

## 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5月27日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740187

研究課題名（和文） 余剰次元模型における対称性の破れに関する研究

研究課題名（英文） Research on symmetry breaking in extra-dimensional models

研究代表者

阪村 豊 (SAKAMURA YUTAKA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：90525552

研究成果の概要（和文）：素粒子物理の標準模型を超える新理論の候補として余剰次元模型に着目し、特に対称性の破れに関する研究を行った。具体的にはゲージヒッグス統合模型において電弱対称性の破れに関係するヒッグス粒子と余剰次元の安定化に関係する粒子の間の関係を明らかにし、それぞれの質量を見積もった。また、5次元超重力理論の理論的定式化の整備も行った。これにより複雑な理論の取り扱いが容易になり、新理論の模型構築を見通し良く行うことが可能となった。

研究成果の概要（英文）：I investigated models with extra dimensions as a candidate for the theory beyond the standard model in particle physics. Especially, I focus on the breaking of the electroweak gauge symmetry and the supersymmetry. For the former, I clarified the relation between the Higgs particle and the radion, which is a particle related to the stabilization of the extra dimension, in the context of the gauge-Higgs unification models. For the latter, I developed useful formulation of five-dimensional supergravity. This makes it possible to discuss various models based on the five-dimensional supergravity much easier.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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)

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理の標準模型は100GeV以下の現象をよく記述している一方で、幾つかの理論的問題点を抱えている為に最終理論とは考えられていない。その為それらの問題点を解決する標準模型を超える理論の存在が期待されており、これまでに超対称性理論、強結

合ゲージ理論、余剰次元理論等の様々な模型が提唱されている。その中で高次元理論に基づいた余剰次元理論は、我々の観測する4次元時空以外に余剰の空間次元が存在するというアイデアに基づく理論で、これまでに多くの研究がなされている。余剰次元の存在は最終理論の有力候補である超弦理論におい

でも示唆されており、理論的観点からも興味深い研究対象である。一方で現象論的観点からも従来の4次元理論の枠組みでは考えられないような機構によって標準模型の問題点を解決する可能性を持っており、模型の検証可能性も含めて活発に研究が行われている。その一方で、未だ調べられていない余剰次元模型特有の性質も多く残されている。

## 2. 研究の目的

素粒子標準模型を超える理論の候補として余剰次元模型に着目し、特に対称性の破れという観点から余剰次元模型特有の性質についての理解を深めることを目標とする。この研究で得られた知見は現象論的模型構築を通じた新物理の特定に貢献することが期待される。

ここでは対称性の破れが余剰次元空間の存在に起因するような場合を考える。この場合、模型は既存の4次元理論にはない特徴的な性質を持つ為、余剰次元模型特有の性質を反映させるような現象論的予言を導き出すことにより余剰次元の検証に役立てることができる。具体的には超対称性及び電弱対称性の破れを中心に研究を行う。

超対称性は余剰次元と共に超弦理論からもその存在が示唆されており、理論の無矛盾性にも大きな役割を担っている。一方で超対称粒子は現実には観測されていない為、超対称性は自発的に破れていなければならない。しかし4次元理論の枠組みで自発的超対称性の破れを起こすことは容易ではない。余剰次元が存在すると余剰次元方向の境界条件により、超対称性を容易に破ることが出来る。

電弱対称性の破れの起源は未だ解明されておらず、多くの破れの機構が考えられている。余剰次元模型では上記の超対称性と同様に余剰次元方向の境界条件によって電弱対称性の破れを引き起こすことが出来、模型構築に新たな可能性を加えることになる。

これら余剰次元特有の対称性の破れの機構を用いて現実的な模型を構築した場合、その痕跡が4次元有効理論に何らかの形で現れると予想される。そのような特徴を把握することは標準模型を超える理論の特定に大きく貢献する。本研究ではそれらの特徴についての理解を深めることを目的とした。

## 3. 研究の方法

主に5次元理論に着目し、ゲージヒッグス統合模型や超重力理論について余剰次元の安定化に関する研究や模型構築の為の定式化を行う。

一般に余剰次元模型を考える場合、余剰次元空間の大きさや形に対応するモジュライと呼ばれるスカラー場の真空期待値を有限な値に安定化させる機構が必要になる。一方

で現実的な超対称模型の構築の為には超対称性を破る機構及びその破れを我々の世界に伝える機構も必要である。これまでに行われてきた多くの研究からこれらの機構は密接に関係していることが分かっている。そこで私は様々な超対称余剰次元模型においてモジュライの安定化機構を詳細に調べ、安定化機構と超対称性の破れの関係を明確にして現象論的模型構築の足掛かりを築くと同時に、実験で観測できる各模型に特徴的なシグナルを見出して標準模型を超える物理の特定に役立てることを計画した。この計画ではモジュライを正しく扱う為には超重力理論の枠組みで考えなければならない。しかし一般に高次元超重力理論は複雑で計算も煩雑になる為、従来の多くの研究では超重力理論の観点から見ると非常に限られた場合のみ議論されてきた。私は自身が開発した5次元超重力理論の有効理論を導出する系統的な方法を用いて、一般的な5次元超重力理論の枠組みで現象論的模型構築を行うことを目指した。

上記のような超対称的な模型とは別に、高次元ゲージ対称性を用いることで電弱対称性の破れのスケールの量子補正の下での安定性を保証するゲージヒッグス統合模型も標準模型を超える物理の興味深い候補である。この模型を重力理論の枠組みで考えた場合、モジュライを有限な値に安定化させる機構が必要になる。そのような機構の1つに5次元場の1ループ量子補正により誘起されたスカラーポテンシャルによる安定化機構がある。これは余剰次元空間におけるカシミア効果を利用したものであり、余剰次元の安定化の為に余分な場を導入する必要がないという利点を持つ。この場合、ヒッグス場の真空期待値を決めるスカラーポテンシャルがモジュライにも異存することになり、電弱対称性の破れと余剰次元の安定化が関係付くことになる。そこでモジュライの安定化機構が電弱対称性の破れに及ぼす影響についても調べることを計画した。具体的な方法は標準的な方法で1ループヒッグスポテンシャルを求める際に余剰次元の大きさ(radion)も力学的自由度として扱うことにより、ヒッグスとradionの2つの場についてのポテンシャルを求め、その停留値条件から2つの場の混合と質量固有値を見積もる。これらの情報からゲージヒッグス統合模型が標準模型を超える理論だった場合に余剰次元の大きさがどのように決定されるのかについて重要な情報が得られることになる。

## 4. 研究成果

5次元ゲージヒッグス統合模型において、電弱対称性の破れに関係するヒッグス粒子と余剰次元の安定化に関係する粒子

(radion)の間の相互関係を明らかにし、それぞれの質量や粒子間の混合を見積もった。余剰次元の大きさが5次元場の量子効果によって実現している場合には、これらの粒子がほとんど混合せず、radionはヒッグス粒子に比べてずっと軽いことが分かった。これらの結果は現実的なゲージヒッグス統合模型について強い制限を与えることになる。

超対称性の破れに関しては、5次元超重力理論に基づいて現象論的模型構築を行った。特にこれまであまり調べられていなかったモジュライが複数ある場合について4次元低エネルギー理論を正確に導出し、超対称フレーバー問題を回避できる新たな可能性を具体的に示した。またいくつかの典型的な場合に超対称粒子の質量スペクトルやヒッグス粒子の質量を実際に求め、この枠組みで既存の実験結果と無矛盾な現実的な模型を構築できることを実証した。この研究結果により、従来扱われていた5次元超重力理論をより一般的な枠組みで考える重要性が再認識された。

このことを動機として複数のモジュライを含んだオービフォールド上にコンパクト化された一般的な5次元超重力理論における量子補正も議論した。この量子効果は超対称性の破れの伝搬や余剰次元の安定化において本質的な役割を担う為、それらを正確に評価することは極めて重要である。そのような量子補正の計算を見通し良く行うにはN=1超場形式が有用である。そこで私はまず4次元超場形式を一般的な4次元超重力理論の超共形定式化に対して適用できるように両形式間の相互関係を明らかにし、その情報を元に一般的な5次元超重力理論をN=1超場を用いて記述する方法を開発した。その上でその方法を用いて一般的な5次元超重力理論の4次元有効理論における1ループ量子補正を系統的に求めることに成功した。この結果は従来のものを複数のモジュライを含んだ場合に拡張したものであり、より一般的な枠組みで模型構築を行い、模型特有の性質を抽出する際に大変有用である。

## 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6件)

① Yutaka Sakamura, “One-loop Kaehler potential in 5D gauged supergravity with generic prepotential”, Nuclear Physics B873 (2013年) 165, 査読有 (DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2013.04.013)

② Yutaka Sakamura, “Superfield

description of gravitational couplings in generic 5D supergravity”, Journal of High Energy Physics 1207 (2012年) 183, 査読有 (DOI: 10.1007/JHEP07(2012)183)

③ Hiroyuki Abe, Hajime Otsuka, Yutaka Sakamura, Yusuke Yamada, “SUSY flavor structure of generic 5D supergravity models”, The European Physical Journal C72 (2012年) 2018, 査読有 (DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-2018-x)

④ Yutaka Sakamura, “Direct relation of linearized supergravity to superconformal formulation” Journal of High Energy Physics 1112 (2011年) 008, 査読有 (DOI: 10.1007/JHEP12(2011)008)

⑤ Yutaka Sakamura, “Radion and Higgs masses in gauge-Higgs unification”, Physical Review D83 (2011年) 036007, 査読有 (DOI: 10.1103/PhysRevD.83.036007)

⑥ Nobuhito Maru, Yutaka Sakamura, “Modulus stabilization and IR-brane kinetic terms in gauge-Higgs unification”, Journal of High Energy Physics 1004 (2010年) 100, 査読有 (DOI: 10.1007/JHEP04(2010)100)

[学会発表] (計8件)

① 阪村豊, 「5次元超重力模型の有効Kaehlerポテンシャルに対する量子補正」、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月27日、広島大学東広島キャンパス

② 阪村豊, 「5次元超重力模型におけるカシミア効果とモジュライの安定化」、日本物理学会2012年秋季大会、2012年9月11日、京都産業大学

③ 阪村豊, 「5次元超重力理論のN=1超場による記述」、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス

④ 阪村豊, 「線形化超重力理論と超共形式化の関係」、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月16日、弘前大学文京町キャンパス

⑤ 阪村豊, 「Linearized supergravity and superconformal formulation」、SUSY2011、2011年8月28日、Fermilab (アメリカ)

⑥ 阪村豊, 檜垣徹太郎, 「5次元超重力模型におけるカシミア効果とモジュライの安定

化」、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学五十嵐キャンパス

⑦ 阪村豊、丸信人、「ゲージヒッグス統合モデルにおける余剰次元の安定化」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 13 日、九州工業大学戸畑キャンパス

⑧ 阪村豊、「Moduli stabilization in gauge-Higgs unification」, SUSY2010, 2010 年 8 月 27 日、ボン大学（ドイツ）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阪村 豊 (SAKAMURA YUTAKA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：90525552