

Graduate School of Advanced Science and Engineering  
Waseda University

# 博士論文概要

## Doctoral Thesis Synopsis

論文題目  
Thesis Theme

Effective theories of type IIB string  
compactified on Calabi-Yau manifolds and  
their applications

カラビ・ヤウ多様体上にコンパクト化された  
IIB 型超弦理論の有効理論とその応用

申請者  
(Applicant Name)

Akane	OIKAWA
及川	茜

Department of Pure and Applied Physics, Research on Theoretical Particle Physics

November, 2016

超弦理論は、ゲージ相互作用と重力相互作用を統一的に記述する理論の有力候補であり、超対称性をもつ 10 次元時空の理論である。超対称性とは、ボソンとフェルミオンがペアで存在することを要請し、それらを入れ替える対称性である。また、10 次元時空は、時間 1 次元と私達が感じる 3 次元空間、及びコンパクト化された 6 次元の余剰次元空間から構成される。

超弦理論は非常に高いエネルギー領域の物理現象を記述すると考えられており、現在の技術では実験・観測を用いた直接検証は困難であるため、超弦理論の低エネルギー有効理論に着目した上で様々な観測との整合性を見ることは重要である。特に現象論的アプローチにおいては、様々な実験結果と矛盾のない素粒子標準理論を低エネルギー有効理論として含むような超弦模型を構成し、その模型に基づき素粒子標準理論からは得られない示唆を与えることが重要である。

4 次元有効理論で現象論的に望ましいカイラルな超対称性が残るためには、カラビ・ヤウ多様体と呼ばれる空間に超弦理論の余剰次元空間がコンパクト化される必要があることが知られている。本論文では、IIB 型超弦理論において、カラビ・ヤウ多様体の幾何学的構造が 4 次元有効理論にどのような影響を与えるかを、現象論的側面と宇宙論的側面から考察する。

はじめに、現象論的側面について述べる。素粒子標準理論では素粒子の質量や混合角はパラメタであるが、超弦模型においては力学的にその値が決定される。したがって、これらのパラメタに対し、超弦模型から得られる理論値と実験・観測データを比較することによって、現実的な超弦模型を見つけるための手がかりが得られると期待される。特に 4 次元有効理論でクォークやレプトンの質量を決める湯川結合定数は、余剰次元空間に広がる物質場の波動関数の重なり積分によって導出されるため、余剰次元空間の幾何学的構造の影響を受ける。このため、様々な余剰次元空間で超弦模型を調べることにより、余剰次元空間の幾何探索への指導原理を得ることができると期待される。

また、クォークやレプトンには同じ電荷をもち質量のみが大きく異なる 3 つの世代があることが確認されているが、その起源も余剰次元の幾何と密接に関わっている。例えば曲率をもたないトーラスを余剰次元空間としたとき、磁場をもつ D ブレーン上のゼロモード波動関数の独立解の数は世代数と解釈でき、波動関数の局在により世代間の質量階層性も概ね説明可能である。

しかし、曲率をもつような他の余剰次元空間の模型で同様の考察を試みたとしても、曲率をもつカラビ・ヤウ多様体は現在一つも計量が知られている例がないため、大局的な模型において D ブレーン上の波動関数を導出することは困難である。従って、カラビ・ヤウ多様体に局所的に既知の計量が含まれている状況を想定し、その領域内での D ブレーン上の波動関数を扱う局所模型を考えることとする。本論文では、特に余剰次元空間に局所的にユニフォームを含む模型について解析を行う。

次に、宇宙論的側面について述べる。超弦理論のコンパクト化において、モジュライ場と呼ばれるスカラー場が現れる。特に計量のゆらぎなどに起因して現れる閉弦のモジュライ場には、期待値が空間の大きさを決めるケーラーモジュライ場、空間の形を決める複素構造モジュライ場、弦の結合定数を決めるディラトン場がある。モジュライ場の期待値を力学的に決定する機構はモジュライ固定と呼ばれ、IIB型超弦理論のテンソル場のフラックスによって生成されるポテンシャルにより、複素構造モジュライ場とディラトン場は摂動的に固定されることが知られている。一方、ケーラーモジュライ場は非摂動項やループ効果によってしか固定できず、複素構造モジュライ場やディラトン場よりも軽い質量をもつ傾向がある。本論文では、これらのモジュライ場をインフラトン場とみなすことで、初期宇宙の加速膨張を引き起こすインフレーションのモデルを議論する。

インフラトン以外の場をインフレーションスケールよりも十分高いスケールで固定することによって、インフレーション中にそれらのポテンシャルが不安定になる状況を回避することができる。それゆえ、複素構造モジュライ場よりもケーラーモジュライ場をインフラトン場とみなすモデルが多く考えられてきた。本論文では複素構造モジュライ場がケーラーモジュライ場よりも軽くなると共に、インフラトン場とみなすことができるインフレーションモデルを提案する。

本論文の構成は以下の通りである。最初に前提となる複素幾何学の導入と IIB型超弦理論の一般論を第一章と第二章においてそれぞれ述べた後、カラビ・ヤウ多様体上にコンパクト化された IIB型超弦理論の有効理論において、第一部では現象論的側面、第二部では宇宙論的側面についての考察を行う。

第一部では、複素トーラスもしくは  $AdS_5 \times T^{1,1}$  時空にコンパクト化された IIB型超弦理論の特定の局所モデルを具体例として扱う。特に  $AdS_5 \times T^{1,1}$  時空は IIB型超弦理論における超対称解であるクレバノフ・ウィッテンモデルにおいて知られ、4次元ミンコフスキー時空と6次元コニフォールドのワープした計量を用いて表される。現象論を考察するためには物質場が存在できるようなDブレーンを配置する必要があるが、余剰次元空間であるコニフォールドの一部にDブレーンを安定に配置するためには、 $\kappa$ 対称性と呼ばれる局所的なフェルミオンの対称性を保たなければならない。 $AdS_5 \times T^{1,1}$  時空において  $\kappa$ 対称性を満たすDブレーンの配置は既に知られており、そのうち一つの配置に注目してその上での物質場の波動関数を求める。既に述べた通り、4次元の湯川結合定数は余剰次元空間に広がる波動関数の重なり積分によって導出できるため、得られた波動関数の現象論的性質について考察を行う。

第一章では複素トーラスや  $AdS_5 \times T^{1,1}$  時空を含む複素幾何学の基礎的な導入を行う。第二章ではクレバノフ・ウィッテンモデルと  $\kappa$ 対称性について概説し、第一部で注目する余剰次元空間の幾何やDブレーンの配置についての一般論を述べる。第三章では、他の余剰次元空間、例えばトーラスや複素射影空間のモデルにおいて、

余剰次元空間に広がり磁場をもつ D ブレーン上での物質場の波動関数の導出やその性質について先行研究の解説を行う。第四章では、 $AdS_5 \times T^{1,1}$  空間に巻き付いた D ブレーン上の物質場の波動関数の導出を行う。得られた波動関数は、 $AdS_5$  空間方向に着目すると、今まで 5 次元理論で議論されていた既知の波動関数と似た振る舞いを示すことがわかった。この結果をもとに、現象論的な性質に関する考察を行う。

次に、後半の第二部では、複素構造モジュライを用いた新しいインフレーション機構の提案を行う。カラビ・ヤウ多様体上にコンパクト化された IIB 型超弦理論から得られる 4 次元超重力理論を議論する。複素構造モジュライ場がフラックスによって摂動的に固定されない場合は、インスタントン補正などの非摂動効果を用いて固定されることになり、ケーラーモジュライ場よりも軽くなることが可能となる。本論文では、複素構造モジュライ場由来の対称性を持つ場をアクシオンと呼び、これをインフラトンとみなす。従来の閉弦アクシオンインフレーションにおいては、ナチュラルインフレーション型とモノドロミーインフレーション型のポテンシャルに大別されていたが、複素構造モジュライ場に対する非摂動効果であるインスタントン補正項を考慮することで、新しい形状のポテンシャルを導出することが可能であることを示す。その際、ケーラーモジュライ場を固定する機構である KKLТ シナリオや LVS 等の違いにより、異なるインフラトンポテンシャルを導くことができる。プランク衛星の実験結果から、インフレーション機構は厳しく制限されているため、得られたポテンシャルとの整合性について議論する。カラビ・ヤウ多様体の幾何学的構造がポテンシャルの具体形を決定するため、余剰次元空間の幾何構造に対して宇宙論的側面から制限を与えることに繋がる。

第五章では、ナチュラルインフレーションやモノドロミーインフレーションなど、これまでのインフレーション機構や関係する実験結果を解説する。第六章では、複素構造モジュライ場にインスタントン効果を導入する具体的なモデルにおいて、新しいアクシオンインフレーションのポテンシャルを導出する。最後に第七章で全体の総括を行う。

本論文では、カラビ・ヤウ多様体にコンパクト化された IIB 型超弦理論の 4 次元有効理論において、余剰次元空間の構造が現象論的側面と宇宙論的側面双方についてどのような役割を担うのかを考察した。その結果、カラビ・ヤウ多様体の具体的な構造から素粒子質量階層性や宇宙論的観測を説明するためのモデル構築とそれらの検証に向けた幾つかの重要な指針を得た。特に、これまでのところ、実験による観測値の観点からカラビ・ヤウ多様体の構造への制限はほとんど知られていなかったが、本論文で提案したモデルは宇宙論的側面からそのパラメータを制限することが可能である。

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 及川 茜 印

(2017年 2月 8日現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	Constraints on small-field axion inflation, Physical Review D(採録決定), 2016年9月, Tatsuo Kobayashi, <u>Akane Oikawa</u> , Naoya Omoto, Hajime Otsuka and Ikumi Saga.
論文	Axion decay constants at special points in type II String theory, Journal of High Energy physics 01(2017)064, 2016年8月, Masaki Honda, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
論文	Small field axion inflation with sub-Planckian decay constant, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 10(2016)013, 2016年10月, Kenji Kadota, Tatsuo Kobayashi, <u>Akane Oikawa</u> , Naoya Omoto, Hajime Otsuka and Takuya H. Tatsuishi.
論文	Moduli mediation without moduli-induced gravitino problem, Journal of High Energy Physics 05(2016)178, 2016年5月, Kensuke Akita, Tatsuo Kobayashi, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
○論文	New potentials for string axion inflation, Physical Review D 93, 083508, 2016年4月, Tatsuo Kobayashi, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
○論文	Wavefunctions on magnetized branes in the conifold, Journal of High Energy Physics 07(2016)054, 2016年7月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
論文	Phenomenological aspects of 10D SYM theory with magnetized extra dimensions, Nuclear Physics B870(2013)30-54, 2013年1月, Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hiroshi Ohki, <u>Akane Oikawa</u> and Keigo Sumita.
講演 (国際会議・口頭)	New potentials for string axion inflation in Calabi-Yau compactification, HU-IBS Sapporo Summer Institute on Particle Physics and Cosmology, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2016年8月, Tatsuo Kobayashi, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (国際会議・口頭)	New potentials for string axion inflation, Strings and Fields 2016, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2016年8月, Tatsuo Kobayashi, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (国際会議・口頭)	Supersymmetric branes on the conifold with magnetic fluxes, PASCOS2013, Taipei, Taiwan, 2013年11月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (国際会議・口頭)	Phenomenological aspects of 10D SYM theory with magnetized extra dimensions, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2013), 2013年3月, Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hiroshi Ohki, <u>Akane Oikawa</u> and Keigo Sumita.

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (学会・口頭)	Non-Abelian fluxes on magnetized brane model, 日本物理学会第 70 回年次大会, 21pDG-11, 早稲田大学, 2015 年 3 月, <u>Akane Oikawa</u> .
講演 (研究会・口頭)	Wavefunctions on magnetized branes in the conifold, Workshop on geometry, extra dimensions and string phenomenology in Miyazaki, ANA ホリデイ・イン リゾート宮崎, 2014 年 11 月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (学会・口頭)	Supersymmetric branes on Sasaki-Einstein manifolds with magnetic fluxes, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 23aSK-8, 高知大学, 2013 年 9 月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (学会・口頭)	Fermionic zero modes on Sasaki-Einstein manifolds, 日本物理学会第 68 回年次大会, 27aRA-3, 広島大学, 2013 年 3 月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (研究会・ポスター)	磁場をもつ佐々木・アインシュタイン多様体上のゼロモード波動関数の導出, KEK 理論研究会 2013, 高エネルギー加速器研究機構, 2013 年 3 月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> and Hajime Otsuka.
講演 (学会・口頭)	磁場とウィルソンラインを用いた高次元模型におけるクォーク・レプトン質量行列の解析, 日本物理学会第 67 回年次大会, 24pGA-12, 関西学院大学, 2012 年 3 月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> , Hiroshi Ohki, Tatsuo Kobayashi, Keigo Sumita and Yuki Nomoto.
講演 (研究会・ポスター)	磁場とウィルソンラインを用いた高次元模型におけるクォーク・レプトン質量行列の解析, 原子核三者若手夏の学校素粒子論パート, 白浜荘, 2011 年 8 月, Hiroyuki Abe, <u>Akane Oikawa</u> , Hiroshi Ohki, Tatsuo Kobayashi, Keigo Sumita.