

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 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：37409

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540285

研究課題名（和文）高次元ゲージ理論に基づく素粒子理論の構築

研究課題名（英文）Elementary particle physics based on higher dimensional gauge theory

研究代表者 竹永 和典

（TAKENAGA KAZUNORI）

熊本保健科学大学・保健科学部・准教授

研究者番号：50379294

研究成果の概要（和文）：標準理論のヒッグス（Higgs）粒子にまつわる問題点を解決する魅力的な可能性の候補が高次元ゲージ理論、特に、ゲージヒッグス統一機構である。本研究では、高次元ゲージ理論のダイナミクスを摂動、非摂動的な観点から明らかにした。特に、有限温度相転移に関して、予想しなかった新しい結果、高温でのゲージ対称性の破れ、を得ることができた。また、格子化された時空上で高次元ゲージ理論を定義して、非摂動的な手法を用いて研究した。その結果、理論に新しい対称性（串刺し対称性）が存在することを発見し、その対称性は、低エネルギー有効作用の構築、数値シミュレーションに重要な役割を果たすことがわかった。更には、ゲージヒッグス統一機構の大統一理論への応用も議論した。

研究成果の概要（英文）：Higher dimensional gauge theory, namely the gauge-Higgs unification is an attractive candidate for solving the problem related to the Higgs particle in the standard model. In this research we studied the dynamics possessed by the higher dimensional gauge theory both from a perturbative and nonperturbative point of view. In particular, we obtained the unexpected result that gauge symmetry can be broken even at high temperature. We studied higher dimensional gauge theory on lattice and found the new symmetry called stick symmetry in the theory, which plays an important role to construct low-energy effective theory and to perform numerical simulation. Moreover, we also discussed the application of the gauge-Higgs unification to grand unified theory.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：高次元ゲージ理論、余剰次元、ゲージヒッグス統一機構、有限温度、格子理論

1. 研究開始当初の背景

我々が手にしている素粒子の基礎理論である標準理論は、約30年近くにわたって精密実験の検証に耐えてきました。しかし、標

準理論にはヒッグス相互作用を制御する対称性の欠如のため、その相互作用や質量を予言することはできません。そして、その欠如がゲージ階層性問題の起因と考えられてき

ました。

ヒッグス相互作用を制御する対称性として、超対称性ではなく、高次元ゲージ対称性を用いる企画的な試みが始まり、中でも、ゲージヒッグス統一機構は標準理論の困難を克服する魅力的なアイデアと考えられ、その機構の持つ基本的な性質が調べられ、徐々に明らかにされてきました。

その結果、この機構の枠組みは、ゲージ階層性問題に対する有望なアプローチになり得ること、オービフォールド化された余剰次元の場合は、標準理論のヒッグス機構に代わってゲージ対称性の破れを引き起こす機構になり得ることが研究者の間で定着していました。そして、この機構に基づいた真に現実的な模型構築へ向けた研究が、様々な方向から進められていました。

2. 研究の目的

(1) このような基本的な成果をふまえて、本研究では、ゲージヒッグス統一機構のダイナミクスを解明して、宇宙論に関係した物理から電弱スケールの物理を、この機構の描像に基づいて構築することを目的にしました。

(2) 具体的には、宇宙のバリオン数生成といった宇宙論への応用を念頭に置き、ゲージヒッグス統一機構の有限温度のもとでのダイナミクスを解明することから、本研究を開始しました。

(3) その後、この機構が持つと期待される非摂動的なダイナミクスを明らかにするという観点から、格子化された時空上で高次元ゲージ理論を定義し、数値シミュレーションを用いた研究を行い、非摂動的に物理的パラメータを決定することを目的にしました。

(4) 重力理論の繰り込み可能性として、高階微分が重要な役割を果たすことが指摘されたのを受け、高階微分がゲージヒッグス統一機構に与える影響を研究することが目的に追加されました。

(5) 大統一理論のゲージ対称性をゲージヒッグス統一機構で破り、かつ、カイラルフェルミオンを含む模型を構築するという新しい試みも目的としました。この研究はその視点の新しさから、大変興味深い研究と考えられます。

3. 研究の方法

(1) 有限温度のもとでのゲージヒッグス統一機構の振る舞いを明らかにする研究では、今までに研究代表者が行ってきた研究の成

果、例えば、Phys. Rev. D72, (2005)046003、Phys. Rev. D74(2006)015017、を応用し、物質場を含んだ、より一般の場合の有効ポテンシャルを調べることで、有限温度でのゲージ対称性の破れ、回復や有限温度相転移の次数を研究しました。

(2) 格子化された時空上でゲージヒッグス統一機構を研究することは、その機構の非摂動的な側面を研究することになり、摂動論に基づく従来の研究では決して得られなかったダイナミクスを明らかにできる可能性があります。S¹/Z₂にオービフォールド化された余剰次元を持つ、物質場を含まない、最も簡単な5次元SU(2)ゲージ理論を出発点にします。物理としての主なターゲットは、ゲージ対称性の破れの有無を確認すること、ヒッグス質量の有限性の確認と、その値を求めることです。この研究目的を遂行するにあたり、研究分担者の宗博人氏(愛媛大学・理工学部・教授)と研究協力者の石山浩平氏(当時、新潟大学大学院 自然科学研究科 博士課程2年)に研究を分担して頂きました。宗氏は格子化された高次元ゲージ理論とその数値シミュレーションの研究に関して、重要な業績を上げている研究者です。研究代表者の高次元ゲージ理論に関する知識、理解を結びつけ、研究を行いました。

(3) 物質場の運動項が高階微分を含む場合のゲージヒッグス統一機構の研究では、研究の重要な手段となる有効ポテンシャルを計算するための数学的手法の整備、開発を行うことから研究を始めて、最終的には、高階微分が、ゲージ対称性の破れのパターン、ヒッグス粒子の質量、相転移の次数に与える影響を研究しました。

(4) 大統一理論のゲージ対称性の破れをゲージヒッグス統一機構で行い、カイラルフェルミオンも含む模型の構築は、新しい視点に立った大統一理論の構築であり、大変、価値の高い研究であると言えます。場の境界条件の設定から、力学的なゼロモードを抜き出し、それに対する有効ポテンシャルを求め、大統一理論のゲージ対称性を破るパターンが含まれるかどうかを調べます。そして、望ましい模型を選定した後、その模型が持つ陽子崩壊といった、所謂、大統一理論が持つとされる一般的な特徴を調べます。この研究では、研究協力者の山下敏史氏(当時、名古屋大学大学院理学研究科、日本学術振興会特別研究員)と協力し(および、他一名)、山下氏の大統一理論に関する理解、知識、経験を本研究課題に結びつけることで、研究を行いました。

4 研究成果

(1) 2007, 2008 年度で有限温度での高次元ゲージ理論の解析を行いました。2009 年度はそれをさらに発展させた研究を行いました。物質場を含む高次元ゲージ理論の有効ポテンシャルをワイループ近似で求めました。さらにその表式を3つの異なる形に表すことに成功しました。それらは、低温近似、高温近似、数値解析に適した形をしています。これらを利用して、解析した結果、高温ではフェルミオンの寄与が無くなり、予想に反して、高温でもゲージ対称性が回復しない場合があること、高温でもゲージ対称性が破れる場合があることを明らかにしました。

(2) さらに、我々は、物質場の運動項が高階微分を含むゲージ理論（リフシッツ型ゲージ理論）におけるゲージヒッグス統一機構を研究しました。高階微分を含む場合の有効ポテンシャルを評価する数学的手法の開発、整備を行うとともに、相転移の次数、ヒッグス質量の大きさを求めました。その結果、高階微分の存在は、真空の構造、すなわち、ゲージ対称性の破れのパターンを劇的に変化させること、重いヒッグス質量を帰結することを初めて示しました。

(3) ゲージヒッグス統一機構では、Wilson ライン位相を通じたダイナミクスがその機構の本質的な部分を担っています。その機構は、非摂動的にも豊富なダイナミクスを含んでいることが期待されています。我々は、オービフォルド化された余剰次元を持つ時空を格子化した上で高次元ゲージ理論を定義して、非摂動的なダイナミクスの解明を目指しました。その結果、格子化された時空上では、理論に新しい対称性が存在することを発見し、「串刺し対称性 (stick symmetry)」と名付けました。更に、この対称性に対する良いオーダーパラメータを定義して、その振る舞いを数値的に明らかにしました。また、この対称性は理論の低エネルギー有効作用を構築する際に重要な役割を果たすことも分かりました。この研究により、ゲージヒッグス統一機構の数値シミュレーションへ向けた基礎を築き、その第一歩を踏み出したと言えます。

(4) 大統一理論のゲージ対称性を、ゲージヒッグ統一機構で破り、かつ、カイラルフェルミオンが存在できるモデルの構築を研究しました。弦理論でよく知られた「対角化埋め込み」の手法が、高次元ゲージ理論にも適用可能なことがわかりました。それにより、ゲージ群のもとで随伴表現に属するスカラー場を、力学的ゼロモード、すなわち、ゲージポテンシャルの余剰次元方向の成分ゲージ

場として取り出すことができ、ミニマルなモデルを構築することに成功しました。具体例として、大統一理論のゲージ群が $SU(5)$ の場合に有効ポテンシャルを計算し、標準理論のゲージ群は大域的真空であることを示しました。この研究により、対角化埋め込みの手法を用いないモデルの構築方法に対しても、手掛かりが得られました。

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 5 件)

① Hisaki Hatanaka, Makoto Sakamoto and Kazunori Takenaga, Gauge-Higgs unification in Lifshitz-type gauge theory, Physical Review D84, 025018-1-15 (2011)、査読有

② Kentaro Kojima, Kazunori Takenaga and Toshifumi Yamashita, Grand gauge-Higgs unification, Physical Review D84, 051701-1-4, (2011)、査読有

③ Kouhei Ishiyama, Michika Murata, Hiroto So and Kazunori Takenaga, Symmetry and Z_2 -Orbifolding Approach in Five-Dimensional Lattice Gauge Theory, Progress of Theoretical Physics, 123, 257-269 (2010)、査読有

④ Michika Murata, Hiroto So and Kazunori Takenaga, 5-dimensional $SU(2)$ lattice gauge theory with Z_2 orbifolding and its phase structure, in PoS LATTICE2010(2010)266, arXiv:0911.4555, 査読無

⑤ Makoto Sakamoto and Kazunori Takenaga, High temperature symmetry nonrestoration and inverse symmetry breaking on extra dimensions, Physical Review D80, 085016-1-11 (2009)、査読有

[学会発表] (計 6 件)

① 小島健太郎、竹永和典、山下敏史、Grand gauge-Higgs unification、日本物理学会、2011 年 9 月 17 日、弘前大学

② Kazunori Takenaga, Gauge-Higgs unification in Lifshitz-type gauge theory, String Theory 2011、2011 年 9 月 7 日、Padova, Italy

③ Hiroto So, 5-dimensional $SU(2)$ lattice

gauge theory with Z_2 orbifolding and its phase structure, The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, 2010年6月14日、Sardinia, Italy

④ 石山浩平、 Z_2 オービフォルド化された5次元格子ゲージ理論の対称性と有効理論、日本物理学会、2010年3月21日、岡山大学

⑤ 竹永和典、High temperature inverse symmetry breaking and symmetry non-restoration with extra dimensions、日本物理学会、2009年9月11日、甲南大学

⑥ 石山浩平、Orbifolding approach to 5-dimensional lattice gauge theory、日本物理学会、2009年9月10日、甲南大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹永 和典 (TAKENAGA KAZUNORI)
熊本保健科学大学・保健科学部・准教授
研究者番号：50379294

(2) 研究分担者

宗 博人 (SO HIROTO)
愛媛大学・理工学研究科・教授
研究者番号：20196992