

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400252

研究課題名(和文) 現実的な超弦理論の低エネルギー有効理論とその対称性について

研究課題名(英文) Low-energy effective field theory in realistic superstring theory

研究代表者

小林 達夫 (Kobayashi, Tatsuo)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60322153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)： II型超弦理論やヘテロ型弦理論から標準模型を再現するコンパクト化の研究を行い、スペクトルにおいて現実的なモデルを多く構築した。それらのモデルにおいてゲージ結合は実験値を再現するか、質量行列は現実的かなど定量的な解析も行い、標準模型を再現する研究を推進した。それらの定量的な解析においては、摂動論的に計算できる範囲と非摂動論的計算を具体的にに行った解析も含む。

そのような素粒子現象論的性質の解明に加えて、インフレーションやダークマターやその他の超弦理論から導かれる宇宙論的性質の解明についても研究を行い、あらたにインフレーションモデルの提案や新たな熱史の可能性を指摘した。

研究成果の概要(英文)： Within type II and heterotic superstring theory, we have derived the gauge group of the standard model and its three chiral generations of quarks and leptons. We have also studied realization of experimental values of gauge couplings and quark/lepton masses and their mixing angles through perturbative calculations. Furthermore, we have studied concretely non-perturbative effects. We have also studied cosmological aspects such as inflation, dark matter, etc. We have proposed new types of inflation models and new scenarios of thermal history.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論

### 1. 研究開始当初の背景

超弦理論は、重力を含めたすべての相互作用とヒッグス場やクォーク・レプトンなどの物質場を統一的に記述する理論と考えられている。超弦理論が本当に我々の世界を記述するものとして、意味があるためには、超弦理論の4次元低エネルギー有効場の理論として、標準模型が導出されるであろうし、標準模型では謎とされているようなその他の素粒子論の問題や宇宙論的問題にも解答を与えてくれるはずである。

そのような目的で、超弦理論から現実的な素粒子の世界を導出する研究はこれまで盛んに研究されてきた。しかし、その多くが標準模型のゲージ群の再現や世代数などの再現などそのスペクトルの再現、定性的な再現であった。このように標準模型のスペクトルを再現することに関しては、かなり多くの弦模型が現在構築されている段階であり、さらに我々の素粒子の世界を再現するため、定量的な再現も必要である。

### 2. 研究の目的

この研究では、上述のような標準模型のスペクトルの再現に加えて、ゲージ結合の実験値やクォーク・レプトンの質量や混合角の定量的な再現とその他低エネルギー有効場の理論の様々な素粒子現象論的性質や宇宙論的性質の解明を行うのが目的である。したがって、現実的なスペクトルを再現できるコンパクト化の中から、結合定数の大きさなどが定量的に計算可能なコンパクト化に着目し、より具体的に低エネルギー有効理論を解析していき、様々な性質を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

II型超弦理論やヘテロ型弦理論において、上述のような定量的な解析が可能なコンパクト化において、ゲージ結合や3世代のクォーク・レプトンの再現はもとより、その低エネルギー有効場の理論の解析を遂行し、その数値等を当てはめていき、定量的な現実性を探求する。その一方、そのような値が決定されるダイナミクスを追及することで、その他の物理への影響、素粒子現象論的予言につながる影響や宇宙論的性質の影響など、様々な性質を明らかにしていく。

### 4. 研究成果

II型超弦理論やヘテロ型弦理論において、標準模型のスペクトルを再現する模型の構築をおこなった。このことにより、これまで存在した模型に加えて、また新たな現実的な模型の候補を追加したことになる。

次に、我々が提案したタイプの模型に関して、ゲージ結合や湯川結合の解析を行い、

モジュライをパラメータとして扱うことで、ゲージ結合の実験値が再現でき、クォーク・レプトンの質量と混合角を再現できるような模型が存在することを示した。

さらに、ニュートリノにおいて、その質量項は、非摂動論的效果により、導出されるのではないかという示唆がこれまであったが、我々は超弦理論のインスパイア効果を用いた具体的なコンパクト空間上の弦理論において解析を行い、具体的にニュートリノ質量行列を導出してみせた以上に、その質量行列に現れる対称性や結果としてえられる質量行列のパターンを明らかにした。そして、現実のニュートリノ振動で示唆されるレプトン混合角の値との対応を検証し、我々が具体的に非摂動論的效果で明らかにした質量行列の形が実験的にも非常に現実的なパターンであることを示した。

一方で、低エネルギー有効場の理論の宇宙論的側面についても研究を行い、新しいタイプのインフレーション模型の提案や様々な宇宙論的性質についても研究を行った。インフレーション模型に関しては、超弦理論の枠内では、モジュライの虚数部分であるアクシオンは、対称性のために、フラットポテンシャルである。一般のその対称性は破れ、何らかのポテンシャルのアクシオンはもつと考えられる。このように、インフレーションを引き起こす場の有力な候補である。我々は、II型超弦理論やヘテロ型弦理論におけるアクシオンのポテンシャルを解析し、その様々なアクシオンのもつ対称性のいろいろな対称性の破れのパターンを解析することで、新たなパターンのアクシオンのポテンシャルを得た。そのポテンシャルにおいて、インフレーションの実現の可能性を調べ、これまでないタイプのインフレーション模型を提案することができた。その模型の中には、プランクスケールを超えるくらい場の値が変更するインフレーション模型とプランクスケールに比べて、はるかに小さな値だけ場の値が変化する模型が存在し、その観測値への予言が大きく異なる。さらには我々の場合は、超弦理論から導かれる低エネルギー有効場の理論をあからさまに書き出しているので、インフレーションを引き起こすアクシオンと他の粒子との結合が具体的にわかっている。そのためにインフレーション後に起こる様々なプロセスを具体的に追っていくことが可能である。今後は、そのような他の様々な要素との関連を調べながら、我々の提案した新たなインフレーション模型の予言や様々な宇宙論への影響について解析を進める予定である。

### 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 33 件)

T.Kobayashi, Y.Tatsuta and S.Uemura,  
``Majorana neutrino mass structure  
induced by rigid instantons on toroidal  
orbifold,``

Phys. Rev. D 93, no. 6, 065029 (2016)  
doi:10.1103/PhysRevD.93.065029

[査読あり]

T.Kobayashi, A.Oikawa and H.Otsuka,  
``New potentials for string axion  
inflation,``

Phys. Rev.D f 93, no. 8, 083508 (2016)  
doi:10.1103/PhysRevD.93.08350

[査読あり]

K. Hagimoto, T.Kobayashi, H.Makino,  
K.i.Okumura and T.Shimomura,  
``Phenomenology of NMSSM in TeV scale  
mirage mediation,``

JHEP 1602, 089 (2016)  
doi:10.1007/JHEP02(2016)089

[査読あり]

H.Abe, T.Kobayashi, H.Otsuka and  
Y.Takano,  
``Realistic three-generation models  
from  $SO(32)$  heterotic string theory,``

JHEP 150, 056 (2015)  
doi:10.1007/JHEP09(2015)056

[査読あり]

H.Abe, T.Kobayashi, Y.Tatsuta and  
S.Uemura,  
``D-brane instanton induced mu terms and  
their hierarchical structure,``

Phys. Rev. D 92, no. 2, 026001 (2015)  
doi:10.1103/PhysRevD.92.026001

[査読あり]

H.Abe, T.Kobayashi and H.Otsuka,  
``Natural inflation with and without  
modulations in type IIB string theory,``  
JHEP 1504, 160 (2015)

doi:10.1007/JHEP04(2015)160

[査読あり]

H.Abe, T.Kobayashi and H.Otsuka,  
``Towards natural inflation from weakly  
coupled heterotic string theory,``

PTEP 2015, no. 6, 063E02  
doi:10.1093/ptep/ptv075

[査読あり]

Y.Hamada, T.Kobayashi and S.Uemura,  
``Standard Model-like D-brane models  
and gauge couplings,``

Nucl. Phys. B 897, 563 (2015)  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2015.06.005

[査読あり]

F.Beye, T.Kobayashi and S.Kuwakino,  
``Gauge Origin of Discrete Flavor  
Symmetries in Heterotic Orbifolds,``

Phys. Lett. B f 736, 433 (2014)  
doi:10.1016/j.physletb.2014.07.058

[査読あり]

Y.Hamada, T.Kobayashi and S.Uemura,  
``Flavor structure in D-brane models:  
Majorana neutrino masses",

JHEP 1405 (2014) 116.  
doi:10.1007/JHEP05(2014)116

[査読あり]

F.Beye, T.Kobayashi and S.Kuwakino,  
``Three-generation Asymmetric Orbifold  
Models from Heterotic String Theory,``

JHEP 1401, 013 (2014)  
doi:10.1007/JHEP01(2014)013

[査読あり]

〔学会発表〕(計 11 件)

T.Kobayashi

Novel potentials for string axion inflation',  
the 11th international workshop "Dark Side of the Universe 2015",  
京大基礎物理学研究所、京都府、京都市  
2015年12月14日 18日

T.Kobayashi

Novel potentials for string axion inflation',  
the IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology,  
プサン、韓国、  
2015年12月2日 5日

T.Kobayashi

String phenomenology and cosmology',  
第5回日大理工・益川塾連携シンポジウム  
日大、東京都千代田区、  
2015年10月24日 25日

T.Kobayashi

TeV scale mirage mediation in NMSSM',  
the 2nd Toyama International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics 2015" (HPNP2015), 富山大、富山県富山市  
2015年2月11日 15日

T.Kobayashi

Heterotic asymmetric orbifolds', Bethe Forum "Non-geometry, asymmetric orbifolds and model building",  
ボン、ドイツ、2014年6月10日 13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 )  
北海道大学・大学院理学研究院・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：