

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：32652

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21244036

研究課題名(和文)高次元理論と予言可能な物理量

研究課題名(英文)Higher Dimensional Theories and Predictable Observables

研究代表者

林 青司(Lim, Seiji (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) 32,000,000円、(間接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：主として Gauge-Higgs Unification シナリオに関する様々な研究を行った。異常磁気能率が予言可能であること、シナリオ特有のCPの破れの機構が存在する事、“異常ヒッグス相互作用”の存在、等を議論した。また、ヒッグス粒子の質量を有限な量子補正を用いて説明可能な事、更には宇宙論への応用(extra natural inflation)についても研究した。その他に、radionをインフラトンとするシナリオ、domain wall 等に関する研究、 $SO(5) \times U(1)$ 模型の検証、世代構造解明の試み、LHC実験における高次元理論の検証、ダークマター等々についても研究を行った。

研究成果の概要(英文)：As the research of the project, main focus was on the various aspects of the Gauge-Higgs Unification scenario, a candidate of physics beyond the standard model. To be concrete, we have revealed the following: (i) The scenario can predict anomalous magnetic moment. (ii) There exists mechanisms to break CP symmetry, characteristic to the scenario. (iii) The presence of anomalous Higgs interactions. We also have discussed that the Higgs mass can be predicted in this scenario as a finite value even under the quantum correction and we even performed a research on the application of the scenario to the cosmology, i.e. on the extra natural inflation. In addition, the members of the project have performed research on various subjects, such as the proposal of a scenario to identify the radion with an inflaton, studies on domain walls, studies of $SO(5) \times U(1)$ model, attempts to clarify the generation structure, the tests of the theories at LHC, studies on the dark matter, etc.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高次元理論 標準模型を超える理論 ヒッグス粒子 余剰次元

1. 研究開始当初の背景

素粒子の「標準模型」は(ほぼ)完全な確立に到っているが、理論的には特にヒッグス粒子に関わるいくつかの不十分な問題点があり、“標準模型を超える”新たな理論の構築とその検証が急務となっている。

こうした“標準模型を超える”理論として最近4次元時空以外に余剰次元を持った高次元理論が大きな注目を集めている。

しかし、一方で高次元理論はゲージ理論でさえも繰り込み不可能であるため物理量への量子補正は発散を伴って現れ、物理量の予言は難しい。しかし、代表者は“Gauge-Higgs Unification”シナリオにおいては高次元的ゲージ対称性の為に、紫外発散を被らない有限な値としていくつかの重要な物理量に関して不定性の無い予言を行う事が可能であることを示した。

2. 研究の目的

この科学研究費に依る研究においては、こうした成果を踏まえ、現実的な高次元理論に基づく模型の構築と並んで、こうした高次元理論における予言可能な物理量について体系的に議論し、高次元理論の検証を行う事が主目的であった。

特に研究代表者の研究では、上記のGauge-Higgs Unification シナリオに関する研究を主目的とした。このシナリオでは、ゲージ相互作用とヒッグス相互作用の統一、即ち“Gauge-Higgs Unification”を高次元ゲージ理論を用いて実現する。素粒子理論の大問題として「階層性問題」が存在するが、1998年に代表者は、このシナリオでは、ヒッグス粒子にまつわる“階層性問題”が超対称性に頼ることなく解決する事を具体的計算を用いて初めて指摘した(Mod.Phys.Lett.A13 ('98) 2601)。

上で述べたように、このシナリオでは高次元的ゲージ対称性のおかげで、普通は紫外発散を被るはずの物理量が有限値として予言可能な場合があり得る事が分かって来た。先に述べたヒッグス質量以外にも、代表者らの研究により色々なタイプの物理量に関する予言が可能な事が徐々に分かって来ている。

3. 研究の方法

本研究においては、こうした成果を踏まえ、より現実的な模型の構築を行って予言可能な物理量を議論すると共に、CPの破れによる電気双極子能率等の他のいくつかの興味ある物理量についても同様な予言を行い理論の検証を行う事を目的とした。

また、LHC実験においてヒッグス探査が行われ近く貴重な実験データが得られる事にも鑑みて、ヒッグス質量やその相互作用に関する研究も出来る限り進めることも目的と

した。

4. 研究成果

まず、研究代表者のこの間の研究により得られた成果について、各テーマに分けて述べる。

(1) g - 2 に関する研究

フェルミオンの異常磁気能率(g - 2) は、標準模型における量子補正の効果だけでなく、標準模型を超える理論の予言する新粒子の存在に敏感であり、理論の成否を決めるのに有用な物理量である。代表者は、これ以前の研究において、高次元ゲージ理論が繰り込み不可能という事実にも拘わらず、Gauge-Higgs Unification においては、高次元ゲージ対称性の帰結として、g - 2 に関して紫外発散しない有限値としての予言が可能である事を指摘した。しかし、当初の論文では、この機構が働くことを示すのが主目的であったため、モデルとしては高次元 QED を採用した。そこで、この科研費に依る研究では、SU(3)ゲージ対称性を持ち標準模型を内包出来る現実的モデルを採用し、現実的なg - 2 の予言値を求めた。また、これを異常磁気能率の精密測定から得られているデータと比較し、余剰次元の大きさに関する上限値を導出した。

(2) CP 対称性の破れに関する研究

Gauge-Higgs Unification シナリオではヒッグスの起源はゲージ粒子なので、湯川結合は本来ゲージ結合で実数となり、小林・益川理論における様な CP 対称性の破れの機構を実現することは自明ではない。

この研究では、CP を破る機構として、二通り提案した。一つは、5次元時空ではヒッグスの真空期待値が CP 変換の下で符号を変える事から、真空期待値により自発的に CP を破るという機構である。この機構が働くことを、CP の破れで生じる中性子の電気双極子能率を計算することで具体的に示した。

もう一つの機構として、6次元時空上の理論において、余剰次元のコンパクト化の仕方によって CP を破るという機構も可能であることを議論した。具体的には、余剰次元としてオービフォールド T^2/Z_n を採用した場合を想定し、離散的対称性を Z_4 とすると、4次元時空上の CP 変換と Z_4 対称性が矛盾する為に CP 対称性が物理的に破れる事を示した。

(3) ヒッグスの異常相互作用に関する研究

最後の未発見粒子であったヒッグス粒子が2012年に発見され大きな話題となったが、今後はヒッグス粒子の相互作用の精密検証により、どの理論が正しいかという方向性を決めて行く事が非常に重要となる。

代表的な標準模型を超える理論はヒッグス粒子の抱える階層性問題を解決するために提唱されて来たという経緯もあり、ヒッグ

スの相互作用が標準模型の予言から逸脱する事が期待されるのである。こうした観点から、この科研費に依り、標準模型の予言からずれた、ヒッグスの“異常相互作用”に関する研究を行った。

特に、Gauge-Higgs Unification 特有の異常相互作用について研究を行った。このシナリオでは、物理量がヒッグス場に関して周期的になるという著しい特徴がある。この周期性のために、粒子の質量が標準模型の場合の様にヒッグスの真空期待値に関して線形ではなく、三角関数の様な真空期待値の非線形な関数として振る舞う場合があり、これに従って、例えば湯川結合が標準模型の様に定数ではなく、真空期待値に依存して変化する、といった“異常な”事が生じる。ヒッグスとコンパクト化スケール(余剰次元の大きさの逆数)との比の関数として、湯川結合の標準模型からのずれを求めた。

更に、こうした異常相互作用を引き起こす根本的な要因について考察し、ヒッグス場に関する周期性と並んで、余剰次元方向の並進対称性の破れが重要であるとの認識に到り、これを指摘した。我々の採用した理論では、この並進対称性の破れはフェルミオンの持つ Z_2 -odd のbulk mass により引き起こされる事を議論した。

(4) ヒッグス質量に関する研究

LHC 実験はヒッグスの発見と同時に非常に重要なヒントを素粒子理論に与えた。それは、ヒッグス質量が 126 GeV で弱スケールと同程度である、即ちヒッグスは“軽い”、という事実である。更に、これはヒッグスの自己相互作用の結合定数がゲージ相互作用に依って支配されている事を示唆している様にも思える。Gauge-Higgs Unification ではヒッグスの起源はゲージ粒子なので、正にこうした性質を持つ。更に、6次元時空上の理論では、余剰次元として T^2/Z_3 オービフォルドを採用すると、古典レベルでヒッグス質量が W ゲージボソン質量のちょうど2倍になるという興味深い事実がある。そこで我々は、量子効果により実測された 126 GeV との差を説明可能かどうか、について議論し論文として発表した。

重要な事は、古典レベルでのヒッグス質量と W ボソン質量との比例関係は、量子補正の紫外発散部分に関しても変わらない為に、この関係からのずれを有限な値として予言可能であり、実験データとの比較が出来るという事である。こうした比較から、コンパクト化スケールを求めた。

(5) 宇宙論的帰結に関する研究

インフレーション宇宙論は、観測事実からも支持され益々有力な理論となっているが、一方でインフレーションを引き起こすインフラトンの起源についてははっきりしない。我々は Gauge-Higgs Unification のヒッグ

ス場の様に高次元ゲージ場に起源をもつスカラー粒子をインフラトンと特定する“extra natural inflation”シナリオに着目し、“natural inflation”シナリオから区別する手法を提唱した。

分担者の研究のテーマについて幾つか挙げるとすれば、高次元重力・ゲージ理論における radion ポテンシャルへの量子補正の計算、radion をインフラトンとするシナリオの提唱、余剰次元の配位としても重要な domain wall や vortex に関する研究、Randall-Sundrum 時空上で構成された現実的な $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification 模型の LHC 実験で検証可能な様々な物理量に関する予言に関する研究、オービフォルドと統一理論の構造を用いてフェルミオンの世代構造を解明する試み、Kaluza-Klein グルーオンや radion といった高次元理論の予言する粒子の LHC 実験における検証に関する研究、“Gauge-Higgs Dark Matter”や高次元理論に基づくニュートリノ質量のシーソー機構に関する研究、等々が挙げられる。こうした研究の成果について、学術雑誌に掲載すると共に、国際学会、ワークショップ、セミナー等において積極的に発表を行った。

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 36 件)

C.S. Lim, “The Higgs Particle and Higher-Dimensional Theories”, PTEP 2014 (2014) 2, 02A101, 査読有

DOI: 10.1093/ptep/ptt083

K. Hasegawa, Nobuaki Kurahashi, C.S. Lim, Kazuya Tanabe, “Anomalous Higgs Interactions in Gauge-Higgs Unification”, Phys. Rev. D87 (2013)016011, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.016011

Y Fukazawa, T Inami, Y Koyama “Radion Inflation in Higher-Dimensional Gravity Theory”, PTEP2013(2013)021B01, 査読有, DOI:10.1093/ptep/pts088

Masato Arai, Filip Blaschke, Minoru Eto and Norisuke Sakai, “Stabilizing matter and gauge fields localized on walls,” PTEP 2013 (2013) 093B01-1-21, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptt064

Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka,

Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Takuya Shimotani, "Novel universality and Higgs decay $H \rightarrow \gamma\gamma$, gg in the $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs Unification, Phys.Lett. B722 (2013) 94-99, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.03.040

Yuhei Goto, Yoshiharu Kawamura and Takashi Miura, "Orbifold family unification on six dimension", Phys. Rev. D88 (2013) 055016, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.055016

M. Arai, G.C. Cho, K. Smolek, "Kaluza-Klein gluon searches using the three-b-jet decay channel at the Large Hadron Collider", Phys. Rev. D88 (2013) 076003, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.076003

G.C. Cho, D. Nomura, Y. Ohno, "Constraints on radion in a warped extra dimension model from Higgs boson searches at the LHC", Mod.Phys.Lett. A28 (2013) 1350148, 査読有, DOI: 10.1142/S0217732313501484

N. Haba, K. Kaneta and S. Tsuno, "QCD parity violation at LHC in warped extra dimension," Phys. Rev. D87 (2013) 095002-1-7, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.095002

Yuki Adachi, Nobuaki Kurahashi, C.S. Lim, Nobuhito Maru, "D⁰- \bar{D}^0 Mixing in Gauge-Higgs Unification", JHEP 1201 (2012) 047, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP01(2012)047

Minoru Eto, Toshiaki Fujimori, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, "Dynamics of Non-Abelian Vortices," Phys. Rev. D84 (2011) 125030-1-23, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.84.125030

Yutaka Hosotani, Minoru Tanaka,

Nobuhiro Uekusa, "Collider signatures of the $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification", Phys. Rev. D84 (2011) 075014, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.84.075014

N. Haba, K.-y. Oda and R. Takahashi, "Dirichlet Higgs as radion stabilizer in warped compactification", JHEP 1105 (2011) 125-1-33, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP05(2011)125

Yuki Adachi, Nobuaki Kurahashi, C.S. Lim, Nobuhito Maru, "Flavor Mixing in Gauge-Higgs Unification", JHEP 1011 (2010) 150, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP11(2010)150

C.S. Lim, Nobuhito Maru, Kenji Nishiwaki, "CP Violation due to Compactification", Phys.Rev. D81 (2010) 076006, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.81.076006

Yuki Adachi, C.S. Lim, Nobuhito Maru, "Lower Bound for Compactification Scale from μ on $g - 2$ in the Gauge-Higgs Unification", Nucl.Phys. B839 (2010) 52-95, 査読有, DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2010.06.001

Toshiaki Fujimori, Giacomo Marmorini, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi and Norisuke Sakai, "The Moduli Space Metric for Well-Separated Non-Abelian Vortices," Phys. Rev. D82 (2010) 065005-1-17, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.82.065005

Yutaka Hosotani, Minoru Tanaka, Nobuhiro Uekusa, "H parity and the stable Higgs boson in the $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification", Phys. Rev. D82 (2010) 115024, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.82.115024

Yoshiharu Kawamura and Takashi Miura, "Orbifold family unification in $SO(2N)$ gauge theory", Phys. Rev. D81

(2010) 075011, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.075011

N. Haba, S. Matsumoto, N. Okada
and T. Yamashita, "Gauge-Higgs Dark
Matter," JHEP 1003 (2010) 064-1-18, 査読
有, DOI: 10.1007/JHEP03(2010)064

21 T. Saito, M. Asano, K. Fujii, N. Haba,
S. Matsumoto, T. Nabeshima, Y. Takubo
and H. Yamamoto et al., "Extra
dimensions and Seesaw Neutrinos at the
International Linear Collider," Phys. Rev.
D82 (2010) 093004-1-11, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.82.093004

22 Yuki Adachi, C.S. Lim, Nobuhito Maru,
"Neutron Electric Dipole Moment in the
Gauge-Higgs Unification", Phys. Rev. D80
(2009) 055025, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.80.055025

23 Takeo Inami, Yoji Koyama, C.S. Lim,
Shie Minakami, "Higgs Inflaton
Potential in Higher-Dimensional SUSY
Gauge Theories", Prog.Theor.Phys. 122
(2009) 543-551, 査読有, DOI: 10.1143/
PTP.122.543

24 Yuki Adachi, C.S. Lim, Nobuhito
Maru, "More on the Finiteness of
Anomalous Magnetic Moment in the
Gauge-Higgs Unification", Phys.Rev. D79
(2009) 075018, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.79.075018

25 Yutaka Hosotani, Pyungwon Ko,
Minoru Tanaka, "Stable Higgs Bosons as
Cold Dark Matter", Phys. Lett. B680 (2009)
179-183, 査読有,
DOI: 10.1016/j.physletb.2009.08.050

{学会発表}(計 38 件)

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, 東京

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, 東京

Yutaka Hosotani, $SO(5) \times U(1)$
gauge-Higgs unification", Scalars 2013,
12-16 September, 2013, Warsaw

Yutaka Hosotani, "Higgs boson as a
gauge field in extra dimensions – Pinning
it down at LHC and ILC", Tohoku
Workshop on "Higgs and Beyond", 5-9 June,
2013, Tohoku Univ.,

曹 基哲, "Collider phenomenology in
warped extra dimension models", 松江現
象論研究会 2014, 2014 年 2 月 8-9 日, くにび
きメッセ(島根県松江市)

大野慶子, 曹基哲, 野村大輔, "ラディオ
ン質量に対するヒッグス探索実験からの制
限", 日本物理学会 2013 年秋季大会,
2013 年 9 月 23 日, 高知大学

林 青司, "Gauge-Higgs unification as
physics BSM", KEK 理論研究会 2013,
2013 年 3 月 18 日, つくば

川村嘉春, 「力の統一と余剰次元に基づく
世代の統合」, KEK 理論研究会 2013, 2013
年 3 月 18~21 日, 高エネルギー加速器研究
機構, つくば市

林 青司, "Gauge-Higgs unification as
physics BSM", workshop "Toward
Extra-dimensions on the Lattice", 2013
年 3 月 13~16 日, 大阪大学

Yutaka Hosotani, "126 GeV Higgs
boson and universality relations in the
 $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification",
Toyama International Workshop on "Higgs
as a Probe of New Physics 2013"
(HPNP2013), Feb. 13-16, 2013, Toyama

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, 札幌

C.S. Lim, "Flavor Physics and
Anomalous Interactions in the
Gauge-Higgs Unification", International
Conference on Flavor Physics and
Cosmophysics 2012 (ICFPC2012), Aug. 8-12
(2012), Weihai, China

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

C.S. Lim, "Flavor physics and
anomalous interactions in Gauge-Higgs
Unification scenario", Seminar at Univ.
of Hawaii, July 6 (2012), Hawaii, USA

C.S. Lim, "Flavor physics and
anomalous interactions in Gauge-Higgs
Unification", PLANCK2012, May 30
(2012), Warsaw, Poland

Yoshiharu Kawamura, "Soft SUSY
breaking masses from dynamical
rearrangement", workshop "Beyond The
Standard Model and the Origin of Higgs",

2012年3月13日、神戸大学

Yutaka Hosotani, "Realistic $SO(5) \times U(1)$ model in RS space", Rencontres de Moriond EW 2012, Thuile, Italy, 9 March 2012

Yutaka Hosotani, "Gauge-Higgs unification and the LHC", Strongly coupled physics beyond standard model, ICTP, 26 January 2012, Trieste, Italy,

C.S. Lim, "Gauge Higgs unification as a scenario of new physics", international workshop "Extra Dimensions in the Era of the LHC", 2011年12月12日, 大阪大学

Yoshiharu Kawamura, "Orbifold GUT and related topics", StringVac 2011, 2011年9月5日, 韓国・釜山

²¹ C.S. Lim, "The Violation of CP Symmetry in Higher Dimensional Theories", 7th International Conference on Quantum Theory and Symmetries (QTS7), 2011年8月9日, プラハ(チェコ)

²² 坂井典佑, Moduli space volume of vortex and localization, 7th International Conference on Quantum Theory and Symmetries (QTS7), 2011年8月8日, プラハ(チェコ)

²³ 坂井典佑, Volume of Moduli Space of Vortex Equations and Localization, Continuous Advances in QCD 2011, 2011年5月12日, ミネソタ大学(アメリカ合衆国)

²⁴ C.S. Lim, "CP Violation and Flavor Physics in Gauge-Higgs Unification", Goran Fest: A look from the past into the future of particle physics, 2010年6月10日, スプリット(クロアチア)

²⁵ 坂井典佑, "Maximally Non-Abelian Vortices from Self-dual Yang-Mills Fields", International Conference SUSY 2010, 2010年8月23日, ボン(ドイツ)

²⁶ 齋藤智之, 浅野雅樹, 田窪洋介, 鍋島偉宏, 波場直之, 藤井恵介, 松本重貴, 山本均, 吉岡興一, "ILCにおける高次元シーソー模型の右巻きニュートリノに関する測定精度の検証", 日本物理学会, 2010年9月14日, 九州工業大学(福岡県)

²⁷ C.S. Lim, "Precision Tests and CP Violation in Gauge-Higgs Unification", The 5th International Conference on Flavor Physics, 2009年9月28日, Hanoi University of Science, Hanoi (Vietnam)

²⁸ 坂井典佑, "Domain walls with non-Abelian orientational moduli", the First Mediterranean Conference on Classical and Quantum Gravity, 2009年9月14日, コリンバリ(ギリシャ)

²⁹ 阪村豊, 波場直之, 山下敏史, "Unitarity bound of Gauge-Higgs Unification", 日本物理学会, 2009年9月12日, 甲南大学

〔図書〕(計4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, 200

川村嘉春, 裳華房, 「相対論的量子力学」, 2012, 353

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林青司 (LIM, Seiji (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

稲見武夫 (INAMI, Takeo)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 20012487

坂井典佑 (SAKAI, Norisuke)

慶應義塾大学・自然科学研究教育センター・訪問教授

研究者番号: 80108448

細谷裕 (HOSOTANI, Yutaka)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 50324744

川村嘉春 (KAWAMURA, Yoshiharu)

信州大学・理学部・教授

研究者番号: 10224859

曹基哲 (CHO, Gi-Chol)

お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授

研究者番号: 10323859

波場直之 (HABA, Naoyuki)

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号: 00293803