

令和元年5月28日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05052

研究課題名(和文) 自発的対称性の破れ、細谷機構のダイナミクス

研究課題名(英文) Dynamics of Spontaneous Symmetry Breaking and the Hosotani Mechanism

研究代表者

細谷 裕 (Hosotani, Yutaka)

大阪大学・理学研究科・招へい研究員

研究者番号：50324744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：力の統合は大きなゲージ対称性を意味するが、同時に低エネルギーに実現する多様な力の形態は、この大きなゲージ対称性が自発的に小さなゲージ対称性に破れる事によって成し遂げられる。素粒子の標準理論ではヒッグス機構により対称性が破られる。本研究では、ヒッグス機構に代わって細谷機構により力学的にゲージ対称性が自発的に破れるゲージヒッグス統合理論を構築した。4次元でみるヒッグス場は、ゲージ場の5次元目成分として出現する。時空の5次元目は高エネルギー加速器(LHC, ILC)で観測できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

力の統合と対称性の自発的破れは表裏一体の関係にある。素粒子の標準理論ではヒッグス機構により対称性が破られる。本研究では、ヒッグス機構に代わって細谷機構により力学的にゲージ対称性が自発的に破れるゲージヒッグス統合理論を構築した。我々の時空は4次元ではなく、5次元目の空間があるとする。細谷機構は高次元空間のゲージ理論における量子効果でゲージ対称性が自発的に破れる。ヒッグスボソンはゲージ場の一部となる。5次元目の存在を近い将来、高エネルギー加速器(LHC, ILC)で観測できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Unification of forces implies large gauge symmetry. This large gauge symmetry must be spontaneously broken to smaller gauge symmetry to produce diverse forms of forces observed in Nature at low energies. In the standard model of elementary particle physics, the symmetry is broken by the Higgs mechanism. In this research project the gauge-Higgs unification theory was constructed, in which the large gauge symmetry is dynamically and spontaneously broken to smaller gauge symmetry by the Hosotani mechanism in place of the Higgs mechanism. The Higgs boson in four dimensions appears as the fifth dimensional component of the gauge fields. The signatures of the fifth dimension in spacetime can be observed in experiments at high energy colliders such as LHC and ILC.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子論 ゲージ理論 余剰次元 細谷機構 対称性の自発的破れ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1983年、細谷(代表者)はゲージ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。余剰次元におけるゲージ不変なアハロノフ・ボーム(AB)位相の力学によるゲージ対称性の自発的破れのメカニズムである。標準理論で適用されているヒッグス機構と異なり、この細谷機構はゲージ原理に支配される。しかし、細谷機構が素粒子の統一理論で実現されているかどうかは定かではない。

2012年素粒子標準理論に必須とされているヒッグス粒子が発見された。それは単に、新粒子の発見というにとどまらず、異なる力(相互作用)が統一されるというシナリオ、考え方、パラダイムが実証されたことを意味する。しかし、その正体は不明である。ヒッグス粒子の存在は力の統一という描像の正しさを意味するが、対称性の自発的破れの機構の精査が重要課題となる。力の統一と対称性の自発的破れは、表裏一体の関係にある。標準理論のヒッグス機構では、相互作用に任意性が生じ、かつ原理が欠落している。この問題は、ゲージ原理に支配された細谷機構により解決される。発見されたヒッグス粒子が、ヒッグス機構を司るスカラー粒子か、或は、細谷機構を司る余剰次元のゲージ粒子であるかを見極めることは極めて重要である。これはまた、余剰次元の存在の正否を決める鍵になる。力の統一のシナリオは電弱相互作用にとどまらない。3つの力のゲージ結合定数の値がエネルギーをあげるとともに近づくという事実は強い力を含む統合を示唆する。この大統一理論にも細谷機構は大きな役割を果たすかもしれない。

2. 研究の目的

統一理論を支える自発的対称性の破れのメカニズムとしての細谷機構を理論的に確立し、自然現象を記述するゲージヒッグス統合理論を打ち立てる。これまで細谷機構は摂動論の枠組みで様々なモデルで正しさが検証されてきた。本研究では、細谷機構を精密化し、ゲージ群、物質場、時空構造、境界条件を特定、自然界の電弱相互作用の統一や強い相互作用をも統一する大統一理論を構築する。特に、低エネルギーでは実験観測と矛盾しないゲージヒッグス電弱統合理論を構成し、今後の高エネルギー加速器実験(LHCやILC)でどのように検証できるかを明らかにする。

3. 研究の方法

まず $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージ・ヒッグス電弱統合理論を確立し、LHCやILCでいかに検証できるかを明らかにする。クォーク、レプトンの他にダークフェルミオンも組み入れる必要がある。 $S_0(5)$ のどの表現に入れるかが鍵となる。ゲージ結合やヒッグス結合を評価する。カルーツァ・クライン(KK)励起モード(5次元目への励起モード)を探り、余剰次元がいかに実験で見えるかを明らかにする。さらに強い相互作用も包含するゲージ・ヒッグス大統一理論の構築する。

4. 研究成果

(1) $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$ 電弱ゲージヒッグス統合モデルで、ヒッグスボソンの光子やZボソンへの1ループ崩壊過程で、無限の数のKK励起モードの寄与を評価し、全て足し合わせると、驚くべき絶妙の相殺があり、無限和が有限になり、かつ、その大きさは微小である。さら

に、クォーク・レプトンのゲージ結合は標準理論のそれとほぼ同じになることを示した。ヒッグス結合は、アハロノフ・ボーム(AB) 位相を θ として $\cos \theta$ だけ小さくなるが、 θ は 0.1 ぐらいで、標準理論からのズレはわずか 1% ぐらいであることが判明した。これらは、現在の実験観測と完全に整合する。

- (2) 強い相互作用も統合する $S_0(11)$ ゲージヒッグス大統一理論を構成した。ゲージ群はほぼユニークに $S_0(11)$ になることを示した。ニュートリノの質量はゲージヒッグス・シーソー機構で自然に微小になる。また、陽子崩壊は自然に抑制されることを予言する。
- (3) ゲージヒッグス統合モデルは KK 励起モードを 7 TeV - 10 TeV 領域に予言する。実験的に最も見つけやすいのは、Z ボゾンや光子の励起モード (Z' 粒子と呼ばれる) である。14 TeV の LHC ではまだ見つかっていない。このことから AB 位相 θ の値は 0.11 より小さいと結論される。将来、高輝度 LHC では電子・陽電子対、あるいは、ミュー粒子・反ミュー粒子対として観測される。
- (4) $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$ 電弱ゲージヒッグス統合モデルでは、クォーク・レプトンと Z' 粒子の結合に大きなパリティの破れが予言される。右巻きのクォーク・レプトンと Z' 粒子の結合は比較的大きく、250 GeV - 500 GeV の電子・陽電子衝突 (ILC) で顕著に観測できる。Z' 粒子は 7 TeV - 10 TeV と重く、ILC では直接生成はエネルギー的に不可能である。しかし、電子・陽電子衝突では中間状態として光子、Z ボゾンを經由する振幅と Z' 粒子を經由する振幅の干渉効果が綺麗に見える。例えば、電子・陽電子からミュー粒子・反ミュー粒子対が生成される過程の衝突断面積、前方後方非対称性に標準理論からの大きなズレが予言される。(図 1) 電子ビームの偏極度によりズレのパターンが大きく変化する。(図 2)

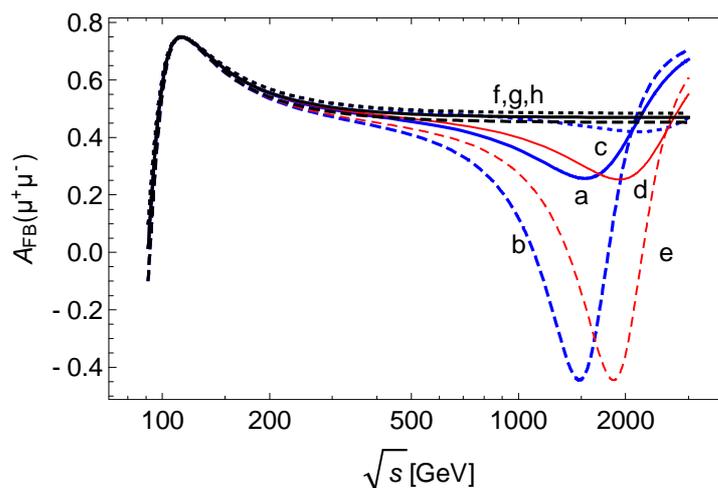


図 1 電子・陽電子衝突での前方後方非対称性: エネルギー依存性. 黒線は標準理論. 青は $\theta \sim 0.091$, 赤は $\theta \sim 0.074$ の場合. 実線は電子ビームの偏極度が 0, 点線は +0.877 の場合。

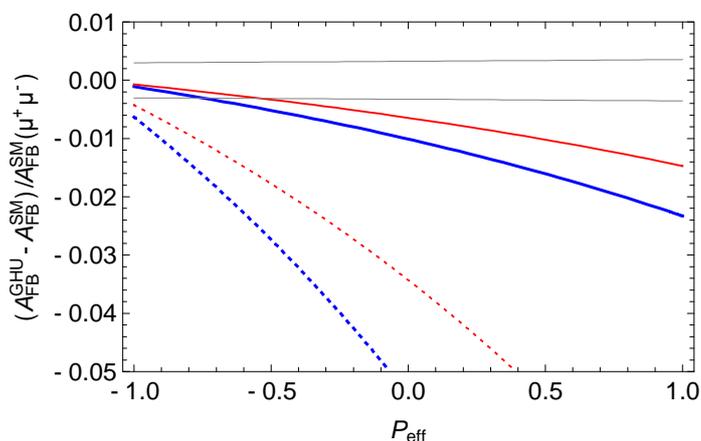


図2 電子・陽電子衝突での前方後方非対称性の偏極度依存性. 標準理論からのズレを表す。青は $\theta \sim 0.091$, 赤は $\theta \sim 0.074$ の場合。実線は 250 GeV, 点線は 500 GeV の場合。灰色のバンドは、ILC のエネルギーが 250 GeV で、 250 fb^{-1} のデータを取ったときの統計誤差を表す。ILC の初期の段階でゲージヒッグス統合の予言を検証できる。

- (5) $S_0(11)$ ゲージヒッグス大統一理論に埋め込み可能な新しい $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$ 電弱ゲージヒッグス統合モデルを構成した。クォーク・レプトンの導入方法が以前のモデルと異なる。新モデルでは、ブレン上での相互作用も含めて $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$ ゲージ対称性が維持され、より予言能力が高くなっている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 11 件)

- (1) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, N. Yamatsu, GUT inspired $S_0(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification, Phys.Rev. D99 (2019) no.9, 095010 (査読有)
DOI: [10.1103/PhysRevD.99.095010](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.095010)
- (2) Y. Hosotani and N. Yamatsu, Gauge-Higgs seesaw mechanism in 6-dimensional grand unification, PTEP2017 (2017) no.9, 091B01 (査読有) DOI: [10.1093/ptep/ptx124](https://doi.org/10.1093/ptep/ptx124)
- (3) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, Distinct signals of the gauge-Higgs unification in electron-positron collider experiments, Phys.Lett. B775 (2017) 297-302 (査読有) DOI: [10.1016/j.physletb.2017.10.068](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.10.068)
- (4) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, Collider signals of W' and Z' bosons in the gauge-Higgs unification, Phys.Rev. D95 (2017) no.3, 035032 (査読有)
DOI: [10.1103/PhysRevD.95.035032](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.035032)
- (5) A. Furui, Y. Hosotani, and N. Yamatsu, Toward realistic gauge-Higgs grand unification, PTEP 2016 (2016) no.9, 093B01 (査読有) DOI: [10.1093/ptep/ptw116](https://doi.org/10.1093/ptep/ptw116)
- (6) Y. Hosotani and N. Yamatsu, Gauge-Higgs grand unification, PTEP 2015 (2015) 111B01 (査読有) DOI: [10.1093/ptep/ptv153](https://doi.org/10.1093/ptep/ptv153)
- (7) S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, T. Shimotani, LHC signals of the $S_0(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification, Phys.Rev. D89 (2014) no.9, 095019 (査読有)
DOI: [10.1103/PhysRevD.89.095019](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.095019)

〔学会発表〕（計 28 件）

- (1) Y. Hosotani, Signals of gauge-Higgs unification at 250 GeV ILC, Asian Linear Collider Workshop 2018, 2018.
- (2) Y. Hosotani, Gauge-Higgs unification at e^+e^- linear colliders, Corfu Summer Institute, Greece, 2018.
- (3) 細谷 裕, ILC によるゲージヒッグス統一理論の検証(シンポジウム:新物理学探究における ILC の意義), 日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年)
- (4) Y. Hosotani, Distinct signals of the gauge-Higgs unification in e^+e^- collider experiments, 2017 American Workshop on Linear Colliders, USA, 2017.
- (5) Y. Hosotani, Gauge-Higgs unification: distinct signals at LHC and ILC, Scalars 2017, Poland, 2017.
- (6) Y. Hosotani, Unification of gauge fields and Higgs field, PLANCK 2016, Spain, 2016.
- (7) Y. Hosotani, Gauge-Higgs unification - LHC and beyond -, NCTS Annual Theory Meeting 2016, Taiwan, 2016
- (8) Y. Hosotani, Gauge-Higgs Grand Unification, PLANCK 2015, Greece, 2015.
- (9) Y. Hosotani, Gauge-Higgs Unification from EW to GUT, Scalars 2015, Poland, 2015.

〔図書〕（計 1 件）

細谷 裕, ゲージヒッグス統合理論 - 素粒子標準理論のその先へ, サイエンス社, (2018 年 10 月 25 日, 208 ページ)