

氏 名 矢田 雅哉

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1592 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Toward the construction of realistic models from Superstrings

論文審査委員 主 査 准教授 西村 淳
講師 溝口 俊弥
教授 北澤 良久
助教 阪村 豊
教授 初田 真知子 順天堂大学

The superstring theory has been considered as an important candidate for a fundamental theory. There exist five consistent superstring theory: type I, type IIA, type IIB, SO(32) heterotic and $E_8 \times E_8$ heterotic theories. Heterotic strings automatically include the SO(32) or $E_8 \times E_8$ gauge symmetries, so it can explain the origin of gauge symmetries. Since the $E_8 \times E_8$ gauge group is remarkable from the point of view of the GUTs, $E_8 \times E_8$ heterotic string has been considered to be the most promising theory for describing the physics beyond the Standard Model. On the other hand, type II strings are possible to include gauge symmetries by D-branes which are higher dimensional objects. The D-branes have many interesting properties and applications, so various studies have been considered. Although superstring theories possess lots of attractive features, there is no conclusive evidence that the string theories are fundamental theories. The Standard Model does not appear automatically in the superstring theory in the first place. Thus, we must consider the scenario or setup that links the superstring theories at high energy and the Standard Model or the GUTs at low energy. The salient issue is that the superstring theories are consistent only in 10D spacetime. Since the Standard Model (or the GUTs) is in 4D spacetime, we do something about the issue. Usually, the extra 6D space is regarded as an unknown compact manifold and the size of the manifold is assumed to be sufficiently small. The long standing study of superstring theory reveals that the internal 6D space structure relates the framework of the 4D low energy field theories, such as the family structure and gauge groups. Although various approaches have been pursued to construct realistic models, none of the approaches can achieve the success. In heterotic string theory, one of the primary tasks of the string compactification is to find a way to realize a model with less moduli.

In this thesis, we introduce a novel, interesting brane setup in heterotic string theory, where we use NS5-branes instead of D-branes. After the brief review of heterotic string theory and orbifold compactifications, we consider the system of two stacks of intersecting NS5-brane in $E_8 \times E_8$ heterotic string theory and investigate the localized zero modes on the branes. Since the generalized spin connection is in SU(3) structure, the system preserves 4D N=1 SUSY and the unbroken gauge symmetry is E6. We perform an explicit computation of the Dirac zero modes on two types of intersecting five-brane backgrounds, the domain wall-type and vortex type solutions, and confirm that three chiral zero modes, two are in $\mathbf{27}$ and one is in $\overline{\mathbf{27}}$ representations in E6, are localized on the brane in both types of solutions.

We also investigate the possibility of realizing warped compactifications in

heterotic string theory. It is known that warped compactification needs being with some of negative tension branes. In type II string theories, such an object corresponds to orientifolds. In the other hand, such negative tension objects have not been found in heterotic string theory. We suggest a possible interpretation of the negative tension branes in heterotic theories as a T-dual of the asymptotic form of the Atiyah-Hitchin manifold. Since the asymptotic form of the Atiyah-Hitchin manifold agrees with the negative charge Taub-NUT metric and Taub-NUT solutions can be converted to smeared NS 5-brane solutions by T-duality, we can obtain negative tension five-branes in heterotic string theory. Furthermore, The Atiyah-Hitchin manifold has a bolt singularity, the negative tension five-branes behave as orientifold like objects. In order to compactify the extra 4D space, we consider the Gibbons-Hawking metric for a three-dimensional periodic array of multi-Taub-NUT centers which contain positive NUT charges but also negative NUT charges, where the negative charge Taub-NUT is regarded as the asymptotic form of the Atiyah-Hitchin metric. The array is converted by T-duality to a system of NS5-branes with the $SU(2)$ structure, and further considered as a heterotic background by the standard embedding. The one of advantages of the NS5-brane construction is that it is a non-zero flux theory. The three form flux is beneficial to moduli stabilization, even if it cannot stabilize completely in heterotic string theory. It is also noteworthy that the setup is the new way that achieves the warped compactification in heterotic string theory.

博士論文の審査結果の要旨

本学位論文は、超弦理論における最も大きな課題である現実的な素粒子模型の構築に向け、既存の理論が直面する、特にいわゆるモジュライに起因する困難を回避するため、伝統的なコンパクト化とは異なる機構によって現実的な模型を得ようとする意欲的な試みに関するものである。

本論文は、まず既存の超弦コンパクト化、特に伝統的なオービフォルドによるコンパクト化についてのレビューがなされた後、出願者によって執筆され既に査読付き雑誌に掲載された2本の論文についてまとめる形で構成されている。前半はE8×E8ヘテロティック超弦理論の5-ブレーンの交差を用いて余剰次元モデルを構成する試みに関する出願者本人単名の著作に基づいており、また後半はワープコンパクト化に必要な負張力ブレーンのヘテロティック弦における起源についての共著論文をもとに論じている。

前半部分は、2枚のブレーンが交差する4次元時空と垂直な6次元余剰次元のうち、1次元空間依存性のみを残す系のディラック方程式のゼロモード解析に関する既存の研究を2次元に拡張したものであるが、拡張に伴う技術的困難を一人で克服してまとめたという点は研究者としての自立性を示すものと評価できる。また、その結果は既存研究とほとんど変わらないものではあったものの、その物理的意義ならびに問題点についての記述には一定の学問的な専門性が認められる。

後半部分では、オリエンティフォルドをもたないヘテロティック弦におけるワープコンパクト化について論じられている。ワープコンパクト化における一般的定理は、負の張力ブレーンの必要性を要請するが、ヘテロティック弦では左右のモードが非対称のため、タイプII理論のようにオリエンティフォルドは定義できない。本論文では、遠方で負のチャージのタウプ・ナット空間に漸近的に近づくアティヤ・ヒッチン空間の性質に着目し、そのT-双対をその代替物と見なすことでワープコンパクト化の実現する可能性を議論している。また、その現実的なコンパクト化を実現するためのトイモデルとして、それらのブレーンを4次元空間に無限個配置して周期的に同一視し、6次元時空へのコンパクト化を実現する系について結晶学の理論を引用しつつ考察している。それら一連の議論はまだ定量的予言ができる段階にはないが、ヘテロティック弦におけるブレーンコンパクト化を探る試みは新しく、学問的に意義のあるものと認められ、またその内容は、査読つき欧文雑誌に既に掲載され、物理学会や研究会等でも発表されている。

また、冒頭の導入部分では、歴史的背景を含む超弦理論の素粒子の統一模型としての位置づけについてよく書かれている。

このように、論文内容は学位を授与するに足る十分な学問的な専門性と意義を有しており、また審査会における質疑応答を通して博士にふさわしい専門的知識ならびにコミュニケーション能力を有していると認められたので、論文審査において合格と判断した。