

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540289

研究課題名(和文)大型ハドロン衝突型加速器時代の超対称性と余剰次元理論

研究課題名(英文)Theory of supersymmetry and extra dimensions in the LHC era

研究代表者

村山 斉 (MURAYAMA, HITOSHI)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：20222341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：提案時はLHC実験が始まった頃で、超対称性や余剰次元の実験的発見を予想し、その理論についての研究を提案した。その後予想よりも早くヒッグス粒子が発見され、素粒子の基礎理論である標準模型が確立し、大きな進展となった。一方標準模型を超える超対称性や余剰次元の実験的兆候はまだない。この劇的な展開の中で、超対称性や余剰次元の理論は大きな再考を迫られた。本研究では見つかったヒッグス粒子の質量、まだない直接証拠、そして最近の宇宙論やニュートリノ物理からの情報をつき合わせ、世界に先駆けて新しい理論的方向をいくつか提案し、その実験的検証を考察した。

研究成果の概要(英文)：I proposed to study theory of supersymmetry and extra dimensions anticipating their experimental discovery at the time of the start of the LHC experiments. Since then, the Higgs boson was discovered earlier than expected, leading to a major progress establishing the Standard Model, the foundational theory of elementary particles. On the other hand, there are no experimental hints of physics beyond the standard model such as supersymmetry or extra dimensions. Given this dramatic development, major reconsideration of theories of supersymmetry and extra dimensions were warranted. In this proposed research, I proposed new theoretical directions first in the world and studied their experimental verifications by combining the mass of the discovered Higgs boson, lack of direct evidence, and recent data from cosmology and neutrino physics.

研究分野：素粒子物理

キーワード：国際研究者交流 国際情報交換 加速器実験 余剰次元 超対称性

1. 研究開始当初の背景

申請時においては、LHC 実験がまさに始まろうとしている時で、超対称性、余剰次元といった有望視されていた理論の実験的証拠が出るのが強く期待されていた。一方ヒッグス粒子については、発見にはまだ時間がかかると思われていた。

2. 研究の目的

欧州原子核研究機構(CERN)で大型ハドロン衝突型加速器(LHC)が稼働を開始し、一年後には今までの全ての加速器を約二倍上回る感度で超対称性や余剰次元の理論の探索が可能になる。この好機を得て、実験データを速やかに解釈して理論の制限・改善を図り、新しい予言をすることで更に実験・理論双方を進めていくことを図る。これにより、超対称性の破れや余剰次元のコンパクト化の機構について新しい知見を得ていく。また、暗黒物質の候補の可能性を絞り込み、XMASSなどの直接探索実験、宇宙線やニュートリノによる間接探索実験との比較検証を行う。

LHC から重要なデータが出る24年度の夏を睨み、23年度は知られているモデルのシミュレーション、宇宙論からの制限、ひも理論からの触発等、基本的なところを押さえて準備する。24年度の夏に 1fb^{-1} のデータが出て来て新しい物理への制限が強まった場合、発表された特定のモデルに対する制限を他のモデルへ翻訳し、どこまで制限されているのかを決めていく。一方新しい物理の徴候が出た場合は、データと整合するモデルの可能性を系統的に並べ上げ、その一つ一つに付いて、次にどのような解析がなされれば区別がついていくのかを議論していく。そしてIPMUで天文からひも理論、数学までの研究者が共存する環境を最大限に活かして、モデルの可能性を広く多角的に探っていく。

3. 研究の方法

(1) Tevatron でも LHC でも、未だに新しい物理の徴候は見つからず、階層性の問題を解決するための新粒子は未発見である。この状況の中で、新粒子が実験で作られているにもかかわらず、発見が難しくまだ見えていないだけだという可能性として、新しい粒子が非常に縮退していて、消失運動量が小さい場合が挙げられる。この場合に、LHCでの発見のために有効な手法を理論的に考察し、提案する。

(2) 新粒子がスカラー粒子であった場合、日本のB-ファクトリーを含め、低エネルギーのフレーバー物理からの制限が非常に厳しい。一般には、スカラー粒子とクォークの結合は極めて弱くないと制限を逃れられないと考えられて来た。こうした制限を逃れられるモデルを探索する。

(3) また、第四世代は電弱精密測定

の制限から、宇宙の物質・反物質非対称性に対する帰結や、電弱精密測定

の制限を逃れる可能性について考察する。

(4) LHC 実験がすすみ、ヒッグス粒子が発見されたが、一方標準模型を超える物理の存在はまだヒントすらない。ヒッグス粒子の性質の詳細測定はまだこれからだが、現在では標準模型の予言と誤差を含めるとほぼ合っていると見てよい。更に、ヒッグス粒子の質量が126 GeVであることから、最も簡単な超対称性のモデルで期待される質量よりもかなり高めにしている。これを総合すると、超対称性粒子は、階層性問題を解くために期待されていた軽い質量には存在せず、もっと重く、ファイン・チューニングが必要とされる領域に入って来る。残念ながら当初の研究実施計画で期待していた情報は出て来ていない。

そこで別の問題として、超対称性粒子が見つからないのは、予想しなかった質量スペクトルのため実験的に見えにくくなっているためか、という問題に取り組んだ。粒子のスペクトルが縮退していると実験的に見えにくいことは Stephen Martin などの仕事で知られていたが、いわば「手で」勝手にスペクトルをいじるため、理論的な整合性が不明であった。特にゲージ粒子のパートナーと、物質粒子のパートナーが縮退する理由が特になく、逆に一種のファイン・チューニングとなっていた。こうしたスペクトルが自然に出る可能性を超対称性と余剰次元を結びつけて考察する。

(5) 見つかったヒッグス粒子の質量は、超対称性理論で予言されていたものよりも重かった。これは、超対称性粒子、特にトップクォークのパートナーが非常に重いことを示唆しており、そのために超対称性が解くべきはずであったファインチューニングの問題が再燃することとなった。このファインチューニングを避ける可能性を探索する。

(6) ヒッグス粒子が発見されたことを最大限有効に活かすため、ヒッグス粒子の相互作用などから情報を引き出すための理論的な手法を確立する必要がある。有効場の理論を用いて、系統的な枠組みを考察する。

(7) 宇宙論のデータと結びつけると、ヒッグス粒子の発見と、超対称性の兆候がまだないことから、長年有望視されてきた「ゲージ媒介」の理論が否定されたことに気づいた。そこで、同じように低エネルギーで超対称性が破れるモデルの可能性を探る。

4. 研究成果

(1) 野尻、飛岡と縮退したスペクトルの場合の実験的探索の手法を調べた。今まで mT2 と

いう、粒子の質量測定のために有用な力学量が提案されていたが、我々はこの mT^2 が、新粒子探索のために非常に有用であり、特にトップ・クォークからくる雑音を排除するのに有効であることを発見した。今後のこの手法が LHC の実験データの解析に使われるに違わず、新粒子発見に役立つ可能性が充分ある。

(2) Evans, Feldstein, Klemm, 柳田とともに、湯川行列がエルミートである場合に限りこの制限を簡単に逃れることができ、コライダーで発見可能な程断面積が高くなることがありえることを発見した。更に、長年の謎である QCD の θ 角をゼロにする可能性も秘めている。この発見で、LHC でこうした新しいタイプのスカラー粒子を探索する動機が強くなった。

(3) Rentala, Shu, 柳田とともに、第四世代のニュートリノの質量がかなり軽い場合には電弱精密測定 of 制限がかなり弱くなり、LHC で充分発見可能なことを示すと同時に、第四世代の存在がバリオン非対称性を消してしまいがちな電弱量子異常によるスファレロン効果を抑制し、バリオン非対称性を保護することを発見、第四世代の探索の新しい動機付けを与えた。

(4) 野村、飛岡、白井と四人で、縮退したスペクトルが出る簡単な模型を発見した。新たな空間次元がオービフォールドという線分である場合、第零近似では、超対称性粒子が全て同じ質量になる。特にゲージ粒子のパートナーと、物質粒子のパートナーが縮退することが自然に理解できる。更に摂動の効果を入れると縮退は解けるが、それでもスペクトルはかなりコンパクトになっており、実験的な制限がゆるくなる。つまり割と軽めであっても LHC で見つかっていない可能性がでてきた。これを「コンパクト超対称性」と呼んだ。

(5) ファイン・チューニングを最大限避けるヒッグスの模型を提案した。シングレットを用いた超対称性の模型は NMSSM などがよく知られているが、シングレットが重くなるとともにファイン・チューニングが再燃する。我々はシングレットでもディラック型のもを導入することで、重くしてもファイン・チューニングに効かないセミ・ソフトという新しい形の超対称性の破れのパラメータを発見した。これによって既に 0.3% 程度のファイン・チューニングが必要な MSSM と比較し、数パーセントですむ模型が可能であることを示した。

(6) Henning, Lu とともにヒッグスの精密測定から新物理を探る方法を提案した。具体的には有効場の理論を用い、新物理から得られる効果をゲージ不変な形で取り込む一般的な方法が発見した。また、その効果が実際の物

理観測量にどう現れるのかを系統的に調べる手法を提示した。

(7) プリンストン高等研究所のポスドク Anson Hook と共同で、新たな模型を発見した。これは LHC での制限と、宇宙論におけるグラビティへの制限を和解させる理論である。超対称性の破れが $U(1)$ ゲージ対称性の D-term と呼ばれる項を通じて超対称性粒子の質量を生む機構である。これによりスピン 0 の超対称性粒子は数十 TeV と重くなり、ヒッグス粒子が予想よりも重かったことを自然に説明する。一方スピン 1/2 の超対称性粒子は TeV 程度であり、今年からの LHC Run2 で発見される可能性を残す。同時にグラビティノは非常に軽く宇宙論の制限を満たすことが同時にできる。これを「ベクトル・メデイエーション」と呼んだ。また、ヒッグス粒子の精密測定を理論と比較できるようにするための枠組みを有効理論を使って具体的に提案した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 27 件)

- ① Haruki Watanabe, Hitoshi Murayama, Spontaneously broken non-Abelian gauge symmetries in nonrelativistic systems, Phys. Rev., 査読有, D90, 2014, 6pp, DDI:10.1103/PhysRevD.90.121703
- ② Xiaochuan Lu, Hitoshi Murayama, Neutrino Mass Anarchy and the Universe, JHEP, 査読有, 1408, 2014, 23pp, DDI:10.1007/JHEP08(2014)101
- ③ Hitoshi Murayama, Kazunori Nakayama, Fuminobu Takahashi, Tsutomu T. Yanagida, Sneutrino Chaotic Inflation and Landscape, Phys. Lett., 査読有, B738, 2014, 5pp, DDI:10.1016/j.physletb.2014.09.045
- ④ Haruki Watanabe, Tomas Brauner, Hitoshi Murayama, Massive Nambu-Goldstone Bosons, Phys. Rev. Lett., 査読有, 111, 2013, 5pp, DDI:10.1103/PhysRevLett.111.021601
- ⑤ Haruki Watanabe, Hitoshi Murayama, Redundancies in Nambu-Goldstone Bosons, Phys. Rev. Lett., 査読有, 110, 5pp, DDI:10.1103/PhysRevLett.110.181601
- ⑥ H. Watanabe, H. Murayama, Unified Description of Nambu-Goldstone Bosons without Lorentz Invariance, Physical Phys. Rev. Lett., 査読有, 108, 5pp, DDI:10.1103/PhysRevLett.108.251602

⑦H. Murayama, V. Rentala,
Randall-Sundrum graviton spin
determination using azimuthal angular
dependence, Phys. Rev., 査読有, D85, 2012,
7pp, DDI:10.1103/PhysRevD.85.095005

⑧H. Murayama, Y. Nomura, S. Shirai et al,
Compact supersymmetry,
Phys. Rev., 査読有, D86, 2012, 5pp,
DDI:10.1103/PhysRevD.86.115014

⑨H. Murayama, M.M. Nojiri, T. Tobioka,
Improved discovery of a nearly
degenerate model: MUED using MT2 at
the LHC, Phys. Rev., 査読有, D84, 2011,
22pp, DDI:10.1103/PhysRevD.84.094015

⑩J.L. Evans, B. Feldstein, W. Klemm, H.
Murayama, T.T. Yanagida, Hermitian
flavor violation, Phys. Lett., 査読有,
B703, 2011, 18pp,
DDI:10.1016/j.physletb.2011.08.059

[学会発表] (計 61 件)

①村山 齊, What's wrong with Goldstone?,
Low Energy Challenges for High Energy
Physicists, 2014. 5. 28, Perimeter
Institute, Ontario, Canada

②村山 齊, ILC, Exploring the Physics
Frontier with Circular Colliders,
2015. 1. 26, Aspen Center For Physics,
Colorado, USA

③村山 齊, Future Experimental Programs,
Nobel Symposium on LHC results,
2013. 5. 16, Krusenberg, Sweden

④村山 齊, Are we done with the LHC?, Planck
2013, 2013. 5. 20, Bonn, Germany

⑤村山 齊, Highlights and Perspectives,
Blois 2012, 2012. 6. 1, Blois, France

⑥村山 齊, Physics of the Linear Colliders,
The 2012IEEE, 2012. 10. 29, Anaheim, USA

[図書] (計 5 件)

①村山 齊, 集英社新書、宇宙を創る実験、
2014、8-96

②村山 齊, 講談社、宇宙になぜ我々が存在す
るのか、2013

③村山 齊, 集英社、宇宙はなぜこんなにうま
くできているのか、2012

④村山 齊, 講談社、宇宙は本当にひとつなの
か、2011

[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：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

<http://www.ipmu.jp/ja/hitoshi-murayama>

<http://hitoshi.berkeley.edu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村山 齊 (MURAYAMA, Hitoshi)

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・
特任教授

研究者番号：20222341

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：