

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

Type IIB Effective Theories from the
Viewpoint of the Matrix Model

申請者

Masaki	HONDA
本多	正樹

物理学及応用物理学専攻 素粒子理論研究

2021年2月

素粒子標準模型は非可換ゲージ理論に基づく量子場の理論であり、その相互作用の一部は左右非対称なカイラル構造をもつ。標準模型はこれまでの高エネルギー実験の結果を再現する優れたモデルである一方、理論的には不満足な点も少なからず存在する。その代表的なものとして、自由パラメータを多数含むことが挙げられる。標準模型の物質粒子は、核子の構成要素を含むクォークと、電子やニュートリノを含むレプトンに分類されるが、これらのそれぞれに質量の異なる3つの「世代」の存在が実験的に確認されている。クォークとレプトンの3世代の質量はすべて自由パラメータで表されており、標準模型は素粒子の質量の値を予言できない。また、ヒッグス粒子とクォークもしくはレプトン2体の間に働く3体相互作用である湯川相互作用に起因した世代混合が生じ、世代間の遷移が起こることが確認されているが、その混合の度合いも自由パラメータとなっている。そして、これらのパラメータの値に不自然な階層構造を仮定しなければ素粒子の質量や混合の観測データを再現できないことが分かっている。従って、多くの研究者は標準模型の背後にこれらのパラメータの値を説明するより基本的な理論が隠されていると考え、その探究を行っている。

一方、初期宇宙のような超高エネルギー状態を扱う際には、素粒子標準模型と一般相対性理論を併用した解析を行う必要性が生じるが、後者で重力場は古典的に扱われており、両者には隔たりが存在する。前者と同様に重力場を量子化すると、相関関数に現れる様々な発散量をパラメータに吸収できず、理論が破綻することが知られている。これに対し、重力の量子化を無矛盾に扱える数少ない理論的枠組みの1つとして、超弦理論と呼ばれる紐の量子論が構築されているが、これは同時に非可換ゲージ理論を内包しており、一般相対性理論と素粒子標準模型を統一する理論の候補として注目されている。量子化した際に矛盾の生じない超弦理論にはI型、IIA型、IIB型と2種類の混成型の合計5種類が存在するが、いずれの場合も、その低エネルギー有効理論として10次元時空の局所超対称理論（超重力理論）が現れる。これは一般相対性理論のもつ時空の対称性を最大限に拡張した局所超対称性をもつ場の理論となっており、開弦の端点に由来するDブレーンの自由度を考慮することで、上述のように非可換ゲージ理論も内包することが示されている。

統一理論を探究する研究者の多くは、この10次元時空に由来する余剰次元空間にコンパクトな多様体を仮定することで、これが見えなくなる極限において4次元時空の一般相対性理論と素粒子標準模型が有効的に再現される可能性を追究している。この場合、標準模型の湯川相互作用の構造やその結合定数の値は、多様体上での物質場の波動関数の重なり積分により決定される。波動関数は多様体の幾何学的構造や様々な背景場の影響を受けるため、通常はトーラスや球面などの単純な構造の多様体で具体的な解析がなされている。現象論的に有望な例としては、IIB型超弦理論の有効理論を、背景磁場をもつトーラスにコンパクト化することで、標準模型を再現する上で重要

となるカイラルな世代構造が実現可能となり、そこでは波動関数の具体的な解析と湯川相互作用の構造解析がなされている。

このように超弦理論を特定の多様体上にコンパクト化したモデルが盛んに調べられている一方で、同理論が摂動論的にしか定義されていないことから、その基底状態として無数の異なる背景時空や背景場が許され、これらを原理的に決定する手段は存在しない。これに対し、超弦理論を背景に依らず定式化する手法の1つとして行列モデルが提案されており、そこでは背景時空の決定をはじめとする超弦理論の非摂動的性質の解明に向けた研究も行われている。行列モデルでは場の理論の演算子や波動関数を行列で表し、その表現次元を操作することでこれらの正則化を行う。特に IIB 型の行列モデルでは、IIB 型超弦の世界面作用に行列正則化を行うことで得られる作用が基本原理を与える。時空構造はこの原理により決定されると考えられており、IIB 型超弦理論の非摂動的定式化の候補として注目されている。

以上のような背景の下、申請者は、IIB 型超弦理論の有効理論を、背景磁場をもつトーラスや球面にコンパクト化した先行研究の枠組みに対し、これらをより一般的な多様体に拡張した際の相互作用の摂動論的な構造解析と、行列モデルに拡張した場合の非摂動論的な解析を行っている。

本論文は7つの章から構成されている。以下に各章の概要と評価を述べる。まず第1章では本論文の研究の背景が述べられている。第2章では、弦の世界面作用に基づくモード展開とスペクトル解析、閉弦の低エネルギー有効理論を記述する超重力理論の作用、及び、開弦の端点に由来する D ブレーンと閉弦の有効理論に含まれる場の相互作用について、申請者の研究の土台を与える IIB 型超弦理論の視点から概観されている。

第3章では、前章で導入した D ブレーンの低エネルギー有効理論として現れる高次元時空の非可換ゲージ理論に対し、これを、背景磁場をもつトーラスと球面にそれぞれコンパクト化した際の波動関数の導出と、これに基づく相互作用の構造解析について先行研究を紹介している。現象論的に重要な質量ゼロのモードに注目し、磁束数に応じた縮退構造をもつゼロモード間の相互作用を決める波動関数の重なり積分について、トーラスと球面のそれぞれの場合に詳細な解説を行っている。特に、ゼロモード波動関数の積がそれらの線形結合で書き表されるという性質が詳しく説明されている。

第4章では、特定の極限で IIB 型超弦理論を導く IIB 型行列モデルについて概説している。IIB 型超弦の世界面作用に行列正則化を行うことで IIB 型行列モデルの作用が導出され、そのゲージ理論との関係や、作用の対称性と運動方程式及び非可換トーラス解についての解説がなされている。また、出発点の作用を修正することで得られるファジー球面解についても本章で説明がなされており、これらの解は後の章で応用されている。

第5章では、高次元時空の非可換ゲージ理論を、背景磁場をもつトーラスと球面にそれぞれコンパクト化した第3章の枠組みに対し、これらをより一

一般的な多様体に拡張した際のゼロモード相互作用の摂動論的な構造解析について、申請者らの研究成果が説明されている。ここでは波動関数を具体的に求める立場ではなく、一般的な多様体上の作用から同定される演算子のもつ性質を元に、その固有関数として得られる波動関数に対する積の演算則を導き、これを用いて波動関数の重なり積分で与えられる相互作用の結合定数が満たす性質を演繹する手法が提案されている。この方法により、一般的な多様体に対しても湯川相互作用や高次の相互作用の性質を調べることができるため、これは統一理論の探究に大変有用な手法であると考えられる。

第6章では、Dブレーンの有効理論を、背景磁場をもつトーラスと球面にそれぞれコンパクト化した第3章の枠組みに対し、これらを行列模型に拡張した際のゼロモード相互作用と結合定数の非摂動論的な解析について、申請者の研究成果が説明されている。ここでは背景多様体のトーラスと球面の代わりに、第4章で紹介された、IIB型行列表型とこれを修正した模型の運動方程式の解である、非可換トーラスとファジー球面をそれぞれ扱っている。これらの解の下、行列表正則化をしたモード方程式を解析することで、それぞれの場合に具体的なゼロモードの解を見出し、これらの積構造も明らかにしている。その結果、特に現象論的視点から相互作用の結合定数に対する非摂動的な影響はほとんど無いが、非可換トーラスの場合に、背景磁場の量子化条件と波動関数の規格化因子が非可換パラメータで決まる補正を受けることを見出している。これは摂動論的に構成された現象論模型が行列表正則化の下でも有効であり、より豊富な構造をもつことを示す興味深い成果である。

以上を要約すると、申請者は、現象論的観点から有望なIIB型超弦理論の有効理論を一般の多様体にコンパクト化した際の、ゼロモード相互作用の構造を摂動論的に解析する汎用性の高い手法を提案した。また、超弦理論の非摂動的定式化の候補の1つである行列表型に基づき、非可換トーラスとファジー球面の解に対するゼロモード波動関数を構成し、これらが通常のトーラス及び球面上の波動関数と同様の性質を持つことを明らかにした。これらの成果は、IIB型超弦理論に基づく統一理論の探究において有用な解析手法と指針を与えるものであり、同理論に基づく素粒子模型の現象論と宇宙論を展開する際にも応用が期待される優れた成果である。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。

2021年1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