

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740151

研究課題名(和文) R-対称性を持つ超対称理論の研究とその実験的検証

研究課題名(英文) Study on supersymmetric theories with R-symmetry and its experimental implications.

研究代表者

伊部 昌宏 (Ibe, Masahiro)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：50599008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：R-対称性は超対称理論が持ち得る対称性で、超対称性と非可換であるという特殊性質のため理論に強い制限を与え得る。本研究ではR-対称性の一般的性質、素粒子現象論および宇宙論への影響に関する様々な成果を得た。それらの成果には広いクラスの超対称統一モデルにおけるR-対称性への制限、超場形式の超重力理論でのR-対称性の量子異常の取り扱い、離散的R-対称性の自発的破れの宇宙論への影響などが含まれる。また現在最も有力なモデルの一つである純粋重力伝搬型モデルにおいてはR-対称性が重要であるが本研究によってそのモデルがLHC実験および宇宙線実験を通してどのように検証可能であるかについても大きな進展を得た。

研究成果の概要(英文)：The R-symmetry is a symmetry in a supersymmetric theory which is not commutative with supersymmetry. Due to its peculiar nature, R-symmetry puts strong constraints on supersymmetric models. In this project, we achieved substantial results as for generic aspect of the R-symmetry, as well as its effects on particle phenomenology and cosmology.

Some of those results are, generic constraints on the R-symmetry in a large class of supersymmetric grand unified theory, consistent treatment of the quantum anomaly of the R-symmetry in the superspace formalism of supergravity, and cosmological consequences of spontaneous breaking of a discrete R-symmetry.

In addition, we also made substantial progress on how to test the so-called pure gravity mediation model by the LHC experiments and the cosmic ray experiments, where the R-symmetry plays important roles.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子理論 超対称性 宇宙論

1. 研究開始当初の背景

(1) R-対称性は超対称理論が持つことの出来る対称性で、超対称性と非可換であるという特殊性質のため理論に強い制限を与えることが分かっている。そのため、R-対称性は超対称性を持つ様々な模型の構築において応用されて来た。中でも特に R-対称性が重要な役割を果たすと考えられている問題に、超対称性の自発的破れのメカニズム [1, 2, 3, 4]、超対称性の破れの伝搬メカニズム及び超対称粒子の質量スペクトル [5, 6, 7, 8, 9]、大統一超対称模型におけるヒッグス 2 重項 3 重項問題 [10, 11, 12]、宇宙のインフレーションの模型 [13, 14, 15]、超対称模型の宇宙項問題 [16, 17] 等が挙げられる。これらの問題はそれぞれが超対称模型における重要な問題であり、R-対称性はこれらの問題への応用を通して多方面から研究されている。なお、それぞれの問題における R-対称性の応用に関する参考文献は非常に多く存在するが、ここでは代表的な文献や最近の発展を幾つか挙げるにとどめている。

(2) このように様々な問題に應用されている R-対称性ではあるが、理解が不十分な点がまだ多く存在する。特にそれぞれの應用で用いられている R-対称性が独立なものなのか、それとも同じ起源を持つ共通の対称性として理解出来るのかという問題については十分な考察がなされていない。なお R-対称性にはそれが厳密な対称性であるとする必然的に時空の対称性の一部になっており理論に一つしか存在出来ない。従って、もし多くの應用で考えられている R-対称性がそれぞれ独立であるならば、それらはそれぞれ近似的で偶然の対称性であることになる。その場合、R-対称性が上述の多くの問題に同時に解を与えているとは考えにくい。一方、R-対称性が厳密で唯一の対称性であるとする、当然それぞれの應用で用いられている R-対称性が互いに無矛盾でなければならない。本研究の開始当初、そのような互いの無矛盾性やそのことから導かれる理論への制限についての研究はまだ十分になされていなかった。また理論的な側面においても例えば R-対称性の量子異常を通じた超対称性の破れの伝搬機構が知られているが超場形式における超重力理論においてどのように取り扱われるべきかも課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、R-対称性の性質をより深く考察し R-対称性が及ぼす超対称標準模型への影響を調べることでより現実的な超対称標準模型を構築すること及び R-対称性の有無の実験的検証の可能性の追求することを大きな目的としている。R-対称性による超対称模型への制限はこれまでも多く研究されているが、本研究では特に R-対称性の起源や種々の應用間の無矛盾性を追求することでこれまで考えられて来た制限よりも強い制限を得ることを目標としている。また、実験で超対称粒子の質量スペクトルのヒントが得られた場合 R-対称性の関係性を調べることで、R-対称性の実験的な検証につなげて行く。さらに R-対称性の自発的破れに伴って予言される軽い新粒子の観測を通じた R-対称性の直接的な検証や R-対称性が重要となる純粋重力伝搬型の超対称標準模型の実験的検証の展望を整理することも目的としている。R-対称性の及ぼす宇宙論への影響についても理解を深めることを目標としている。これらに加え、より理論的な側面の問題、例えば R-対称性の量子異常を通じた超対称性の破れの伝搬機構の超場

形式での超重力理論における無矛盾性の問題などについても解決を目指している。

3. 研究の方法

本研究では R-対称性の様々な側面を研究対象とするものであるがその際に素粒子現象論、宇宙論及び場の量子論を包括的に考察しながら研究を進めていく。例えば自発的破れの模型とインフレーション模型との関連、さらにこれまでの申請者の研究結果 [18, 19, 20, 4] を合わせて考察することで超対称模型に対する新たな制限及び予言について調べて行く。また R-対称性が重要な働きをしている純粋重力伝搬型の超対称標準模型の場合その模型が予言するゲージノの質量を LHC 実験、宇宙線観測を通してどこまで明らかにできるのか問いつた問題についてはシミュレーションを通して考察を進める。また理論の様々は無矛盾性を追求することで R-対称性の可能性を探っていく。

これらの研究および上記の研究目的にあげた事項について適宜共同研究者と共に議論を進めていく。

4. 研究成果

本研究では R-対称性の一般的性質、素粒子現象論および宇宙論への影響に関する様々な成果を得た。

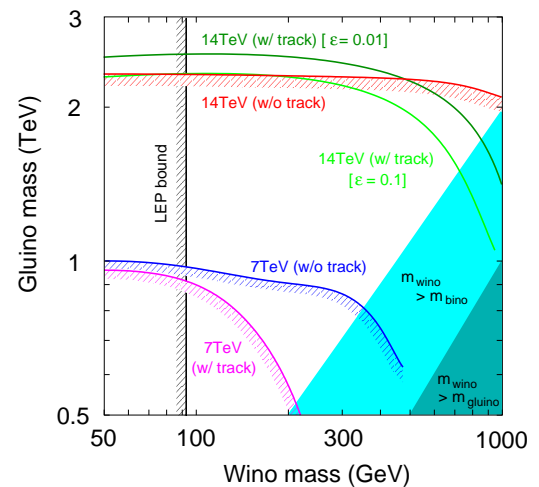


Figure 1: LHC 実験で将来検証可能なグルイーノ及びウィーノの質量領域。ここでは 14TeV で 300 fb⁻¹ のデータをためた場合を想定している。(詳細については [21] を参照)

(1) その一つ例としていわゆる純粋重力伝搬型の超対称標準模型が今後の LHC 実験でどこまで検証できるのかについて考察した結果を挙げる [21]。純粋重力伝搬型では非常に重く 100TeV 程度の質量を持つ squark (quark の超対称パートナー) によって観測されたヒッグス粒子の質量を説明する一方で R-対称性によってゲージノ (ゲージ粒子の超対称パートナー) は TeV 領域に存在する模型となっている。我々の考察の結果グルイーノ (グルーオンの超対称パートナー) の質量およびウィーノ (ウィークゲージボソンの超対称パートナー)

の質量がそれぞれ 2.4 TeV および 1 TeV 程度までの領域を 14 TeV の LHC 実験 (ルミノシティ 300 fb⁻¹) によって検証可能であることを示した (Figure 1)。この研究成果はゲージノの探索に焦点を絞った点で先駆的な研究と言え現在までに 60 回以上引用されている。なおこの成果は Bhattacherjee 氏, Feldstein 氏, 松本氏, 柳田氏 との共同研究によるものである。

(2) 純粋重力伝搬型の超対称標準模型における荷電ウィーノと中性ウィーノの質量差の理論予想を 2-loop order の精度で評価した。荷電ウィーノと中性ウィーノの質量差は標準模型のゲージ対称性の破れを通じてのみ生じるため非常に小さく 164 MeV 程度である。そのため荷電ウィーノの寿命が $\mathcal{O}(1)$ ps と比較的長く加速器実験の検出器内に消失する荷電軌跡を残し得る。このチャンネルは超対称性粒子探索の重要なチャンネルの一つとなっている。本研究以前には質量差の理論予想は 1-loop order の精度までしか行われていなかったため $\mathcal{O}(1)$ MeV の不定性が存在したが本研究によって不定性が $\mathcal{O}(0.1)$ MeV にまで抑えられた。その結果荷電軌跡探索からくるウィーノ質量制限への不定性が抑えられ質量下限大きく改善した (Figure 2) [22]。2-loop order の精度での任意のウィーノ質量に対する質量差の理論様相は本研究が世界初であり現在までに 50 回以上引用されている。なおこの成果は佐藤氏, 松本氏との共同研究によるものである。

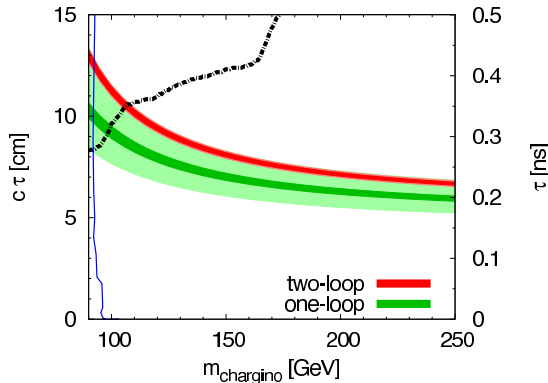


Figure 2: 荷電ウィーノの寿命及び制限 (横軸は荷電ウィーノの質量)。緑は 1-loop level の質量差を用いた結果で赤は本研究の 2-loop level の質量差を用いたもの [22]。黒い線は ATLAS 実験によって得られている 95%信頼度での制限。青い線は LEP2 実験からの制限。

(3) 上記の加速器実験における純粋重力伝搬型の超対称標準模型への制限に加え中性ウィーノ暗黒物質の探索の将来展望についても成果を得た。中性ウィーノ暗黒物質の場合通常物質との相互作用が非常に小さく直接探索実験は非常に難しい。一方で比較的大きな対消滅断面積を持つことから宇宙線観測を通じた非直接探索実験に期待がかかっている。本研究ではその一つの可能性として我々の銀河の随伴銀河 (dwarf galaxy) 内での暗黒物質対消滅由来の宇宙ガンマ線観測によるウィーノ暗黒物質探索に着目した。特に dwarf galaxy における暗黒物質の質量分布の不定性が与える暗黒物質探索の将来展望へ

の影響を詳細に調べた。その結果いわゆる ultra-Faint dwarf galaxy 内の暗黒物質の質量分布の不定性を現在の古典的な dwarf galaxy における暗黒物質の質量分布の不定性程度にまで抑えることができれば Fermi-LAT 衛星で 10 年程度観測することで現在最も期待されている 3 TeV 以下のウィーノ暗黒物質のほとんどの領域は十分検証可能であることを示した [23] (図 3)。この研究では dwarf galaxy の暗黒物質の分布がどのように程度ウィーノ暗黒物質探索に影響を及ぼすかを調べた点で先駆的であり、その後の dwarf galaxy 中の暗黒物質分布の球形からのズレによる影響の研究 [24] に発展している。なおこの成果は Bhattacherjee 氏, 市川氏, 松本氏, 西山氏との共同研究によるものである。

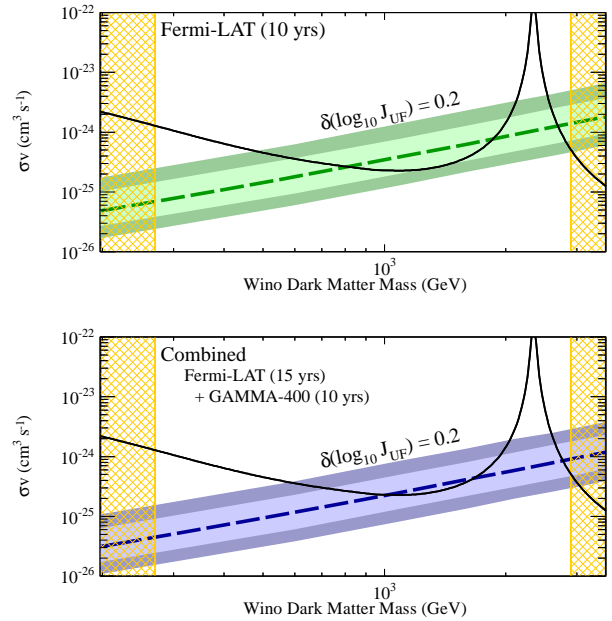


Figure 3: 将来期待される暗黒物質の対消滅断面積への制限。上の図では Fermi-LAT 実験で 10 年間観測を行った場合。下の図では Fermi-LAT 実験で 15 年間観測を行いさらに GAMMA-400 実験で 10 年間観測を行った場合。いずれの図においても J -factor の不定性が $\delta(\log_{10} J_{UF}) = 0.2$ まで抑えられた場合を想定している [23]。

(4) 本研究では R-対称性および共形対称性の量子的破れを通じたゲージノ質量生成機構の理論的な理解においても成果が得られた。量子的破れを通じたゲージノ質量生成機構 [5, 6] は宇宙論で問題と成り得るいわゆるポロニー場を伴わないため非常に有力な機構と考えられており純粋重力伝搬型模型をはじめ様々な模型で用いられている。しかしながら超場形式の超重力理論において経路積分に現れる量子的破れによるゲージノの質量項が超一般座標変換の下で不変に表せないという問題があった [25]。本研究によってこの問題は R-対称性および共形対称性を保つ経路積分の測度と超一般座標変換に対して普遍的な経路積分の測度が一致していないことに起因していることが突き止められた。その結果ゲージノの質量項による超一般座標変換の破れと R-対称性および共形対称性を保つ経路積分の測度による超一般座標変換の破れが丁度相殺しており矛盾がないことが確認された。この成果によって R-対

称性および共形対称性の量子的破れを通じたゲージノ質量生成機構が超場形式の超重力理論においても矛盾していないことが経路積分表式で初めて示された [26]。なおこの成果は張ヶ谷氏との共同研究によるものである。

(5) 超対称大統一模型におけるヒッグス 2 重項 3 重項問題から得られる R-対称性への一般的な制限についても成果を得た。一般に超対称性の破れにおける真空の安定性の要求から R-対称性は統一理論よりも低いエネルギー領域まで保たれていることが期待されている。一方で本研究では標準模型のゲージ対称性が共通の群に埋め込まれるクラスの統一理論においては大統一理論のゲージ群の種類によらずに R-対称性は 2 次の離散群にまで破れていることを R-対称性のアノマリーの一一致条件から示した [27]。この結果はたとえ統一理論のゲージ群が直積群であっても成立しており非常に一般的なものとなっている。この結果はゲージ結合定数の統一が予言されるクラスの大統一模型においては超対称性の破れの機構や超対称標準模型に現れる R-対称性は偶然的な対称性であることを意味しており、模型構築の際に非常に重要な制限を与えることになる。また本研究ではそのような偶然的な R-対称性を作り出す新しい機構も提案した。大統一理論は超対称統一模型の大きな動機付けの一つであることから本研究の得られた一般的な条件は今後の超対称標準模型、超対称大統一模型の構築に重要な示唆を与えると期待される。これらの研究成果は張ヶ谷氏及び鈴木氏との共同研究によるものである。

(6) R-対称性が持ち得る超対称標準模型における階層性問題への影響について新しい可能性を提案した。LHC によって発見されたヒッグス質量は超対称性粒子の質量がこれまで想定してきたものよりも重い可能性を示唆している。一方でいわゆる電弱スケールの階層性問題の解としての超対称標準模型においてはより軽い超対称粒子が期待されてきた。そのため現状では超対称標準模型が正しいとすると何故軽い超対称粒子ではなく比較的重い超対称粒子が実現しているのかと言う疑問が生じている。本研究では離散的 R-対称性の自発的破れに伴うドメインウォールの形成まで考慮に入れた宇宙論を考察すると階層性問題を考慮に入れても重い超対称粒子の可能性が必ずしも低いとは言えないことを示した [28]。この議論は LHC 実験でゲージ粒子の超対称パートナーのみが発見された場合に直面する階層性問題に対し重要な示唆を与えると期待される。なおこの研究成果は Schmitz 氏、張ヶ谷氏、柳田氏との共同研究によるものである。

(7) R-対称性のその他の応用として宇宙のインフレーション模型についても成果を得た。本研究では離散 R-対称性の自発的破れの機構に伴うスカラー超対称場がインフレーションを引き起こしているインフラトンに対応する模型 [13] を再考察した。その結果測定されている初期ゆらぎのスペクトル指標を再現するにはグラビティーノ (重力子の超対称パートナー) の質量が 100 TeV 以上でなければならないことが明らかとなった [29]。この結果は粋重力伝搬型の超対称標準模型のような重い超対称粒子の仮定と無矛盾であり非常に興味深い。この模型は宇宙背景放射の重力波由来のゆらぎ成分が非常に小さいため近い将来その成分が観測されれば否定することができる。今後その他の実験及び観測からの制限が可能かについて継続的に考察していく予定である。なおこの研究成果は張ヶ谷氏、柳田氏との共同研究によるものである。

References

- [1] A. E. Nelson, N. Seiberg, Nucl. Phys. **B416**, 46-62 (1994).
- [2] K. A. Intriligator, N. Seiberg, D. Shih, JHEP **0707**, 017 (2007).
- [3] Z. Komargodski, D. Shih, JHEP **0904**, 093 (2009).
- [4] J. Goodman, M. Ibe, Y. Shirman, F. Yu, Phys. Rev. **D84**, 045015 (2011).
- [5] G. F. Giudice, M. A. Luty, H. Murayama and R. Rattazzi, JHEP **9812**, 027 (1998) doi:10.1088/1126-6708/1998/12/027 [hep-ph/9810442].
- [6] L. Randall and R. Sundrum, Nucl. Phys. B **557**, 79 (1999) doi:10.1016/S0550-3213(99)00359-4 [hep-th/9810155].
- [7] D. Shih, JHEP **0802**, 091 (2008) [arXiv:hep-th/0703196].
- [8] M. Ibe, K. -I. Izawa, Y. Nakai, Phys. Rev. **D80**, 035002 (2009).
- [9] M. Ibe, Y. Shirman, T. T. Yanagida, JHEP **1012**, 027 (2010).
- [10] M. W. Goodman and E. Witten, Nucl. Phys. B **271**, 21 (1986). doi:10.1016/0550-3213(86)90352-4, 10.1016/S0550-3213(86)80002-5
- [11] K. I. Izawa and T. Yanagida, Prog. Theor. Phys. **97**, 913 (1997) [arXiv:hep-ph/9703350].
- [12] M. Dine, Y. Nir, Y. Shadmi, Phys. Rev. **D66**, 115001 (2002). [hep-ph/0206268].
- [13] K. Kumekawa, T. Moroi and T. Yanagida, Prog. Theor. Phys. **92**, 437 (1994)
- [14] M. Ibe, K. I. Izawa and T. Yanagida, Phys. Rev. D **71**, 035005 (2005)
- [15] M. Dine and L. Pack, arXiv:1109.2079 [hep-ph].
- [16] R. Kitano, Phys. Rev. D **74**, 115002 (2006)
- [17] M. Ibe, Y. Nakayama and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **668**, 28 (2008)
- [18] M. Ibe, K. I. Izawa and T. Yanagida, Phys. Rev. D **71**, 035005 (2005) [arXiv:hep-ph/0409203].
- [19] M. Ibe, K. I. Izawa and Y. Nakai, Phys. Rev. D **80**, 035002 (2009) [arXiv:0812.4089 [hep-ph]]; M. Ibe, K. I. Izawa and Y. Nakai, arXiv:0907.2970 [hep-ph].
- [20] M. Ibe, Y. Shirman and T. T. Yanagida, JHEP **1012**, 027 (2010) doi:10.1007/JHEP12(2010)027 [arXiv:1009.2818 [hep-ph]].
- [21] B. Bhattacharjee, B. Feldstein, M. Ibe, S. Matsumoto and T. T. Yanagida, Phys. Rev. D **87**, no. 1, 015028 (2013) [arXiv:1207.5453 [hep-ph]].
- [22] M. Ibe, S. Matsumoto and R. Sato, Phys. Lett. B **721**, 252 (2013) [arXiv:1212.5989 [hep-ph]].
- [23] B. Bhattacharjee, M. Ibe, K. Ichikawa, S. Matsumoto and K. Nishiyama, JHEP **1407**, 080 (2014) [arXiv:1405.4914 [hep-ph]].
- [24] K. Hayashi, K. Ichikawa, S. Matsumoto, M. Ibe, M. N. Ishigaki and H. Sugai, arXiv:1603.08046 [astro-ph.GA].
- [25] S. P. de Alwis, Phys. Rev. D **77**, 105020 (2008) doi:10.1103/PhysRevD.77.105020 [arXiv:0801.0578 [hep-th]].
- [26] K. Harigaya and M. Ibe, Phys. Rev. D **90**, no. 8, 085028 (2014) [arXiv:1409.5029 [hep-th]].
- [27] K. Harigaya, M. Ibe and M. Suzuki, JHEP **1509**, 155 (2015) [arXiv:1505.05024 [hep-ph]].
- [28] K. Harigaya, M. Ibe, K. Schmitz and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **749**, 298 (2015) [arXiv:1506.00426 [hep-ph]].
- [29] K. Harigaya, M. Ibe and T. T. Yanagida, Phys. Rev. D **89**, no. 5, 055014 (2014) doi:10.1103/PhysRevD.89.055014 [arXiv:1311.1898 [hep-ph]].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 20 件)

1. “**Cosmological Selection of Multi-TeV Supersymmetry**”
査読有り
K. Harigaya, M. Ibe, K. Schmitz and T. T. Yanagida.
DOI:10.1016/j.physletb.2015.07.073
Phys. Lett. B **749**, 298 (2015)
2. “**Mass-splitting between haves and have-nots — symmetry vs. Grand Unified Theory**” 査読有り
K. Harigaya, M. Ibe and M. Suzuki.
DOI:10.1007/JHEP09(2015)155
JHEP **1509**, 155 (2015)
3. “**Anomaly Mediated Gaugino Mass and Path-Integral Measure**” 査読有り
K. Harigaya and M. Ibe.
DOI:10.1103/PhysRevD.90.085028
Phys. Rev. D **90**, no. 8, 085028 (2014)
4. “**Wino Dark Matter and Future dSph Observations**” 査読有り
B. Bhattacharjee, M. Ibe, K. Ichikawa, S. Matsumoto and K. Nishiyama.
DOI:10.1007/JHEP07(2014)080
JHEP **1407**, 080 (2014)
5. “**Lower Bound on the Gravitino Mass $m_{3/2} > O(100)$ TeV in R -Symmetry Breaking New Inflation**” 査読有り
K. Harigaya, M. Ibe and T. T. Yanagida.
DOI:10.1103/PhysRevD.89.055014
Phys. Rev. D **89**, no. 5, 055014 (2014)
6. “**Mass Splitting between Charged and Neutral Winos at Two-Loop Level**” 査読有り
M. Ibe, S. Matsumoto and R. Sato.
arXiv:1212.5989 [hep-ph]
DOI:10.1016/j.physletb.2013.03.015
Phys. Lett. B **721**, 252 (2013)
ICRR-REPORT-641-2012-30, IPMU-12-0231, UT-12-44
7. “**Pure gravity mediation of supersymmetry breaking at the Large Hadron Collider**” 査読有り
B. Bhattacharjee, B. Feldstein, M. Ibe, S. Matsumoto and T. T. Yanagida.
DOI:10.1103/PhysRevD.87.015028
Phys. Rev. D **87**, no. 1, 015028 (2013)

〔学会発表〕 (計 1 件)

1. “重い超対称粒子の模型とその検証”,
伊部昌宏, 日本物理学会 (2013 年 9 月 20 日) 高知大学朝倉キャンパス (招待講演).

6. 研究組織

1. 研究代表者
伊部 昌宏 (Masahiro Ibe)
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