

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287039

研究課題名(和文) 高スケール超対称模型の理論及び現象論的研究

研究課題名(英文) Theoretical and phenomenological studies of High-scale supersymmetric model

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) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：LHC実験におけるヒッグス粒子の発見、及び様々な実験・観測における新物理シグナルの未発見を踏まえ、現在最も有望な素粒子模型の一つと考えられている高スケール超対称模型(Pure Gravity Mediation Model)について、理論及び現象論の両側面から研究を行った。本模型における電弱スケールに関する階層性問題の可決案を提案し、ガンマ線観測を用いた(本模型が予言する)暗黒物質の探査を通じて確かな検証が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have intensively studied the high-scale supersymmetry model (Pure gravity mediation model) from both theoretical and phenomenological viewpoints, which is now known to be one of the most influential models thanks to the discovery of the Higgs boson at the LHC as well as the non-observation of robust new physics signals at various experiments and observations. We have proposed a novel idea to solve the so-called the hierarchy problem concerning the electroweak scale within the framework of the model and have shown that the indirect detection of the dark matter (predicted in the model) utilizing the gamma-ray observation of dwarf spheroidal galaxies allows us to robustly test the model in near future.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 超対称性 最小超重力誘導型超対称標準理論 LHC現象論 暗黒物質現象論

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初は、大型ハドロン衝突型加速器実験 LHC においてヒッグス粒子が発見され、その質量が約 125GeV 程度であることが判明した直後であった。一方、確実な新物理シグナルは、LHC 実験や地下実験における暗黒物質探査をはじめ、全ての実験及び観測において発見されていなかった。それらの事情を踏まえた結果、典型的な超対称性粒子の質量が 10—100 TeV と重くなる超対称性模型、いわゆる Pure Gravity Mediation Model が大きな注目を集めていた。尚、同様な状況は 2018 年の現在も続いている。

Pure Gravity Mediation Model は、これまで行われてきた実験と無矛盾であり、また宇宙観測からくる厳しい制限とも矛盾しない一方、最もシンプルな超対称性の破れの伝達機構を用いて記述される模型として知られていたが、次に述べる二つの問題も指摘されていた。一つは、典型的な超対称粒子が重く予言されることから生じる、電弱スケールを説明するための微調整問題である。二つ目は、実験的な検証が他の超対称性模型と比べ難しいことである。理論的な側面から本模型はとても強い動機を持つため、研究計画当初において、この二つの問題の解決について明確な見通しを得ることが強く求められていた。

2. 研究の目的

大型ハドロン衝突型加速器実験 LHC におけるヒッグス粒子の発見、及び新物理探査におけるシグナルの未発見を踏まえ、現在最も有望な素粒子模型の一つと考えられている高スケール超対称模型、いわゆる Pure Gravity Mediation Model、について、理論及び現象論の両側面から徹底的に研究を進める。

理論的側面からは、大統一理論やフレーバ対称性との整合性、本模型が予言する初期宇宙像を調べると同時に、電弱スケールを理解するための微調整問題について再考する。特に微調整問題では、従来の解決手法とは異なり、本超対称模型と宇宙論との整合性等を考慮することにより電弱スケールを説明できる可能性があり、これについて研究を行う。

現象論的な側面からは、本模型に対する制限を徹底的に調べると同時に、近い将来に本模型を完全にテストする実験・観測を明らかにする、あるいは新たに提案することを目的とする。特に現在感度が著しく上がっている宇宙線反陽子観測において、本模型の予言する暗黒物質シグナルが受かっていないのかどうか、また将来において感度の上昇が期待されるガンマ線観測において、暗黒物質シグナルを用いて確実な手法で本模型の検証が可能であるのかどうかについて研究を行う。

3. 研究の方法

前項(研究の目的)での方針に従い、高スケール超対称性模型(Pure Gravity Mediation Model)を徹底的に研究するために必要な重点研究項目として、模型構築等に関する研究、初期宇宙論との整合性を追求する研究、加速器における本模型の検証可能性を調べる研究、暗黒物質探査を通じた本模型の検証を調べる研究の4項目を設定し、効率的に研究を進める。前2項目は本模型の理論側面の研究、後2項目は現象論側面の研究に相当する。

理論側面の研究では、何故微調整問題が生じない大きさで超対称性が破れなかったのかについて考察を進める。本模型の特徴として Gaugino の質量スペクトル構造が非常に制限されており、微調整問題が生じない大きさで超対称性が破れた場合には、現在の宇宙における暗黒物質質量の説明に困難が生じることが判明しつつある。本問題をさらに追求し、微調整問題が生じない大きさでの超対称性の破れでは現在の宇宙を再現不可能であったことが明らかになれば、微調整問題の一つの解へとつながる。

現象論側面の主な研究の方法は以下の二つである。一つ目は、本模型が予言する Wino 暗黒物質のガンマ線を用いた間接検出において重要となる、我々の近傍の楕円体銀河(dSph)内の暗黒物質分布を、観測データのみを用いて評価を行う。またその結果を用いて、暗黒物質の間接検出からの本模型に対する最も信頼できる制限を与える。二つ目は、LHC 実験における Gluino 対生成に注目する。特にジェット・サブストラクチャーを用いた解析等を考慮し、本模型の探査において LHC 実験のポテンシャルを限界まで引き出す解析法の確立を目指す。

4. 研究成果

幸いにも、上記研究計画をほぼ完全な形で遂行することができた。活発な研究活動の結果、次項(発表論文等)や各年度における実績報告でも報告したとおり、非常に多数の論文を発表するに至り、研究代表者及び研究分担者共に、本研究課題に関して数多くの招待講演を国内外の会議より受けることができた。本研究において得られた結果のうち、特に重要と思われるものについて以下で報告する。

(1) 本模型における微調整問題の解決案

高スケール超対称性模型(Pure Gravity Mediation Model)では、“TeV 以下のより低いスケールの超対称性が実現していないのは何故か?”という問いに答える必要がある。その答えの可能性の一つとして、宇宙論による超対称性スケールへの下限の存在を

議論し、その具体例として、超対称性理論において重要であると考えられている離散的 R-対称性の自発的対称性の破れに注目した。離散的 R-対称性の破れのスケールは、超対称性の破れのスケールと直結しているが、その自発的破れが宇宙のインフレーション前に起こる必要があるとの要請から、インフレーションのエネルギースケールによっては超対称性粒子の下限が 100TeV 以上となり得ることを示し、本模型における微調整問題の解の一つとなることを明らかにした。図 1 は、この議論を図式的に表したものである。

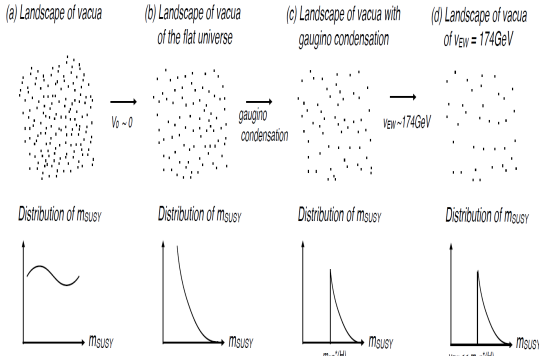


図 1 : 次項(発表論文等)の論文 より抜粋

(2) 宇宙反陽子観測からの示唆

Pure Gravity Mediation Model は弱電荷 1 を持つ WIMP 暗黒物質 (Wino) の存在を预言するが、この暗黒物質は現在の宇宙においてゾンマーフェルト効果により活発に対消滅を行うと期待されている。そのため宇宙線反陽子の新たな発生源となる可能性があり、その兆候が観測の感度が高い AMS-02 実験で捉えられる可能性が指摘されていた。

図 2 は観測で得られた反陽子と陽子のフラックス比を本模型が预言する Wino からの寄与と比較したものである。実線は Wino の寄与がある場合で、破線は寄与がない場合であるが、寄与がある場合のほうが観測結果と良く合う。背景宇宙線反陽子のフラックスは不定性が大きいので、まだ確たる証拠とは言えないが、本模型の動機を強める結果といえる。

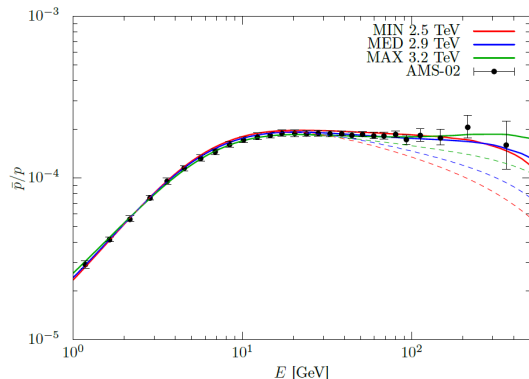


図 2 : 次項(発表論文等)の論文 より抜粋

(3) ガンマ線観測を用いた本模型の検証

最も軽い超対称性粒子である Wino (暗黒物質) の探査は、本模型の検証として最も有効な手法の一つである。現在の宇宙で活発に対消滅する Wino は新たなガンマ線源ともなるため、CTA 実験等の近い将来での高感度ガンマ線観測において検出が期待されている。

ガンマ線観測で最も有望なターゲットとして暗黒物質を大量に含む矮小楕円体銀河 (dSph) が挙げられるが、その観測の感度が本模型の検証に充分であるのかを評価するためには、dSph 内の暗黒物質分布を正確に見積もる必要がある。そこで dSph の非球状性も考慮してより正確に暗黒物質分布を評価した。図 3 は分布より得られる J 因子についてまとめたもので、赤字は我々の結果、他はこれまでの結果である。現在この結果は様々な論文や講演で数多く引用されている。

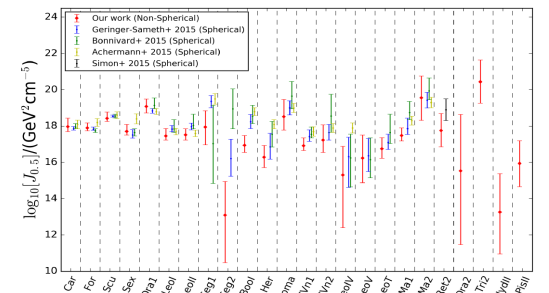


図 3 : 次項(発表論文等)の論文 より抜粋

(4) クォークとグルーオンジェットの識別

LHC ではクォークやグルーオンといったカラーを持つ粒子が多数つくられ、同方向に進むハドロン束であるジェットとなる。ジェットがクォークとグルーオンのどちらに由来するのかわかることは、これまで識別できないと考えられてきたが、最近の研究により、これを定性的に調べることが可能となった。多くの新物理シグナルがクォークジェットを伴う一方、バックグラウンドは主にグルーオンにより生成される。この知見に基づき、超対称粒子などが暗黒物質と複数のジェットに壊れる有望なプロセスについて、クォークジェットとグルーオンジェットの識別により、LHC の感度が著しく向上することを示した。図 4 はこの向上を定量的に示したものである。

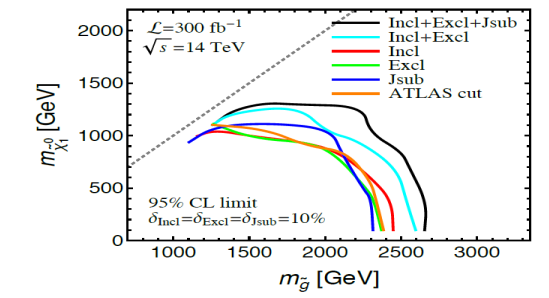


図 4 : 次項(発表論文等)の論文 より抜粋

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

B. Bhattacharjee, S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, Y. Sakaki, B. R. Webber, Quark-gluon discrimination in the search for gluino pair production at the LHC, JHEP01(2017)44, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP01(2017)044.

M. Ibe, M. Suzuki, T. T. Yanagida, Revisiting gravitino dark matter in thermal Leptogenesis, JHEP02(2017)63, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP02(2017)063.

K. Nakayama, F. Takahashi, T. T. Yanagida, Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis, PLB757(2016)32, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2016.03.051

T. T. Yanagida, W. Yin, N. Yokozaki, Nambu-Goldstone Boson Hypothesis for Squarks and Sleptons in Pure Gravity Mediation, JHEP09(2016)86, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP09(2016)086.

K. Hayashi, K. Ichikawa, S. Matsumoto, M. Ibe, M. N. Ishigaki, H. Sugai, Dark matter annihilation and decay from non-spherical dark halos in galactic dwarf satellites, MNRAS461(2016)2914, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stw1457.

K. Nakayama, F. Takahashi, T. T. Yanagida, Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis, PLB757(2016)32, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2016.03.051

K. Harigaya, M. Ibe, K. Schmitz, T. T. Yanagida, Cosmological Selection of Multi-TeV Supersymmetry, PLB749(2015)298, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2015.07.073.

M. Ibe, S. Matsumoto, S. Shirai, T. T. Yanagida, Wino dark matter in light of the AMS-02 2015 Data, PRD91(2015)111701. 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.111701.

K. Harigaya, K. Ichikawa, A. Kundu, S. Matsumoto, S. Shirai, Indirect Probe of Electroweak-Interacting Particles at Future Lepton Colliders, JHEP09(2015)105, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP09(2015)105.

B. Bhattacharjee, S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, Y. Sakaki, B. R. Webber, Associated jet and subjet rates in light-quark and gluon jet discrimination, JHEP04(2015)131, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP04(2015)131.

M. Ibe, S. Matsumoto, S. Shirai, T. T. Yanagida, Mass of Decaying Wino from AMS-02 2014, PLB741(2015)134, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.12.016.

K. Harigaya, T. T. Yanagida, Pure Gravity Mediation and Chaotic Inflation in Supergravity, PRD90(2014)75022, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.075022.

B. Bhattacharjee, M. Ibe, K. Ichikawa, S. Matsumoto, K. Nishiyama, Wino Dark Matter and Future dSph Observations, JHEP1407(2014)80, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP1407(2014)080.

S. Mukhopadhyay, M. M. Nojiri, T. T. Yanagida, Compressed SUSY search at the 13 TeV LHC using kinematic correlations and structure of ISR jets, JHEP1410(2014)12, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP10(2014)012.

H. Murayama, K. Nakayama, F. Takahashi, T. T. Yanagida, Sneutrino Chaotic Inflation and Landscape, PLB738(2014)196, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.09.045.

[学会発表](招待講演)(計 15 件)

M. Ibe, Thermal Relic Dark Matter Beyond the Unitarity Limit, KEK-PH 2017, 2017.2.14, KEK, Japan.

T. T. Yanagida, Neutrino mass in the landscape of vacua, CosPA 2016, 2016.11.28, U. Sydney, Australia.

F. Takahashi, Axions, Invisibles 16 workshop, 2016.9.14, Orto Botanico, Padova, Italy.

M. Nojiri, The Case for the WINP; the Case for a New Idea, ICHEP 2016, 2016.8.10, Sheraton Grand Chicago, USA.

S. Matsumoto, Current Status and Future Prospects of WIMP Paradigm, The 1st KEK-KIAS-NCTS Joint Workshop on Particle Physics Phenomenology,

2016.5.26, NCTS, Taiwan.

M. Ibe, A model of heavy QCD axion, Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, 2016.3.7, OIST, Japan.

T. T. Yanagida, The Origin of Matter in the Universe, Colloquium in The University of Melbourne, 2015.11.24, U. Melbourne, Australia.

M. Nojiri, Most General BSM, Gordon Research Conference, 2015.6.9, The Hong Kong University of Science and Technology, China.

F. Takahashi, Axion and Higgs Domain Walls - inflation, GWs, and baryogenesis, String Phenomenology 2015, 2015.6.9, U. A. Madrid, Spain.

S. Matsumoto, Physics and Perspectives of the ILC, PHEN02015, 2015.5.6, U. Pittsburgh, USA.

M. Nojiri, Quark gluon separation at LHC, Flavor and top physics @ 100TeV workshop, 2015.3.4-7, HEP Beijing, China.

S. Matsumoto, Wino dark matter: Its motivation and detection, LHCDM-2015, 2015.2.9-18, IACS Kolkata, India.

T. T. Yanagida, Chaotic Inflation from Particle Physics, CosPA 2014, 2014.12.8-12, U. Auckland, New Zealand.

M. Ibe, Inflation potential from strong dynamics, Model Building in the LHC ERA, 2014.8.3-31, Aspen Center for Physics, USA.

F. Takahashi, Searching high and low for traces of inflation, String Phenomenology 2014, 2014.7.7-11, ICTP, Italy.

6 . 研究組織

(1) 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： 1 0 1 2 5 6 7 7

(2) 研究分担者

松本 重貴 (MATSUMOTO, Shigeki)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・

准教授

研究者番号： 0 0 4 5 1 6 2 5

伊部 昌宏 (IBE, Masahiro)

東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号： 5 0 5 9 9 0 0 8

野尻 美保子 (NOJIRI, Mihoko)

高エネルギー加速器研究機構・
素粒子原子核研究所・教授
研究者番号： 3 0 2 2 2 2 0 1

高橋 史宜 (TAKAHASHI, Fuminobu)

東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号： 6 0 5 0 3 8 7 8