

博士論文審査報告書

論文題目

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

Akane	OIKAWA
及川	茜

物理学及応用物理学専攻 素粒子理論研究

2017 年 2 月

物質の最も基本的な構成単位として、クォークやレプトンといったスピン $1/2$ のフェルミオンの存在が確認されている。核子を構成するアップやダウンなどの粒子はクォークと呼ばれ、電子とニュートリノはレプトンに分類される。クォークやレプトンの間に働く相互作用のうち、電磁相互作用はニュートリノ以外のクォークとレプトン、弱い相互作用は左巻きのクォークとレプトン、強い相互作用はクォークのみに作用する。これら3種類の基本相互作用は、素粒子標準模型と呼ばれるゲージ場の量子論により、それぞれスピン1のボソンにより伝達されるゲージ相互作用として記述される。クォークとレプトンはそれぞれ3世代に分かれており、世代間の質量比は湯川相互作用のパラメータで決定されるが、これらは階層的な値をもつことが実験で確認されている。なぜ自然界にはこのように多種多様な基本粒子と基本相互作用が存在し、後者の大きさを決めるパラメータは階層的な値を取っているのか、といった疑問に標準模型は答えることができない。

一方、ビッグバン標準宇宙論の枠組みでは、重力の基礎理論である一般相対性理論と上述の素粒子標準模型を組み合わせることで宇宙進化の解析がなされ、観測データとの比較検証が行われている。宇宙背景放射の精密測定により、初期宇宙の物理法則を間接的に確かめることが可能となっており、これらの最新データから、ビッグバン以前にインフレーションと呼ばれる空間の急激な加速膨張が起きたとする説が有力となっている。初期宇宙のような超高温・高密度状態では、素粒子に対しても重力相互作用が支配的となることが考えられるが、通常の方法で重力を量子化すると、物理量の発散をくり込みの処方で取り除くことができず、理論が予言能力を失う。

重力相互作用を量子論的に記述可能な理論として、超弦理論と呼ばれる「ひも」の量子論が知られている。ボソンとフェルミオンの入れ替えの下での対称性は超対称性と呼ばれており、これにより超弦理論の基底状態の安定性が保証され、フェルミオンの存在も必然性をもつ。この理論は、ゲージ相互作用と重力相互作用を統一的に扱うことができるだけでなく、単一の開弦の振動モードにより標準模型の複雑な粒子組成を説明できる可能性をもつ。しかしながら、理論的な整合性から10次元時空で定義されるため、我々が直接感じる3次元空間の他に余剰6次元空間の存在を予言し、後者は検出不可能なほど小さくコンパクト化されていると考えられている。

この余剰空間自体の幾何構造と、そこでの超弦の基底状態の配位が、低エネルギーに残る粒子の組成と相互作用の仕方や強さを決定する。特に、モジュライと呼ばれる余剰次元由来の力学的自由度が普遍的に現れることが知られており、これらは宇宙の構造や進化に多大な影響を及ぼすと考えられている。したがって、超弦理論で現実世界を説明しようとする試みにおいては、余剰空間の構造を分析することが重要となる。特に、そこでのゼロモードが標準模型のように左右非対称となり、かつ超対称性を（一部）保つようなコンパクト空間の幾何構造は、Calabi-Yau (CY) 多様体で表すことができ、そ

の幾何学的性質が有効理論の粒子組成と相互作用に反映される。

以上のような背景の下、本論文では CY 多様体上にコンパクト化された IIB 型超弦理論に注目し、その典型的な配位に対して低エネルギー有効理論を具体的に解析することで、余剰空間の幾何構造が素粒子現象論と宇宙論に及ぼす影響を調べている。

本論文は 7 つの章から構成されており、その主要部分は、現象論的な立場の第 I 部（第 3 章及び第 4 章）と、宇宙論的な立場の第 II 部（第 5 章及び第 6 章）に分けられる。以下に各章の概要と評価を述べる。

第 1 章では、CY 多様体の基礎となる複素多様体論と、後に必要となるトーリック幾何及びコニフォールドに関する基礎的事項の解説がなされている。

第 2 章では、II 型超弦理論の 10 次元有効超重力作用と、同一点に D3 ブレーンが多数存在する場合の（非コンパクト CY 多様体を含む）重力解として知られる $AdS_5 \times T^{1,1}$ について解説がなされている。さらに、この多様体上に安定に配置された Dp ブレーンのもつ κ 対称性についても述べられている。 Dp ブレーンは開弦の端点が拘束される 10 次元時空中の $(p+1)$ 次元超曲面であり、その上に誘起される有効場の理論としてゲージ理論が現れる。

第 3 章では、コンパクトな余剰空間としてトーラスや単純な射影空間を考え、そこに背景磁場が存在する場合の荷電ゼロモードの性質について先行研究の解説がなされている。余剰空間の背景磁場は幾何構造と共に次章の現象論模型において重要な役割を担っており、本章で解説された波動関数の構造解析手法が次章でも応用される。

第 4 章では、第 2 章で解説した重力解に含まれるコニフォールド領域が、別のコンパクトな CY 多様体の局所領域として現れることを仮定し、この領域に標準模型が誘起される D7 ブレーンが存在する状況を想定した現象論解析を行っている。まず、第 2 章で述べた κ 対称性を用いて D7 ブレーン上の誘導計量を同定し、同ブレーンに背景磁場が存在する場合の物質場のゼロモード波動関数の解析解を導くことに成功している。この解には余剰空間の幾何構造が大いに反映されている。これを用いて、コニフォールド領域の AdS_5 方向に注目した 5 次元有効理論を導出し、 AdS_5 上の波動関数の局在化の強さと D7 ブレーンのもつ磁束の間を関係を明らかにしている。これにより、背景時空の幾何構造が（磁束に応じた）階層的な質量スケールを生む要因となり得ることを指摘している点は大変興味深い。さらに、3 つの波動関数の重なり積分として与えられる 4 次元有効理論の湯川結合定数を計算し、標準模型の一部の粒子の質量比が再現できる可能性も指摘している。

第 5 章では、モジュライ場を用いた典型的なインフレーション模型について解説を行っている。CY 多様体上にコンパクト化された超弦理論において、閉弦由来のモジュライ場としては、期待値が弦の結合定数を決めるディラトン場に加え、それぞれ余剰空間のサイズと形状を決めるケーラーモジュライ場と複素構造モジュライ場が存在する。Dp ブレーンが存在する系ではさら

に開弦由来のモジュライ場も現れる。本章ではこれらのモジュライ場が宇宙初期の加速膨張を引き起こすインフラトン場としての役割を担うインフレーション模型についてレビューを行っている。

第6章では、複素構造モジュライ場をインフラトン場とみなすことで、新しいインフレーションの模型を提案している。ケーラーや複素構造などの幾何学的なモジュライ場のポテンシャルエネルギーはCY多様体の幾何構造で決まっており、テンソル場のフラックスによる影響も合わせてこれを幾何学的に計算する手法が知られている。その結果、余剰空間の複素構造はフラックスにより特定の形状に固定できるがサイズは固定されないため、通常はケーラーモジュライがインフラトンの候補と考えられてきた。本章では、複素構造の一部が固定されないようなフラックスを敢えて考えることで、複素構造モジュライがインフラトンの役割を担う可能性を追究している。この場合、インフラトンのポテンシャルエネルギーはCYの幾何構造を直接反映した新奇的な構造をもち、前章で解説した通常の模型とは異なるインフレーションのダイナミクスが実現可能であることを示している。そこではケーラーモジュライ側の固定に既存の2つのシナリオを想定しており、それぞれに対して模型のパラメータを変化させた際の観測量の応答を数値的に解析し、最新の観測データと整合するパラメータ領域が存在することを示している。また、インフレーション後の再加熱温度は通常の模型よりも低くなり、これは暗黒物質の残存量に影響を与え得ることも指摘している。

第7章では、本論文の総括と展望が述べられている。

以上を要約すると、本論文では超弦理論の余剰空間がCY多様体を成している場合に、その幾何構造が素粒子現象論と宇宙論に及ぼす影響を特定の配位に対してそれぞれ定量的に解析し、幾何構造と観測量の相関を見出した。これは実験・観測による超弦理論の検証に役立つばかりでなく、同理論に基づく現実的な素粒子模型の構築に指針を与える優れた成果であると考えられる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

2017年2月

審査委員

(主査) 早稲田大学教授 博士(理学) 広島大学 安倍博之

早稲田大学教授 理学博士(早稲田大学) 中里弘道

早稲田大学教授 理学博士(京都大学) 前田恵一

慶應義塾大学専任講師 博士(理学) 京都大学 檜垣徹太郎