

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 15 日現在

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2011
 課題番号：20540266
 研究課題名（和文） 超弦理論の現象論的性質についての研究

研究課題名（英文）
 Study on phenomenological aspects in superstring theory

研究代表者
 小林 達夫 (Kobayashi Tatsuo)
 京都大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：60322153

研究成果の概要（和文）：

超弦理論から導かれる4次元低エネルギー有効理論の研究を行った。超弦理論から標準模型を導出するのに有望と思われるオービフォールド上のヘテロ型弦理論と背景磁場をもつブレーン模型を出発点にその4次元低エネルギー有効理論の解析を行った。特に、その有効理論に現れる離散対称性を調べ、特定の非可換離散フレーバー対称性が現れることを示した。そして離散対称性のアノマリーについても普遍的な関係式があることを示した。さらに、弦理論の振幅の計算を行い、場の理論の対称性の言葉では簡単に理解することができない弦理論特有の結合の選択則があることをしめした。

研究成果の概要（英文）：

We have studied four-dimensional low-energy effective field theory, derived from superstring theory, in particular heterotic string theory on the orbifolds and magnetized/intersecting brane models. We have studied Abelian and non-Abelian discrete symmetries, which appear in these string models. Also we have studied their anomalies and found that the universal relations among certain anomalies. Furthermore, by explicit string computations we have shown stringy coupling selection rules, which seem to be difficult to understand from the symmetries of low-energy effective field theories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：素粒子（理論）

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は、重力を含む統一理論の有力な

候補である。超弦理論が素粒子物理学として本当に意味がある理論であるならば、4次元

低エネルギー有効理論として、標準模型を再現するはずである。超弦理論は、我々の4次元時空以外に6次元コンパクト空間の存在を予言するが、様々な6次元コンパクト空間が可能であり、純粋に理論的観点からどのようなコンパクト空間を選ぶべきかという指導原理は分かっていない。

一方で、6次元コンパクト空間の幾何学的性質と背景場を決めると、質量ゼロスペクトルは完全に決定される。このように背景幾何と背景場を決定したものを弦理論の1つの真空、あるいは、4次元弦模型と呼ぶ。これまでに様々なコンパクト空間の解析がなされ、現実的な質量ゼロスペクトルを導く多数の真空がみついている。ここで現実的な質量ゼロスペクトルとは、標準模型のゲージ群か大統一理論のように拡張した群をもち、クォーク・レプトンの3世代とヒッグス粒子を含むようなスペクトルである。それらに加えて、一般に多くのシングレットがスペクトルに現れる。さらに、標準模型の群のもとでクォーク・レプトンに対応しないような量子数をもつ場合も含むスペクトルを導く場合もある。とにかく、研究開始当初の段階としては、ある程度現実的な質量ゼロスペクトルを導く弦理論の真空は多数みついているという段階であった。

2. 研究の目的

「超弦理論から我々の世界がどのように導かれるか」ということを探求することが本研究のテーマである。より具体的には「超弦理論から標準模型を導出する」というのが大きな目的である。ここで「標準模型を導く」といった場合に上述のような標準模型の質量ゼロスペクトルを再現するだけでなく、標準模型がパラメータとしてもつゲージ結合や湯川結合の実験値も含めて再現するという意味である。そのような大きな目的のためには、超弦理論から導かれる4次元低エネルギー有効理論を調べるのが重要である。そして、最終的にはゲージ結合やクォーク・レプトンの質量や混合角の値まで含めて現実的な弦理論の真空を探し、陽子崩壊、超対称性の破れ、CPの破れ、暗黒物質などのその真空のその他の現象論的性質を調べていくことが目的である。

3. 研究の方法

上述のように現実的な質量ゼロスペクトルを導く数多くの4次元弦模型が知られている。特に、オービフォルド上のヘテロ型弦理論や交叉するD-brane模型や背景磁場をもつD-brane模型は、現実的な質量ゼロスペクトルを導く有望な4次元弦模型であり、実際

それらの弦模型の枠内でかなり多くの現実的な質量ゼロスペクトルを導く真空がみついている。たとえば、オービフォルド上のヘテロ型弦理論においては、2000年代半ば以降に数多くの現実的な質量ゼロスペクトルを導く真空がみついている。その先駆的な役割をしたのが、我々の論文

(Kobayashi-Raby-Zhang, Phys. Lett. B593 (2004) 262; Nucl. Phys. B704 (2005) 3) である。また、交叉するD-brane模型と背景磁場をもつD-brane模型も有望な模型であるが、それらのD-brane模型は互いに基本的にはT-dualの関係にあり、一方の理論から導かれる4次元低エネルギー有効議論が解析することができれば、他方の有効理論はT-dual変換によって、えることができる。とにかく、このような模型の範囲で、現実的なスペクトルをもつ真空がみついているので、次の段階はそのような弦模型からどのような4次元低エネルギー有効理論が導かれるかを解析することが重要であり、そのような低エネルギー有効理論の導出を弦理論の振幅の計算やdimensional reductionなどの方法で試みる。

オービフォルド上の弦理論や交叉するD-brane理論において、弦の理論が摂動論の範囲内で完全に解くことができるので、上述のような弦理論的計算が原理的に可能である。この点においても、我々が取り扱うオービフォルド上のヘテロ型弦理論や交叉するD-brane模型などの4次元弦模型は利点がある。たとえば、Calabi-Yau多様体は弦理論のコンパクト空間としては古くから知られているが、一般のCalabi-Yau上の弦理論は運動方程式を解くことはかなり難しく、弦理論的解析が困難である。

このように、オービフォルド上のヘテロ型弦理論や交叉するD-brane模型や背景磁場のあるD-brane模型から導出される4次元低エネルギー有効理論の解析を行う。特に、低エネルギー有効理論を特徴付けるものとして、どのような連続的、離散的対称性が現れるかを理解する。さらにそのような対称性のアノマリーの構造を調べる。これらのアノマリーの構造は、弦理論的な非摂動論の効果を把握するのに重要となるからである。

4. 研究成果

上述のような目的で、オービフォルド上のヘテロ型弦理論、背景磁場のあるD-brane模型からどのような4次元低エネルギー有効理論が導かれるかの研究を行った。

まずオービフォルド上のヘテロ型弦理論からの4次元低エネルギー有効理論の導出の研究についてであるが、以前の我々の研究(Kobayashi-Raby-Zhang, Nucl. Phys. B704

(2005) 3; Kobayashi-Nilles-Ploger-Raby-Ratz, Nucl. Phys. B768 (2007) 135.) など、その低エネルギー有効理論には、様々な離散的な対称性が現れることが議論された。今回はそのような様々な離散対称性について、T.Araki-Kobayashi-Kubo-Ramos-Sanchez-Ratz-Vaudrevange, Nucl.Phys. B805 (2008) 124 の論文で、そのアノマリーを解析した。その結果として、アノマリーに特定のパターンがあり、特に「基本となる」離散的対称性のアノマリーに関しては、普遍的な関係式が現れることを示した。このことは、離散的対称性でさえ、そのアノマリーが Green-Schwarz 機構で相殺できることを示す重要な関係式である。また、最近 Kobayashi- Parameswaran-Ramos-Sanchez-Zavala (JHEP に掲載決定) では、具体的な弦理論での振幅計算を高次の結合項にも行い、その弦理論から導出され4次元の有効場の理論の解析を進めた。その解析結果によると4次元の有効場の理論の「対称性の言葉」では、理解することが難しいような弦理論特有の許される結合項への選択則があることを議論した。今後はこのような弦理論特有の結合項への選択則の理解をさらに進めるとともに、得られた離散対称性やそのアノマリーを現実的な湯川結合の導出や右巻きニュートリノの質量項の導出、陽子崩壊の抑制などへ応用していく計画である。

背景磁場をもつブレーン模型も有望な模型の1つである。我々は論文 Abe-Kobayashi-Ohki, JEHP0809 (2008) 043; Abe-Choi-Kobayashi-Ohki, Nucl. Phys. B814 (2009) 265; Kobayashi-Maruyama-Murata-Ohki-Sakai JHEP 1005(2010) 050 で、現実的なスペクトルを得る可能性を様々な背景場の組み合わせを使い系統的に解析した。また、その結合をモジュライの関数として計算し、現実的なクォーク・レプトンの質量や混合角を得る可能性を調べた。さらに、そのようなブレーン模型においても、論文 Kobayashi-Nilles- Ploger- Raby- Ratz, Nucl. Phys. B768 (2007) 135 でオービフォルド上のヘテロ型弦模型で示されたものと同様に、特定の非可換離散群がフレーバー対称性として現れることを論文 Abe-Choi-Kobayashi-Ohki, Nucl.Phys. B820 (2009) 317; Phys. Rev. D80 (2009) 126006, Phys. Rev. D81 (2010) 126003 で示した。今後はこの解析得たフレーバー対称性と具体的にモジュライの関数としての湯川結合の値を使い、現実的なクォーク・レプトンの質量と混合角の値の導出の可能性を系統的に解析していく計画である。また、オービフォルド上のヘテロ型弦理論と同様にその様々な離散的対称性のアノマリーの構造を解析し、非撰

動論的な効果の把握に役立てる計画である。上述のように非可換離散群はフレーバー構造を理解するために重要な道具となりつつある。特に、ニュートリノ振動実験から導かれるレプトンセクターの混合角はクォークセクターのそれとことなり、 $\theta = 13^\circ$ を除いて大きな混合角であることが分かっている。そのような大きな混合を導く模型として、非可換離散対称性を使った場の理論の模型構築が盛んに研究されている。しかしこれまで、非可換離散群は、非可換連続群に比べ、多くの素粒子論研究者には馴染みがなく、また離散群の系列のパラメーターも複雑である。そのような非可換離散群についてまとめた論文が、Ishimori- Kobayashi-Ohki-Okada- Shimizu- Tanimoti, Prog. Thor. Phys. Suppl. 183 (2010) 1 の論文である。この論文では様々な非可換離散群の数学的性質をまとめたのみならず、素粒子論への応用を考慮して、それぞれの非可換離散群のアノマリーの解析の仕方、部分群や表現の分解の仕方をまとめた。フレーバー構造の非可換離散対称性による理解が真実であるならば、上述のような4次元弦模型においては、特定の非可換離散フレーバー対称性が現れることを我々は示したので、弦理論と低エネルギーを結び付ける重要な「鍵」にこの非可換離散フレーバー対称性になるはずであり、今後このテーマについて精力的に研究することは非常に重要である。

さらに、最近F理論の現象論への応用が盛んに研究されている。その模型の構築の仕方は、上述の背景磁場をもつブレーン模型の構築のしかたに類似している。これまでのF理論の枠内で模型の構築方法は、E8 群に対応するブレーンを用意し、それらを交叉や背景磁場を入れる等を施し、SU(5)群等の大統一理論をえて、それをさらに背景磁場等で標準模型を得るシナリオである。我々はこれまでの背景磁場のあるブレーン模型の知識をいかり、論文 K.S.Choi-T.Kobayashi, Phys. Lett. B693 (2010) 330 で、E8 群からSU(5)群を経ずに、直接標準模型を得る可能性を提案し、現実的な模型の構築を行った。その模型の性質は、これまで存在するSU(5)群を一度経由する模型と異なる性質を示す。今後この模型についてもさらなる現象論的性質の解析が重要である。しかしながら、F理論からの4次元低エネルギー有効理論の解析にはいまだ明瞭でない部分が多く、今後F理論から4次元低エネルギー有効理論を導出するテクニックを開発していくことが重要である。

全体としては、弦理論から現実的な模型を導く有力な候補であるオービフォルド上のヘテロ型弦理論や交叉するブレーン模型や背景磁場のあるブレーン模型が導出される

4次元低エネルギー有効理論に現れる離散的な対称性の様子の理解がかなり進展した。さらに、その離散対称性のアノマリーの構造も把握しつつあるが、離散対称性のアノマリーの構造の完全な理解をするためには、その研究の継続が必要である。また、弦理論の具体的な計算により、弦理論特有の許される結合への選択則があることを見出したが、その深い理解は今後の課題である。したがって、このような研究をこれから継続する一方で、得られた結果をクォーク・レプトンの現実的な質量行列の導出や陽子崩壊の抑制などの応用面についても並行して研究する計画である。

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 12件)

- ① T. Higaki and T. Kobayashi
“Note on moduli stabilization, supersymmetry breaking and axiverse”,
Phys. Rev. D84 (2011) 045021.
[DOI:10.1103/PhysRevD.84.045021]
- ② H. Ishimori, T. Kobayashi, H. Ohki,
H. Okada, Y. Shimizu and M. Tanimoto,
“Non-Abelian Discrete Symmetries in
Particle Physics”,
Prog. Theor. Phys. Suppl. 183 (2010)
1-163.
[DOI:10.1143/PTPS.183.1]
- ③ K. S. Choi and T. Kobayashi,
“Towards the MSSM from F-theory”,
Phys. Lett. B693 (2010) 330-333
[DOI:10.1016/j.physletb.2010.08.042]
- ④ T. Kobayashi, R. Maruyama, M. Murata,
H. Ohki and M. Sakai,
“Three-generation Models from E8
Magnetized Extra Dimensional Theory”,
JHEP 1005 (2010) 050.
[DOI:10.1007/JHEP05(2010)050]
- ⑤ H. Abe, K. S. Choi, T. Kobayashi and
H. Ohki,
“Flavor Structure from Magnetic Fluxes
and Non-Abelian Wilson lines”, Phys.
Rev. D81 (2010) 126003.
[DOI:10.1103/PhysRevD.81.12003]
- ⑥ H. Abe, K. S. Choi, T. Kobayashi and
H. Ohki,

“Magnetic flux, Wilson line and
orbifold”, Phys. Rev. D80 (2009) 126006.
[DOI:10.1103/PhysRevD.80.126006]

⑦ H. Abe, K. S. Choi, T. Kobayashi and
H. Ohki,
“Non-Abelian Discrete Flavor Symmetries
from Magnetized/Intersecting
Brane Models”, Nucl. Phys. B820 (2009)
317-333.
[DOI:10.1016/j.nuclphysb.2009.05.024]

⑧ H. Ishimori, T. Kobayashi, H. Okada,
Y. Shimizu and M. Tanimoto,
“Lepton Flavor Model from $\Delta(54)$
Symmetry”,
JHEP 0904 (2009) 011.
[DOI:10.1088/1126-6708/2009/04/011]

⑨ T. Kobayashi, Y. Omura and K. Yoshioka,
“Flavor Symmetry Breaking and Vacuum
Alignment on Orbifolds”,
Phys. Rev. D78 (2008) 115006.
[DOI:10.1103/PhysRevD.78.115006]

⑩ H. Abe, K. S. Choi, T. Kobayashi, H. Ohki,
“Three Generation Magnetized Orbifold
Models”,
Nucl. Phys. B814 (2009) 080
[DOI:10.1016/j.nuclphysb.2009.02.002]

⑪ H. Abe, T. Kobayashi, H. Ohki,
“Magnetized Orbifold Models”,
JHEP 0809 (2008) 043
[DOI:10.1088/1126-6708/2008/09/043]

⑫ T. Araki, T. Kobayashi, J. Kubo,
S. Ramos-Sanchez,
M. Ratz and P. K. S. Vaudrevange,
“(Non-)Abelian discrete anomalies”,
Nucl. Phys. B805 (2008) 124.
[DOI:10.1016/j.nuclphysb.2008.07.005]

[学会発表] (計 1件)

小林達夫
“String (moduli) phenomenology”
日本物理学会、宇宙線・宇宙物理領域、
素粒子論領域合同シンポジウム
「主題: Prospects of string cosmology」,
2009年3月28日

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 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◇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

小林 達夫 (Kobayashi Tatsuo)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：60322153

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：