

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：37409

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540291

研究課題名(和文) ゲージヒッグス統一機構の大統一理論への応用とダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Grand gauge-Higgs unification and its dynamics

研究代表者

竹永 和典 (TAKENAGA, KAZUNORI)

熊本保健科学大学・保健科学部・教授

研究者番号：50379294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：標準理論を超える物理を考える上で有望なアイデアがゲージヒッグス統一機構で、この機構を持つ現実的モデルを構築するには、そのダイナミクスを明らかにすることが重要です。カットオフを導入したゲージヒッグス統一機構の有効ポテンシャルを研究し、兼ね合いパラメーターという量を定義することで、カルーザクラインモードの寄与とヒッグス質量の大きさの関係を明らかにした。さらに、発見されたヒッグス粒子と余剰次元との関連も議論した。また、有限温度理論とゲージヒッグス統一機構のポテンシャルの数学的類似性から、オーダーパラメーターを正しく取り込んで、標準理論の有限温度相構造を研究した。新しい相構造は存在しなかった。

研究成果の概要(英文)：Gauge-Higgs unification (GHU) is one of the attractive ideas for physics beyond the standard model. It is important to understand the dynamics for realistic applications. We study the effective potential of the GHU by introducing a cutoff for the fifth direction of the space time. In doing it, we define an important parameter called interrelation, by which we can clarify how much the Kaluza-Klein modes contribute to the Higgs boson mass. We also discuss the implication of the discovered Higgs boson on physics with extra dimensions. The effective potential at the finite temperature and the one with the GHU share the same mathematical structure. We correctly take into account the order parameters in the standard model, and study the phase structure at finite temperature. We do not find new phases for which the new order parameters take nonvanishing vacuum expectation values.

研究分野：数物系科学(素粒子理論)

キーワード：ゲージヒッグス統一機構 余剰次元 高次元ゲージ理論 有限温度 大統一理論

1. 研究開始当初の背景

現在、我々が手にしている素粒子の標準理論は、約 30 年近くにわたって精密実験による検証に耐えてきており、2012 年にヒッグス粒子が発見されたことで、一応の完成を見たと言えます。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に、その質量や相互作用を予言することはできず、これらは標準理論の潜在的な欠陥と考えられています。さらに、その対称性の欠如は、素粒子理論の長年の問題であるゲージ階層性問題の原因として捉えることもできます。

1990 年代後半から、高次元ゲージ理論が、ヒッグス相互作用を制御する対称性として注目され始め、中でも、高次元ゲージ理論を理論的な枠組みとするゲージヒッグス統一機構は標準理論の困難を克服できる魅力的な可能性として、精力的に研究されてきました。特に、オービフォールド化された余剰次元を持つ 5 次元ゲージ理論は、様々な方向から研究され、標準理論のヒッグス機構に替わる魅力的な可能性として認識されました。

このような状況の下で、オービフォールド化された余剰次元を考えることで、 S^1 コンパクト化では困難であったカイラルフェルミオンの存在の問題が解決できるため、もともとのゲージヒッグス統一機構の動機であった、ゲージヒッグス統一機構を持つ大統一理論の構築が現実味を帯びてきました。

2. 研究の目的

(1) ゲージヒッグス統一機構を持ち、低エネルギーでカイラルフェルミオンを持ち、さらに、標準理論のゲージ群にダイナミカルに破れる大統一理論を構築することを目的としました。

(2) ゲージヒッグス統一機構は高次元ゲージ理論と現実の 4 次元ゲージ理論が関係していますが、その兼ね合いを、4 次元の物理量、特にヒッグス質量を通じて定量的に表し、明らかにすることを目的としました。

(3) 有限温度の場の理論の有効ポテンシャルとゲージヒッグス統一機構の有効ポテンシャルには数学的な類似性が存在します。このことを念頭に置き、オーダーパラメータを正しく取り込んで、有限温度のもとの標準理論の相構造を研究し、新しい相構造を探ることを研究目的としました。

3. 研究の方法

(1) 5 次元ゲージ理論をオービフォールドコンパクト化した時空から出発します。標準理論のゲージ群を含み、かつ、ゲージヒッ

ス統一機構が機能すると予想されるゲージ群として E_6 群を選びます。適切な境界条件のもとで E_6 群を $SU(5)$ を持つ大統一群に破り、その後は、輻射補正の効果で大統一ゲージ群を破り、標準理論のゲージ群を得るシナリオを考えます。その際、物質場の構成を適切にとり、有効ポテンシャルを最小化する配位を調べることで、このシナリオが機能するかどうかを確認します。また、より現実的には、グリーン・シュワルツ機構を考慮に入れなければならない、このため質量スペクトルの歪みが生じ、有効ポテンシャルに修正が加えられることが予想されます。この点も考慮して、真空を探すこととなります。

(2) ゲージヒッグス統一機構において有効ポテンシャルの計算は真空やヒッグス質量を決定する役割を持つ重要な量です。4 次元の物理に 5 次元の物理がどのように効いているかを明確にするために、4 次元のゲージ不変性を壊すことなく、5 次元方向にカットオフを入れて有効ポテンシャルの計算を行います。この時、4 次元と 5 次元の物理の兼ね合いを表すパラメータを定義することができ、当初の研究目的を確実に行うことができます。

(3) ユークリッド時間形式に基づく有限温度の場の理論形式でゲージ理論を考察する場合、ユークリッド時間方向の成分ゲージ場はゲージ変換で取り除くことのできない、力学的自由度になり、その結果、真空期待値を持つことが可能になり、その値によっては、ゲージ対称性が破れことがあります。この事情はゲージヒッグス統一機構におけるゲージ対称性の破れと本質的に同じ効果です。ユークリッド時間方向がコンパクト化された次元の方向とみなせば、有効ポテンシャルを持つ数学的構造に関して、両者は同じものになります。この点を念頭に置いて、有限温度下での標準理論の有効ポテンシャルを評価するに際し、正しくオーダーパラメータを取り込むことで、新しい相構造を発見できる可能性が出てきました。

4. 研究成果

(1) 適切な物質場を考えることで大統一理論のゲージ対称性が標準理論のゲージ対称性へ壊れる模型を見つけることができました。我々の模型では、flipped $SU(5)$ タイプの大統一理論になっている点が特徴的といえます。また、グリーン・シュワルツ機構によって、質量スペクトルが歪んだ効果も取り入れた研究も行い、この場合でも標準理論のゲージ対称性への破れを起こす模型を見つけることができました。ここでの研究成果をもとにして、この模型が加速器実験で検証可能であるか否かを議論することができ、興味深いと言えます。また、4 次元の標準的な

大統一理論、例えば SU(5)大統一理論、との比較も可能になり、陽子崩壊などの実験とも関係して、新しい物理の探索も可能になります。

(2)

5次元方向のカットオフと余剰次元のサイズを用いて定義された、兼ね合いを表すパラメーターにより、4次元の低エネルギーでの物理を決定するのに、5次元の物理、すなわち、カルーザクラインモードがどのように効いているかを明らかにすることができました。ヒッグス質量に対しては、カットオフが大きくなるにつれて、カルーザクラインモードの励起が数多くなり、そのため、より重い質量のヒッグス粒子を帰結することがわかりました。ここでの成果、特に、兼ね合いパラメーターによる4次元の物理の記述は、非摂動的にゲージヒッグス統一機構を研究する際に有用であると期待され、格子化された時空上でのゲージヒッグス統一機構の研究に向けて興味深い可能性を開いたと言えます。

(3) オーダーパラメーターを正しく取り込んだ上で、有限温度下での標準理論の相構造を研究しました。今までは考慮されなかった新しいオーダーパラメーターは3個存在することがわかり、いずれも、ユークリッド時間方向の成分ゲージ場由来のもので、摂動のワンループ近似での有効ポテンシャルを評価して真空を求めました。これらの新しい3個のオーダーパラメーターが非自明な真空期待値をとる相は存在しないことが示せました。この研究により、標準理論を拡張した超対称性標準理論などを有限温度のもとで考える際に、ヒッグス場の真空期待値のみならず、ユークリッド時間方向の成分ゲージ場をオーダーパラメーターとして考慮しなければならないということを確認したと言えます。この点は今までの研究では全く考慮されていないため、今後、さらなる研究が必要になります。また、宇宙の進化を考える際に、有限温度での相構造は避けて通ることができないため、今後、宇宙論との関わりも研究テーマとして視野に入ってきました。

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 2件)

Makoto Sakamoto, Kazunori Takenaga,
Standard model with new order parameters at finite temperature,
Physical Review D89 (2014) 105032-1-20,
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.105032,
査読有。

Hiroto So, Kazunori Takenaga,
Is the Higgs boson a sign of extra dimensions? ,
Physical Review D88 (2013) 016001-1-9,
DOI:10.1103/PhysRevD.88.016001,
査読有。

[学会発表](計 8件)

竹永和典,
有限温度での標準理論の新しい相の可能性、
日本物理学会、2014年3月27日~30日、
東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

小島健太郎,
高次元ゲージ理論による E₆ 対称性の自発的な破れと大統一理論、日本物理学会、2014年3月27日~30日、
東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

竹永和典,
ゲージヒッグス統一機構と兼ね合いパラメーター、日本物理学会、2013年9月20日~23日、高知大学朝倉キャンパス(高知市)

山下敏史,
Grand gauge-Higgs unification and its Higgs sector、Higgs as a probe of new physics 2015、2015年2月11日~15日、
富山大学(富山市)

山下敏史,
Grand gauge-Higgs unification and its Higgs sector、12th regular meeting of the new Higgs working group、2015年1月10日~11日、富山大学(富山市)

山下敏史,
E₆ orbifold GUT with gauge-Higgs unification、素粒子物理学の発展 2013、2013年8月5日~9日、京都大学基礎物理学研究所(京都市)

山下敏史,
Grand unified theory and Higgs physics、Higgs as a probe of new physics 2013、2013年2月13日~16日、富山大学(富山市)

山下敏史,
E₆ orbifold GUT with gauge-Higgs unification、Summer Institute 2012、2012年8月18日~24日、Sun Moon Lake, Taiwan

[図書](計 0件)

[産業財産権]
出願状況(計 0件)

名称:
発明者:

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

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・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

山下 敏史 (YAMASHITA, Toshifumi)
愛知医科大学・医学部・講師
研究者番号：90622671

小島 健太郎 (KOJIMA, Kentaro)
九州大学・学内共同利用施設等・准教授
研究者番号：20525456

(3) 連携研究者

()

研究者番号：