

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 3 月 29 日現在

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2011
 課題番号：20540272
 研究課題名（和文）
 余剰次元理論における新しいモデルの構築と LHC・ILC に向けた解析
 研究課題名（英文）
 Model building in extra-dimensional theory and its analyses toward LHC・ILC experiments
 波場 直之 (HABA NAUYUKI)
 大阪大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：00293803

研究成果の概要（和文）：標準模型を超える新しい物理の有力候補である余剰次元理論の枠組みで、詳細なモデルの提案をして、実験観測の数値解析をおこなうことで、余剰次元理論が ILC や ILC 実験でどの様に観測され得るのか調査した。

研究成果の概要（英文）：In the framework of extra-dimension theory, which is an excellent candidate of new physics beyond the standard model, I have suggested new models and its phenomenological analyses. Through the analyses, I have investigated how the extra-dimension theory can be observed in LHC and ILC experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：素粒子論

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：(1) 余剰次元理論 (2)LHC 実験での検証可能性 (3) ILC 実験での予言 (4) ニュートリノ質量 (5) 新しいヒッグス模型 (6) 超対称性理論

1. 研究開始当初の背景

- (1) LHC 実験の開始が近づき、Higgs の発見が期待されると同時に、素粒子の標準模型を超える物理の発見が期待されてきた。理論的にも標準模型を超える物理の模型構築や現象論的解析、LHC 実験での観測可能性の数値解析等をする必要が急がれた。
- (2) 標準模型を超える新しい物理として、余剰次元理論が有力候補として提案され、詳細なモデルの提案や実験での観測可能性の解析が、早急に、かつ、正確におこな

われる必要があった。

- (3) 超対称性理論等の余剰次元理論以外の新しい物理の候補についても、同様の現象論的研究の必要性が増した。

2. 研究の目的

- (1) 標準模型には、世代の謎等の様々な未解決の問題があり、背後に標準模型を超える物理の存在を示唆している。研究の目標は、標準模型を超える物理の解明であり、主に「余剰次元理論」に関して研究をおこなうとともに、「超対称性理論」、

- 「大統一理論」、「新しく開発した模型」にも取り組み、これらの枠組みを用いて、現象論の解析や実験との整合性、コライダーでの観測可能性の解析等をおこない標準模型を超える物理の解明に取り組む。
- (2) 標準模型を超える新しい物理の有力候補である余剰次元理論が、他の有力候補である超対称性理論と比べて、LHC や ILC 実験でどの様に観測され得るのかを調査する。
 - (3) 標準模型では説明できなかった物理現象でも、余剰次元理論では自然に説明できる可能性がある。そうした可能性を、Higgs 系やニュートリノ系等、様々な物理に対して考察する。
 - (4) 超対称性理論や自身が開発した模型等、余剰次元理論以外の標準模型を超える物理に関しても、LHC 物理を中心に、宇宙論等に関しても、新しい可能性を考察する。

3. 研究の方法

- (1) 余剰次元理論の枠組みで、詳細な模型の提案をおこない、実験観測の数値解析をおこなうことで、余剰次元理論が ILC や ILC 実験でどの様に観測され得るのか、調査する。例えば、LHC でレプトン数非保存のプロセスが観測される可能性がある 5 次元 see-saw 機構の解析や、QCD でのパリティの破れを調査して、余剰次元理論の実験的特徴を評価する。
- (2) 超対称性理論や自身が開発した模型等に関しても、LHC・ILC 物理を中心に新しい可能性を調査する。
- (3) 実験から得られる最新のデータを常に考慮し取り入れて、模型の改善をおこなう。
- (4) 素粒子論的宇宙論に関しても、最新の観測結果と照らしあわせ、素粒子論の立場から、新しい可能性を提案する。

4. 研究成果

- (1) 余剰次元ゲージ理論の枠組みで、境界条件でゲージ対称性を部分的に破る場合、この条件で重くなったゲージボソンの散乱振幅のエネルギー依存性の解析を、Wilson ライン位相をパラメータにして、おこなった。この解析により、高次元ゲージ理論における等価定理に対する理解を深めることができた。
- (2) $SU(5) \times U(1)$ ゲージ・ヒッグス統一模型で、反周期境界条件を持つ場が、ダーク・マターの候補になり得ることを示した。更に、ダーク・マターの relic abundance 等の解析をおこない、将来のダーク・マター探索実験で、このシナリ

オの観測可能性を調査した。

- (3) 超対称性不変は「超対称性変換で total derivative が境界条件で消えることを要求する」ので、コンパクト化された余剰次元理論での超対称性不変は、自明でない。そこで、超対称性のある余剰次元理論において、境界の存在で超対称性が破れる新しい機構を開発し、更に、現象論へ応用した。
- (4) ヒッグス場が、余剰次元に広がり、かつ、様々な境界条件を取る場合について定式化をおこない、LHC 物理等の現象論的解析をおこなった。この場合、Higgs が 1 つしか無くても、「トップと physical Higgs 粒子の相互作用」が「トップ質量を Higgs の真空期待値で割った値」と違う可能性があることを指摘し、LHC での観測可能性を解析した。更に、余剰次元のコンパクト空間のサイズを安定化する機構開発と解析をおこなった。
- (5) 5次元理論におけるシーソー機構の現象論への応用をおこなった。特に、LHC と ILC で、レプトン数を破る同符号の 2 つのレプトンのイベントの観測可能性を解析した。
- (6) 5次元 GUT において、2つの新しい模型の構築をおこなった。特に、 $SO(10)$ GUT を 5次元で構成することに成功して、質量階層性と世代間混合の新しい生成機構を提案した。
- (7) QCD の θ パラメータが小さいことを余剰次元理論で説明する新しい模型の構築と解析をおこなった。
- (8) local minimum 真空で超対称性が破れる ISS 模型を、超重力理論へ埋め込み、宇宙定数をゼロにすることで gaugino 質量を得る世界初の機構の開発と現象論的解析をおこなった。
- (9) 「ダークマターとバリオンのエネルギー密度比」と「バリオン数生成」を同時に説明する世界初の機構の開発に成功した。更に、インフレーションも同時に説明する機構の開発と解析をおこなった。また、他にも、『PAMERA 実験の宇宙線 anomalies を自然に説明する(新しいフレーバー対称性を用いた)新しい模型の開発と解析をおこなった。
- (9) ニュートリノ質量の小ささは、ニュートリノの Dirac 質量を生成する新しい Higgs doublet の真空期待値が小さいことに起因する可能性を提唱して、模型を構築し、現象論的解析をおこなった。この場合、ニュートリノの湯川相互作用は大きくてもいいため、低エネルギーの熱的レプトジェネシスが可能になることを世界で初めて示し現象論と宇宙論的制限を解析した。また、この場合、超対

称性理論では、gravitino 問題も解決されることを示した。更に、LHC と ILC での観測可能性の解析をおこなった。また、新しく導入した Higgs と標準模型の Higgs の真空期待値間の階層性の量子補正に対する安定性の解析もおこなった。更に、大統一理論へ組み込むと、TeV スケールが GUT スケールとニュートリノ質量の相乗平均に自然になる模型を構築した。

- (10) 標準模型ではパリティの破れは「手で」与えられ、その起源は全くの謎である。そこで、weak スケールより十分高いスケールで left-right 対称型ゲージ群が存在して、「パリティが自発的に破れる可能性」を、(強結合 SUSY ゲージ理論の非摂動効果を用い)「複合 Higgs 模型」を構築して示し、更に、現象論的解析をおこなった。また、超対称性理論では、「gaugino-squark-quark 相互作用はカイラル」であり、一方、「left-handed squark と right-handed squark の質量は一般には異なる」。そうすると、もし標準模型を超える物理が超対称性理論なら QCD でもパリティが破れるはずで、その可能性を世界に先駆けて指摘し、LHC での観測可能性を解析した。

また、現時点まで QCD でのパリティの破れは観測されていないことから、(メソンの崩壊や核子の相互作用の実験データを使用して、left-handed squark と right-handed squark の質量の縮退度が得られるはずである。その縮退度の理論的な評価法を開発し、解析をおこなった。

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 38 件)

- (1) N. Haba, K. Kaneta, S. Matsumoto, T. Nabeshima and S. Tsuno, “Parity Violation in QCD Process”, Phys. Rev. D, 査読有, 85 (2011) 014007-1 - 014007-7
- (2) N. Haba, “Why is TeV-scale a geometric mean of neutrino mass and GUT-scale?”, Europhys. Lett, 査読有, 96 (2011) 21001-1 - 21001-4
- (3) N. Haba and T. Horita, “Vacuum stability in leptophilic Higgs doublet model”, Phys. Lett B, 査読有, 705 (2011) 98-105
- (4) N. Haba and R. Takahashi, “Predictions via large θ_{13} from cascades”, Phys. Lett. B, 査読有, 702 (2011) 388-393
- (5) N. Haba and S. Matsumoto, “Baryogenesis from Dark Sector”, Prog. Theor. Phys, 査読有, 125 (2011) 1311 - 1316
- (6) N. Haba, S. Matsumoto and R. Sato, “Sneutrino Inflation with Asymmetric Dark Matter”, Phys. Rev. D, 査読有, 84 (2011) 055016-1 - 055016-6
- (7) N. Haba, and O. Seto, “Low scale thermal leptogenesis in leptophilic Higgs doublet models”, Prog. Theor. Phys, 査読有, 125 (2011) 1155 - 1169
- (8) N. Haba and T. Shindou, “Tiny neutrino mass from SUSY and lepton number breaking sector”, Phys. Lett. B, 査読有, 701 (2011) 229 - 233
- (9) N. Haba and H. Ohki, “Spontaneous Parity Violation in SUSY Strong Gauge Theory”, JHEP, 査読有, 1108 (2011) 021-1 - 021-16
- (10) N. Haba and K. Tsumura, “ ν -Two Higgs Doublet Model and its Collider Phenomenology”, JHEP, 査読有, 1106 (2011) 068-1 - 068-19
- (11) N. Haba, and O. Seto, “Thermal leptogenesis in a supersymmetric leptophilic Higgs model”, Phys. Rev. D, 査読有, 84 (2011) 103524-1 - 103524-5
- (12) N. Haba, K. Oda and R. Takahashi, “Dirichlet Higgs as radion stabilizer in warped compactification”, JHEP, 査読有, 1105 (2011) 125-1 - 125-33
- (13) N. Haba, K. Oda and R. Takahashi, “Dirichlet Higgs in extra-dimension, consistent with electroweak data”, Acta Phys. Polon. B, 査読有, 42 (2011) 33-44
- (14) N. Haba, Y. Kajiyama, S. Matsumoto, H. Okada and K. Yoshioka, “Universally Leptophilic Dark Matter From Non-Abelian Discrete Symmetry”, Phys. Lett. B, 査読有, 695 (2010) 476-481
- (15) N. Haba, K. Oda and R. Takahashi, “Phenomenological Aspects of Dirichlet Higgs Model from Extra-Dimension”, JHEP, 査読有, 1007 (2010) 079-1 - 079-24
- (16) N. Haba, M. Hirotsu, “TeV-scale seesaw from a multi-Higgs model”, Eur. Phys. J. C, 査読有, 69 (2010) 481-492
- (17) N. Haba and N. Uekusa, “Total-derivative supersymmetry breaking”, Phys. Rev. D, 査読有, 81 (2010) 481-492
- (18) T. Saito, M. Asano, K. Fujii, N. Haba, S. Matsumoto, T. Nabeshima, Y. Takubo,

- H. Yamamoto, and K. Yoshioka, “Extra dimensions and Seesaw Neutrinos at the International Linear Collider”, Phys. Rev. D, 査読有, 82 (2010) 09300-1 – 09300-11
- (19) N. Haba, Y. Sakamura and T. Yamashita, “Tree-level unitarity in Gauge-Higgs Unification”, JHEP, 査読有, 1003 (2010) 069-1 – 069-34
- (20) N. Haba, Y. Sakamura, and T. Yamashita, “Weak boson scattering in Gauge-Higgs Unification”, JHEP, 査読有, 0907 (2009) 020
- (21) N. Haba, S. Matsumoto and K. Yoshioka, “Observable Seesaw and its Collider Signatures”, Phys. Lett. B, 査読有, 677 (2009) 291-295
- (22) N. Haba, S. Matsumoto, N. Okada and T. Yamashita, “Effective Potential of Higgs Field in Warped Gauge-Higgs Unification”, Prog. Theor. Phys, 査読有, 120 (2008) 77-98
- (23) N. Haba, R. Takahashi, M. Tanimoto and K. Yoshioka, “Tri-bimaximal Mixing from Cascades”, Phys. Rev. D, 査読有, 78 (2008) 113002-1 – 113002-12
- (24) N. Haba, Y. Kawamura and K. y. Oda, “Dynamical Rearrangement of Theta Parameter in Presence of Mixed Chern-Simons Term”, Phys. Rev. D, 査読有, 78 (2008) 085021-1 – 085021-7

[学会発表] (計 19 件)

- (1) 波場直之、堀田朋宏、Vacuum stability in neutrinophilic Higgs doublet model、第 67 回日本物理学会年次大会、2012. 3. 25、関西学院大学
- (2) 金田邦雄、波場直之、清水康弘、Phenomenology of neutrinophilic Higgs GUT、第 67 回日本物理学会年次大会、2012. 3. 25、関西学院大学
- (3) 波場直之、佐藤亮介、松本重貴、Sneutrino Inflation with Asymmetric Dark Matter、日本物理学会 2010 年秋季大会、2011. 9. 18、弘前大学
- (4) 波場直之、金田邦雄、大野木哲也、Quarkonium Parity Violation in Supersymmetric QCD、日本物理学会 2010 年秋季大会、2011. 9. 16、弘前大学
- (5) 金田邦雄、波場直之、松本重貴、鍋島偉宏、津野総司、トップ対生成のヘリシテイ非対称性による MSSM と UED の判別、第 66 回日本物理学会年次大会、2011. 3. 28、新潟大学
- (6) 波場直之、弘津晶輝、瀬戸治、鍋島偉宏、TeV-scale seesaw Model におけるニュー

トリノ質量生成と ILC 物理、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 14、九州工業大学

- (7) 齋藤智之、浅野雅樹、田窪洋介、鍋島偉宏、波場直之、藤井恵介、松本重貴、山本均、吉岡興一、ILC における高次元シーソー模型の右巻きニュートリノに関する測定精度の検証、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 14、九州工業大学
- (8) 波場直之、梶山裕二、松本重貴、鍋島偉宏、岡田寛、吉岡興一、Do the PAMELA anomaly and neutrino masses have the same origin?、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 13、九州工業大学
- (9) 金田邦雄、波場直之、松本重貴、鍋島偉宏、津野総司、LHC におけるトップ対生成のヘリシテイ測定を用いた標準模型を超える物理の探索、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 11、九州工業大学
- (10) 波場直之、長崎晃一、松本重貴、鍋島偉宏、田中実、津野総司、LHC におけるトップ対生成のヘリシテイ測定を用いた新しい物理模型の識別、第 65 回日本物理学会年次大会 2010. 3. 23、岡山大学
- (11) 波場直之、弘津晶輝、2 Doublet+1 Singlet Higgs Model における neutrino mass 生成と LHC physics、第 65 回日本物理学会年次大会、2010. 3. 22、岡山大学
- (12) 齋藤智之、田窪洋介、鍋島偉宏、波場直之、藤井恵介、松本重貴、山本均、吉岡興一、ILC における余剰次元模型の右巻きニュートリノに関する測定精度の評価、第 65 回日本物理学会年次大会、2010. 3. 20、岡山大学
- (13) 阪村豊、波場直之、山下敏史、Unitarity in general 5D models on interval、第 64 回日本物理学会年次大会、2009. 3. 30、立教大学
- (14) 波場直之、松本重貴、岡田宣親、山下敏史、Gauge-Higgs Dark Matter、日本物理学会秋季大会、2008. 9. 23、山形大学

6. 研究組織

- (1) 波場直之 (HABA NAOYUKI)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：20540272