

平成 21 年 5 月 13 日現在

研究種目： 若手研究 (B)  
研究期間： 2007 ~ 2008  
課題番号： 19740144  
研究課題名 (和文) 小さな階層性を持った超対称理論の研究  
研究課題名 (英文) Research of supersymmetric theory with little hierarchy  
研究代表者 奥村 健一 (OKUMURA KENICHI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号： 40403935

## 研究成果の概要：

超対称理論は標準理論を超える物理の最も有力な可能性とされてきたが、近年の実験の進歩により電弱対称性の破れと超対称性の破れのスケール間の小さな階層性による微調整の問題が顕在化してきた。本研究課題ではこの小さな階層性を持った質量スペクトラムを持つ超対称理論の自然な実現を目指して超対称性の破れの mirage 伝達模型の拡張の可能性を研究した。研究の過程で超対称性の破れの mirage 伝達模型の拡張についてこれまでにない新しい知見を得る事が出来た。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	270,000	2,170,000

研究分野：素粒子物理学

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：電弱対称性の破れ、超対称性の破れ、超対称粒子の質量

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の標準理論はヒッグス場の質量に二次発散があるため量子補正に対してきわめて不安定であり、ヒッグス場によって電弱対称性が破れる 100 GeV 近傍のエネルギースケールで二次発散がない新しい理論に置き換わると広く信じられている。様々な傍証からこれまで超対称理論がこの二次発散を制御する新しい物理の最も有力な候補であると考えられてきた。

しかし超対称理論の予言する新粒子は未だ発見されておらず、特に最小超対称標準理論 (MS SM) において古典近似で Z ボゾン (91 GeV) よりも軽くなるはずのヒッグス粒子は既に直接実験による質量下限が 114 GeV に達している。量子補正を加えることでこれを満たすためにはトップクォークとその超対称パートナーであるトップスクォークの間に 500 GeV 近い大きな質量差が必要となる。この電弱対称性の破れと超対称性の破れのエネルギースケールの間の小さな

階層性は既にMS S Mの電弱対称性の破れに%レベル以上の微調整が必要であることを示唆している(超対称理論の小さな階層性問題)。この事実は電弱対称性の破れの背後にMS S Mを超える物理が存在することの表れと捉えることもできる。

このような事情を背景として2005年に本課題の研究代表者は共同研究者と共に超対称性の破れの mirage 伝達機構に基づいてこの小さな階層性を微調整なしに自然に実現するモデルを提案した。しかしその後このモデルは超弦理論の有効理論として実現することが困難であることが指摘され、また mirage 伝達機構自身も宇宙初期に gravitino 由来の暗黒物質が過剰生成される問題があることが明らかになった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は超対称理論の小さな階層性問題を手掛かりとして新たな超対称モデルを構築し、間もなく本格的に稼働を始めるLHC実験の結果の現象論的解析にこれまでにない可能性を提示することで実験に基づいた電弱対称性の破れの機構の解明に向けた研究を活性化することである。

## 3. 研究の方法

本課題の研究代表者と共同研究者によって提案された mirage 伝達機構に基づいた小さな階層性を持つ超対称モデル(TeV scale mirage 伝達モデル)の構造をさらに詳しく研究することで小さな階層性を超弦理論の低エネルギー有効理論として自然に実現する方法を探る。また mirage 伝達機構が抱える宇宙論的な問題を解決できるモデルの拡張を考え、LHCを念頭においてその現象論的帰結を詳しく考察する。

## 4. 研究成果

### (1) [雑誌論文3]

本研究課題の開始と共に研究代表者が研究機関を移動し、素粒子論的宇宙論の研究者の近くで仕事をすることになった。このため当初の研究計画の順序を入れ替え、始めに mirage 伝達機構の宇宙論的問題を解決するシナリオの構築を目指すことにした。

mirage 伝達機構においては必然的に gravitino 質量程度の比較的軽い moduli 場が存在する。そのような場が存在すると宇宙初期、インフレーション後に振動を始め、宇宙の断熱膨張と共にその振動エネルギーが宇宙の全エネルギーの大部分を占めるようになる。この振動は最終的には素粒子に崩壊

し、放射エネルギーに転化することになる。このとき同時に生成される gravitino は暗黒物質である neutralino が熱浴から離脱した後崩壊し、neutralino を非熱的に生成する。mirage 伝達ではその量が観測されている暗黒物質よりも二桁程度多いため問題となっている(moduli induced gravitino 問題)。

この問題を解決するため、本課題において我々は、mirage 伝達モデルに超対称性の破れによって動的に Pecci-Quinn (PQ) スケールが決まる hadronic axion 場を導入した(Axionic mirage 伝達)。このような場合、axion の超対称パートナーである axino の質量は gravitino に比べて 2-loop の抑制因子で軽くなり、1GeV-100MeV 程度となる。過剰生成された neutralino は最終的に axino に崩壊し、詳細な計算を行うとこの neutralino より二桁程度軽い axino が観測されている暗黒物質量を丁度説明できることが明らかになった。このような軽い暗黒物質は free streaming によって宇宙の小さなスケールでの構造形成を阻害し、最近問題となっている構造形成の数値シミュレーション結果と観測結果の間の齟齬を説明できる可能性がある。

このような axion によるモデルの拡張は電弱対称性の破れにも重要な役割を果たす。MS S Mにおいて正しく電弱対称性の破れを引き起こすためには higgsino の質量項である  $B\mu$  項が共に電弱スケール程度の大きさを持たなければならない。通常の超重力モデルではBパラメータは gravitino 質量程度の大きさを持つため mirage 伝達のように anomaly 伝達が主要な役割を果たす場合は gravitino が超対称粒子の質量よりも loop 因子だけ重くなり、何らかの微調整を導入しないと正しい電弱対称性の破れを引き起こすことができない。(TeV scale mirage 伝達モデルは特別でこの微調整を自動的に行うように構成できる。)しかし moduli induced gravitino 問題を解決するためにモデルに(s)axion 超場を導入すると PQ 対称性によってBパラメータへの主要な寄与が禁止され、さらに saxion 場(とそのF項)の真空期待値による PQ 対称性の破れによって 1-loop で抑制された丁度良い大きさのBパラメータを生成できることが分かった。

また動的に決定される PQ スケールは mirage 伝達機構の起源としてKKLT型の超弦モデルを仮定すると広いパラメータ空間で  $10^{10}$  の  $10$  乗 GeV 程度になり、axion の実験的な制限を丁度満たすことができることが明らかになった。しかし一方で TeV mirage 伝達モデルではそのままではこのスケールが gravitino 質量近傍となるため、axion の実験的制限を満たすためにはさらなる模

型の拡張が必要であることが判明した。

Saxion 場を安定化させ、PQ 対称性を動的に破るためには saxion と結合し、標準理論のゲージ相互作用をする messenger 場を導入する必要がある。この messenger はゲージ伝達によって超対称性の破れを伝える役割も果たすため、mirage 伝達の質量スペクトラムが変化する可能性がある。従ってこのモデルは質量スペクトラムの点からも mirage 伝達の興味深い拡張になっていることが明らかになり、小さな階層性の実現に向けてさらにこの方向で研究を進めることになった。

## (2) [雑誌論文 2]

超対称性の破れの伝達機構に対する重要な制約としてフレーバー物理からの実験的制限がある。標準理論において三世代のクォークやレプトンの質量は湯川結合行列によって決まっている。一方でその超対称パートナーの質量は独立な物理である超対称性の破れによって決まる。もしこの超対称性の破れによる質量が世代によって勝手な値をとると、クォークやレプトンの質量行列と超対称粒子の質量行列は同時に対角化することができず、世代間（フレーバー）の混合を引き起こす。この混合は超対称粒子が介在する量子補正を通じて標準理論で禁止されているレプトンフレーバーを破る過程や強く抑制されている FCNC 過程を引き起こす。しかし今のところこれらの過程に標準理論からの明らかなずれは見つかっていない。この問題を解決する一つの方法は何らかの原理によって超対称性の破れに起因する質量が世代に依存しないように保障することである。ゲージ伝達や anomaly 伝達では主にゲージ相互作用が超対称性の破れを伝える役割を果たすため、この条件が自動的に満たされている。Mirage 伝達では moduli によって伝えられる超対称性の破れがこの条件を満たしているかどうかは必ずしも自明ではない。本研究課題では mirage 伝達が既にある実験的な制限を満たしているかどうかを確認するため、moduli 伝達に対するフレーバー物理からの制限も詳しく考察した。

超弦理論においてはすべての結合は何らかの moduli 場の真空期待値によって決まっている。もし湯川結合を決めている moduli が超対称性の破れを媒介すると超対称性を破る質量にフレーバーに対する依存性が現れる。しかし mirage 伝達においてはそうした moduli はフラックスにより固定され、Planck 質量近くの重さを持つため、それらが媒介する超対称性の破れはその質量により抑制されて全く問題にならない。一方、超対称性の破れを媒介する moduli はフラックスではなく非摂動効果により固定され、

gravitino に近い軽い質量を持つ。この moduli はゲージ結合定数を決定し、虚部に対して shift symmetry を持つため super potential 中の湯川結合に現れることができない。またそうした moduli の物質場の Kaehler metric に対する主要な依存性は moduli の値の変化に対する物質場の波動関数のスケールリング(modular weight)で決定され、異なる世代の物質場が同じブレン上に住んでいると同じスケールリングに従うためフレーバー依存性を持たなくなる。

しかしたとえ主要項がフレーバーに依らなくても Kaehler metric の moduli による展開を考えればスケールリング則からのずれを表す高次項は一般にフレーバー依存性を持つのでまだ危険である。我々は moduli がゲージ結合定数に相当することを考えると、この展開は量子補正に相当し、高次項は loop 因子により抑制されていると予想されることを指摘した。我々はこの仮定のもとに現れる超対称性の破れのフレーバー混合を調べ、ほとんどの場合に実験からの制限が問題にならないことを示した。例外は中性 K 中間子混合の CP を破るパラメータ、 $\epsilon$  と  $\mu$  粒子の放射崩壊  $\mu \rightarrow e, \gamma$  である。これらの場合も湯川結合の階層性の起源に対して局在化した波動関数の重複やフレーバー対称性など、比較的一般的な仮定をすれば制限を逃れられることが明らかになった。

小さな階層性を実現する TeV mirage 伝達モデルにおいては、少なくともトップ湯川結合で結びついた三つの場の modular weight に sum rule が成り立っている必要があり、その起源が問題であった。フレーバー物理の考察の過程でこの sum rule が上述のスケールリング則などコンパクト化された超弦理論起源の moduli に期待される性質から導き出せる場合があることが明らかになった。しかし TeV mirage 伝達モデルの超弦理論における起源との深い関連まで理解するには至らなかった。

## (3) [雑誌論文 1]

Axionic mirage 伝達の場合のように messenger の質量を決めている一重項スカラー場の真空期待値が超対称性の破れに起因するポテンシャルによって固定される場合、その質量スケールで mirage 伝達による超対称粒子の質量にゲージ伝達の寄与が加わる。これによりその質量スケールから下でその質量の繰り込み群による発展が mirage 伝達の軌道からずれ、電弱スケールでのスペクトラムが変化する。我々はこのように mirage 伝達にさらにゲージ伝達を加わった場合(deflected mirage 伝達)の低エネルギー質量スペクトラムの一般論を調べた。

この研究により我々は deflected mirage 伝達の質量スペクトラムも mirage 伝達を記述するパラメータである  $\alpha$  と modular weight を有効値に置き換えれば Mirage 伝達と全く同じ公式で表わされることを明らかにした。この有効パラメータが実際の模型でどうなるかを計算すると、超重力の枠組みで新たな質量スケールを導入せず自然に実現される一重項スカラー場のポテンシャルでは、新たに加わったゲージ伝達の寄与と messenger による moduli 伝達に対する量子補正が相殺するため、質量スペクトラムのずれは小さく留まることが分かった。一方で例えば Affleck-Dine-Seiberg の superpotential のような非摂動効果を用いて動的に新しい質量スケールを導入するか、複雑な超重力模型を構成すれば  $\alpha$  や modular weight をゲージ伝達のない単純な K K L T 型超弦模型における mirage 伝達の予言から大きくずることが出来ることが分かった。

以上の研究により deflected mirage 伝達では TeV scale mirage 伝達に必要な  $\alpha = 2$  を有効パラメータとして K K L T 型超弦模型の枠内で比較的容易に実現できることが分かったが、modular weight への補正を離散的な値に制御することが出来なため sum rule を実現することが困難であり、こうした方向で小さな階層性を実現することは現実的ではないことが分かった。一方で TeV scale mirage 伝達のような量子補正の厳密な相殺を用いなくても、K K L T 型の  $\alpha = 1$  の模型内で deflected mirage 伝達におけるゲージ伝達による小さな補正を併用すれば離散的なパラメータの選択によって同レベルの小さな階層性を偶然に実現できることが明らかになった。この場合 (1) の Axionic mirage 伝達によって宇宙論的な問題も  $B \mu$  項の問題も同時に解決が可能である。

また本研究により有効パラメータとして  $\alpha = 3$  を選べば gluino を最も軽い超対称粒子に選ぶことが出来ることが分かった。このような場合 gluino を含む長寿命の複合粒子が現れるため、LHC の現象論は通常と全く異なったものになる。この事実はこれまで非常に特殊な模型でしか実現できない稀なケースと考えられていたシナリオが、超弦理論に背景を持った比較的自然な模型によって実現されることが分かったことになり、LHC の現象論に大きなインパクトをもっていると考えられる。この場合、小さな階層性は実現されないが、(1) の Axionic mirage 伝達を使えば宇宙論的な問題や  $B \mu$  項の問題は解決できる。

## 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 3 件)

- ① K. Choi, K. S. Jeong, S. Nakamura, K. i. Okumura and M. Yamaguchi, "Sparticle masses in deflected mirage mediation," JHEP **0904**, 107 (2009) 1-36 査読有
- ② K. Choi, K. S. Jeong and K. i. Okumura, "Flavor and CP conserving moduli mediated SUSY breaking in flux compactification," JHEP **0807**, 047 (2008) 1-24 査読有
- ③ S. Nakamura, K. i. Okumura and M. Yamaguchi, "Axionic Mirage Mediation," Phys. Rev. D **77**, 115027 (2008) 1-18 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Ken-ichi Okumura, "Sparticle masses in deflected mirage mediation", KEK 理論研究会 (KEKPH09), 高エネルギー加速器研究機構, 2009 年 3 月 3 日
- ② Ken-i Ken-ichi Okumura, "Deflecting the mirage mediation", 日本物理学会 2008 年秋季大会, 山形大学, 2008 年 9 月 22 日
- ③ Ken-ichi Okumura, "Axino dark matter in mirage mediation", 4<sup>th</sup> International Workshop on the Dark Side of the Universe, The British University in Egypt, 2008 年 6 月 5 日
- ④ Kenichi Okumura, "Deflected anomaly mediation into mirage mediation", 日本物理学会 2007 年年次大会, 2007 年 9 月 24 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥村 健一 (OKUMURA KEN-ICHI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 40403935

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者