

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月10日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740155

研究課題名（和文） 超対称性の破れのミラージュ伝達と LHC の物理

研究課題名（英文） Mirage mediation of supersymmetry breaking and physics at LHC

研究代表者

奥村 健一（OKUMURA KEN-ICHI）

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：40403935

研究成果の概要（和文）：

超対称理論は標準理論(SM)を超える物理の最も有力な可能性の一つである。しかし現実の世界では超対称性は破れており、超対称粒子の質量スペクトラムなど、その現象論的帰結の多くは超対称性の破れの媒介機構に依存している。超対称性の破れの媒介機構はこれまで現象論的な要請から考察されることが多かったが、最近になって超弦理論の有効理論の考察から mirage mediation という新しいカテゴリーの媒介機構が注目されるようになった。本研究ではこの mirage mediation の概念の拡張や LHC により判明した新たな実験事実に基づいた mirage mediation の現象論について研究を行った。その成果の主なものは、

1. Anomalous U(1)ゲージ対称性を持つ超弦理論の有効超重力理論において、Anomalous U(1)ゲージ場質量への Stueckelberg 質量の寄与と FI 項を相殺するために導入された SM singlet の真空期待値の寄与の相対的な比に応じて、低エネルギー有効理論での flat direction が Green-Schwarz (GS) modulus から SM singlet に連続的に変化し、modulus mediation と anomaly mediation の組み合わせである mirage mediation を含む様々な超対称性の破れの媒介機構の組み合わせが現れることが分かった。
2. Mirage mediation において右巻きニュートリノを導入した最小超対称理論(MSSM)でレプトンフレーバーを破る過程  $\mu \rightarrow e\gamma$  を考察し、右巻きニュートリノによる敷居補正によって UV insensitive な anomaly mediation だけでなく modulus mediation と anomaly mediation の混合項に存在するレプトンフレーバーの破れもほぼ相殺され、modulus mediation のレプトンフレーバーの破れの寄与だけが残ることが分かった。
3. Mirage mediation においては mirage scale を TeV 近辺に設定する (TeV scale mirage mediation) ことにより、電弱対称性の破れのスケールよりも一桁重い超対称粒子の質量を微調整無しに実現できることが知られている。LHC による超対称粒子の質量下限の大幅な上昇と MSSM での上限に近い質量の軽いヒッグス粒子の兆候が明らかになったことを踏まえ、mirage mediation において微調整の基準を緩めて 10 TeV スケールの超対称粒子の質量を実現した場合の現象論を考察し、ヒッグス質量と超対称粒子質量の関係を計算した。これにより LHC で超対称粒子が発見されなかった場合、将来の実験計画を立てる上で  $\tan\beta$  の測定が非常に重要であることが明らかになった。
4. LHC による前記のような状況を踏まえ、TeV scale mirage mediation において MSSM に一重項場を導入した NMSSM を考察し、その電弱対称性の破れの構造と軽いヒッグス質量を調べた。これによりダウン型ヒッグス質量パラメータと有効  $\mu$  項の相殺が起ることで、微調整を導入することなく有効  $\mu$  項（ヒッグシーノ質量）を重く出来ることが分かった。また 1TeV 程度の超対称粒子でも NMSSM に典型的な偽真空やヒッグスの tachyonic mode を避けて 125GeV 程度の軽いヒッグス質量を実現可能であることを明らかにした。

となる。研究の途中で LHC の初期の解析が公表され、超対称粒子の質量が予想よりも重い兆候が明らかになったため、当初計画していた暗黒物質の過剰生成を解決する模型構築とそれに基づく LHC での超対称粒子生成の数値シミュレーションから、**mirage mediation** による重い超対称粒子実現のシナリオの研究に重点を移した。成果 2、3 については現在研究を継続中であり、本研究の成果として出版する予定である。

研究成果の概要（英文）：

Supersymmetric (SUSY) extension of the Standard Model (SM) is widely accepted as the most promising candidate for the physics beyond the SM. However, supersymmetry is broken in the real world. Most of the phenomenological consequences of the SUSY models actually depend on the mechanism of mediating SUSY breaking from the hidden sector to the SM sector. Traditionally, the mechanism of mediating SUSY breaking has been investigated in the bottom up approach by taking various phenomenological requirements as a clue to understand it. Recently, a new category of mechanism to mediate SUSY breaking called “mirage mediation” emerged from the study of effective supergravity theory of superstring and has been gathering a lot of attention. In this project, we tried to extend the concept of the mirage mediation and studied the phenomenology of the mirage mediation taking into account the latest experimental results from the LHC. The main results follow:

1. We analyzed the effective supergravity theory of the superstring having the anomalous U(1) gauge symmetry. Depending on the ratio of the contributions to the gauge boson mass from the Stueckelberg mass and the vev of the SM singlet which is introduced to cancel the FI term, the flat direction in the low energy theory varies continuously from the Green-Schwarz (GS) modulus to the SM singlet. Then various combinations of the SUSY breaking mechanism appear in the low energy theory including the mirage mediation which is described as a combination of the modulus mediation and the anomaly mediation.
2. We studied the lepton flavor violating process,  $\mu \rightarrow e \gamma$ , in the minimal SUSY SM (MSSM) with the heavy right-handed neutrino under the mirage mediation. It is found that lepton flavor violation in the mixing terms of the modulus and anomaly mediation is almost cancelled by the threshold correction of the right-handed neutrino, in addition to the lepton flavor violation in the anomaly mediation which is known to be UV insensitive. Then the lepton flavor violation only remains in the modulus mediation contribution.
3. It is known that, in mirage mediation, the SUSY scale one order heavier than the electroweak scale can be realized without any fine-tuning by taking the mirage scale around the TeV scale (TeV scale mirage mediation). Considering the fact that the lower bound of the SUSY particle mass is drastically improved by the LHC and indications of the lightest Higgs boson almost sticking to the upper bound in the MSSM are also reported by the LHC, we investigated the phenomenological consequences when we relax the criteria of the fine-tuning in the TeV scale mirage mediation and push the SUSY scale to 10 TeV. We calculated the relation between the lightest Higgs boson mass and the SUSY scale. Then we found that the measurement of  $\tan \beta$  is extremely important to plan the next generation experiments if the SUSY particles is eventually found to be out of the reach of the LHC.
4. Taking into account the above situation introduced by the LHC, we investigated the Next-to-Minimal SUSY SM (NMSSM) in which we add a SM singlet to the MSSM. We examined the structure of the electroweak symmetry breaking and calculated the mass of the lightest Higgs boson. We found that we can raise the effective  $\mu$  term (the higgsino mass) to considerably heavier than the

electroweak scale without deteriorating the fine-tuning. This is because of the cancellation between the effective  $\mu$  term and the down-type Higgs boson mass. We also found that the lightest Higgs boson can be as heavy as 125 GeV for 1 TeV SUSY scale simultaneously satisfying the constraint from the false vacuum and the tachyonic mode.

In the middle of the project, the first result from the LHC is published and it suggested that the SUSY particles are much heavier than the expectation when this project is planned, we shifted the emphasis of the study to the study of models with natural heavy SUSY spectrum in mirage mediation from the model building to solve the problem of dark matter over production and the Monte Carlo simulation of SUSY particle production at LHC based on it. The 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> results are still preliminary and we are continuing the studies. We are planning to publish these researches as results of this fund.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

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：mirage mediation, anomalous U(1), axion, レプトンフレーバーの破れ, 敷居補正, ヒッグス粒子質量, NMSSM

## 1. 研究開始当初の背景

超対称理論は標準理論のゲージ階層性問題を新たな対称性（超対称性）の導入により美しく解決する一方、ゲージ結合定数統一の予言や冷たい暗黒物質の候補の存在など実験や観測に根差した様々な魅力的な性質を備え、電弱対称性の破れの背後にあるとされる新しい物理の最も有力な候補と考えられている。厳密な超対称性の下、超対称理論は標準理論粒子と同質量のパートナー粒子（超対称粒子）を予言するが、これらは未発見であるため現実の世界では超対称性は質量次元を持ったパラメータによりソフトに破れており、超対称粒子は階層性問題が生じない電弱スケール程度以下の質量を持っていると考えられる。宇宙論的な帰結を含め、超対称理論の様々な予言はこの超対称性を破る機構をどう仮定するか強く依存しており、その理解は超対称理論の現象論の大きな目標の一つとされてきた。

超対称性の破れはこれまでフレーバー物理からの強い制限を指導原理として現象論的な立場から様々な機構が提案され、予言に用いられてきた。一方、超弦理論の立場から見るとこのような低エネルギー超対称理論

はカラビヤウと呼ばれる6次元多様体にコンパクト化された超弦理論の有効理論として記述され、超対称性の破れもその枠組みで理解されるはずである。この6次元多様体の形や大きさを記述するモジュライは4次元では通常質量を持たない場として現れ、物質場とプランク質量で抑制された相互作用を持つためにいわゆる **hidden sector** の一部として超対称性の破れの媒介場となることが古くから知られている。しかしこのモジュライ場が媒介する超対称性の破れ (**modulus mediation**) を予言するためにはモジュライ固定のダイナミクスを宇宙定数が観測されている微小な正の値にコントロールされた状況で具体的に構成することが必要である。

最近になって超弦理論のフラックスコンパクト化により初めてそのような議論が可能になった。特にKKLT模型に代表される一般的な宇宙定数調整シナリオではモジュライ場が媒介する超対称性の破れがループ因子程度抑制され、anomaly mediationと同程度になることが明らかになった。このような超対称性の破れは mirage mediation と呼ばれ、modulus mediationの量子補正とanomaly mediationの相殺により従来の機構とは全く異なるコンパ

クトな特徴的低エネルギースペクトラムを与えることが本研究の申請者と共同研究者によって明らかにされていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はこの超対称性の破れの mirage mediation をさらに一般的な場合に拡張し、LHC などのコライダー物理、レプトンフレーバーの破れや FCNC などのフレーバー物理、宇宙の熱的進化と暗黒物質の残存量などに適応することでその予言を議論し、またその結果を用いてさらに現実的なモデルを構築することにある。特に最小の mirage mediation 模型においては宇宙初期においてモジュライ場起源のグラビティーノにより暗黒物質が過剰生成される問題があり、これを解決するための模型の修正を考察し、またこれによって超対称粒子のスペクトラムに対する予言がどう変化するか、異なる模型の予言を LHC によっていかに区別するかを考える。また暗黒物質の直接、間接検出によってそのようなモデルを検証する方法についても考察する。その他にこの mirage mediation を大統一理論と組み合わせた場合の現象論的帰結も考察する。特に anomaly mediation では相殺する大統一相互作用による量子補正が mirage mediation においてレプトンフレーバーの破れや LHC B を始めとする B の物理等、フレーバー物理へどのような影響を与えるかを研究する。

## 3. 研究の方法

本研究は mirage mediation の拡張模型の構築とその LHC での検証可能性を探るための現象論的解析に分けることができる。研究の前半は模型構築に当て、後半は数値計算を用いたより具体的な解析に重点を移すことで研究期間中に成果をまとめる。

## 4. 研究成果

### (1) [雑誌論文 1]

超弦理論の低エネルギー有効理論に anomalous U(1) が存在する場合、Green-Schwarz 機構による anomaly 相殺のために Green-Schwarz (GS) modulus が必要になる。このとき一般に GS modulus に依存する Fayet-Iliopoulos (FI) 項が生じる。低エネルギー超対称性を実現するためには U(1) 電荷を持った SM singlet を導入してこれを相殺する必要がある。anomalous U(1) は GS modulus と SM singlet の組み合わせの一方を吸収することで重くなり、別の組み合わせが mass less の D-flat 方向として残る。

この D-flat 方向が主に GS modulus で構成されているか、SM singlet で構成されているかによって mirage mediation、mixed gauge-gravity mediation (sweetspot SUSY) など様々な超対称性の破れのシナリオが現れる。これらの何れのシナリオが実現するかは GS modulus の Kaehler potential の形状或は GS modulus の起源に強く依存している。特に FI 項が消える場合、anomalous U(1) に含まれる global symmetry から QCD axion が自然に実現する。

### (3) [学会発表 1]

LHC の初期の解析に標準理論からのずれが見つからなかったことにより、スクォークやグルイーノ等のカラーを持った超対称粒子は 1TeV 以上の質量を持つ可能性が極めて高くなった。一方、125 GeV 近辺にヒッグス粒子の兆候が報告されている。これは MSSM の枠組みで捉えると、ストップの質量が数 TeV 以上であることを示唆している。通常の超対称性の破れの模型では、ストップの質量とアップ型ヒッグス質量は量子補正により混ざり合うことで同程度の大きさになる。従って電弱対称性の破れに一万分の一程度の微調整が存在することになる。Mirage mediation においては Mirage scale を TeV 近辺に設定することにより、1-loop 繰り込み群の精度で量子補正を相殺することが可能であり、アップ型ヒッグス質量をストップと比べて十分の一程度に抑制出来る。この場合ストップが 10TeV でも微調整は数パーセント程度で済む。また gauge mediation を一般化した general gauge mediation においても、グルイーノとウィーノの質量を自由に選べるため、ストップ質量を抑制出来るパラメータが存在する。このような 10TeV 超対称理論において Higgs 質量とストップ質量の関係を計算した。tan  $\beta$  が 10 程度よりも大きいときは Higgs 質量の tan  $\beta$  に対する依存性は小さく、Higgs 質量によりストップ質量スケールが求められるが、tan  $\beta$  が 10 程度よりも小さくなるとストップ質量は tan  $\beta$  に依存して 10TeV 付近からさらに急激に大きくなり、ストップ質量の下限しか求まらないことが明らかになった。これにより LHC で超対称粒子が見つからなかった場合、湯川結合の測定による tan  $\beta$  の測定が重要になることが明らかになった。B  $\rightarrow$  Xs,  $\gamma$  や Bs  $\rightarrow \mu \mu$  等の FCNC 過程からの制限も求めたところ、理論の予言の不定性により強い制限が得ることは将来に渡っても困難であることが分かった。

### (2) [学会発表 3]

Anomaly mediation は UV insensitive なこ

とが知られており、超対称性をソフトに破る項に対して重い粒子の繰り込み群による寄与と重い粒子を積分したときの数居補正が厳密に相殺することで低エネルギーでは重い粒子の痕跡が消えてしまう。重い右巻きニュートリノを導入した MSSM においては一般に右巻きニュートリノが関与するニュートリノ湯川結合の繰り込み群の効果によりソフト項にレプトンフレーバーの破れが生じるが、UV insensitivity のため anomaly mediation においてはこのような効果は現れない。Modulus mediation が加わった mirage mediation でこの相殺効果がどうなるかを調べた結果、Anomaly mediation の寄与だけでなく anomaly mediation と modulus mediation の干渉項に対しても SM の小さな湯川結合がゼロの極限で同様の相殺が存在し、低エネルギーにおいて右巻きニュートリノによるレプトンフレーバーの破れは Modulus mediation の寄与にだけ現れることを明らかにした。

#### (4) [雑誌論文 2]

Mirage mediation においては、mirage scale を電弱対称性の破れのスケールに置く事により電弱対称性の破れのスケールよりも一桁程度重い超対称粒子を自然に実現できることが知られている。一方、MSSM で電弱対称性を適切に破るために必要な B 項は mirage mediation では典型的には超対称粒子よりループ因子だけ重いグラビティーノ質量で与えられるため、何らかの相殺機構を導入して B 項を小さくしなければならない。一方、LHC により 125GeV 近辺に軽いヒッグス粒子の兆候が報告されており、これを mirage mediation において MSSM で実現するためには数 TeV 以上のストップ質量が必要となって、数パーセント程度の微調整が必要になってくる。そこで MSSM をゲージ重項を加えた NMSSM に拡張し、mirage mediation において解析を行った。NMSSM では  $\mu$  項は一重項の真空期待値に置き代わり (有効  $\mu$  項)、B 項は一重項の湯川結合の A 項で与えられるため、mirage mediation において自動的に超対称粒子の質量スケールとなる。一方ヒッグス場の 4 点結合に新たな寄与が加わることにより、軽いヒッグス粒子の質量を MSSM よりも持ち上げることが出来ることが期待される。電弱対称性の破れを数値的に詳しく調べた結果、NMSSM に特有の擬真空や tachyonic mode の制限の下でも mirage mediation において 1 TeV 程度のストップ質量に対し、実験から示唆されている 125 GeV 近辺のヒッグス質量が実現可能であることが分かった。この時、電弱対称性を破るために必要とされる一重項の質量は、丁度 mirage mediation によって予言

される値に近くなることが判明した。また有効  $\mu$  項とダウン型ヒッグス質量の相殺により、有効  $\mu$  項が 500GeV 程度と重くなっても、電弱対称性の破れの微調整が悪くならないことが明らかになった。

#### 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 2 件)

- ① Kiwoon Choi, Kwang-Sik Jeong, Ken-ichi Okumura, Masahiro Yamaguchi, "Mixed Mediation of Supersymmetry Breaking with Anomalous U(1) Symmetry", JHEP **1106** (2011) 49, 査読有
- ② Tatsuo Kobayashi, Hiroki Makino, Ken-ichi Okumura, Takashi Shimomura, Tsubasa Takahashi, "TeV scale mirage mediation in NMSSM", arXiv:1204.3561, 査読無し (Phys. Rev. D に投稿中)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Tatsuo Kobayashi, Hiroki Makino, Ken-ichi Okumura, Ryo Takahashi, "10TeV 超対称理論でのくりこみ群による Higgs 粒子の解析", 日本物理学会 2011 年年次大会, 関西学院大学, 2011 年 3 月 25 日
- ② Tatsuo Kobayashi, Ken-ichi Okumura, Tsubasa Takahashi, Takashi Shimomura, "Constraints on NMSSM parameters in TeV scale mirage mediation", 日本物理学会 2011 年年次大会, 関西学院大学, 2011 年 3 月 25 日
- ③ Kiwoon Choi, Kwang-Sik Jeong, Ken-ichi Okumura, Kazuto Uenou, Masahiro Yamaguchi, "Lepton flavor violation in mirage mediation", 日本物理学会 2010 年年次大会, 新潟大学, 2010 年 3 月 25 日

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

奥村 健一 (OKUMURA KEN-ICHI)  
九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号: 40403935