

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23104009

研究課題名（和文）テラスケール物理がもたらす新しい時空像

研究課題名（英文）New perspective of spacetime from physics at TeV scale

研究代表者

細谷 裕（Hosotani, Yutaka）

大阪大学・理学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50324744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,900,000円

研究成果の概要（和文）：LHCで発見されたヒッグスボソンの正体を探った。我々の世界の時空が5次元以上あるとすれば、その反映としてヒッグスボソンは標準模型と全く違う形で出現する。ヒッグスボソンはゲージ場の余剰次元成分であるとするゲージヒッグス統合理論を構成した。驚くべきことに、低エネルギーでは、標準理論とほぼ同じになるが、14TeVのLHC実験で、6TeV - 8TeV領域にZ'という新しい粒子が出現すると予測する。余剰次元の存在を確かめることは、新しい時空像を築くことを意味する。

研究成果の概要（英文）：What is the origin of the Higgs boson discovered at LHC? If our spacetime has more than four dimensions, the Higgs boson appears completely different from that in the standard model. We have proposed the gauge-Higgs unification scenario in which the four-dimensional Higgs boson is identified with the extra-dimensional component of the gauge potentials defined in five dimensions. Surprisingly the gauge-Higgs unification model yields almost the same phenomenology at low energies as the standard model. It predicts that new particles such as Z prime particles in the energy range 6 TeV to 8 TeV, which should be confirmed at 14 TeV LHC. The confirmation will support the existence of extra dimensions, hereby leading to the new vision and perspective of spacetime.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子理論 余剰次元 ヒッグスボソン ゲージヒッグス統合 細谷機構 ヒッグスインフレーション

1. 研究開始当初の背景

標準模型は幾多の実験的テストに耐え、大きな成功を収めていたが、要のヒッグス粒子は未発見であった。その質量を電弱スケール(100 GeV)に保つためには理論のパラメタの不自然な微調整が必要であるという階層性問題や、クォーク・レプトンの質量や世代間混合を司る湯川結合が任意で、理論に多くの不定パラメタが存在するといった問題点を抱えている。この原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。

ヒッグス相互作用を制御する方法として、余剰次元におけるゲージ・ヒッグス統合を考える。これは、もともと代表者の細谷が1983年に提出したゲージ場とヒッグス場を5次元ゲージ理論のなかで統一し、量子効果により対称性を破るという細谷機構に基づいている。我々の時空は4次元ではなく、5次元目、6次元目の余剰次元があり、余剰次元でのゲージ相互作用が、ヒッグス相互作用としてあらわれると考えるのである。分担者の林は1998年このゲージ・ヒッグス統合で階層性問題が解決できることを見だし、電弱相互作用でのゲージ・ヒッグス統合理論の突破口を開いた。

余剰次元の歴史は古い。1920年代にKaluzaとKleinは重力と電磁相互作用を5次元時空で統一することを提唱した。だが、それを確かめる術はなかった。1970年ごろより、素粒子の基本相互作用は非可換ゲージ理論の形で統一されることになる。そして1983年、細谷は統一理論の柱となる対称性の自発的破れが5次元時空のゲージ相互作用の結果、自然に起こることを発見した。更に、左右非対称でカイラルな弱い相互作用が、オービフォルドの余剰次元で自然に実現できることを見いだされ、電弱相互作用を記述する現実的な余剰次元理論、ゲージ・ヒッグス統合理論が構成されるに至った。

2. 研究の目的

余剰次元が存在するという新しい時空描像のもと、ゲージ・ヒッグス統合理論を中心とする余剰次元理論から帰結されるテラスケールの物理を予言し、LHCや暗黒物質探索などの実験観測に直接結びつけ、検証することで新しい時空像を確立していく。

3. 研究の方法

余剰次元と実験観測との接点をヒッグスボゾン、KK励起粒子、暗黒物質、ブラックホール生成等に見極め、テラスケール加速器実験と観測で直接検証する形で時空描像を塗り替える。細谷が28年前明らかにした細谷機構を基礎とし、林が13年前に整備したゲージ・ヒッグス統合が、ようやく電弱相互作用を記述する現実的な理論となり、実験観測による検証が可能となる。1920年代に始まった余剰次元による統一のシナリオが、単なる理論的可能性としてではなく、自然科学

として実現できる。相対論の出現で時間と空間が融合し、量子論の出現でミクロの世界の基本原理が塗り替えられた。余剰次元の存在は、ミクロの彼方に潜む時空概念の大変革を意味し、我々は、新しい自然観の世界に突入する。

4. 研究成果

(1) ゲージ・ヒッグス統合理論の構築

細谷は $S0(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論をRandall-Sundrumワープ空間で構成した。このモデルは、低エネルギー領域では、標準模型とほぼ同じ結果を与える。ヒッグスボゾンがゲージ場の5次元目の成分として出現し、量子効果により、電弱対称性が自発的に破れる。ヒッグスボゾンの質量は有限に予言される。階層性問題が自動的に解決される。クォーク・レプトンはカイラルな相互作用を持つ零モードとして現れる。

ヒッグスボゾンは、5次元目の空間でのアハロノフ・ボーム位相となる。ゲージ不変性により保証された位相として性質から、ヒッグスボゾンの相互作用係数は有限となる。

(2) ゲージ・ヒッグス統合理論の整合性

$S0(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論は驚くべき性質を持っていることが判明した。高次元で定義された理論では、各粒子に付随して5次元方向への励起モード(KKモード)が無制限出現する。2012年に発見されたヒッグスボゾンは、例えば、2光子に崩壊する。この崩壊過程には、無限個のKKモードの寄与があり、総和は発散してしまう危険性がある。ゲージ・ヒッグス統合理論では各モードの寄与の間に相殺が起こり、総和は有限で、かつ非常に小さいことが示された。その後の実験結果と整合し、ゲージ・ヒッグス統合理論では、5次元目の空間でのアハロノフ・ボーム位相がある程度小さい限り(つまり、0.1より小さいかぎり)全てのヒッグスボゾンの崩壊モードのレートの標準模型からのずれは1%以下になることが示された。

(3) ゲージ・ヒッグス統合理論の予言

$S0(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論はいくつか自由にとれるパラメタがある。にもかかわらず、多くの観測可能な物理量は、理論の詳細によらず、アハロノフ・ボーム位相の値でほぼ決まることが示された。この性質はユニバーサルティ(普遍性)と呼ばれる。何故、ユニバーサルティが成立するのはまだ理解されていない。

例えば、光子やZボゾン、クォークのKK励起モードの質量、クォーク・レプトンの湯川結合の大きさ、ヒッグスボゾンの3点、4点自己相互作用の大きさなどは、すべてアハロノフ・ボーム位相の値でほぼ決まる。位相が0.1より小さいと、湯川結合の標準模型からのずれを実験的に観測するのは難しい。LHC実験で探索可能なのは、光子やZボゾン

の KK 励起モード (Z' と呼ばれる) で、その質量は 6 TeV から 8 TeV の領域に予言される。これが発見されれば、アハロノフ・ボーム位相の値が決まり、他の物理量 (ヒッグスポゾンの 3 点、4 点自己相互作用の大きさなど) に対する予言となる。 Z' 事象の発見は、余剰次元探索の要である。

(4) 暗黒物質

理論の詳細に依存するが、 $SU(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統合理論は暗黒物質の存在を予言する。現在 CMB (宇宙背景マイクロ波) 等の観測データから決められた暗黒物質の残存量を説明し、かつ、暗黒物質直接探索の制限を満たすためには、アハロノフ・ボーム位相の値は 0.07 から 0.1 で、暗黒物質候補となる粒子の質量は 2 TeV から 3 TeV の領域に予言される。現在稼働中の、あるいは次期にプランされている暗黒物質直接探索実験で見つかる可能性がある。

(5) ゲージ・ヒッグス統合の理論的精密化

ゲージ・ヒッグス統合は新しい可能性として理論的にも更なる精密化が必要である。林は、ゲージ・ヒッグス統合理論におけるフレーバ混合の仕組みを明らかにした。世代間での FCNC を自然に抑制するための方法が開発された。また、 $SU(3)$ モデルで、125 GeV というヒッグス質量を古典レベルで再現することが可能であることも示した。

(6) 新分野の創造

ゲージ・ヒッグス統合理論の基礎となるのが細谷機構による対称性の自発的破れである。通常のヒッグス機構とは異なり、純粋なゲージ相互作用の枠内で、力学的に量子論的に、ゲージ対称性が自発的に破れる。このメカニズムは、これまで、摂動論的に確かめられ、ゲージ・ヒッグス統合理論に応用されてきた。

細谷は、この細谷メカニズムによるゲージ対称性の力学的破れを格子ゲージ理論による数値シミュレーションで非摂動論的に検証できることを示した。格子ゲージ理論の専門家との共同事業である。格子 QCD 理論の技術を応用し、スーパーコンピュータを使い、随伴表現のフェルミオンを含む 4 次元の $SU(3)$ ゲージ理論で、温度やフェルミオン質量が変化させ、Polyakov ループの固有値分布を見ることで、 $SU(3)$ ゲージ対称性が $SU(2) \times U(1)$ や、 $U(1) \times U(1)$ 対称性に破れることを示してみせた。

非摂動論的にゲージ対称性の自発的破れを示したことは、将来の物理学に大きな影響を及ぼすものと期待される。また、計算機科学の新しい分野を切り開いたことも貴重である。

(7) インフレーション

標準模型の枠内で、ヒッグス場と重力の間

に新しい結合があれば、プランクスケール近傍でインフレーションが起こりえることを尾田は示した。さらに、超弦理論において、ヒッグス場を弦の無質量モードと固定すると、場の値が大きな領域においては、ヒッグス・ポテンシャルは逃避真空に繋がっていることを示した。その結果、ヒッグス場が永遠のインフレーションの起源となっていることを示した。ヒッグス場の物理がプランクスケールの物理に繋がる事を示したのは非常に興味深い。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 32 件)

(1) Y. Hosotani and N. Yamatsu, Gauge-Higgs grand unification, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 111B01, 1-9. DOI: 10.1093/ptep/ptv153

(2) S. Funatsu, H. Hatanaka and Y. Hosotani, H to Z, γ in the gauge-Higgs unification, Phys. Rev. D 92 (2015) 115003, 1-20. DOI: 10.1103/PhysRevD.92.115003

(3) Y. Hamada, H. Kawai and K. Oda, Eternal Higgs inflation and the cosmological constant problem, Phys. Rev. D 92 (2015) 045009, 1-30. DOI: 10.1103/PhysRevD.92.045009

(4) C.S. Lim, N. Maru and T. Miura, Is the 126 GeV Higgs boson mass calculable in gauge-Higgs unification?, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 043B02, 1-23. DOI: 10.1093/ptep/ptv030

(5) Y. Hamada, H. Kawai, K. Oda and S.C. Park, Higgs inflation from standard model criticality, Phys. Rev. D 91 (2015) 053008, 1-17. DOI: 10.1103/PhysRevD.91.053008

(6) G. Cossu, H. Hatanaka, Y. Hosotani and J. Noaki, Polyakov loops and the Hosotani mechanism on the lattice, Phys. Rev. D 89 (2014) 094509, 1-22. DOI: 10.1103/PhysRevD.89.094509

(7) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Oriyasa and T. Shimotani, LHC signals of the $SU(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Phys. Rev. D 89 (2014) 095019, 1-18. DOI: 10.1103/PhysRevD.89.095019

(8) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Oriyasa and T. Shimotani, Dark matter in the $SU(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Prog. Theor. Exp. Phys., 2014 (2014) 113B01, 1-40. DOI: 10.1093/ptep/ptu146

(9) C.S. Lim, The Higgs particle and higher-dimensional theories, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (2014) 02A101, 1-21. DOI: 10.1093/ptep/ptt083

(10) Y. Hamada, H. Kawai and K. Oda, Minimal Higgs inflation, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (2014) 023B02. DOI: 10.1093/ptep/ptt116

(11) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa and T. Shimotani, Novel universality and Higgs decay $H \rightarrow \gamma\gamma$, $g g$ in the $SU(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Phys. Lett. B 722 (2013) 94-99. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.03.040

(12) H. Hatanaka and Y. Hosotani, SUSY breaking scales in the gauge-Higgs unification, Phys. Lett. B 713 (2012) 481-484. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.06.039

(13) Y. Hosotani, M. Tanaka and N. Uekusa, Collider signatures of the $SU(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Phys. Rev. D 84 (2011) 075014, 1-22.

[学会発表](計57件)

(1) Y. Hosotani, Gauge-Higgs grand unification, PLANCK2015, Ioannina, Greece, 25 - 29 May 2015.

(2) Y. Hosotani, Gauge-Higgs unification from EW to GUT, Scalars 2015, Warsaw, Poland, 3-7 December 2015.

(3) K. Oda, Eternal Higgs inflation, 15th Hellenic School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity, Corfu, Greece, 13-19 September 2015.

(4) Y. Hosotani, Hosotani mechanism and gauge symmetry breaking on the lattice, Summer Institute 2014, 富士吉田, 山梨, 2014年8月21日-28日

(5) C.S. Lim, Higgs mass and anomalous Higgs interactions in gauge-Higgs unification, PLANCK 2014, Paris, France, 26-30 May 2014

(6) Y. Hosotani, $SU(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Scalars 2013, Warsaw, Poland, 12-16 September 2013

(7) Y. Hosotani, 126 GeV Higgs boson and

universality relations in the $SU(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Toyama International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics 2013", 富山, 2013年2月13日-16日

(8) Y. Hosotani, Hosotani mechanism on the lattice, Summer Institute 2012, Sun Moon Lake, Taiwan, 18 - 24 August 2012.

(9) Y. Hosotani, Collider signatures of gauge-Higgs unification, Scalars 2011, Warsaw, Poland, 26 August 2011

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

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

(3) 研究分担者

尾田欣也 (ODA, Kin-ya)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 60442943