

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18204024

研究課題名 (和文) Gauge-Higgs Unification の新たな展開

研究課題名 (英文) New Development of the Gauge-Higgs Unification

研究代表者

林 青司 (SEIJI LIM (C. S. Lim) )

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80201870

研究成果の概要 (和文)：素粒子を記述する標準模型は非常な成功を収めてはいるが、理論的にはヒッグス (Higgs) 粒子にまつわるいくつかの本質的な問題が存在し、これを超える「新しい物理」の理論構築が重要なテーマである。この研究では、その魅力的な可能性として素粒子の相互作用を伝えるゲージ粒子とヒッグス粒子を統一する Gauge-Higgs Unification シナリオを取り上げ、実験可能な物理量についての、この理論特有のいくつかの重要な予言を導いた。更には、このシナリオの新たな展開として、例えば宇宙論への興味深い応用を議論した。

研究成果の概要 (英文)：Although the Standard Model of elementary particles has been very successful, the theory has several essential theoretical problems related to the Higgs particle, and the construction of “New Physics” beyond the Standard Model is the most important issue. In this research, we discussed “Gauge-Higgs Unification” scenario as an attractive candidate of New Physics. We obtained several characteristic predictions of the scenario for observables under the experimental tests. As the further development of the scenario, we applied the scenario to the cosmology, for instance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2007 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2008 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
年度			
年度			
総計	20,200,000	6,060,000	26,260,000

研究分野：素粒子理論

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：Gauge-Higgs Unification, 階層性問題、標準模型を超える物理

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子理論の大問題として「階層性問題」が存在し、その解決の試みから超対称理論、

超弦理論といった一連の標準模型を越える理論 (“新しい物理”) が構築されて来たとい

う意味で極めて重要な問題であるが、1998年に研究代表者は、幡中、稲見両氏との共著論文で、素粒子の相互作用を媒介するゲージ粒子と Higgs 粒子の統一、即ち “Gauge-Higgs Unification” シナリオによって超対称性を用いることなく階層性問題を解決し得る事を示した (Mod. Phys. Lett. A13 ('98) 2601)。この論文は現在174件の引用があり、世界的にも認知された論文と成っていると思われる。

このシナリオでは、階層性問題、即ち Higgs 質量への 2 次発散する量子補正の問題は、高次元的な局所ゲージ対称性のおかげで回避できる事、このシナリオに基づく標準模型を含む最も簡単な模型は SU(3) 模型である、といった基本的な性質は、本研究を開始した時点で既に調べられていた。

## 2. 研究の目的

こうした基本的な成果を踏まえ、本研究では、Gauge-Higgs Unification シナリオを様々な観点から議論して更なる発展を目指す事を研究目的とした。

実際、研究分担者、連携研究者には、Gauge-Higgs Unification に直接関わる研究者のみならず、超弦理論、宇宙論といった分野の専門家の参加も得ており、多面的な発展が期待出来た。

具体的には、既にある程度研究が進んでいた高次元ゲージ理論に隠された (量子力学的) 超対称性に関する研究、 $S^2$  の様な単連結空間を余剰次元とする場合へのシナリオの拡張と Higgs 質量への量子補正の解析、大統一を実現するモデルの構成、といった点を当面の研究テーマとして研究が開始された。

その後、このシナリオでは高次元理論で繰り込み不可能にも関わらずいくつかの重要な物理量に関して有限値として予言可能である事に気づき、いくつかの興味深い予言を行う事も研究の重要な柱とした。

更には、分担者との議論を通じて、このシナリオの宇宙論への応用も研究目的の一つとなった。

## 3. 研究の方法

素粒子理論の研究においては、何人かの共同研究による場合が多いものの、基本的には研究は個人レベルで行われる。しかしながら、新たな視野や発想を得るには、研究者どうしの議論が大変重要である。特に、本研究においては様々な分野で活躍する専門家の参加を得ており、議論の機会を設けることは大変重要であった。

こうした観点から、2007 年 11 月に、この科学研究費を用いた国際ワークショップを神戸大学にて開催し、この科研費の代表者、分担者、連携研究者のみならず、M. Peskin (研究協力者)、W. Bardeen といったアメリカの著名な研究者の参加も得て大変有意義な議論が行われた。

## 4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果を以下にまとめる。

### (1) $S^2$ を余剰次元とする Gauge-Higgs Unification シナリオの研究

円のような非単連結空間 (穴のある空間) が余剰次元の場合には、Gauge-Higgs Unification シナリオにおいては Higgs 質量は発散しないものの有限の質量を持ち、コンパクト化の質量スケールが高くなると階層性問題の解決が難しくなる。この有限質量は言わばアハロノフ・ボーム効果の帰結なので、磁束の透過を許さない単連結空間では Higgs への有限の質量さえも生じないと期待される。こうした観点から、 $S^2$  を余剰次元とする Gauge-Higgs Unification シナリオに関して議論した。具体的な計算の結果、期待

通り Higgs 質量への量子補正が正確に消える事を確かめることが出来た（ただし、新たな問題点も確認された）。

#### (2) Grand Gauge-Higgs Unification の研究

このシナリオは元々、大統一理論 (Grand Unified Theory) におけるゲージ階層性問題の解法を目指して提唱したものであった。こうした経緯もあり、Gauge-Higgs Unification シナリオを具現化する大統一理論の構築は大変興味深いテーマである。我々は、こうした案点から SU(6) ゲージ対称性を持った大統一モデルを構成した。興味深い事に、既存のクォークやレプトンが入り、しかも不必要な粒子が現れない群の表現が存在することを発見し、更に危険な陽子崩壊を引き起こす相互作用が自動的に禁止されている事を確かめる事が出来た。

#### (3) S, T パラメターの予言

例えば LEP 実験といった電弱相互作用の精密テストを行う実験で検証される“新しい物理”の効果が現れ得る物理量として、Peskin-竹内のいわゆる S, T パラメターというものがある。普通は高次元理論は繰り込み可能ではなく、その為にこうした物理量は空間の次元が上がると直ちに紫外発散してしまい明確な予言が難しいと思われている。

しかしながら、我々は Gauge-Higgs Unification のシナリオにおいては、S, T パラメターを記述する演算子が互いに独立でなくなり、S, T の特定の線形結合をとった物理量が仮に 6 次元時空を想定したとしても有限値として予言可能な事を発見し、その成果を論文として公表した。

#### (4) 有限なフェルミオンの異常磁気能率

Gauge-Higgs Unification シナリオにおいては、Higgs がゲージ場の一部であることから

らヒッグス質量や S, T パラメター、等のボゾンに関係した物理量が高次元ゲージ対称性の帰結として有限となり予言可能になるという事実が我々の研究で明らかになった。

我々はこうした研究を更に推し進めて、フェルミオンに関しても運動方程式

(“on-shell 条件”) を用いると有限値の予言が可能な場合がある事を発見した。具体的には、ミューオン等のフェルミオンの異常磁気能率が、少なくとも電磁量子力学を高次元化したモデルにおいては任意の空間次元で有限と成る事を、演算子を用いた一般的解析、ファインマン図の直接計算という両方の手法を用いて示す事が出来た。

#### (5) インフレーション宇宙論への応用

先に述べた階層性問題は、理論のパラメターの微調整が自然でないと考える問題であるが、インフレーション宇宙論においても、インフレーションを引き起こす場であるインフラトンのポテンシャルの曲率項の微調整の問題が存在する。Gauge-Higgs Unification の Higgs 粒子をこのインフラトンと同一視しようというのが我々のアイデアであり、このアイデアを超対称性のあるモデルで議論し、観測事実を説明することの出来るインフラトンポテンシャルが可能に成る事を示した。

#### (6) その他の関連する研究

これらの研究の他にも、各分担者、連携研究者が関連するテーマに関する活発な研究活動を展開した。

いくつか例を挙げると、gauge-Higgs unification シナリオの Higgs が dark matter と成る可能性の指摘、ブレーンやドメインウォールといった高次元理論におけるソリトンに関する研究、ブレーンを持った高次元理論を用いた宇宙論の展開、高次元理論の隠された量子力学的超対称性と関連す

る話題の研究、等である。これらの成果は、論文発表のみならず、国際学会、研究集会での招待講演等で公表されている。

#### 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 87 件)

- ① Higgs-Inflaton Potential in 5D Super Yang-Mills Theory, T. Inami, Y. Koyama, C. S. Lim, S. Minakami, Prog. Theor. Phys. 122:543-551, 2009(査読有)
- ② More on the Finiteness of Anomalous Magnetic Moment in the Gauge-Higgs Unification, Y. Adachi, C. S. Lim, N. Maru, Phys. Rev. D79:075018, 2009(査読有)
- ③ Yukawa Couplings and Effective Interactions in Gauge-Higgs Unification, Y. Hosotani, Y. Kobayashi, Phys. Lett. B674:192-196, 2009(査読有)
- ④ Dynamical D4-D8 and D3-D7 branes in supergravity, P. Binetrui, M. Sasaki, K. Uzawa, Phys. Rev. D80:026001, 2009(査読有)
- ⑤ Gauge-Fixing and Residual Symmetries in Gauge/Gravity Theories with Extra Dimensions, C. S. Lim, T. Nagasawa, S. Ohya, K. Sakamoto, M. Sakamoto, Phys. Rev. D77:065009, 2008(査読有)
- ⑥ Effective Potential of Higgs Field in Warped Gauge-Higgs Unification, N. Haba, S. Matsumoto, N. Okada, T. Yamashita, Prog. Theor. Phys. 120, 77-98, 2008(査読有)
- ⑦ Supersymmetry in 5d gravity, C. S. Lim, T. Nagasawa, S. Ohya, K. Sakamoto, M. Sakamoto, Phys. Rev. D77:045020, 2008(査読有).
- ⑧ Equivalence Classes of Boundary Conditions in Gauge Theory on  $Z_3$  Orbifold, Y. Kawamura, T. Kinami, T. Miura, Prog. Theor. Phys. 120, No. 5: 815-831, 2008(査読有)
- ⑨ Six Dimensional Gauge-Higgs Unification with an Extra Space  $S^{**2}$  and the Hierarchy Problem, C. S. Lim, N. Maru, K. Hasegawa, J. Phys. Soc. Jap. 77: 074101, 2008(査読有)
- ⑩ Finite anomalous magnetic moment in the gauge-Higgs unification, Y. Adachi, C. S. Lim, N. Maru, Phys. Rev. D76

:075009, 2007(査読有)

- ⑪ Towards a realistic grand gauge-Higgs unification, C. S. Lim, N. Maru, Phys. Lett. B653:320-324, 2007(査読有)
- ⑫ Calculable One-Loop Contributions to S and T Parameters in the Gauge-Higgs Unification, C. S. Lim, N. Maru, Phys. Rev. D75:115011, 2007(査読有)
- ⑬ Anomalous Higgs couplings in the  $SO(5) \times U(1)$  (B-L) gauge-Higgs unification in warped spacetime, Y. Hosotani, Y. Sakamura, Prog. Theor. Phys. 118:935-968, 2007(査読有)
- ⑭ Baryons in AdS/QCD, D.-K. Hong, T. Inami, H.-U. Yee Phys. Letts. B646: 165-171, 2007(査読有)
- ⑮ Radius stabilization by constant boundary superpotentials in warped space, N. Maru, N. Sakai and N. Uekusa, Phys. Rev. D75:125014-1-12, 2007(査読有)
- ⑯ Selecting gauge theories on an interval by 5D gauge transformations, N. Sakai, N. Uekusa, Prog. Theor. Phys. 118: 315-335, 2007(査読有)
- ⑰ Orbifold family unification, Y. Kawamura, T. Kinami, Kin-ya Oda, Phys. Rev. D 76: 035001, 2007(査読有)
- ⑱ Kaluza-Klein braneworld cosmology with static internal dimensions, S. Kanno, D. Langlois, M. Sasaki, J. Soda, Prog. Theor. Phys. 118:701-713, 2007.
- ⑲ Large gauge hierarchy in gauge-Higgs unification, M. Sakamoto, K. Takenaga, Phys. Rev. D75:045015, 2007(査読有)
- ⑳ Effective theoretical approach of gauge-Higgs unification model and its phenomenological applications, N. Haba, S. Matsumoto, N. Okada and T. Yamashita, JHEP 0602, 073-1-073-15, 2006, (査読有)

他 67 件

[学会発表] (計 59 件)

- ① “Gauge-Higgs unification, calculable observables and the precision tests” C. S. Lim, Seminar at Univ. Autonoma de Barcelona, Barcelona, Spain, March 9, 2009
- ② “高次元超対称ヤンミルズ理論とゲージ階層性問題” 稲見武夫、水上史絵、小山陽次、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月 20 日-23 日
- ③ “Z2 Orbifold GUTで学んだことをそれをを超える試みに活かす” 川村嘉春、理研集

中セミナー「余剰次元模型の理論的枠組み」, 理化学研究所大河内記念ホール, 2008年12月6日

- ④ “Calculable One-Loop Contributions to S and T Parameters in the Gauge-Higgs Unification” C. S. Lim, Seminar at KIAS, Seoul, Korea, March 27, 2007
- ⑤ “Introduction to String Theory” T. Inami, Lectures at Hanoi University and Institute of Physics, Hanoi, Vietnam, March 22 - April 10, 2007
- ⑥ “Effective Action of Domain Wall Networks” 坂井典佑, International Conference SUSY 2007, カールスルーエ大学, カールスルーエ, ドイツ, 2007年7月31日
- ⑦ “Selecting gauge theories on an interval by 5D gauge transformations” 坂井典佑, International Workshop on Higher Dimensional Gauge Theory and the Unification of Forces, 神戸大学, 2007年11月30日
- ⑧ “Kaluza-Klein braneworld cosmology” M. Sasaki, International Workshop on String Theory and Cosmology, Beijing, China, 5 - 9 November, 2007
- ⑨ “Search for a Realistic Orbifold Grand Unification” Y. Kawamura, International Workshop on Grand Unified Theories: Current Status and Future Prospects (GUT07), 立命館大学, 2007年12月18日
- ⑩ “Recent Developments in Inflationary Cosmology” M. Sasaki, Summer Institute on New Trends in Particle Physics and Cosmology, Sheffield, UK 19 - 23 June 2006

他 49 件

〔図書〕 (計 4 件)

- ① “CPの破れの意味するところ” 林 青司, ノーベル物理学賞記念パリティ増刊号 「破れた対称性」, 丸善, 2009年
- ② “弱い相互作用の研究と進展 (特集 電弱統一理論—素粒子物理学発展のキーワードを巡って)” 林 青司, 数理科学, サイエンス社, 2007年, p17~p22
- ③ “超対称性理論” 太田信義, 坂井典佑, サイエンス社, 2006年, 総ページ数 166
- ④ “例題形式で学ぶ現代素粒子物理学” 川村嘉春, 臨時別冊・数理科学 SGCライブラリ 48, サイエンス社, 2006年, 総ページ数 223

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 青司 (SEIJI LIM (C.S. Lim))  
神戸大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 80201870

### (2) 研究分担者

稲見 武夫 (TAKEO INAMI)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20012487

坂井 典佑 (NORISUKE SAKAI)  
東京女子大学・文理学部・教授  
研究者番号: 80108448

細谷 裕 (YUTAKA HOSOTANI)  
大阪大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 50324744

波場直之 (NAOYUKI HABA)  
大阪大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 00293803

### (3) 連携研究者

佐々木 節 (MISAO SASAKI)  
京都大学・基礎物理学研究所・教授  
研究者番号: 70162386

川合 光 (HIKARU KAWAI)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 80211176

坂本 真人 (MAKOTO SAKAMOTO)  
神戸大学・理学研究科・助教  
研究者番号: 30183817

山口 昌弘 (MASAHIRO YAMAGUCHI)  
東北大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 10222366

川村 嘉春 (YOSHIHARU KAWAMURA)  
信州大学・理学部・教授  
研究者番号: 10224859