

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20244028

研究課題名（和文） 余剰次元、世代起源と LHC 物理

研究課題名（英文） Extra Dimensions, Origin of Generations and LHC Physics

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：ヒッグス粒子の正体、余剰次元の存在の可能性、クォーク・レプトンの起源を LHC 実験で探る物理として探求した。ヒッグス粒子を余剰次元のゲージボゾンとするゲージ・ヒッグス統合理論を構成した。質量 126 GeV のヒッグス粒子の存在から、余剰次元での励起粒子、ヒッグス粒子の相互作用の間に普遍的な関係（ユニバーサリティ）があることを発見した。今後の LHC 実験で検証されれば、余剰次元の存在が確立される。

研究成果の概要（英文）：Nature of the Higgs boson, the existence of extra dimensions in space-time, the origin of quark-lepton generations were explored as physics of LHC. The gauge-Higgs unification model was constructed. It was discovered that there exists the universality among the mass spectrum in extra dimensions and interactions of the Higgs boson. The existence of extra dimensions can be established by confirming the universality at LHC in the coming years.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2009年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2012年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

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：素粒子理論、ヒッグス粒子、細谷機構、ゲージ・ヒッグス統合、余剰次元

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論は不完全である。標準理論におけるヒッグス相互作用は、任意な部分が多い。強い相互作用も含めて、大統一理論を作ろうとすると、極度に異なる(15桁以上にわたる)エネルギー、長さのスケールが一つの枠組みの中に自然におさまるようにせねばならない。この階層性問題の一因は、ヒッグ

ス相互作用を制御する対称性原理の欠如にある。標準理論では、ゲージ場(W, Z ボゾン)の相互作用は実験的にはほぼ確立されているが、ヒッグス粒子については、直接的な証拠は一つもなかった。この状況は 2008年から始まる LHC の実験で一変する。新粒子の発見、ヒッグス粒子の相互作用の確定を通して、現在の電弱統一理論の基本的枠組みが正しいか、対

称性の破れの起源は何か、そして3世代あるクォーク・レプトンの起源は何かなどが明確にせねばならない。これらの問題を余剰次元の立場から考察し、LHC/ILCなどの実験でいかに検証できるかを明らかにする。

2. 研究の目的

これらの問題を高次元理論の見地から吟味し、余剰次元の存在がいかにゲージ・ヒッグス統合や高次元ブラックホール生成を可能にし、それらがいかに LHC/ILC などの実験で検証できるか、クォーク・レプトンの質量・混合、世代の起源が余剰次元といかに関わりつくかを明らかにしようとする。標準理論を超える理論として高次元理論を軸に、他の理論との対比もふくめて、LHC の実験と結びつく形で研究をすすめる。

特にヒッグス粒子の発見を予想し、ゲージ・ヒッグス統合理論からの予想を導き、それをもとに、余剰次元の存在を見極める手段を与える。

3. 研究の方法

この研究の独自、独創的な点は、余剰次元と実験との接点をヒッグス粒子、クォーク・レプトン世代起源、高次元ブラックホール生成に見極めた点にある。細谷が30年前に明らかにした細谷機構を基礎とするゲージ・ヒッグス統合を、細谷、波場、尾田は電弱相互作用に適用し、LHC実験での検証が可能な段階にまでひきあげ、様々な帰結を導く。さらに、波場は余剰次元の存在が世代起源の鍵であることに注目、尾田はそれがブラックホール生成として見えることを解明する。すべてはLHCを中心とする加速器実験の結果に左右されながら進展していく。4次元の電弱標準模型、超対称性標準模型を超えた新しい理論として時空構造の変換を伴う点にも特色がある。余剰次元の存在が示唆、そして確立されれば、素粒子論の究極理論としての超弦理論への大きな礎となる点でもその意義は非常に大きい。

国内研究会、国際研究会も開催し、余剰次元理論を探求するコミュニティを形成し、素粒子物理学の進展に寄与する。

4. 研究成果

LHCでヒッグス粒子が発見されたが、その正体は不明である。標準模型で想定されているものなのかどうか、あるいは新しい物理を示唆するののかどうかを検証せねばならない。本研究課題では、余剰次元でゲージ場とヒッグス粒子を統合するゲージ・ヒッグス統合理

論、標準理論、超対称性理論の見地からヒッグス粒子の正体に迫った。また、ニュートリノを手がかりに新しい統一理論も構成した。特任研究員として植草宣弘氏、幡中久樹氏を雇用した。

細谷は、質量126GeVのヒッグス粒子を実現する $S(0)(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論を構成し、5次元目のAB位相、KK質量、ヒッグスボゾンの3点、4点結合定数、ZボゾンのKK励起粒子の質量などの間に、理論の詳細によらない普遍的な関係があることを発見した。このことは、一つの量(ZボゾンのKK励起粒子の質量など)が決まれば、他の量が予言され、今後の実験で検証できることを意味する。また、ヒッグス粒子の2光子への崩壊幅も評価し、KK粒子の寄与は非常に小さい事を示した。2015年、LHCのエネルギーが14 TeVに上がり実験すれば、ZボゾンのKK励起粒子を生成することが可能になり、細谷の $S(0)(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論を検証し、余剰次元の存在を確立できる可能性がある。

細谷は $S(0)(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論でのHパリティに関する一般論も展開した。ヒッグスボゾンの発見は、Hパリティが破れている事を意味する筆を示した。

波場は、ニュートリノの小さな質量を説明する機構として、従来のシーソー機構とは異なる第2のヒッグス場機構を提唱した。また、ヒッグス粒子が超対称性理論における複合粒子で構成されている可能性を示し、その場合、LHC実験における2光子への崩壊のずれが説明できることをしめした。

尾田は、射影球面上のカイラルな6次元モデルを構成した。また、境界条件により電弱対称性を破る新しい方法を開発した。また、標準模型において裸の結合定数を用いて裸のヒッグス質量への二次発散する寄与を1ループ及び2ループで求めた。裸の質量の切断スケールへの依存性を求め、トップクォーク質量が170GeVであれば、このスケールはプランクスケールとなることを示した。

以下の研究会を大阪大学で開催した。

国内研究会：

「余剰次元物理 2010」

2010年1月20日

「余剰次元物理 2011」

2011年1月24日～25日

国際研究会：

「International Workshop: Extra Dimensions in the Era of the LHC」

2011年12月12日～14日

「International Workshop: Toward Extra Dimensions on the Lattice」

2013年3月13日～15日

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 57 件)

1. S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and T. 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 [10.1016/j.physletb.2013.03.040](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2013.03.040)
2. Y. Hamada, H. Kawai, and K. Oda, “Bare Higgs mass at Planck scale”, Phys. Rev. D87 (2013) 053009 (1-9), 査読有, [10.1103/PhysRevD.87.053009](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.87.053009)
3. H. Hatanaka and Y. Hosotani, “SUSY breaking scales in the gauge-Higgs unification”, Phys. Lett. B713 (2012) 481-484. 査読有 [10.1016/j.physletb.2012.06.039](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2012.06.039)
4. N. Haba, K. Kaneta, S. Matsumoto, T. Nabeshima and S. Tsuno, “Parity Violation in QCD Process”, Phys. Rev. D85 (2012) 014007 (1-7). 査読有 [10.1103/PhysRevD.85.014007](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.85.014007)
5. K. Nishiwaki, K. Oda, N. Okuda, R. Watanabe, “Heavy Higgs boson at the Tevatron and the LHC in universal extra dimension models”, Phys. Rev. D85 (2012) 035026 (1-22). 査読有 [10.1103/PhysRevD.85.035026](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.85.035026)
6. Y. Hosotani, M. Tanaka, and N. Uekusa, “Collider signatures of the $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification”, Phys. Rev. D84 (2011) 075014 (1-22). 査読有 [10.1103/PhysRevD.84.075014](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.84.075014)
7. N. Haba, K. Oda and R. Takahashi, “Dirichlet Higgs as radion stabilizer in warped compactification”, JHEP 1105 (2011) 125 (1-33) (2011) 33-44. 査読有 [10.1007/JHEP05\(2011\)125](https://arxiv.org/abs/10.1007/JHEP05(2011)125)
8. N. Haba and T. Horita, “Vacuum stability in neutrinophilic Higgs doublet model”, Phys. Lett. B705 (2011) 98-105. 査読有 [10.1016/j.physletb.2011.09.103](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2011.09.103)
9. Y. Hosotani, S. Noda, and N. Uekusa, “The Electroweak gauge couplings in $SO(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification”, Prog. Theoret. Phys. 123, 757-790 (2010). 査読有 [10.1143/PTP.123.757](https://arxiv.org/abs/10.1143/PTP.123.757)
10. H. Dohi, K. Oda, “Universal Extra Dimensions on Real Projective Plane”, Phys. Lett. B692, 114-120 (2010). 査読有 [10.1016/j.physletb.2010.07.020](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2010.07.020)
11. Y. Hosotani, Y. Kobayashi, “Yukawa Couplings and Effective Interactions in Gauge-Higgs Unification”, Phys. Lett. B674, 192-196 (2009). 査読有 [10.1016/j.physletb.2010.07.020](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2010.07.020)
12. Y. Hosotani, P. Ko, M. Tanaka, “Stable Higgs Bosons as Cold Dark Matter”, Phys. Lett. B680, 179-183 (2009). 査読有 [10.1016/j.physletb.2009.08.050](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2009.08.050)
13. N. Haba, K. Oda, R. Takahashi, “Top Yukawa deviation in extra dimension”, Nucl. Phys. B821, 74-128 (2009). 査読有
14. Y. Hosotani, K. Oda, T. Ohnuma, Y. Sakamura, “Dynamical Electroweak Symmetry Breaking in $SO(5) \times U(1)$ Gauge-Higgs Unification with Top and Bottom Quarks”, Phys. Rev. D78, 096002 1-16 (2008) 査読有 [10.1103/PhysRevD.78.096002](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.78.096002)

[学会発表] (計 65 件)

1. Y. Hosotani, “Hosotani mechanism on the lattice and its application to EW”, International Workshop “Toward Extra Dimensions on the Lattice”, 2013年03月13日, 大阪大学
2. Y. 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”, 2013年02月13日
3. K. Oda, “Bare Higgs mass and potential at UV cutoff”, Toyama International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2013”, 2013年02月13日
4. Y. Hosotani, “Hosotani mechanism on the lattice”, Summer Institute 2012, 2012年08月19日, Sun Moon Lake, Taiwan
5. K. Oda, “Minimal Dilaton Model”, Hadron Collider Physics Symposium 2012, 2012年11月15日, Kyoto, Japan
6. K. Oda, “Universal extra dimensions in LHC era: LKP dark matter or not?”, SKKU Symposium on Astrophysics and Cosmology: from Particle to Universe, 2012年08月31日, Suwon, Korea
7. Y. Hosotani, “Gauge-Higgs unification approach”, GUT 2012, 2012年3月17日, 京都大学基礎物理学研究所
8. Y. Hosotani, “Realistic $SO(5) \times U(1)$

model in RS space”, Rencontres de Moriond EW 2012, 2012年3月6日, Thuile, Italy

9. Y. Hosotani, “Gauge-Higgs unification and the LHC”, Strongly coupled physics beyond standard model, 2012年1月26日, ICTP, Trieste, Italy

10. Y. Hosotani, “Collider signatures of gauge-Higgs unification”, Scalar 2011, 2011年8月26日, Warsaw, Poland

11. N. Haba, “Neutrinophilic Higgs doublet model and its phenomenology”, Scalar 2011, 2011年8月28日, Warsaw, Poland

12. K. Oda, “Unitarity in Dirichlet Higgs Model”, 場の理論と弦理論, 2011年7月25日, 京都大学基礎物理学研究所

13. K. Oda, “Higgs at ILC in Universal Extra Dimensions in Light of Recent LHC Data”, International Workshop on Future Linear Collider, 2011年9月26日, Granada, Spain

14. Y. Hosotani, “Extra Dimensions: Clues at LHC”, 素粒子物理学の進展 2011, 2011年3月8日, 京都大学基礎物理学研究所

15. Y. Hosotani, “Stable Higgs Bosons -- New Candidate for Cold Dark Matter”, OMEG10: The 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, 2010年3月8日, RCNP, Osaka University.

16. Y. Hosotani, “Gauge-Higgs Unification: Stable Higgs Bosons as Cold Dark Matter”, SCGT09 Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era, 2009年12月9日, Nagoya University.

17. Y. Hosotani, “Dynamical Electroweak Symmetry Breaking in $SO(5) \times U(1)$ Gauge-Higgs Unification in the Randall-Sundrum Warped Space”, PANIC08: International Conference on Particles And Nuclei, 2008年11月10日, Eilat, Israel.

18. Y. Hosotani, “Electroweak Gauge-Higgs Unification Scenario”, SUSY2008: 16th Int. Conf. on Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions, 2008年6月21日, Seoul, Korea.

[その他]

ホームページ等

<http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~hosotani/ws2011jan.html>

<https://sites.google.com/a/hetmail.phys.sci.osaka-u.ac.jp/edlh11/>

<http://www-conf.kek.jp/extradim/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

波場 直之 (HABA NAOYUKI)

北海道大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00293803

尾田 欣也 (ODA KIN-YA)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60442943