

氏名	寺口俊介
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2746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	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Vacuum String Field Theory in the Oscillator Formalism (振動子形式における真空型弦の場の理論)

論文調査委員 (主査) 教授 九後太一 教授 中村卓史 助教授 畑 浩之

論文内容の要旨

弦理論は素粒子の標準模型から量子重力までを含んだ究極統一論の候補である。実際、弦理論はその低エネルギー極限として、ゲージ理論や重力理論を含んでいる。しかしながら、弦理論の摂動論の起点となるべき真空は無数に存在することが知られているため、現在のところ、弦理論は現実の物理現象に対する予言能力を持たない。そのため、弦理論の真の真空を決定する機構や、枠組みの探求が必要とされている。弦理論の真空については、タキオン凝縮と呼ばれる現象に基づいて、近年盛んに研究されてきた。特に開弦のタキオン凝縮は開弦の端が付着する膜であるDブレーンの不安定性と関連づけて議論することができる。タキオン凝縮は質量殻外の現象であるため、弦理論の質量殻外への拡張である弦の場の理論を用いた解析が必要とされる。

申請論文表題の「真空型弦の場の理論」というのはタキオン凝縮が起こった後の安定な真空上で展開された弦の場の理論であると予想されている。弦の場の理論の解析には、共形場理論に基づいたアプローチと振動子形式によるものがある。申請論文では後者によるアプローチに基づいて、真空型弦の場の理論が本当にタキオン凝縮後の弦の場の理論であるかどうかを検証するための研究を行なっている。その内容は、真空型弦の場の理論における、Dブレーンに対応する古典解を構成し、その上の励起モードが通常の開弦理論を再現するかどうかを調べる、というものである。励起モードに関連した物理量の解析において、ツイストアノマリーと名付けられた、形式的には一見ゼロになる量がツイスト対称性の破れのために有限の物理量を生成するという現象が起こる。同様の特異な現象は、真空型弦の場の理論の古典解周りの励起モードの解析において様々な場面で現れる。申請者は発表論文で、ツイストアノマリーの形で表現される物理量を厳密に評価する方法を提案し、特に古典解周りのスカラーモードの質量が開弦のタキオンの質量と一致することを厳密に示した。また参考論文では、古典解周りの零質量ベクトル場のゲージ変換がある種のツイストアノマリーによって正しく生成されることを示した。

真空型弦の場の理論はその出発点の真空において最初から開弦の励起を持たないように構成されており、タキオン凝縮後の安定な真空の周りで展開された弦の場の理論であると期待されている。これを確かめるには、その古典解のエネルギーやその周りの励起モードの質量等の物理量を計算し、これらが通常の開弦理論のものと一致しているかどうかを調べる必要がある。真空型弦の場の理論の運動方程式を解くことにより、物理量はノイマン行列と呼ばれる弦の場の理論の相互作用を表わす無限次元行列を用いて表現することができる。数値計算を用いれば実際にこれらの物理量を評価することができる。しかしながら、一方でこれらの物理量を形式的に計算してしまうと、ツイスト対称性によって縮退したモード間で相殺が起こり、意味のある結果を与えないように見える。これは物理量のノイマン行列を用いた表式の特異性からくるもので、正しい結果を得るためには適切な正則化を行うことが必要となる。発表論文では、有限行列正則化という正則化の手続きを用いて真空型弦の場の理論の励起モードの質量が通常の開弦理論のものと一致していることを示している。この正則化の下でツイスト対称性による縮退は解け、有限の寄与が再現されるのである。

さらに、真空型弦の場の理論の古典解周りでのゲージ構造においてもこのような無限次元行列の特異性は重要な役割を果

たす。先にあげた正則化を用いず形式的な計算を行なった場合、通常の開弦の理論に現れるゲージ構造は再現されない。しかしながら、ツイスト変換性のためにゲージ構造に寄与を与えることができないと思われていた項の中には発散する量が含まれることがわかる。一方、有限行列正則化の過程においては運動方程式が厳密には満たされないため、余計な微小項が現れる。この微小項が本来のツイスト対称性を壊すため、先ほどの発散する量はゲージ構造に有限の寄与をすることができる。こうして参考論文では、真空型弦の場の理論の古典解周りでの零質量ベクトル場に対して正しいゲージ変換を再現することを示した。

論文審査の結果の要旨

弦理論は量子重力までを含んだ究極理論の有力な候補であるが、摂動論の範囲では、そのまわりで展開すべき真空の候補が無限に多く存在するため、現実的な予言能力を持たないという大きな問題点を抱えている。そのため、弦理論の真の真空を決定するための非摂動論的枠組みや機構の探求が急務である。

一般に、点粒子の通常場の理論において、タキオンという二乗質量が負のモードの存在は、そのモードの存在する真空の不安定性を意味する。この場合、タキオン場は真空期待値を獲得し、系はより安定な新しい真空へ遷移を起こす。これをタキオン凝縮という。弦理論の場合にも同様の機構が考えられ、特に開弦の理論にはDブレーンと呼ばれるエネルギーを持った高次元膜が存在することから、タキオン凝縮はDブレーンの崩壊現象と捉えることもでき、その描像でタキオン凝縮に関する検証可能な予想を立てることができる。タキオン凝縮は質量殻外の現象であるため、通常弦理論の第一量子化では解析が困難であり、弦の場の理論を使わねばならない。弦の場の理論は、弦理論を質量殻外にまで拡張した理論であり、弦理論をその摂動展開によらず定式化しようとする試みの一つである。申請論文の題目にあげられている「真空型弦の場の理論」というのは、このような弦の場の理論の一つであり、ボソニック開弦理論におけるタキオン凝縮後の真空周りで展開した弦の場の理論であると予想されているものである。この予想が正しいとすれば、この理論の古典解としてDブレーンが存在し、そのDブレーンの上では通常の開弦理論が再現されるはずである。

申請者は申請論文において、この真空型弦の場の理論によるタキオン凝縮の解析を演算子形式による定式化に基づいて行なった。そこで取り上げられた内容は、真空型弦の場の理論の構成に始まり、真空型弦の場の理論のDブレーンに対応した古典解、及び、その周りの励起モードを解析する、というものである。特に古典解周りの励起モードに関する解析の際には、ツイストモノマリーと名付けられた、形式的には一見ゼロになるが量が、ツイスト対称性の破れのために有限の物理量を与えるという現象が起こる。これらツイストモノマリーの形で表現される物理量を評価する新しい方法を提案し、それを用いて、スカラーモードの質量や古典解のエネルギーを計算し、古典解周りのゲージ構造を解明しているという点が申請者のオリジナルな寄与である。

真空型弦の場の理論の妥当性を確かめるためには、古典解のエネルギーや励起モードの質量スペクトラムを計算し、これらが通常開弦理論のものとは一致しているかどうかを調べる必要がある。これらの物理量は形式的には、縮退したモードの間で打ち消しあうためゼロとなってしまう。これは、弦の場の理論の相互作用を表す無限次元行列を用いた物理量の表式の特異性からくるもので、正しい結果を得るためには適切な正則化を行うことが必要である。申請者は発表論文において、有限行列正則化という正則化の手続きを提案し、その方法で真空型弦の場の理論の励起モードの質量が通常不安定な真空まわりの開弦理論のものとは一致していることを示し、これらの問題を解決した。さらに参考論文では真空型弦の場の理論の古典解周りでのゲージ構造を解析している。先にあげた正則化を用いない場合、通常開弦の理論に現れるゲージ構造は再現されず問題となっていた。申請者は、世界面のパリティ変換性のためにゲージ構造に寄与を与えることができないと思われていた項の中に、発散する量が含まれていたことに着目した。一方、有限行列正則化を用いると、その正則化の過程においては、運動方程式が厳密には満たされず、微小項が現れることがわかる。実は、この微小項が世界面のパリティ変換性を壊すため、先ほどの発散する量はゲージ構造に有限の寄与をすることができる。こうして申請者は、真空型弦の場の理論の古典解周りでの零質量ベクトル場に対して正しいゲージ変換を再現することに成功した。

演算子形式を用いた真空型弦の場の理論の解析は未だ完全なものにはなっていないが、申請論文で与えられたツイストモノマリーの取り扱い方は、この解析において欠くことの出来ない申請者のオリジナルで重要な業績である。よって、本申請

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。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。