

氏名	小林晋平
学位の種類	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第 224 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科人間・環境学専攻
学位論文題目	弦の場の理論による不安定 D-brane 系の動的記述

論文調査委員 (主査) 教授 富田博之 教授 際本泰士 助教授 阪上雅昭

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文は、まず本研究を行うに至った背景と動機を以下のように述べている。

物質の基本的構成要素およびそれらの間の相互作用を記述する究極の統一理論はどのようなものであるか、さらにその理論体系により宇宙の誕生や進化はどのように理解されるか、という問題に答えることは現代理論物理学の重要な課題である。超弦理論は、ひも状の開弦と、輪ゴム状の閉弦という 2 つの 1 次元物体を基本構成単位とするもので、重力理論をも含む統一理論の最有力候補であるとされている。現在、超弦理論は摂動的にしか定式化されていないが、近年、その非摂動的側面も徐々に明らかになってきている。この過程で D-brane の発見が果たした役割は大きい。D-brane とは、空間の何次元かに広がったオブジェクトで、開弦・閉弦と並び超弦理論の基礎をなす構成要素の一つである。D-brane を通じて、各種の摂動的超弦理論の間に双対性があることや、D-brane 上のゲージ理論と D-brane が埋め込まれた時空の重力との間にも対応関係があることなど、非摂動的な部分についても理解が深まったと言える。また、最近「タキオン凝縮」という、不安定な D-brane の崩壊を動的に記述するという試みも現れ、今まさに超弦理論の実体が見え出したという段階にある。そしてこれら超弦理論の非摂動的側面の理解が進めば、宇宙の創成・発展という問題は自ずと明らかになると期待できる。特に、不安定 D-brane を動的に記述する方法が確立出来れば、宇宙の時間発展を記述することに関し大きな役割を果たすと期待されている。

そこで本論文では、この不安定 D-brane を動的に記述する方法の確立に取り組んでいる。この目的のために、本論文では「弦の場の理論」を利用している。弦の場の理論とは、超弦理論に弦の相互作用を取り入れた理論である。弦の場の理論を用いると、弦の生成・消滅なども扱うことができ、同様に不安定 D-brane の生成・崩壊も記述することが出来る。不安定 D-brane は、閉弦を放出して真空中に崩壊したり、次元の低い D-brane へと遷移すると考えられているが、それを実際に証明した例はまだないため、弦の場の理論を用いることでそれを実現することが、本研究の主要な目的である。さらに、不安定 D-brane を用いて重力理論の諸現象を記述することをもめざしている。

本論文では、具体的には閉弦の場の理論に弦の生成の原因になる任意の物質をソースとして入れ、そのソースが従う拘束条件を導いている。この拘束条件は弦の場の理論がもつ BRST (Becchi-Rouet-Stora-Tyutin) 対称性に起因し、本研究において初めて導かれたものであって、本論文の中核をなす結果である。しかしながら、その導出は閉弦の場の理論の基本的演算を理解していれば簡単に行えるものであった。むしろ本研究の重要性は、この拘束条件の意味と重要性を明確に示した点にある。申請者は、上の導出方法が場の理論における系の対称性と保存則の存在と同じであること、さらに弦理論の低エネルギー極限で拘束条件がエネルギー保存則にあたることを指摘した。弦理論の低エネルギー極限は一般相対性理論に相当すること、さらにそこでは、(1) 一般座標変換に対する系の不変性がエネルギー保存則を導くこと、(2) エネルギー保存則からソースの運動についての情報が得られることは、既に知られていた。本研究の成果は、一般相対性理論における対称性と保存則の関係という理論構造が、そのまま重力を含む統一理論である弦理論に格上げされているという非常に重要な事

実を明確に指摘した点にある。この理解により、拘束条件（保存則）と場の方程式を同時に解くことで、閉弦場・ソースの古典的な振舞いを完全に決めるといふ、新しい計算手法が基礎づけられたといえる。

さらに本論文では、拘束条件がソースに与える制限の具体例として、(1) 境界状態（D-braneの別の表現）、(2) rolling tachyonの2つを考え、この拘束条件から得られる定性的な結果についても考察している。

まず、(1)の境界状態をソースとして考えた場合については、弦と境界状態との相互作用の効果により、境界状態が閉弦を放出しながら崩壊し、通常の境界状態のままでは存在し得ないことを証明することに成功した。また、その効果により、境界状態の周りの時空が変形していくことも示された。従来、境界状態の崩壊は低エネルギー近似の形でしか議論されていなかったため、高エネルギー系を直接扱っている本論文のこの結果は、大変重要なものである。

(2)のrolling tachyonとは、A. Senによって提唱された「崩壊するD-brane」の1例である。Senはrolling tachyonが崩壊するとtachyon matterと呼ばれる相互作用のないダスト状物質が残ると主張していたが、本研究の解析により、その結果は誤りであり、rolling tachyonは閉弦を放出しながら崩壊し、あとには重力の輻射で満たされた状態が残ることが本研究により示された。

論文審査の結果の要旨

宇宙のごく初期の状態や、ブラックホールが蒸発して消え去る最終段階などにおいては、重力の量子力学的効果が重要な役割を果たすため、これまで宇宙論・相対論研究者が解析に用いてきた一般相対性理論では不十分であることがわかっている。これを可能にするのが超弦理論である。超弦理論とは、物質の究極の構造が「弦」と呼ばれるひも状の1次元物体である、として構成された理論であり、これにより、重力の量子論を含め、自然界におけるすべての力を統一的に記述することが出来ると期待されている。超弦理論は、今のところ摂動論的にしか定義されておらず、完全な形は出来上がっていないが、高次元時空の存在など、多くの興味深い現象を提起している。

本学位論文で申請者は、弦の相互作用に対して「弦の場の理論」を用いることで解析を試みている。論文第1章では、当該研究の動機づけと目的について述べている。第2章では、本研究の基礎となる弦理論の基礎的枠組について解説し、第3章では、弦理論を場の理論に格上げして得られる「弦の場の理論」について概説している。弦には「閉じた弦」と「開いた弦」とがあるが、本論文では重力系に興味があるため、重力相互作用を含む閉じた弦（閉弦）の場の理論について述べている。ここでは特に、あとの第4章で用いる理論のBRST (Becchi-Rouet-Stora-Tyutin) 対称性について詳しく解説している。第4章は本論文の主要部分であり、ここでは閉弦の場の理論にソース項を加えた理論を扱うための一般的な処方について述べている。次いで、これを特にソースとしての境界状態に適用した場合の解析を行なっている。第5章は結論である。さらに、Appendix Aでは、本論文の計算に用いられている弦理論の計算手法について詳しく述べている。Appendix Bでは、境界状態から、それが作り出す時空の計量を求める計算方法について述べている。また、Appendix Cでは、ボゾンの弦理論に含まれる境界状態に対応すると考えられるブラックホール解の導出について述べている。

本学位論文の優れた点は、その独創性と野心的なテーマ設定にある。ソース項を作用に付け加え、そのソース項が従う拘束条件を導くという手法は宇宙論で多く使われる手法であり、それを超弦理論という素粒子論のテーマに導入したという意味で独創的であるといえる。また、不安定なD-braneを動的に記述するという試みは、従来、低エネルギー近似でしかなされていなかった研究テーマであった。それに対し、本学位論文でなされた弦の場の理論を用いて高エネルギー系のまま扱うという取り組みは、今後この分野を大きく発展させると期待される野心的なテーマであると言えよう。

特に、本学位論文では、不安定なD-braneと時空の重力の相互作用に注目している。具体的には、D-braneをソース項として閉弦の場の理論に付け加えることで、D-braneと重力との相互作用を記述することに成功している。これまでD-braneの解析は全て安定なものや、不安定なD-braneを低エネルギーに近似したものに限られていた。申請者は、D-braneを閉弦のソースである境界状態として表現することで閉弦の場の理論に埋め込むことが出来て、それを利用することで境界状態、すなわちD-braneの崩壊を記述することが出来ることを示している。このように、不安定なD-braneを動的に記述する手法を確立した点が、本学位論文の重要な成果である。

以上のように本論文は、自然界の相互作用を統一的に理解する上で欠かせない、超弦理論における相互作用についての理

解を深めた研究であり、人間・環境学専攻自然環境論講座にふさわしい内容を備えたものである。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。