

平成 22 年 5 月 18 日現在

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 西暦(2007~2009)
 課題番号： 19340059
 研究課題名(和文) 自然な大統一理論と宇宙論と超弦理論からの導出とその予言
 研究課題名(英文) Natural grand unified theory, cosmology, derivation from superstring, and predictions
 研究代表者 前川 展祐 (Nobuhiro Maekawa)
 (名古屋大学大学院理学研究科准教授)
 研究者番号： 40273429

研究成果の概要(和文)：

自然な大統一理論において、自発的にCP対称性を破ることにより、小林-益川行列を導出できることを示し、その特徴的なスフェルミオン質量からの予言される現象を指摘した。また、軽いヒッグスシナリオにおいて、ニュートラリーノの熱的生成量は、従来のシナリオよりも少なくなる傾向にあることを示した。また、超弦理論の真空として、アジョイントヒッグスを持つ3世代のE6大統一理論になるものがあることを示した。

研究成果の概要(英文)：

We have shown that in natural grand unified theory, the Kobayashi-Maskawa matrix can be derived by the spontaneous CP violation, and pointed out the various phenomena predicted by the peculiar sfermion masses. Moreover, we have shown that in the light Higgs scenario, the thermal abundance of the neutralino tends to be smaller than the usual scenario. And we have found the two vacua in which E6 unified model with 3 families and adjoint Higgs is realized.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

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：大統一理論、宇宙論、超弦理論、異常 U(1)、世代対称性

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0(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。

(2)、E6群と水平対称性により、現実的なクォーク、レプトンの質量行列を自然に得、また、超対称性模型の問題である超対称性フレーバー問題を解く。そこで予言された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。

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0(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。従って、超弦理論等の基礎理論は基本的にはその対称性さえ導出すれば、現象論的にほとんど問題なく標準模型までつなぐことができることは特筆すべきことである。

2. 研究の目的

本研究の目的の一つはその道筋を明らかにしようとするものであるが、大きく二つの方向性が重要と考えられる。一つはその基本的な対称性を、bottom-up的に定めるという方向で、現象論的、宇宙論的な様々な問題を最も自然と思われる仮定の下で解ける模型を見つけるというものである。これまで、申請者は主にこの方向で研究を進めてきたが、その方向の研究を継続してやる必要があると考えている。もう一つは、top-down的に超弦理論等の基礎理論から出発して、そこから、4次元における有効理論が持つ対称性を導く、という方向である。この二つの方向による、対称性が一致することで超弦理論から標準模型までの一本の道筋を得ることができるわけである。

Bottom upの方向では、現象論的には、すでに多くの問題が自然な枠組みの中で解けることがわかっているが、まだ、わかっていない大きな問題としては、超対称性CP問題がある。また、宇宙論の問題もまだ、ほとんどの問題について解がわかっていないので、それらを理解することで対称性をより定めることができるのではないかと考えている。

残念ながら、超弦理論から4次元理論の有効理論を得るには摂動論的には、真空がほとんど無限個あることが80年代に明らかになって

おり、その意味でtop-down的に対称性を導くことは90年代に発展したように非摂動的な研究が必要になってくると考えられているが、一方で、その無数の有効理論の中でさえも、未だに低エネルギーで標準模型になるものが見つかっていないというのが現在の状況である。ところが、近年の申請者達の研究により、導出すべき4次元理論の対称性や特徴がかなりわかってきたので、その情報を足がかりにして、この閉塞状況を打破したいと考えている。

一方で、申請者達の提案したシナリオで、現在、もしくは、将来の実験でテストできる様々な現象論的なプロセスをより詳細に吟味することは、主に二つの重要な目的がある。一つ目の目的は、超対称性の破れに関する機構や、理論の対称性に対して、制限をつけることである。もう一つの目的は、このシナリオに特徴的かつ実験的に確かめることができる現象をすでに明らかになっている予言以外に見つけることである。このシナリオではスカラーフェルミオンの質量スペクトラムに対して特徴的な予言をする。そのスペクトラム固有の現象を見つけることの重要性はいまでも無いであろう。

3. 研究の方法

(平成19年度)

まず、CPの破れの起源を自発的にCP対称性を破ることで理解したい。水平対称性を破るヒッグズの真空期待値の位相でCPを破ることで、超対称性CP問題も解決するというシナリオがうまくいく理論を見つける。このような可能性を考えている仕事は、過去にもあるが、現実的なフェルミオンの質量行列を得るために非常に複雑、かつ場の数も多いヒッグズセクターを必要とするのでとても本当の理論とは思えないものになっているが、E6+水平対称性を持つ理論は、最小限のヒッグズセクターを導入するだけで現実的なフェルミオンの質量行列が再現できるので、その理論において、CPを自発的に破る理論で現在の実験を再現できるものの存在を確かめることは興味深い研究といえる。一端、その理論を見つけることができれば、その理論において、様々なCPの破れの実験(B物理、ニュートリノ振動、電子双極子モーメント等)に対し、どのような予言をするのかはっきりさせる。複数個理論として可能性がある場合には、それぞれの予言の違いを表にする。

一方で、宇宙論的な観点からの仕事として、微調整問題を解決するシナリオでは、超対称性の破れのスケールを最も小さくする、という要請のため、超対称性標準模型の範囲内で

は、ビーノが最も軽い超対称性粒子となり、ダークマターの候補となる。その模型で熱的にビーノがどれ位作られるかを計算する。微調整問題の解決の際に、軽い荷電ヒッグズの $b \rightarrow s \gamma$ への寄与と、チャージノの寄与を相殺させ、そのために超対称性パラメータが比較的小さい領域がゆるされるようになるのであるが、ダークマターに対して $b \rightarrow s \gamma$ の制限から禁止されていたバルク領域が許されるようになることが予想される。また、軽いヒッグズのために、ヒッグズの極で消滅するプロセスが強くなり、ビーノがさらに少ない量しか出ない可能性もある。

もう一つの宇宙論的な問題として、モジュライ問題が自然な大統一理論のシナリオでどのように解きうるか、ということについての研究も考えている。従来、よくやられるモジュライ問題の一つの解は、グラビティーノの質量スケールを大きくとることで、モジュライの質量スケールを大きくし、モジュライの寿命を十分に短くすることで、ビッグバン原始合成を壊さないようにする、というものがある。実際に、超対称性の破れの伝達の機構として、アノーマリ伝達を考えるとそのようなことが自然に実現できることが知られている。このアイデアの重要な点はモジュライの寿命を短くすることである。しかしながら、モジュライの寿命を短くする方法は、質量を大きくするだけではなく、もう一つの可能性として、結合定数を大きくすることがある。普通は、重力スケールがモジュライの結合定数の大きさを決めているが、もし、ブレーンにローカライズしたモジュライを考え、また、余次元には重力しか伝達しないような状況を考えてみると、理論のカットオフスケールを小さくすることができ、そのスケールでの相互作用でモジュライが崩壊できれば、寿命が短くなる、という理屈である。自然な大統一理論では、カットオフスケールがプランクスケールではなく、従来の大統一スケールにある、と予言されるが、その場合、上記のような性質を持ったモジュライの寿命は短くなり、モジュライ問題が深刻でなくなる可能性が出てくる。その可能性について吟味する予定である。

また、最近、浜口氏や山口氏らによって指摘されているが、グラビティーノスケールを大きくすることでモジュライ問題を解くという可能性には、新たにグラビティーノ問題が生じるが、その問題についても、このシナリオでどれくらい厳しいのか、ということを考えてみるつもりである。

さらに、CPの破れの起源が一つか二つの位

相から来ているとすると、バリオン生成と低エネルギーで測られるCPの破れの過程と結びつくことが期待できる。様々なバリオン生成機構で、うまくバリオンが作れる機構を探すつもりである。

(平成20年以降)

平成19年の半ばから、ポスドクを一人雇いたい。特に宇宙論か、弦理論の現象論、もしくは余次元現象論系を考えているが、平成20年以降の研究は、どの分野のポスドクが雇えるかで、様々なケースが考えられる。宇宙論系の人の場合には、平成19年度の研究からの自然な流れとして、ダークマターやバリオン生成、インフレーションやグラビティーノ問題等をまじめに考えることになる。一方、余次元現象論の場合、弦理論に自然な大統一理論を埋め込む前段階として、余次元に埋め込む可能性について考えたい。また、弦理論の現象論の方の場合には、弦理論に埋め込むことを考える。

まず、宇宙論的な問題について。インフレーションを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我々の自然な枠組みの中で実現させるというのは、大きなチャレンジである。D項でインフレーションをする、というのが、その一つの可能性である。我々の自然な大統一理論において、従来のD項インフレーションの大きな問題の一つが自然に解決される。D項インフレーションでは、宇宙背景放射の精密観測からFayet-Illiopoulos (FI) D項のスケールが、 10^{15} GeVのスケールである必要があるが、そのスケールがプランクスケールに比して、とても小さいことが問題になっていた。ところが、我々が提唱した自然な大統一理論のシナリオでは、ゲージ結合定数の統一を考えると理論のカットオフスケールは、 10^{16} GeVのスケールにとらないといけない。一方で、FI項は、フェルミオンの質量行列の階層性を理解するために、カットオフスケールの0.2倍くらいがよいことがわかっている。以上のことを考えると、我々のシナリオでは、FI項のスケールは、自然に 10^{15} GeVのスケールになり、このことは、宇宙背景放射の精密測定からの要求と一致していることは、興味深い一致と思われる。Toy Modelとしては、対称性で許される項を $O(1)$ 係数で導入する、という仮定の下でモデルを作ることができるが、残念ながら、我々のシナリオの中に埋め込むことはまだできていない。が、インフレーションのスケールとカピボ角に関係がある、というのは、魅力的な理論だと思うので、この方向で考え直してみたいと考えている。

ダークマターやバリオン生成に関しても、Thomasによる、シングレットの崩壊により、非熱的にバリオン数やダークマターを作る、というアイデアがあるが、そのシングレットの自然な候補がE6理論に存在することがわかっており、そのシナリオがうまく実現できるかどうか、というのは、興味深いテーマである。この方向では、もちろん、非熱的にグラビティーノが多くできることで深刻な問題を引き起こすということが様々な人々によって指摘されている。この問題についても、完全に解決できるかどうかは、きちんと計算してみないとわからないが、少なくとも改善できるような様々な性質があるように思っているので、それらのことで、その問題がどの程度改善されるのか、確かめてみたいと考えている。

つぎに余次元について。近年盛んに行われている余次元大統一理論をこのシナリオの中で応用しよう、というものがある。ゲージ群が $E6 \times SU(3)H$ (もしくは、 $E6 \times SU(2)H$)であるということは、 $E6 \times SU(3)H$ を最大部分群として含んでいるE8ゲージ群を更なる統一群として、採用したいと考えるのは自然な流れであるが、残念ながら、4次元E8理論はカイラルな理論ではないので、カイラルな理論である標準模型を得ることができない。従って、より、高次元で考えないと、E8ゲージ群による、統一は実現されないわけである。もちろん、次に説明するtop-down的に超弦理論から直接導出される可能性もあるが、より、確実に結果が期待できる方向として、高次元のE8のゲージ群を持った場の理論を考え、その余った次元をコンパクト化することにより、4次元の $E6 \times SU(3)H$ (もしくは、 $E6 \times SU(2)H$)を持ったカイラル理論を得ることができるので、その機構を用いて、我々が提唱している大統一理論を含んでいる余次元大統一理論を実現するというものがある。近年盛んに行われている余次元大統一理論は、統一群をコンパクト化により、破るというものであるが、その同じテクニックをE8を破ることに使えるであろう、ということである。残念ながら可能性として、4次元ブレーンに場を導入する必要があることで、この可能性を許せば、模型が作れるのは、ある意味あたり前のように思われるので、4次元模型と比して、特に、非自明な模型にはならない、というものがある。とはいえ、余次元を導入することで様々な場が(部分的に)統一される可能性があり、そうなると、異常U(1)の電荷の起源が理解できるので、面白い方向の一つであると考えている。

最後に、弦理論について。bottom-upな議論か

ら、ゲージ群は、ニュートリノセクターの大きな混合角や、超対称性フレーバー問題等を考えると $E6 \times SU(3)H$ もしくは、 $E6 \times SU(2)H$ であると考えており、更にゲージ結合定数の自然な統一を考慮するとカットオフスケールがプランクスケールや従来のストリングスケールよりも小さくなることを一般に示すことができ、そのことは、重力のみが伝播する次元を導入すれば自然に説明できることから、Horava-Wittenが提唱したようなヘテロティックM理論が、この世に直接つながる超弦理論であると考えていることは我々のシナリオの自然な帰結である。M理論は本質的に強結合理論なので、どのように異常U(1)が実現されるか、ということも含めて、今のところ、残念ながら、それほど、よくわかっていないが、M理論は真空の構造にE8対称性が存在していたり、重力しか伝播しない次元が自然に出てきたりと、これまでbottom-upの方向の研究で得られた我々の知見からすると自然な理論になっているので、今まで知られてきている方向性である、Horava-WittenのヘテロティックM理論や、G2ホロノミーを用いて、11次元M理論をコンパクト化して4次元のN=1のカイラルな超対称性理論を実現するという方向性について、新しい発展に目を配りながら、まじめに考えていく、ということが必要かと考えます。

より、確実にできることは、弱結合のヘテロティック理論から我々の模型に近いもしくは、同じ対称性を持った4次元理論を導く可能性を研究することである。この方向では、残念ながら、重力のみが伝播する次元がどのように実現されるかわかっていないので(おそらく実現されない)、この世を本当に記述している道を見つけることができない可能性が高いが、そうだととしても、ヘテロティックM理論において、本格的に探る研究を行うときの練習にはなるのではないかと考えている。実際に、J. Erlerがヘテロティック超弦理論において、我々の大統一理論と似たようなモデルを得たということもあり、可能性があるのでないかと考えている。

また、J. Erler が用いた方法は、非対称オービフォールドというテクニックで、レフトムーバーとライトムーバーの場を4次元以外では別々のディスクリート対称性で割ったものを考えており、そのことは、もともと、10次元や11次元の理論からあるコンパクト化で4次元理論を得るという従来よく議論されているようなシナリオではなく、もともと、次元のようなものが定義されていないような中から、レフトとライトが揃うことで4次元

が生まれ、残りが非対称なディスクリート対称性により、割られたような”空間”になっている、というようなシナリオが示唆されているように思えます。このような方向性で超弦理論の新しい定式化を考えることができれば、面白いのではないかと考えています。

4. 研究成果

世代対称性を持つE6大統一理論において予言される特徴的なスフェルミオンスペクトラムにおいては、B中間子のCPの破れのプロセスで、最小超重力理論の予言からずれ得ることがわかったので、特によくずれが見えることが期待されている過程で、量を計算した。パラメータの値に依存するが、そのずれは、小さいながら、将来の実験で確認される可能性がある。

微小な階層性問題を解決するために軽いヒッグズセクターの導入を我々は提唱したが、その場合、ニュートラリーノがダークマターの場合において、その熱的な生成量を計算した。その結果、従来の超対称性標準模型での結果と異なり、小さすぎる生成量を予言するパラメータ領域が大きいことがわかった。実際、自然なパラメータ領域で、WMAPで得られたダークマターの量を再現できる領域があることも確認された。

超対称性の破れの起源を理解することは、LHCで超対称性の破れのパラメータの幾つかが測定されうることを考えると、重要な課題であるが、我々は、自然な大統一理論を得る際に重要な役割を果たした異常U(1)対称性を用いると、超対称性も自発的に破れうることを準安定真空ではあるが、具体的に示した。

世代対称性を持つE6大統一理論において予言される特徴的なスフェルミオンスペクトラムにおいては、たとえ、超対称性の破れのパラメータを実に取ったとしても、小林-益川位相を導出するために湯川結合定数を複素数にとると、中性子の電気双極子モーメントが大きすぎる、という問題が存在した。その問題と、従来からある超対称性CP問題を解決するために、CP対称性を自発的に破るというアイデアを導入した。すると、以上の問題が解決されるだけでなく、これまで、パラメータ間の相殺が要求された、アップクォークの質量や、 V_{ub} の大きさなどが、相殺なしに自然に導出される、というバイプロダクトを得た。さらに、導入した有限対称性のために許される項が限られたため、クォーク、レプトンの質量行列に対して、予言能力がある理論になった。それらのことをまとめて、論文として発表した。

また、中性子の電気双極子モーメントが大

きく出すぎるという問題は、一応、解決したが、現在の実験バウンド近くになることがわかってきた。その予言が将来の実験で観測される可能性がある。このことも論文としてまとめて発表した。

超弦理論からE6大統一理論を導出する、というプロジェクトも大きな進展があった。ようやく、アジョイントヒッグスを持つ、3世代のE6大統一理論になる、超弦理論の真空を2つ見つけることができた。他にどれくらいあるか、また、現象論的に満足できるものかどうかの解析等を現在、行っているところである。

また、連携研究者の杉本は、タイプIIA超弦理論におけるD4/D8ブレーンによって構築したQCDのホログラフィック双対模型の研究を行った。論文[10-12]において、バリオンを解析する新しいテクニックを開発し、バリオン質量スペクトラム、磁気モーメント、電荷半径、中間子の結合定数、電磁フォームファクター、核力、等を計算した。多くの計算量は、実験データとよい一致を示した。論文[13]では、 $O(N)$ と $USp(N)$ QCDのホログラフィック双対模型を構築し、 $O(N)$ 、 $USp(N)$ QCDの非摂動的性質のいくつかを示した。

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 13 件)

- 1, Flavor structure of E6 GUT models, H. Kawase, N. Maekawa, to appear in Prog. Theor. Phys. (2010). 査読有。
- 2, Gauge-mediated supersymmetry breaking with generalized messenger sector at LHC, H. Kawase, N. Maekawa, K. Sakurai, JHEP, 1001, 27(2010). 査読有。
- 3, Spontaneous CP violation in E6 SUSY GUT with SU(2) flavor and anomalous U(1) symmetries, M. Ishiduki, S.-G. Kim, N. Maekawa, K. Sakurai, Phys. Rev. D80, 039901 (2010). 査読有。
- 4, LHC signature of supersymmetric models with non-universal sfermion masses, S.-G. Kim, N. Maekawa, K. Nagao, M.M. Nojiri, K. Sakurai, JHEP, 0910,005(2009). 査読有。
- 5, CEDM constraints on modified sfermion universality and spontaneous CP violation, M. Ishiduki, S.-G. Kim, N. Maekawa, K. Sakurai, Prog. Theor. Phys. 122, 659 (2009). 査読有
- 6, Spontaneous SUSY breaking with anomalous U(1) symmetry in metastable vacua and

moduli stabilization, S.-G. Kim, N. Maekawa, H. Nishino, K. Sakurai, Phys. Rev. D79, 055009(2009). 査読有。

7, O(N) and USp(N) QCD from String Theory, T. Imoto, T. Sakai, S. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. 122, 1433(2009). 査読有。

8, Nuclear Force from String Theory, K. Hashimoto, T. Sakai, S. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. 122, 427 (2009). 査読有。

9, Neutralino Dark Matter in minimal supersymmetric standard model with natural light Higgs sector, S.-G. Kim, N. Maekawa, K. Nagao, K. Sakurai, T. Yoshikawa, Phys. Rev. D78, 075010 (2008). 査読有。

10, CP asymmetries of B to phi K_S and B to eta' K_S in SUSY GUT Model with Non-universal sfermion masses, S.-G. Kim, N. Maekawa, A. Matsuzaki, K. Sakurai, T. Yoshikawa, Prog. Theor. Phys. 78, 075010(2008). 査読有。

11, Holographic Baryons: Static Properties and From Factors from Gauge/String Duality, K. Hashimoto, T. Sakai, S. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. 120, 1093 (2008). 査読有。

12, Lepton Flavor Violation in SUSY GUT Model with Non-universal Sfermion Masses, S.-G. Kim, N. Maekawa, A. Matsuzaki, K. Sakurai, T. Yoshikawa, Phys. Rev. D75, 115008 (2007). 査読有。

13, Baryons from instantons in holographic QCD, H. Hata, T. Sakai, S. Sugimoto, S. Yamato, Prog. Theor. Phys. 117, 1157 (2007). 査読有。

〔学会発表〕(計3件)

1, 標準模型を超える超対称性大統一理論、前川展祐, シンポジウム素粒子標準模型を超える統一理論に向けて、九州大学、2009年12月18日

2, Spontaneous CP violation in E6 GUT with horizontal symmetry, N. Maekawa, SUSY 09 at Northeastern Univ., Boston, USA, 2009.6.7

3, SUSY breaking and CP violation in E6 grand unified theory with horizontal symmetry, N. Maekawa, International workshop on grand unified theory at Ritsumei Univ., Japan, 2007.12.17-19.

〔図書〕(計0件)

〔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〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者 前川展祐

(名古屋大学大学院理学研究科准教授)

研究者番号: 40273429

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者 杉本茂樹

(東京大学 I PMU 教授)

研究者番号: 80362408