU where the extra space is “latticeized” and that the LH scenario, proposed being strongly inspired by the DD scenario, also has a close relationship with the GHU scenario. I also pointed out that in this type of scenarios “anomalous Higgs interactions”, i.e. the Higgs interactions which deviate from the predictions of the standard model are concluded. We calculated the deviations concretely in GHU and DD scenarios, and analyzed the essential causes of such anomaly.

研究分野：素粒子理論

キーワード：標準模型を超える理論 統一理論 ゲージ・ヒッグス統一理論

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型は、ほぼ全ての実験事実を説明し、また最近では、最後の未発見粒子であったヒッグス粒子と思われる粒子も LHC 実験で発見されて最終的確立に到ったと言える、しかし、そのヒッグス・セクターには重要で基本的ないくつかの理論的な問題点が存在する。この為、標準模型は、より基本的な何らかの「標準模型を超える理論」の低エネルギーでの有効理論(近似的な理論)と予想されている。ヒッグスの抱える理論的問題として「階層性問題」が有名である。この問題を解決しようとする試みから超対称理論に代表される標準模型を超える理論の構築が成されて来た、という意味でも大変重要な問題である。

1998 年に、この科研費の研究代表者は、超対称性を用いることなく階層性問題を解決し得る新たなシナリオを提唱した (H. Hatanaka, T.Inami and C.S. Lim, Mod. Phys. Lett. A13 (1998) 2601)。このシナリオでは、4次元時空中でスピン 0 のヒッグス粒子として振る舞う素粒子は、実は高次元時空のゲージ場の余剰次元方向の成分である、と見なされる、このシナリオは、4次元の世界から見たゲージ粒子とヒッグス粒子を高次元理論の下で統一する理論に成っているので、“ゲージ・ヒッグス統一理論 (Gauge-Higgs Unification (GHU))” とその後呼ばれる様に成った。

このシナリオでは、階層性問題、即ちヒッグスの質量への 2 次発散する量子補正の問題は、高次元的な局所ゲージ対称性のおかげで超対称性を用いずとも回避される。こうして GHU シナリオはヒッグス粒子の起源に関する新しい独創的な研究の方向性を提供したと言える。超対称性に基づくシナリオの場合には、そのシナリオを具現化する標準模型を超える理論として MSSM (最小超対称標準模型、Minimal Supersymmetric Standard Model) が提唱されているが、研究代表者らは、GHU シナリオに基づく最小模型として SU(3) ゲージ対称性を持った 5 次元 GHU 模型の構築を行った (Mod. Phys. Lett. A 17 (2002) 2249)。

2. 研究の目的

この科研費の研究の目的は、上記の様な研究成果を基にして、ゲージ・ヒッグス統一理論 (GHU)、および、これと密接に関係すると思われる標準模型を超える理論である、dimensional deconstruction (DD) シナリオ、および リトル・ヒッグス (Little Higgs, LH) シナリオについて、これらの理論の間の関係を深く考察し、これらを統一的に理解する事、また、こうしたタイプの標準模型を超える理論の実験的検証について議論する事である。

DD シナリオや LH シナリオでは、ヒッ

スは(擬)南部・ゴールドストーンボゾンと見なされ、一見ヒッグスをゲージ粒子(の一部)と見なす GHU シナリオとは全く違うシナリオの様に思われる。しかし、研究代表者はこれら三つのシナリオの間には本質的に非常に深い関係がある事を、特に DD シナリオを橋渡し役として、強く認識する様になった。GHU は高次元(例えば 5 次元)の理論であり、一方 DD や LH は通常の 4 次元の理論であるが、こうした関係が存在するものとする、超弦理論の文脈から発見され近年活発に研究されている AdS-CFT 対応を用いた理解が出来る可能性も非常にあり興味深い。

例えば、GHU と LH は違う対称性に基づく本来全く独立なシナリオである。しかしながら代表者は、これらの間には、まず状況証拠としていくつかの偶然とは思えない類似点があることに気付いた。一つは、いずれのシナリオにおいても、標準模型のゲージ対称性 $H=SU(2)\times U(1)$ をより広い群 G に拡張し、“破れた生成子” G/H に対応するゲージ場の余剰次元成分、および NG ボゾンとしてヒッグスを同定する。また、どちらのシナリオにおいても、対称変換の下で GHU の場合には非斉次項が、LH の場合には定数項が現れ、理論に“シフト対称性”が存在する(この対称性がある為にヒッグス質量を量子補正の下で安定化させる事が可能になる)。代表者は、こうした事実から、これらのシナリオには密接な関係があるとの考えを抱いた。

更に、こうした“状況証拠”の他に、DD シナリオを橋渡し役と見なす事で、これらのシナリオの関係は単なる偶然ではなく、実際に深いレベルで関係したものである事が十分に予想された。橋渡し役となった DD シナリオは本来 4 次元の理論ではあるが、少し見方を変えると、余剰次元が有限の数の格子点に格子化された高次元ゲージ理論と見なす事が可能であり、正に GHU シナリオと対応している事が分かる。一方において、DD シナリオではヒッグスは、ちょうど QCD におけるパイ中間子の様にフェルミオン対の束縛状態としての擬 NG ボゾンとも見なされ、従って LH シナリオとも深く関係している。実際、LH シナリオは DD シナリオに強く触発されて登場したシナリオであると言える。

しかしながら、こうした GHU、DD および LH シナリオの間の深い関係を明確に論じ、これらを統一的に理解しようとする議論はこの研究の前には行われて来なかった。面白い事に、これら三つのシナリオは、いずれも対称性に基づいて階層性問題を解決しようとする殆ど全ての可能性を尽くしており、これらのシナリオの間に深い関係を解明し、統一的な理解が可能となれば(丁度いくつかの超弦理論が M 理論によって統一的に理解される様に)、その意義は大きいと思われる。

3. 研究の方法

研究目的を遂行する為には、GHU、DD 及び LH という三つのシナリオの間の相互関係をまず深く理解しておく事が大切である。

Arkani-Hamed, Cohen, Georgi により提唱された DD シナリオのアイデアは、4次元の強い力のダイナミクスによって余剰次元を実質的に生成出来る、とする非常に興味深いものである。このアイデアの大きな特徴は同じ $SU(n) \times SU(m)$ というゲージ対称性を N 個直積の形で掛け算したゲージ対称性を持っているという事である (“moose diagram” で象徴的に表される)。強い力 $SU(n)$ で、ちょうど QCD (強い相互作用の理論) における湯川のパイ中間子の様な N 個の南部・ゴールドストーン (NG) ボソンが現れるが、一方でこれを記述する (非線形シグマ模型の) 場 U は、ちょうど空間を格子化する格子ゲージ理論において格子点の間を結ぶ N 個のゲージ場のリンク変数 (Wilson line) とも見なせる事が分かる。つまり強い力によって、実質的に N 個の格子点を持った余剰次元が生成されたと思える事が可能である。つまり、このシナリオは余剰次元方向が格子化された GHU シナリオと本質的に同等であると思えるのである。

格子化されていてもゲージ対称性は正確に保たれるので、GHU の場合と同様に、ヒッグス質量への量子補正は 2 次発散を持たないことが期待される。実際、 N が 2 以上の場合には、量子補正において 2 次発散が消え、更に N が 3 以上だと対数発散も消えることが Arkani-Hamed 等による原論文で示されている。この計算で重要な事は、 N 個の質量固有状態全ての寄与を足して初めて紫外発散が相殺するという事実である。これは、ちょうど代表者が GHU シナリオにおいて示した、全ての Kaluza-Klein モードの足し上げに依って紫外発散が消えるという事にぴったり符合するものと思われる。更には、Arkani-Hamed 等が求めたヒッグスのポテンシャルは、 N が無限大の極限で、GHU の場合に求められたものと一致する事も確かめられた。

この様に、GHU は DD のアイデアと非常に密接に関係していると思われるが、一方で、LH シナリオは DD シナリオに強く触発されて登場したシナリオである。実際、LH シナリオでも、ヒッグス粒子は DD シナリオの場合と同様に、大域的対称性の自発的破れで生じる (擬) NG ボソンと見なされる。ただし、LH シナリオではヒッグスは擬 NG ボソンであり、ヒッグス質量への量子補正が 2 次発散を起こさない、という二つの条件のみを指導原理として現実的なモデルを構築しようとするために、より自由度の高いシナリオであるとも言える。いずれにせよ、LH シナリオにおいてはヒッグス質量の 2 次発散を防ぐメカニズムは “collective breaking” (複数の相

相互作用が集団的に作用する時にのみ発散が生じる) であると主張されているが、このメカニズムは、DD シナリオにおいて複数の質量固有状態の和をとること、また GHU においては Kaluza-Klein モードの足し上げを行う事にちょうど対応していると思われる。

こうして、DD シナリオを橋渡しとして、GHU、DD および LH シナリオの間の密接な関係が明らかと成る。

この研究では、こうした知見を深めると共に、こうした互いに密接に関係する三つの標準模型を超える理論のシナリオを、LHC 実験、また計画されている線形加速器実験である ILC 実験等の最先端加速器実験において検証する手法について議論する。標準模型は、本来ヒッグス・セクターの抱える理論的問題点を克服すべく登場したものである、これらの理論の検証においては、ヒッグスの質量や、その相互作用を精密に調べる事が非常に重要になることは容易に理解される。LHC 実験は、2012 年にヒッグス粒子を発見した事でも話題と成ったが、引き続きヒッグス粒子の性質を調べ、更には標準模型を超える理論の予言する新粒子の直接生成を目指して、エネルギーを増強した実験が再スタートしており、実験が継続されている。また、ILC 実験が実現すれば、ヒッグスの相互作用等について、より精密な実験データが得られる事が期待されている。

こうした検証に関する研究としては、特にヒッグスの相互作用における標準模型の予言からのずれである “異常ヒッグス相互作用” に関する研究に重点を置いた。GHU、DD、LH という互いに関係するシナリオにおいては、こうしたシナリオに共通する性質として、諸々の物理量がヒッグス場に関して周期的に成る、という性質があり、これは標準模型の場合とは著しく異なる性質である事に注目した。こうした特質から、湯川相互作用 (ヒッグスのクォークやレプトンとの相互作用) といった相互作用において、標準模型には無い特性が現れることが十分期待出来るのである。

4. 研究成果

研究成果としては、まず上述の様な考察を更に深め、GHU、DD 及び LH のシナリオの間の密接な関連性と相違、これらを一つのタイプの標準模型を超える理論として統一的に捉えることが可能である事等を議論した論文を学術雑誌に掲載した。なお、この論文は、Progress of Theoretical and Experimental Physics のヒッグス発見に関する特集のための招待論文として書かれたものである。

次に、上述の様な、こうしたタイプの標準模型を超える理論における “異常ヒッグス相互作用” に関する研究を行い、一連の論文として学術雑誌に掲載した。

まず、GHU シナリオにおける異常ヒッグス相互作用に関して詳細に調べた。GHU ではヒッグスの起源はゲージ粒子であるために、コンパクト化する余剰次元が円やオービフォールドの様な非単連結空間の場合には、ヒッグス場は物理的解釈としてアハロノフ・ボーム位相と同定されることが可能であり、その為、諸々の物理量がヒッグス場に関して周期的となる。この標準模型とは大きく異なる性質により、ヒッグスの湯川結合がヒッグスの真空期待値に関する周期性を持ち、極端な場合には湯川結合が消えることも可能である。論文では、こうした異常湯川相互作用を詳しく論じ、湯川結合が一般に標準模型の予言値より小さく成る事を示した。更には、こうした異常相互作用の本質的な要因として、上記の周期性と並んで、オービフォールド化等に伴う余剰次元方向の並進対称性の破れが本質的に重要である事を詳細に議論した。

次に、GHU に密接に関連する DD シナリオにおいても同様のヒッグス異常相互作用が生じることが予想されるので、これについて具体的な計算を裏付とする議論を行った。その結果、予想通り、ヒッグス場に関する周期性が生じて異常ヒッグス相互作用が帰結されることを確かめることが出来た。一方で、DD 特有で GHU には存在しない異常相互作用の要因として、余剰次元が格子化されていることに依る余剰次元方向の並進対称性の破れが、そうした異常相互作用の要因となっている事を具体的な計算に基づいて示した。こうした研究成果を学術雑誌に論文として掲載した。LH シナリオについても同様の異常ヒッグス相互作用が十分に予想されるが、残念ながら、論文にまとめるまでには至らなかった。

検証すべきヒッグスの性質として、その相互作用と並んで、その質量が重要である。ヒッグス質量は LHC 実験により 125 GeV である事が判明しているが、この研究では、これが意味するものについても議論した。

標準模型においては、ヒッグス質量を理論的に予言する事は原理的に出来ず、その量子補正は紫外発散して、観測値に合わせて繰り込まれるべきものである。しかし、GHU シナリオでは、ヒッグスは本来ゲージ粒子なので、古典レベルではヒッグス質量はゲージ粒子の質量とほぼ同じに成り、これは LHC 実験のデータからも支持されている望ましい性質である。また、こうした起源が要因となって、ヒッグス質量への量子補正とゲージ粒子質量への量子補正の間の差に関して、発散を伴わない有限値として予言可能であると予想される。

こうした予想に基づき、実際にヒッグス質量への量子補正を計算で求め、上記の予想通り、ゲージ粒子の質量との差が有限に成って予言されることを示した。ただし、用いた GHU 模型は単純化されたものであり、より現実的な模型を用いた計算が必要であることも指

摘した。

この様な一連の仕事と並んで、こうしたタイプの標準模型を超える理論のシナリオの宇宙論への応用に関する研究も行った。具体的には、宇宙のインフレーション的發展を引き起こすインフラトンと呼ばれスピンがゼロのスカラー粒子として、上述のヒッグス場と同定される場を用いるアイデアについて議論した。インフレーションの一つの興味深いシナリオとして “natural inflation” と呼ばれるものが在るが、これを重力相互作用に依る量子補正の下でもポテンシャルが安定と成る様に改変されたシナリオとして “extra natural inflation”

と呼ばれるシナリオが、Arkani-Hamed 等に依り提案されている。これは、GHU シナリオのヒッグス場と同様、高次元ゲージ場の余剰次元成分をインフラトンと見なすシナリオである。我々は、一見見分けが難しい extra natural inflation シナリオと natural inflation シナリオを、スペクトルの波数に依る微分で与えられる物理量の観測によって区別することが可能であることを見出し、論文として発表した。

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 7 件)

1. Nobuaki Kurahashi, C.S. Lim, Kazuya Tanabe, Anomalous Higgs interactions in dimensional deconstruction, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2014 (2014) 123B04 (16 pp.), DOI: 10.1093/ptep/ptu161

2. Kazunori Kohri, C.S. Lim, Chia-Min Lin, Distinguishing between Extra Natural Inflation and Natural Inflation after BICEP2, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 1408 (2014) 001 (10 pp.), DOI: 10.1088/1475-7516/2014/08/001

3. C.S. Lim and Nobuhito Maru, Takashi Miura, Is the 126 GeV Higgs boson mass calculable in gauge-Higgs unification?, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2015 (2015) 043B02 (23 pp.), DOI: 10.1093/ptep/ptv030

4. C.S. Lim, The Higgs Particle and Higher-Dimensional Theories, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2014 (2014) , 02A101 (21 pp.), DOI: 10.1093/ptep/ptt083

5. K. Hasegawa, Nobuaki Kurahashi, C.S. Lim, Anomalous Higgs Interactions in Gauge-Higgs Unification, Physical Review, 査読有, D87 (2013) 16011 (16 pp.), DOI: 10.1103/PhysRevD.87.016011

6. Yuki Adachi, Nobuaki Kurahashi, C.S. Lim, Nobuhito Maru, $D^0\text{-}\bar{D}^0$ Mixing in Gauge-Higgs Unification, Journal of High Energy Physics. 査読有, 1201 (2012) 047 (24 pp.), DOI: 10.1007/JHEP01(2012)047

〔学会発表〕(計 20 件)

1. C.S. Lim (林 青司), Gauge-Higgs Unification after the discovery of the Higgs particle, seminar at the universitat Autònoma de Barcelona, March 13, 2015, Barcelona (Spain)

2. 林 青司, Calculable Higgs Mass in Gauge-Higgs Unification, 日本物理学会, 2014年9月19日, 佐賀大学 (佐賀県・佐賀市)

3. 林 青司, Higgs physics in gauge-Higgs unification, 大阪市立大学セミナー, 2014年8月5日, 大阪市立大学 (大阪府・大阪市)

4. 林 青司, Calculable Higgs mass in the scenario of gauge-Higgs unification, 首都大学東京セミナー, 2014年6月18日, 首都大学東京 (東京都・八王子市)

5. C.S. Lim (林 青司), Higgs mass and anomalous Higgs interactions in gauge-Higgs unification, Planck 2014, May 28, 2014, Paris (France)

6. 林 青司, Gauge-Higgs Unification and the Physics of Higgs, 成蹊大学セミナー, 2013年12月10日, 成蹊大学 (東京都・武蔵野市)

7. 林 青司, Gauge-Higgs unification as a theory beyond the standard model and its implication to the Higgs physics, 首都大学東京セミナー, 2013年6月3日, 首都大学東京 (東京都・八王子市)

8. 林 青司, The physics of Higgs in the scenario of gauge-Higgs unification, お茶の水女子大学セミナー, 2013年5月27日, お茶の水女子大学 (東京都・文京区)

9. 林 青司, Gauge-Higgs unification as

physics BSM, KEK 理論研究会 2013, 2013年3月18日, 高エネルギー加速器研究機構 (茨城県・つくば市)

10. C.S. Lim (林 青司), Gauge-Higgs unification as physics BSM, workshop “Toward Extra-dimensions on the Lattice, on the 30th anniversary of Hosotani Mechanism”, 2013年3月13日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)

11. 林 青司, Gauge-Higgs unification as physics beyond the standard model, 北海道大学セミナー, 2013年1月11日, 北海道大学 (北海道・札幌市)

12. C.S. Lim (林 青司), Flavor Physics and Anomalous Interactions in the Gauge-Higgs Unification, International Conference on Flavor Physics and Cosmophysics 2012 (ICFPC2012), 2012年8月9日, Weihai (中国)

13. 林 青司, Anomalous Higgs Interactions in Gauge-Higgs Unification, 大阪大学セミナー, 2012年7月31日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)

14. C.S. Lim (林 青司), Flavor physics and anomalous interactions in Gauge-Higgs Unification scenario, ハワイ大学セミナー, 2012年7月6日, ハワイ (USA)

15. C.S. Lim (林 青司), Flavor physics and anomalous interactions in Gauge-Higgs Unification, 国際会議 “PLANCK2012”, 2012年5月30日, ワルシャワ(ポーランド)

16. 林 青司, Anomalous interactions in gauge-Higgs unification, 日本物理学会・年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学 (兵庫県・西宮市)

17. C.S. Lim (林 青司), Gauge Higgs Unification as a scenario of new Physics, 国際ワークショップ “Extra Dimensions in the Era of the LHC”, 2011年12月12日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)

18. 林 青司, Extra Dimension の物理 空間は本当に3次元? -, 信州大学・数理科学談話会, 2011年11月29日, 信州大学 (長野県・松本市)

19. C.S. Lim (林 青司), The Violation of CP Symmetry in Higher Dimensional Theories, 国際会議 Seventh International Conference “Quantum Theory and Symmetries”, 2011年8月9日, プラハ (チェコ共和国)

〔図書〕(計 2 件)

林 青司, サイエンス社, CP 対称性の破れ -
小林・益川模型から深める素粒子物理-,
2012 年 6 月, 199 ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 青司 (LIM, C.S.)
東京女子大学・現代教養学部・教授
研究者番号: 80201870

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: