

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月9日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05330

研究課題名（和文）高エネルギー実験と宇宙観測に基づく現実的な高次元超対称模型の探索

研究課題名（英文）Search for realistic supersymmetric models in higher-dimensions based on high-energy/cosmological observations

研究代表者

安倍 博之（ABE, Hiroyuki）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10402760

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：高エネルギー実験と宇宙観測のデータと整合する現実的な高次元超対称模型の探索を行い、これらに課される現象論的制限を精査することで、素粒子標準模型の背後に存在が期待される統一理論の探求に向けた数々の指針を得た。特に、探索の過程で現象論に大きく影響すると考えられる新たな効果を見出し、高次元超対称理論におけるこれらの一般的な定式化と解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、我々の世界を記述する最も基本的な理論である素粒子標準模型の背後の理論として様々な観点から有望視されている、高次元超対称理論に基づく素粒子統一模型の探究に数々の指針を与える成果であると考えている。

研究成果の概要（英文）：We have searched for realistic supersymmetric models in higher-dimensional spacetime based on high-energy/cosmological observations and obtained phenomenological constraints on them. These provide various guidelines to find the unified theory beyond the standard model of elementary particles. During the search, especially, we noticed the existence of new effects which can heavily affect phenomenological features of the model. We developed general formulations of these effects and analyzed them.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子統一理論

1. 研究開始当初の背景

大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) 実験においてヒッグス粒子が発見されたことで、素粒子標準模型により予言されるすべての素粒子群の存在が確認され、さらに標準模型から導かれるこれらの粒子の性質はこれまでのあらゆる高エネルギー実験のデータと大きな矛盾はない。したがって、少なくとも現時点で人工的に到達可能な最大のエネルギースケールである TeV スケール以下では、標準模型が素粒子の運動を記述する最も精密かつ基本的な理論であると言える。しかしながら、標準模型には理論として不満足な点が少なからず存在する。深刻な問題の一つは、これまでの様々な高エネルギー実験のデータから決定される素粒子の質量や混合の大きさと相互作用の強さは、標準模型に含まれる多くの基本パラメータの値に複雑な階層構造を仮定しなければ説明できないことである。このような事実は標準模型の背後により基本的な理論が存在することを強く示唆していると多くの研究者は考えている。これまでの実験データを説明するために要求される標準模型の基本パラメータの値を力学的もしくは幾何学的に説明し、さらにそれらの値の安定性を保証する理論の探索は、素粒子理論の研究分野における最重要課題の1つとなっている。

2. 研究の目的

素粒子標準模型に含まれる基本パラメータの値を力学的に説明する可能性をもち、素粒子統一理論の有力候補とされる超弦理論の低エネルギー有効理論としても現れることが知られている、高次元時空の超対称理論 (高次元超対称理論) は数々の理論的に優れた性質をもっている。本研究は、高エネルギー実験と宇宙観測の結果をもとに高次元超対称理論に基づく現実的な素粒子模型の探索を行い、標準模型を超える素粒子統一理論の探究に向けた指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

高次元時空の超対称理論において、高エネルギー実験によるパラメータの測定値を再現可能な標準模型のセクターと、宇宙観測に整合するモジュライ固定及び超対称性の破れのセクターを、同時に実現可能な系の配位を探索する。両セクターを結ぶメッセンジャー粒子を含めた全体のスペクトラムをもとに、モジュライ固定及び超対称性の破れのダイナミクスの解析を行い、実験観測データとの整合性からこれらの配位の有効性を見る。

4. 研究成果

(1) 素粒子標準模型が内包するゲージ階層性と質量階層性や暗黒物質の問題を説明できる可能性をもち、素粒子統一理論の有力候補の1つとされる高次元超対称理論に対し、具体的な素粒子模型の構築とそれらの現象論及び宇宙論的性質の解明に向けた研究を行った。物質を含む量子重力理論の最有力候補である、超弦理論の臨界次元として知られる10次元時空を出発点として、標準模型の粒子組成と相互作用を再現する上で有望な、背景磁場をもつコンパクトな余剰空間を想定することで、現実的な素粒子模型の構築を試みた。このような枠組みでは、余剰な粒子が脱結合するようなオービフォールドと呼ばれる商空間が先行研究で導入されていたが、そこでは系の安定化とゲージ階層性の説明に必要な超対称性を (低エネルギーまで) 保つのが難しいことが知られていた。これに対し、本研究では背景磁場に対して荷電粒子の真空期待値を考えることで、新たなクラスのオービフォールド模型が構築可能であることを示し、その具体例としてニュートリノの超対称パートナーが期待値をもつことで超対称性が保たれるような模型を提案した。これは高次元超対称模型の現実的なクラスを拓ける重要な成果であると考えている (発表論文[7])。

(2) 背景磁場により物質粒子の現実的なスペクトラムを生成可能なこれまでの幾つかの模型に対し、余剰空間の大きさを安定化するメカニズムについて研究を行なった。コンパクト空間のサイズの揺らぎは高次元重力の力学的自由度を担うモジュライ場により記述され、これが有限な期待値の周りで十分に重い質量をもつこと (モジュライ固定) により同空間が安定化される。ここでは背景磁場模型の非摂動効果で生成されるポテンシャルの性質を調べることで、これによりモジュライ場を固定することが可能であり、余剰空間が安定化されることを示した。これは高次元理論に基づき現実的な素粒子模型を構築する際に解決しなければならない難題を、背景磁場模型がまた一つ克服したことを意味しており、重要な成果であると考えている (発表論文[6])。さらに、背景磁場を用いてこれまで個別に構築してきた超対称標準模型のセクターと超対称性を自発的に破るセクターを、単一の高次元超対称理論に融合する試みも行なった。両セクターを結ぶメッセンジャー粒子のスペクトラムに注意しながら、両者の融合を実現可能な背景磁場の配位を探索した (学会発表[3])。また、この融合系でも上記の余剰空間安定化メカニズムの実効性が保たれる可能性を指摘した (学会発表[2])。

(3) 上記(1), (2)の過程で、FI 項と呼ばれる特定の作用項が磁場系の低エネルギースペクトラムに多大な影響を及ぼすことを見出し、その現象論解析を行った。特に、観測されているクォークやレプトンの世代間質量比と混合角の階層性を説明する上で、同項が主要な役割を担い得ることを示した点は重要であると考えている(発表論文[4])。また、このFI 項は局所超対称理論においても微分高次項と関連して現れ得ることが近年指摘されているため、そのような枠組みでの同項の素粒子論及び宇宙論的影響についても解析を行い、最新の観測データを基に理論のパラメータに対する制限を導いた。局所超対称理論は重力を必然的に含むため超重力理論とも呼ばれるが、これは超弦理論の低エネルギー有効理論としても現れることが知られている。特に、開弦の端点が拘束されるDブレーンに対しては特定の微分高次項を含むDBI型と呼ばれる作用となるため、ここではDBI型超重力作用にFI項を埋め込んだモデルを定式化して解析を行った(発表論文[1],[2])

(4) 上記(1)-(3)とは独立に、高次元超対称モデルの現象論及び宇宙論を展開する際に有用となる超空間作用の定式化に関わる研究も行った(発表論文[3],[5])

以上の(1)-(4)は、標準模型の背後の理論として様々な観点から有望視されている、高次元超対称理論に基づく素粒子統一モデルの探究に数々の指針を与える成果であると考えている。特に、(3)では現象論に大きく影響すると考えられる当初は想定していなかった新たな効果を見出し、以降は計画を変更して高次元超対称理論におけるこれらの一般的な定式化と解析に注力したが、結果的にこれは本研究の主要な成果の1つとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

すべて査読あり

[1] Hiroyuki Abe, Yermek Aldabergenov, Shuntaro Aoki and Sergei V. Ketov, “Polonyi-Starobinsky supergravity with inflaton in a massive vector multiplet with DBI and FI,” *Classical and Quantum Gravity* 36 (2019) no.7, 075012, DOI:10.1088/1361-6382/ab0901 [arXiv:1812.01297 [hep-th]].

[2] Hiroyuki Abe, Yermek Aldabergenov, Shuntaro Aoki and Sergei V. Ketov, “Massive vector multiplet with Dirac-Born-Infeld and new Fayet-Iliopoulos terms in supergravity,” *Journal of High Energy Physics* 1809 (2018) 094, DOI:10.1007/JHEP09(2018)094 [arXiv:1808.00669 [hep-th]].

[3] Hiroyuki Abe, Shuntaro Aoki, Sosuke Imai and Yutaka Sakamura, “N=1 superfield description of BPS solutions in 6D gauged SUGRA with 3-branes,” *Journal of High Energy Physics* 1809 (2018) 073, DOI:10.1007/JHEP09(2018)073 [arXiv:1807.04495 [hep-th]].

[4] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Shintaro Takada, Shio Tamba and Takuya H. Tatsuishi, “Quark mass matrices in magnetized orbifold models with localized Fayet-Iliopoulos terms,” *Physical Review D* 98 (2018) no.10, 106017, DOI:10.1103/PhysRevD.98.106017 [arXiv:1807.02063 [hep-th]].

[5] Hiroyuki Abe, Shuntaro Aoki and Yutaka Sakamura, “Full diffeomorphism and Lorentz invariance in 4D N=1 superfield description of 6D SUGRA,” *Journal of High Energy Physics* 1711 (2017) 146, DOI:10.1007/JHEP11(2017)146 [arXiv:1708.09106 [hep-th]].

[6] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Keigo Sumita and Shohei Uemura, “Kahler moduli stabilization in semirealistic magnetized orbifold models,” *Physical Review D* 96 (2017) no.2, 026019, DOI:10.1103/PhysRevD.96.026019 [arXiv:1703.03402 [hep-th]].

[7] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Keigo Sumita and Yoshiyuki Tatsuta, “Supersymmetric models on magnetized orbifolds with flux-induced Fayet-Iliopoulos terms,” *Physical Review D* 95 (2017) no.1, 015005, DOI:10.1103/PhysRevD.95.015005 [arXiv:1610.07730 [hep-ph]].

〔学会発表〕(計 20 件)

[1] Hiroyuki Abe, “MSSM with non-universal gaugino masses at the unification scale, ” The first NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation, 2018 年, Kyukamura Shikotsuko, Chitose, Japan

[2] Hiroyuki Abe, “Moduli stabilization and F-term uplifting in semi-realistic magnetized orbifold models, ” String Phenomenology 2018: The 17th edition of the String Phenomenology Conference, 2018 年, University of Warsaw, Warsaw, Poland

[3] Hiroyuki Abe (登壇者), Tatsuo Kobayashi, Keigo Sumita and Yoshiyuki Tatsuta, “Phenomenological aspects of magnetized SYM theories in higher-dimensions, ” PLANCK 2017: 20th International Conference From the Planck Scale to the Electroweak Scale, 2017 年, University of Warsaw, Warsaw, Poland

[4] Hiroyuki Abe, “Phenomenological aspects of magnetised SYM theories in higher dimensions, ” 5th String Theory Meeting in the Greater Tokyo Area, 2016 年, Waseda University & Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan

[5] Hiroyuki Abe, “Wavefunction localization and particle physics, ” HU-IBS Sapporo Summer Institute on Particle Physics and Cosmology, 2016 年, Hokkaido University, Sapporo, Japan

その他、研究協力者による学会発表 15 件

6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名：青木 俊太郎

ローマ字氏名：(AOKI, Shuntaro)

研究協力者氏名：ALDABERGENOV, Yermek

ローマ字氏名：(ALDABERGENOV, Yermek)

研究協力者氏名：石田 誠

ローマ字氏名：(ISHIDA, Makoto)

研究協力者氏名：今井 颯介

ローマ字氏名：(IMAI, Sosuke)

研究協力者氏名：上村 尚平

ローマ字氏名：(UEMURA, Shohei)

研究協力者氏名：大塚 啓

ローマ字氏名：(OTSUKA, Hajime)

研究協力者氏名：KETOV, Sergei V.

ローマ字氏名：(KETOV, Sergei V.)

研究協力者氏名：小林 達夫

ローマ字氏名：(KOBAYASHI, Tatsuo)

研究協力者氏名：阪村 豊

ローマ字氏名：(SAKAMURA, Yutaka)

研究協力者氏名：角田 慶吾

ローマ字氏名：(SUMITA, Keigo)

研究協力者氏名：高田 慎太郎

ローマ字氏名：(TAKADA, Shintaro)

研究協力者氏名：高野 恭史
ローマ字氏名：(TAKAN0, Yasufumi)

研究協力者氏名：立石 卓也
ローマ字氏名：(TATSUIISHI, Takuya H.)

研究協力者氏名：龍田 佳幸
ローマ字氏名：(TATSUTA, Yoshiyuki)

研究協力者氏名：丹波 織恩
ローマ字氏名：(TAMBA, Shio)

研究協力者氏名：福原 望
ローマ字氏名：(FUKUHARA, Nozomu)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。