

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244021

研究課題名(和文) LHC実験に基づく新たな素粒子モデルと宇宙像の構築

研究課題名(英文) New particle physics models and cosmological scenarios based on the LHC experiments

研究代表者

柳田 勉 (Yanagida, Tsutomu)

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：10125677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円、(間接経費) 10,320,000円

研究成果の概要(和文)：2012年、LHC実験においてヒッグス粒子がついに発見され、素粒子の標準模型を超える物理の探索が新たな時代に入った。特に超対称性モデルにおいて、126GeVというヒッグス粒子の質量は超対称性粒子の質量がこれまで考えられていたより大きいことを示唆しており、超対称性理論の研究に重大なインパクトを与えている。こうした状況を受けて、Pure Gravity Mediation など新たな素粒子モデルシナリオの提案を行い、さらにその実験的検証可能性の解析、大統一理論やフレーバーの物理への示唆の研究、暗黒物質を含む初期宇宙シナリオの構築などを行った。

研究成果の概要(英文)：The discovery of the Higgs boson in 2012 at the LHC triggered a new era of physics beyond the Standard Model. In particular, in the framework of supersymmetric (SUSY) models, the Higgs boson mass 126 GeV implies that the masses of SUSY particles might be (much) larger than expected before the LHC. This has a significant impact on SUSY models. We have proposed new particle physics models and scenarios, such as Pure Gravity Mediation, studied prospects for the experimental tests of those models, investigated their implications for the Grand Unified Theories and flavor physics, and constructed cosmological scenarios including Dark Matter.

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：LHC 初期宇宙 標準模型を超える素粒子物理

1. 研究開始当初の背景

本研究計画の研究期間(2010年度~2013年度)は7~8 TeVでのLHC実験の稼働時期と重なっており、この間に素粒子標準模型とそれを超える物理に関する実験的検証が飛躍的に進歩すると期待されていた。一方、研究代表者および研究分担者は本研究以前から、(i)新たな素粒子模型の構築、(ii)そのLHC実験での検証、(iii)素粒子論的宇宙論の諸問題について、多くの重要な理論的研究を行ってきた。また研究分担者の浅井はLHC実験のATLASグループにおけるリーダーの1人であり、標準模型を超える物理を切り拓く研究で主導的役割を果たしてきた。

2. 研究の目的

本研究はLHC実験の本格的始動とほぼ同時にスタートし、研究代表者および研究分担者が有機的に連絡を取りつつ研究を推進することで、新たな素粒子模型・宇宙像を構築することを目的とする。同時に、理論家と実験家の協力によりLHC実験における新たな実験・解析方法を探求する。

3. 研究の方法

研究期間中にLHC実験から発信される結果を分析・解析し、様々な新しい素粒子模型の提案および新しい宇宙像の構築を行った。

また本研究の推進をサポートするため、公募により特任研究員を採用した。(2011年4月~2011年9月に1名、2012年4月~2013年11月に1名。)

最終年度には研究会を開催し研究の総括を行った。

4. 研究成果

本研究計画の期間中、2012年にヒッグス粒子の発見という歴史的な出来事があった。これにより素粒子の標準模型の最後のピースが埋まり、同時に標準模型を超える物理の探索は新たな時代に突入した。

特に超対称性模型において、126 GeVというヒッグス粒子の質量は超対称性粒子の質量がこれまで考えられていたより大きいことを示唆しており、超対称性理論の研究に重大なインパクトを与えた。こうした状況を受けて、Pure Gravity Mediationなど新たな素粒子模型シナリオの提案を行い、さらにそれらに基づく初期宇宙シナリオの構築を行った。また素粒子模型の実験的検証可能性の解析、大統一理論やフレーバーの物理への示唆に関する研究も行った。

以下、主な研究成果の一部をまとめる。

(1) 高いスケールの超対称性模型

LHC実験で発見されたヒッグス粒子の質量126 GeVを自然に説明するシナリオとしてPure Gravity Mediationを提案した。これは超対称性の破れとその伝達機構に関してほとんど仮定を必要としない極めてシンプル

な模型である。この模型では超対称性粒子のうちスカラー粒子の質量、ヒッグシーノの質量、およびB-termの大きさは超重力理論の直接相互作用によりグラビティーノの質量と同程度の値を持つ一方、ゲージノの質量は1-loop分小さい値を持つ。このPure Gravity Mediationシナリオにおいてグラビティーノの質量を10-100 TeVと仮定すればヒッグスの質量126 GeVが自然と説明出来て、かつ宇宙論で深刻な問題であるグラビティーノ問題やフレーバーの問題も自然に解決される。

Pure Gravity Mediationでは典型的にW-bosonの超対称パートナーであるWinoが暗黒物質となる。Wino暗黒物質の熱的・非熱的生成機構について解析し、またガンマ線、反陽子、陽電子といった宇宙線によってWino暗黒物質のシグナルを検出する可能性について解析した。

また、上記の模型でnon universalなHiggsのsoft massを仮定すると100 TeV以下のグラビティーノの質量も無矛盾なく電弱対称性の破れを説明できることを示した。この結果は、次期のLHC実験で超対称性粒子が発見できる可能性があることを意味している。

上記のように、超対称性スカラー粒子が重いシナリオにおいては大統一理論も影響を受ける。一般に超対称性の破れのスケールが高い可能性を考慮し、ゲージ結合定数の一致から超対称大統一模型の質量スペクトラムを制限し、陽子崩壊を評価した。高い超対称スケールを仮定することで、ゲージ結合定数の統一が改善し、また陽子崩壊は自然に抑制される一方で将来の実験で観測される可能性を示した。

さらに10-100 TeV程度の質量を持つ超対称粒子がフレーバーやCPの破れに与え得る影響についても研究を行った。特に右巻きニュートリノを含む模型においては、ニュートリノセクターのフレーバーの破れの効果を将来レプトンフレーバーの破れの探査実験で観測し得ることを指摘した。

(2) ミューオン異常磁気モーメントと超対称性模型

ミューオン異常磁気モーメントの観測値は、標準模型における理論値と整合していない。その不整合は超対称性標準模型によって自然に説明する事が出来るが、そのためには超対称性粒子は比較的軽くなければならない。すると、126 GeVというヒッグス粒子の質量をシンプルな超対称標準模型の枠内で説明することは困難になる。超対称標準模型に更に新たな物質場(vector-like fields)を付け加えることで、ミューオン異常磁気モーメントの不整合の理由を説明したままヒッグス粒子の質量126 GeVを大きくできることを示した。またその模型および類似の模型が真空の安定性から強く制限されることを示した。さらにこの模型へのLHCでのSUSY探索

からの制限を調べた。

またミューオン異常磁気モーメントの不整合の理由を説明したままヒッグス粒子の質量 126GeV を大きくすることは、MSSM に対して $U(1)$ ゲージ対称性を付け加えたモデルでも可能であり、これを具体的なモデルで示した。

さらに上記の議論を一般化し、ミューオン異常磁気モーメントの不整合が示唆する一般的な超対称標準模型について、LHC におけるシグナル、スレプトン混合による真空の安定性、レプトンフレーバーや CP の破れを調べた。さらに ILC 実験においてスレプトンとニュートラリーノを観測できれば、ミュー粒子の異常磁気モーメントへの超対称性粒子の寄与が再構成できることを示した。

(3) その他の研究

これらの研究の他にも、研究代表者および研究分担者によって、LHC 実験に基づく新たな素粒子モデルと宇宙像の構築に関連した様々な研究が非常に活発に展開された。(4年間で査読付き雑誌に150本を超える論文が発表された。)

その一部の例を挙げると、

- ``Focus Point Gaugino Mediation'' 模型の提案と解析。このモデルでは naturalness の要請がかなり良く満たされている。この研究で、Higgsino の質量がかなり軽く予言され、ILC 実験計画でその存在を確かめることが可能であることを示した。
- 超対称 $SU(5)$ 大統一モデルにおける陽子崩壊について、中間スケールに新たな物質場が導入される場合 X ボゾンによる陽子崩壊の確率が大きくなることを示した。
- 超対称性の破れが電弱スケールより大きい場合、Wino または Higgsino 的なニュートラリーノは暗黒物質の候補である。暗黒物質直接探索に関わる核子・ニュートラリーノの弾性散乱断面積を、上記の場合に着目し、ループ効果も含め信頼性の高い評価を行った。
- 宇宙初期における Peccei-Quinn スカラー場の振る舞いについて、詳細な解析を行った。そして、これまで正しく取り入れられていなかった熱効果によって、Peccei-Quinn スカラー場の発展が大きな変更を受け得ることを明らかにした。さらに、axion 粒子の超対象パートナーである saxion 粒子が宇宙初期の熱浴からどのような影響を受けるかについての一般的議論を行い、saxion のポテンシャルや振動の減衰率についての議論を行った。さらにその結果を用い、超対称化された Peccei-Quinn 模型に対する制限を求めた。
- インフレーション中に作られた重力波のスペクトルについて、解析を行った。そして、重力波のスペクトルは宇宙発展により様々な影響を受けること、さらに、

将来 DECIGO 等の実験によって重力波のスペクトルが詳細に測定されれば宇宙発展についての様々な情報が得られることを指摘した。

- $U(1)(B-L)$ ゲージ対称性による暗黒物質粒子の安定性に注目し、その結果、モデルの詳細によらず導かれる2つの重要な暗黒物質候補である $SU(2)$ -triplet (ウィーノ) 暗黒物質と非対称 (Asymmetric) 暗黒物質について研究を行った。具体的にはこれら暗黒物質候補の LHC 加速器におけるシグナルはもとより、その宇宙論、暗黒物質の直接及び間接検出におけるシグナル研究を徹底的に行い、これまで行なれてきた実験からの制限及び近い将来における検出可能性について明らかにした。
- リトルヒッグス模型等の複合ヒッグス模型において予言されるトップ・パートナー粒子の LHC シグナルについて詳しく調べた。
- 模型に依存しない手法を用いて、LHC における暗黒物質生成過程について詳細な研究を行った。
- 超対称模型や余剰次元模型など TeV スケールの物理において、暗黒物質を構成する素粒子とカラーを持った素粒子が縮退しているとそれらの模型の兆候を LHC で探索することが困難である。暗黒物質直接探索がそのような状況に対して感度があることを示した。
- 模型に依存しない手法を用いて、テラスケールの新物理が、LHC 実験におけるトップクォーク対生成に与える影響について研究を行った。特に新物理が QCD 過程においてパリティ対称性を破る可能性に注目し、新物理の予言するカラー荷を持つ新粒子のスペクトルとパリティ対称性の破れの関係を解析し、破れの大きさを定量的に評価した。
- 超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオを考える上で重要な役割を果たす thermal inflation について考察した。そして、thermal inflation 終了時に生成される domain wall の消滅に伴い生じる重力波が、将来観測される可能性がある事を示した。

(4) 研究会開催

最終年度には本科学研究費を用いて国際ワークショップを開催した。(``SUSY: Model-building and Phenomenology, ''2012年12月2日~4日、カブリ数物連携宇宙研究機構。) LHC 実験でヒッグス粒子が発見されたこと、またその一方で LHC やその他の実験での新物理探査においてシグナルが発見されず超対称模型に非常に強い制限が得られたことを踏まえて、新しい超対称模型 (及びその他の模型) を議論する12の招待講演と7の依頼講演が行われた。参加者の人数は当初

の予定を大幅に超え、ヒッグス粒子発見後の新たな素粒子模型および宇宙像について、非常に有意義で活発な議論が行われた。

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158件、全て査読有り)

1. A natural scenario for heavy colored and light uncolored superpartners, Gautam Bhattacharyya, Biplob Bhattacharjee, Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki. Phys.Lett. B725 (2013) 339-343.
2. Non-Universalities in Pure Gravity Mediation, Jason L. Evans, Keith A. Olive, Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida. Eur.Phys.J. C73 (2013) 2611.
3. Bino-Higgsino Mixed Dark Matter in a Focus Point Gaugino Mediation, Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki. JHEP 1311 (2013) 020.
4. A Closer Look at Gaugino Masses in Pure Gravity Mediation Model/Minimal Split SUSY Model, Keisuke Harigaya, Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida. JHEP 1312 (2013) 016.
5. Scalar Trapping and Saxion Cosmology, Takeo Moroi, Kyohei Mukaida, Kazunori Nakayama, Masahiro Takimoto. JHEP 1306 (2013) 040.
6. Inflationary Gravitational Waves and the Evolution of the Early Universe, Ryusuke Jinno, Takeo Moroi, Kazunori Nakayama. JCAP 1401 (2014) 040.
7. Grand Unification in High-scale Supersymmetry, Junji Hisano, Takumi Kuwahara, Natsumi Nagata. Phys.Lett. B723 (2013) 324-329.
8. Decoupling Can Revive Minimal Supersymmetric SU(5), Junji Hisano, Daiki Kobayashi, Takumi Kuwahara, Natsumi Nagata. JHEP 1307 (2013) 038.
9. QCD Corrections to Quark (Chromo)Electric Dipole Moments in High-scale Supersymmetry, Kaori Fuyuto, Junji Hisano, Natsumi Nagata, Koji Tsumura. JHEP 1312 (2013) 010.
10. Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the two-Higgs doublet models, Tomohiro Abe, Junji Hisano, Teppei Kitahara, Kohsaku Tobioka. JHEP 1401 (2014) 106.
11. Phenomenology of light fermionic asymmetric dark matter, Biplob Bhattacharjee, Shigeki Matsumoto, Satyanarayan Mukhopadhyay, Mihoko M. Nojiri. JHEP 1310 (2013) 032.
12. AMS-02 Positrons from Decaying Wino in the Pure Gravity Mediation Model, Masahiro Ibe, Shigeki Matsumoto, Satoshi Shirai, Tsutomu T. Yanagida. JHEP 1307 (2013) 063.
13. Muon $g-2$ vs LHC in Supersymmetric Models, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Sho Iwamoto, Takahiro Yoshinaga. JHEP 1401 (2014) 123.
14. Probing Bino contribution to muon $g-2$, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Teppei Kitahara, Takahiro Yoshinaga. JHEP 1311 (2013) 013.
15. Reconstructing Supersymmetric Contribution to Muon Anomalous Magnetic Dipole Moment at ILC, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Sho Iwamoto, Teppei Kitahara, Takeo Moroi. Phys.Lett. B728 (2014) 274-281.
16. Thermal Effects on Saxion in Supersymmetric Model with Peccei-Quinn Symmetry, Takeo Moroi, Masahiro Takimoto. Phys.Lett. B718 (2012) 105-112.
17. Enhancement of Proton Decay Rates in Supersymmetric SU(5) Grand Unified Models, Junji Hisano, Daiki Kobayashi, Natsumi Nagata. Phys.Lett. B716 (2012) 406-412.
18. Direct Search of Dark Matter in High-Scale Supersymmetry, Junji Hisano, Koji Ishiwata, Natsumi Nagata. Phys.Rev. D87 (2013) 035020.
19. Search for the Top Partner at the LHC using Multi-b-Jet Channels, Keisuke Harigaya, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri, Kohsaku Tobioka. Phys.Rev. D86 (2012) 015005.
20. Model Independent Analysis of Interactions between Dark Matter and Various Quarks, Biplob Bhattacharjee, Debajyoti Choudhury, Keisuke Harigaya, Shigeki Matsumoto, Mihoko M. Nojiri. JHEP 1304 (2013) 031.
21. Relatively Heavy Higgs Boson in More Generic Gauge Mediation, Jason L. Evans, Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida. Phys.Lett. B705 (2011) 342-348.
22. The Lightest Higgs Boson Mass in Pure Gravity Mediation Model, Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida. Phys.Lett. B709 (2012) 374-380.
23. Extra Matters Decree the Relatively Heavy Higgs of Mass about 125 GeV in the Supersymmetric Model, Takeo Moroi, Ryosuke Sato, Tsutomu T. Yanagida. Phys.Lett. B709 (2012) 218-221.

24. Direct Detection of Dark Matter Degenerate with Colored Particles in Mass, Junji Hisano, Koji Ishiwata, Natsumi Nagata. Phys.Lett. B706 (2011) 208-212.
25. Domain Walls and Gravitational Waves after Thermal Inflation, Takeo Moroi, Kazunori Nakayama. Phys.Lett. B703 (2011) 160-166.
26. Exploring Supersymmetric Model with Very Light Gravitino at the LHC, Masaki Asano, Takumi Ito, Shigeki Matsumoto, Takeo Moroi. JHEP 1203 (2012) 011.
27. Studying Very Light Gravitino at the ILC, Shigeki Matsumoto, Takeo Moroi. Phys.Lett. B701 (2011) 422-426.
28. Direct Detection of Electroweak-Interacting Dark Matter, Junji Hisano, Koji Ishiwata, Natsumi Nagata, Tomohiro Takesako. JHEP 1107 (2011) 005.
29. Stau Kinks at the LHC, Shoji Asai, Yuya Azuma, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Sho Iwamoto. JHEP 1112 (2011) 041.
30. Spin and Chirality Determination of Superparticles with Long-Lived Stau at the LHC, Takumi Ito, Takeo Moroi. Phys.Lett. B694 (2011) 349-354.
31. Charge-breaking constraints on left-right mixing of stau's, Junji Hisano, Shohei Sugiyama. Phys.Lett. B696 (2011) 92-96, Erratum-ibid. B719 (2013) 472-473.
32. Seesaw Neutrino Signals at the Large Hadron Collider, Shigeki Matsumoto, Takehiro Nabeshima, Koichi Yoshioka. JHEP 1006 (2010) 058.

他 1 2 6 件 (計 1 5 8 件)
 (全て理論研究。研究分担者の浅井祥仁氏らによる ATLAS 実験グループの論文は除いた。)

[学会発表](計 7 7 件)

1. ``Pure Gravity Mediation --- Rethinking Naturalness in Landscape ---,`` Tsutomu Yanagida, Current Themes in High Energy Physics and Cosmology (August 12-16, 2013), Niles Bohr Institute, Copenhagen.
2. ``Probing Beyond-the-Standard-Model Physics with Inflationary Gravitational Waves,`` Takeo Moroi, PLANCK 2013 (May 20 -- 24, 2013), Bonn, Germany.
3. ``Flavor and CP Violations as Probes of BSM Physics,`` Takeo Moroi, The 3rd KIAS Phenomenology Workshop (November 11 -- 15, 2013), Seoul, Korea.
4. ``A dark matter charged under U(1)(B-L),`` Shigeki Matsumoto, Third Workshop on Flavor Symmetries, FLASY13, (01--05 July, 2013), Niigata, Japan.
5. ``Wino Dark Matter Revisited,`` Shigeki Matsumoto, The 3rd KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology (11--15 November, 2013) KIAS, Korea.
6. ``Proton Decay in SUSY GUTs revisited,`` Junji Hisano, 2013 International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation (BLV2013): From the Cosmos to the LHC (2013/4/8-11) MPIK Heidelberg, Germany.
7. ``Neutron EDM and physics beyond the standard model,`` Junji Hisano, CP VIOLATION IN ELEMENTARY PARTICLES AND COMPOSITE SYSTEMS (PCPV2013) (2013/2/19-23) MPIK Heidelberg, Germany Fountain Hotel, Mahabaleshwar, Maharashtra, India.
8. ``EDMs and beyond the standard model,`` Junji Hisano, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大学) 実験核物理領域, 素粒子論領域, 素粒子実験領域, 理論核物理領域合同シンポジウム EDM 探索の新展開 (2013/9/23).
9. ``Tasks in Next 10 Years- A personal view on future of searches for beyond the standard model-,`` Junji Hisano, KMI International Symposium 2013 on ``Quest for the Origin of Particles and the Universe'' (KMI 2013) Nagoya university (2013/12/11-13).
10. ``Review of Electric Dipole Moments (EDMs),`` Junji Hisano, Rencontres de Moriond "ELECTROWEAK INTERACTIONS AND UNIFIED THEORIES" (2014/3/15-21).
11. ``Supersymmetry after Higgs discovery,`` Koichi Hamaguchi, ECFA Linear Collider Workshop 2013 (2013/5/29) DESY Hamburg, Germany.
12. ``Supersymmetry after Higgs discovery,`` Koichi Hamaguchi, Higgs and Beyond (2013/6/6) 東北大学.
13. ``126GeV Higgs からテラスケールへ,`` Koichi Hamaguchi, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大学) (2013/9/21).
14. ``Why haven't SUSY particles been observed yet?`` Tsutomu Yanagida, Implications of the Early LHC for Cosmology, April 2012, DESY, Hamburg.

15. ``Supersymmetry, Peccei-Quinn symmetry, and cosmology,`` Takeo Moroi, SUSY2012 (August 13 -- August 18, 2012), Beijing, China.
16. `` Lepton-Flavor Violation and Physics beyond the Standard Model,`` Junji Hisano, 7th Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM 2012) 2012/9/28, University of Cincinnati.
17. `` Lepton-Flavor Violation and Physics beyond the Standard Model,`` Junji Hisano, 12th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU 2012) 2012/9/28, Nagoya University.
18. ``Phenomenology of the Wino Dark Matter,`` Shigeki Matsumoto, Summer Institute 2012, Sun Moon Lake (Taiwan), Aug. 18-24, 2012.
19. ``Phenomenology of Pure Gravity Mediation,`` Shigeki Matsumoto, SKKU Symposium on Astrophysics and Cosmology, SKKU (Korea), Aug. 30-Sept. 1, 2012.
20. ``The origin of matter,`` Tsutomu Yanagida, Heinrich Hertz Lecture 2011, September 28, 2011, DESY, Hamburg.
21. ``The origin of matter --- Leptogenesis ---,`` Tsutomu Yanagida, Shoichi Sakata Centennial Symposium, October 27-28, 2011, Nagoya University, Nagoya.

他 5 6 件 (計 7 7 件)

〔その他〕アウトリーチ活動

2013年1月, 松本, ダークマターと素粒子物理学 (NHK 柏文化センター)

2013年1月, 濱口, 三省堂サイエンスカフェでの講演

2012年11月, 松本, About dark matter of universe (SSH 東京都立科学技術高校)

2012年1月, 濱口, 朝日カルチャーセンターでの講演

2011年6月, 松本, "Dark matter detections at colliders" (多摩六都科学館)

他多数

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳田 勉 (TSUTOMU YANAGIDA)

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: 10125677

(2) 研究分担者

浅井祥仁 (SHOJI ASAI)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 60282505

濱口幸一 (KOICHI HAMAGUCHI)

東京大学・理学系研究科・准教授

研究者番号: 80431899

久野純治 (JUNJI HISANO)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号: 60300670

松本重貴 (SHIGEKI MATSUMOTO)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号: 00451625

諸井健夫 (TAKEO MOROI)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 60322997