

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540299

研究課題名(和文) 自然な大統一理論における宇宙論

研究課題名(英文) Cosmology in the natural GUT

研究代表者

前川 展祐 (Maekawa, Nobuhiro)

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授

研究者番号：40273429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：B-L数生成による大統一理論におけるバリオン生成機構の新たな提案を行った。また、重たい粒子の崩壊シャワー中に含まれるダークマターの平均的な数の評価を行った。また、非摂動的な粒子生成による真空選択が非繰り込み項を通じて質量を得る粒子についても起こりうることを解析的かつ数値的計算で示した。グラビティーノ問題を解決するために $O(100\text{TeV})$ のグラビティーノを仮定すると、同時に電弱スケールの安定性の問題が大きく改善することを示した。その場合、大統一理論の決定的な証拠が低エネルギー実験で得られる可能性があることを指摘した。また、核子崩壊の崩壊モードを測定することにより統一群を決定できうることを示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new Baryogenesis mechanism in grand unified theories (GUT) via B-L generation. We estimated an averaged number of dark matter in the decay shower of superheavy particles. We showed analytically and numerically that vacuum selection by producing particles which have masses through non-renormalizable interactions is possible. We showed that $O(100\text{TeV})$ gravitino not only solves the cosmological gravitino problem but also improves instability of the electro-weak scale. We showed that in the case, GUT can be proved by low energy experiments. We showed that we can identify the unification group by measuring the decay modes of nucleon.

研究分野：超対称大統一理論

キーワード：大統一理論 超対称性 宇宙論 異常 $U(1)$ 対称性 例外群 バリオン生成 ダークマター 核子崩壊

1. 研究開始当初の背景

2001年に大統一理論の最も大きな問題である二重項三重項分離の問題が対称性で許される項はすべて $O(1)$ 係数で導入するという自然な仮定の下で解けることを発見して(第11回物理学論文賞受賞)以来、標準模型や超対称性大統一理論における様々な問題を考え直してきた。その結果、多くの問題がこの自然な枠組みの中で非自明な形で解けることがわかり、この方向が有望であることを再確認するとともに、標準模型を超える自然でシンプルかつ有望なシナリオが構築できつつある。このシナリオは、申請者達が指摘した次の3つの独立なアイデアから成り立っている。

- 1、**異常 $U(1)$ ゲージ対称性**により、対称性で許される項はすべて $O(1)$ 係数で導入するという自然な仮定の下で、大統一理論の問題である二重項三重項分離の問題、陽子崩壊の問題、湯川結合の統一の問題、ゲージ結合定数の統一の問題を解く。従来の超対称性大統一理論の予言と違い、陽子は、電子とパイ中間子に崩壊する。
- 2、 **E_6 群と世代対称性**により、3世代のクォーク、レプトンを1つか2つの場に統一し、かつ、現実的なクォーク、レプトンの質量や混合行列を自然に得ることができ、さらに、超対称性模型の問題である超対称性フレーバー問題や超対称性CP問題を解くことができる。そこで予言された超対称性粒子の質量スペクトラムは、1,2世代のFCNCを抑えつつ、3世代のFCNCを大きくする構造があり、将来の実験で確かめられる可能性がある。
- 3、**軽いヒッグズセクター**。軽い中性ヒッグズは標準模型ヒッグズほど大きな結合定数を持たない場合、超対称性模型の問題である**微調整問題**はなくなることを指摘。

以上のシナリオの中で、宇宙論がどのように組み込まれているか、を考えることが自然な流れである。宇宙論は、普通の物理と異なり、歴史なので、ある理論を確かめるための再現実験をすることができないため、チェックするのが難しい様々な可能性が提案されており、どの提案が正しいか、判断するのは難しい。(例えば、バリオン生成は、様々な機構が提案されているが、決着を付けるのは難しい機構も多い。)一方で、このシナリオの重要な点は、対称性で許される項をすべて $O(1)$ 係数で導入するという極めて自然な仮定の下で様々な問題が解けていく、ということである。対称性を定めるためのパラメータは、十数個の場に対する異常 $U(1)$ 電荷がメインのパラメータであり、従って、一つのパラメータが多く役割を果たしている。例えば、ニュートリノの質量と(次元5の)陽

子崩壊の寿命、二重項三重項分離の実現は、強く関係している。宇宙論的にうまくいくために、これらのパラメータに更なる制限が加わることが予想され、従って、様々な宇宙論のシナリオが現象論的な予言に繋がる可能性がある。

2. 研究の目的

この研究の目的は、このシナリオで可能な宇宙史を見つけ、その宇宙史が複数あれば、それぞれの宇宙史に対して、その現象論的な予言を明らかにすることである。

3. 研究の方法

基本的には、自然な大統一理論のシナリオの中で、宇宙論的に重要と思える特徴を抽出し、その特徴の宇宙論的影響を一般的に考察したのち、自然な大統一理論のシナリオにおいて、成立可能か、可能だとすれば、その現象論的な予言は何か、ということについて研究していく。具体的には、まず、中間スケールの質量を持つ長寿命粒子が、一般に、宇宙論にどのような影響を及ぼしうるか、を考える。ダークマター生成やバリオン生成では影響を及ぼしうるということがわかっているが、その生成量が現在の宇宙を再現するための条件を求める。その後、自然な大統一理論(異常 $U(1)$ を持つ大統一理論)において、それらの条件を満足しうるかどうか、また、満足しうるシナリオは何かを吟味する。両立しうる模型が見つかった場合、その為に要した変更が現象論的な予言を導く可能性があるため、その可能性について議論する。

4. 研究成果

B-L 数生成による大統一理論バリオン生成機構の提案

自然な大統一理論では対称性で許される項は非繰り込み項も含めてすべての項を $O(1)$ 係数で導入するため、重たい粒子の質量や相互作用も $O(1)$ 係数を除いて対称性で決まっている。更に大統一理論の統一群の破れ方を指定するとどのような粒子が中間スケールに存在しているか、ということも決まってしまう。面白いことにこれらの中間スケールに存在する粒子は相互作用が自然に小さくなるので、寿命が比較的長くなり宇宙史の中で重要な役割を果たす可能性がある。これらの粒子の崩壊モードを計算するとB-L数が保存しないことが判明した。元々大統一理論における重たいゲージボソンの崩壊によりバリオン生成機構が提案されたが、B-L数が保存するためスファレロン効果でせっかく作ったバリオン数が消えてしまう、という問題があったが、自然な大統一理論に存在する重たい粒子の崩壊ではB-L数が保存しないため、バリオン数を残すことができる。我々はより一般的に重たい粒子の非繰り込み項による崩壊によるB-L数生成機構を初めて提案し、存在するバリオン数を再現するための条件を示した。残念ながら、知られている自然な大統一理論ではその条件を満たさないが、よ

り一般的な大統一理論では十分に満たしうる。

重たい粒子の崩壊シャワー中に含まれる平均的なダークマター数の数値的な評価

また、そのような重たい粒子は崩壊時にシャワーを起こす。シャワー中にはダークマターが一般には含まれるので、もし、ダークマターがデカップルした後に重たい粒子が崩壊するような場合を考えると、シャワー中に含まれるダークマター数が重要な物理量になってくることがわかる。我々は初めて超対称性理論におけるダークマターの候補である最も軽い超対称粒子が重たい粒子の崩壊シャワーの中に含まれる平均的な数を DGLAP 方程式により評価した。

粒子生成による真空選択

自然な大統一理論には現象論的に望ましい真空の他に我々の世界に繋がらない無数の真空が存在しており、何故現象論的に望ましい真空が選択されたのか、ということが大きな問題になっていた。現象論的に望ましい真空の近くで質量が零になる多くの粒子が存在しているのに対し、それ以外の真空では質量が零になる粒子がほとんどないという大きな違いが存在し、その違いのために宇宙史的には現象論的に望ましい真空が選ばれやすいことが分かってきた。重要な点は、質量が零になる真空の近くを通るとそれらの粒子が生成されることにより、その真空に引力が働く有効ポテンシャルが生じることである。これらの粒子生成の計算は繰り込み可能な項でのみ質量が与えられる場合にのみ計算されていたが、自然な大統一理論においては、非繰り込み項でのみ質量が与えられる粒子が多数存在している。我々は、それらの粒子も生成することで真空選択に寄与できるかどうか、と言う疑問を持ち、粒子生成に関する計算を解析的にかつ数値的にを行い、寄与できることを示した。

重たいグラビティーノによる微調整問題の改善

超対称理論には、重力子の超対称パートナーであるグラビティーノが存在しているが、インフレーション後に熱的に生成されたグラビティーノがビッグバン軽元素合成 (BBN) 開始後に崩壊するとせっかく作った軽元素が壊され、軽元素合成の成功をスプイルしてしまうという問題が指摘されている。一方でヒッグス質量が 125GeV と定まったことにより、超対称粒子の質量が少なくとも $0(1\text{TeV})$ 以上でなければならず、その場合に電弱スケールが不安定になる (パラメータの微調整が必要になる) ことも指摘されている。我々はグラビティーノを BBN が始まる前に崩壊させるためにその質量を $0(100\text{TeV})$ とすると、電弱スケールの安定性の問題が大きく改善することを示した。更に興味深いことは、その

ような状況では大統一スケールの超対称性質量パラメータが低いスケール (例えば電弱スケール) で直接見ることが有り得ることである。従って、大統一理論の証拠を電弱スケールで質量パラメータを測定することで発見することも可能であることを指摘した。

大統一理論の決定的な証拠を低エネルギー実験から得られる可能性

超対称粒子の質量スペクトラムを測定することで大統一理論の証拠を見つけよう、という指摘はこれまでも為されている。低エネルギーで測定した超対称粒子の質量から大統一スケールでの質量パラメータを繰り込み群により計算し、大統一理論を探ろう、というアイデアである。例えばゲージノの質量が大統一スケールで統一されれば大きな証拠になることが予想される。一方で、上記の研究の結果、 $0(100\text{TeV})$ のグラビティーノを導入するとグラビティーノ問題が解決するだけで無く電弱スケールの安定性も改善することが分かってきた。その際にゲージノ質量は大統一スケールよりも遥かに小さいスケールで統一されることが知られている。そのスケールをミラージュスケールと呼ぶ。興味深いことに他の超対称質量パラメータのほとんどがそのミラージュスケールにおいて大統一スケールで与えられた質量パラメータになることが示される。グラビティーノを $0(100\text{TeV})$ に取るとそのミラージュスケールが電弱スケールになることも十分有り得ることは興味深い。もし、ミラージュスケールが電弱スケールなら、大統一スケールでの質量パラメータが電弱スケールで直接測定されうることを示しており、大統一スケールまでエネルギーを上げずに直接大統一理論を探れることを意味している。とはいえ、これまでフレーバーや CP の破れの過程に対する実験からの制限からすべてのスフェルミオン質量は大統一スケールで同じになることを仮定することが多かった。その場合、ほとんどのスフェルミオン質量がミラージュスケールで同じになることがわかるだけで大統一理論の証拠と言えない。ランクが 4 よりも大きい統一群の場合は D 項の寄与により分かれうるが世代間ではユニバーサルなため決定的な証拠とはいえない。ところが、もし、世代間でもユニバーサリティーが壊れているとすると大統一理論における物質の統一がそのままミラージュスケールで観測されることになる。これは大統一理論の決定的な証拠を言えると思う。今まであまり考えられてこなかった理由として、フレーバーや CP の破れの過程に対する実験からの制限が厳しく、現実的な模型の構築が困難であることが大きな理由である。ところが、特にヒッグス質量が 125GeV と測定されたことにより、超対称粒子の質量が想定より大きく、従ってフレーバーや CP の破れの過程に対する実験からの制限が比較的緩くなるために、実験の

制限を満たしつつ世代間で異なる質量になり得ることを具体的な模型で示しました。このことは大統一理論の決定的な証拠が低エネルギー実験で得られる可能性があることを示したことになっており、重要な仕事と考えている。

核子崩壊による統一群の決定

大統一理論の最も重要な予言は核子崩壊である。ゲージボソン媒介による核子崩壊（次元6演算子による核子崩壊）の他に三重項ヒッグス媒介による核子崩壊（超対称大統一理論では次元5演算子による核子崩壊）の重要性が特に超対称大統一理論では指摘されている。自然な大統一理論では三重項ヒッグス媒介による核子崩壊は強く抑制される一方、ゲージボソン媒介による核子崩壊が増長されるため、他の超対称大統一理論と異なり、ゲージボソン媒介の核子崩壊が重要になる。ゲージボソン媒介による核子崩壊はゲージ相互作用のため比較的予言能力は高いが、ゲージボソンの質量スケールに強く依存し、かつ、実は湯川結合定数の具体的な構造にも依存している。極端な話、アップクォークやダウンクォークと統一されているレプトンがタウなら核子崩壊は強く抑制されてしまう。一方で最近のニュートリノ実験からの知見から得られたクォーク、レプトン質量や混合角における様々な階層性の違いが、大統一理論においては「10次元場は反5次元場より強い湯川結合の階層性を出現させる」という仮定だけで理解できるということは、大統一理論に対する間接的な証拠と言ってもよいと考える。この仮定は、核子崩壊への湯川結合定数から生じる不定性のある意味無くしていることになっており、この仮定の下で核子崩壊を議論することは十分大きな意味があると考えられる。一方で統一群がSU(5)よりランクが大きいSO(10)やE6となると複数の核子崩壊を媒介する重たいゲージボソンが存在しており、それらのゲージボソンの質量スペクトラムに核子崩壊の予言は強く依存してくる。寿命の確かな予言はゲージボソンの質量が2倍変わるとオーダーが変わってしまうため、簡単な事では無いが、崩壊モードの比はゲージボソン質量の比を一定にすると変わらないため、我々は崩壊モードの比の測定により、大統一理論を区別できるようなパラメータを探究した。すると、特にSO(10)やE6固有のゲージボソンの質量がSU(5)のゲージボソンの質量と同程度の時にはある崩壊モードの比を測定することにより、十分に統一群を決定できうることを示した。特に自然な大統一理論ではSO(10)固有のゲージボソンの質量はSU(5)のゲージボソンの質量と同程度になることが予言されているので重要である。

E6 大統一理論の超弦理論からの導出

E6 大統一理論はSU(5)では仮定に過ぎない

「10次元場は反5次元場より強い階層性を湯川結合定数に出現させる」という現実的なクォーク、レプトンの質量や混合角の階層性を実現する時に重要な役割を果たす性質が結果として導出される、という意味で有望な大統一理論である。重力までも統一できる弦理論からE6大統一理論を導出することは重要である。我々の仕事以前にはE6統一群とそれを標準模型のゲージ群まで破るために必要な随伴表現ヒッグス場を持ち、更に3世代のクォーク、レプトンを実現する模型は、1つしか知られておらず、その模型も現実的な湯川結合定数を再現できないという問題があった。そこで我々は、ヘテロティック超弦理論の枠組みで更に非対称オービフォルドというコンパクト化の手法を用いて3世代のクォーク、レプトンとE6統一群、随伴表現ヒッグス場を持つ大統一理論を超弦理論の真空の中から探した。その結果、新たに2つの模型を発見した。残念ながら、現実的な湯川結合定数を得るのは難しいが、新たな可能性がまだまだ残っていることを示した意義は大きいと考えている。

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 10 件)

M. Ito, S. Kuwakino, N. Maekawa, S. Moriyama, K. Takahashi, K. Takei, S. Teraguchi, T. Yamashita, “E6 grand unified theory with three generations from heterotic string”, *Phys. Rev. D* 83 (2011) 091703, 査読有

DOI:10.1103/Phys.RevD.83.091703

M. Ito, S. Kuwakino, N. Maekawa, S. Moriyama, K. Takahashi, K. Takei, S. Teraguchi, T. Yamashita, “Heterotic E6 GUT and Partition Functions”, *Journal of High Energy Physics* 1112 (2011) 100, 査読有

DOI:10.1007/JHEP12(2011)100

Seishi Enomoto, Nobuhiro Maekawa, “Baryogenesis by B-L generation due to superheavy particle decay”, *Phys. Rev. D* 84 (2011) 096007, 査読有,

DOI:10.1103/PhysRevD.84.096007

Yasuhiro Kurata, Nobuhiro Maekawa, “Averaged Number of the Lightest Supersymmetric Particles in Decay of Superheavy Particle with Long Lifetime”, *Prog. Theor. Phys.* 127 (2012) 657-664, 査読有,

DOI:10.1143/PTP.127.657

K. Takayama, N. Maekawa, “Neutrino properties in E6*SU(2)F SUSY GUT with spontaneous CP violation”, *Phys. Rev. D* 85 (2012) 095015, 査読有,

DOI:10.1103/PhysRevD.85.095015

Nobuhiro Maekawa, Yu Muramatsu, "Nucleon decay via dimension-6 operators in anomalous U(1)A supersymmetric GUT", Phys. Rev. D88 (2013) 095008, 査読有,

DOI:10.1103/PhysRevD.88.095008

S. Enomoto, S. Iida, N. Maekawa, T. Matsuda, "Beauty is more attractive: particle production and moduli trapping with higher dimensional interaction", Journal of High Energy Physics 1401 (2014) 141, 査読有

DOI:10.1007/JHEP01(2014)141

Nobuhiro Maekawa, Yu Muramatsu, "Nucleon decay via dimension-6 operators in E6*SUSY(2)F*U(1)A SUSY GUT model", Prog. Theor. Exp. Phys. 113B(2014)03, 査読有

DOI:10.1093/ptep/ptu150

K. Takayama, N. Maekawa, "The heavy gravitino, naturalness, and sizable anomaly mediation", Prog. Theor. Exp. Phys. 093B (2014) 04, 査読有,

DOI:10.1093/ptep/ptu118

N. Maekawa, Y. Muramatsu, Y. Shigekami, "Sizable D-term contribution as a signature of E6*SUSY(2)F*U(1)A SUSY GUT model", Prog. Theor. Exp. Phys. 113B(2014)02, 査読有,

DOI:10.1093/ptep/ptu151

[学会発表](計 12 件)

N. Maekawa, "Cosmology in Natural GUT", COSM02011, 2011.8 in Porto, Portgese.

N. Maekawa, "Origin of Kobayashi-Maskawa theory in E6 GUT with gamily symmetry", KMI Inanguration Conference on "Quest for the Origin of Particles and the Universe", 2011.10 in Nagoya, Japan

N. Maekawa, "Natural GUT and the Cosmology", GUT2012, 2012.3 in Kyoto, Japan

N. Maekawa, "Neutrino mixings in E6 GUT with spontaneous CP violation and comments on 125 GeV Higgs", Summer Institute 2012, 2012.8 in Taiwan

N. Maekawa, "Spontaneous CP violation in E6 GUT, flavor(neutrino) physics, and 125 GeV Higgs", Japanese-German Symposium, 2012.10 in Kanazawa, Japan

N. Maekawa, "Vacuum selection and inflation via particle production in anomalous U(1) model", PASCOS2013, 2013.11 in Taipei, Taiwan

前川展祐, "Neutrino properties in E6*SUSY(2)F SUSY GUT with spontaneous CP violation", 次世代の加速器ニュート

リノ実験ワークショップ, 2014.6 in Kyoto

N. Maekawa, "Heavy gravitino, naturalness and sizable anomaly mediation", PASCOS2014, 2014.6 in Warsaw, Poland

N. Maekawa, "Heavy gravitino, naturalness and sizable anomaly mediation", Summer Institute 2014, 2014.8 in Fujiyoshida, Japan

前川展祐, "Does heavy gravitino evade the naturalness problem in MSSM?", 寺スケール 2014, 2014.11 in Osaka

前川展祐, "超対称 E6 大統一理論、LHC でどうなったか?", 素粒子の展望: 80 年代、90 年代から未来へ, 2015.2 in Osaka

前川展祐, "ニュートリノ、GUT、陽子崩壊", 物理学会ニュートリノ研究の新たな展開, 2015.3 in Waseda.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 展祐 (MAEKAWA, Nobuhiro)

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授

研究者番号: 40273429