

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）
プロジェクト研究（単独プロジェクト研究）
2010年度研究【経過・成果】報告書

プロジェクト主体 研究科等名	理学部物理学科		
研究代表者	所属・職名	氏名	
	理学部物理学科	黒木経秀	印
研究課題	ゲージ理論、弦の場の理論に基づく弦理論の非摂動的定式化と時空構造の解明		
研究組織	所属大学名等・職名	氏名	
	立教大学・助教	黒木経秀	
	立教大学・教授	矢彦沢茂明	
	立教大学・博士2年	奥田論史	
	立教大学・博士2年	高橋大輔	
研究期間	2010年度 ～ 2011年度		
研究経費	2010年度	2011年度	総計
	1846千円	2000千円	3846千円

研究の概要 (200～300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

素粒子理論の研究を行う。素粒子間に働く4つの相互作用を統一的に記述し、重力理論と量子論を矛盾なく融合させた量子重力理論を完成させることが素粒子理論の最大の目標であるが、そのような究極理論の最有力候補が弦理論である。しかし、弦理論は未だに摂動論的な定義しか存在せず、この意味できちんと定式化されていない。近年の研究によって、行列模型や、弦の場の理論による弦理論の非摂動的定式化が提案されているので、これらを詳しく調べることにより、4つの相互作用を統一した量子重力理論となる究極理論を完成させ、我々の宇宙に対する根源的な理解をする。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[ゲージ理論] [弦理論] [弦の場の理論]

研究【経過・成果】の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

黒木が行った行列模型の large-N 極限における自発的超対称性の破れに関する研究では、近年注目されている localization という技術が、行列模型においてどのように正当化され、何をもたらすかをまず明らかにした。黒木は杉野氏との共同研究で、localization は、超対称性を持つ行列積分の積分変数の変数変換によって自然に理解されることを明らかにした。Localization の技術自体は知られていたが、このような理解は今までになかったものであり、我々の結果は localization がなぜ、どのようなときに成立するかを見通し良く理解するのに非常に役立つ。また、localization の成立に主要な役割を果たす超対称性が自発的に破れてしまうような場合でも、我々の変数変換は適用できることが大きな利点である。これに基づき、超対称性が破れている場合に、どの程度それが localization の破れに反映されるかも明らかにした。さらに、このような理解に基づき、localization を行列模型に適用するとどうなるかを研究した。通常のスカラー場の場合は、localization によってスカラー場の積分は superpotential の極値に局在化して有限積分になることが知られているが、行列模型の場合はそのゲージ対称性のため、積分が局在化した後でも連続的な区間の積分が残ることを見出した。このことは localization を適用する際は、ゲージ不変な固有値で積分を表すべきであることを示唆している。よって固有値で書かれた積分に対し localization を適用すると、固有値間の力学は、固有値同士に働く斥力と、localization によって固有値が superpotential の極値に集まろうとする効果の競合によって支配されていることが分かった。このような localization に関する興味深く非自明なダイナミクスは行列模型特有のものであり、かつ今まで知られていなかった現象であり、注目に値する。また、前年度の研究で、double-well 型のポテンシャルを持つ超対称行列模型は finite N では超対称性が破れるのに対し、large-N 極限ではそれが回復することを我々は予言していたが、今年度の研究により、これを正当化することに成功し、例えば超対称性相と、自発的にそれが破れている相の間の 3 次相転移なども初めて見出すことに成功した。

一方、近年盛んに研究されている AdS/CFT 対応 (Anti de Sitter/Conformal Field Theory 対応) では、成立が様々なところで仮定されているが、本来明らかにすべきことは AdS/CFT 対応が本当に成立しているのか、あるいは成立するのはどのような場合か、である。このためには AdS 時空のような曲がった時空で弦を量子化することが必要不可欠であるが、曲がった時空上での弦の量子化は一般には困難である。ところがこれまで矢彦沢を中心とする研究により、pp wave と呼ばれる背景では、平坦でないにも関わらず弦の第 1 量子化ができることが示されていた。そこで今年度は矢彦沢が知崎氏との共同研究で、この背景中での弦の第 2 量子化、すなわち弦の場の理論の正当性を調べた。弦の場の理論の構築のためには、これまでの pp wave 背景での第 1 量子化の結果が必要不可欠であった。その結果、この弦の場の理論の作用は、低エネルギー極限で、pp wave 背景中の超重力理論の作用、及びその対称性を厳密に再現することを示した。これにより、pp wave という曲がった時空中でも、弦の第 2 量子化が可能である示唆を与えた。

本プロジェクトが完成を目指す弦理論の非摂動定式化の候補の一つに M 理論がある。M 理論の基本構成要素は膜である。弦とは異なり膜は量子化することが難しい。しかし、ライトコーンゲージの膜理論を行列正則化した行列模型を構成することはでき、この模型の枠組みで膜理論の量子論的な性質が調べられていた。膜理論で最も重要な量子論的な性質は、膜の不安定性である。この不安定性の背後にある物理的な理由は、膜はエネルギーを変えずに変形することができることにある。このため、一枚の膜を考えたとしても、必然的に多体の膜になってしまう。この特徴から、膜理論は不安定であり、実体のない病的な理論ではないかと指摘されていた。一方、複数枚重なった膜の上の低エネルギー有効理論が近年提唱された。この理論を ABJM 模型と呼ぶ。ABJM 模型は AdS/CFT 対応を用いた解析等の様々な研究はされていたが、膜の不安定性という基本的な問題については調べられてこなかった。そのため、奥田・黒木は ABJM 模型で膜の不安定性を調べた。

研究【経過・成果】の概要 つづき

これを調べる方法として、摂動論を用いた。我々はまず ABJM 模型の古典解である、オービフォルドに巻き付く膜を表す BPS 解を構成した。この古典解まわりで巻きつき数を固定して、膜を変形する揺らぎを調べ、ゼロモードが存在するかどうかを調べた。ゼロモードが存在する場合は不安定性の兆候と見なせる。結果、ABJM 模型において膜を変形するゼロモードが存在することを示した。そのため、ABJM 模型でも膜は不安定であるという示唆を得た。この膜を変形するゼロモードは ABJM 模型に存在するスケール対称性の破れに付随するものである。同様に、高階微分の補正を加えた非線形 ABJM 模型でもこのゼロモードは存在することを示した。

また、比較及び解析手法の確認のため、D2 ブレーン上の基本弦についてゼロモードが存在するかどうかも調べた。基本弦は安定であるべきなので、ゼロモードは存在しないと期待することができる。実際に D2 ブレーン上の基本弦に対応する古典解まわりで揺らぎを調べて、ゼロモードは存在しないことを確かめた。この解析は我々の解析方法の妥当性を保証すると共に、膜と弦の本質的な違いを浮き彫りにした。また、M 理論の低エネルギー有効理論である ABJM 模型を、D2 ブレーン上の低エネルギー有効理論へ落とす方法として novel Higgs mechanism がある。この方法を用いると我々が構成した、ABJM 模型のオービフォルドに巻き付く膜は、D2 ブレーン上の基本弦に変わり、かつ膜の巻きつき数は弦の本数になり、M 理論の解釈と符合することを示した。

同様にゆらぎについても novel Higgs mechanism を適用し、膜と基本弦のゆらぎの関係についても調べた。

弦理論は摂動論的には世界面の理論として考えられているが、非摂動的に弦理論を記述する理論の候補として弦の場の理論がある。弦理論の非摂動的定式化を目指す本プロジェクトの観点では、弦の場の理論の性質を詳しく調べ、弦の場の理論が正しい弦理論の非摂動的定式化を与えるかどうかを調べることは本質的である。

高橋は、現在知られている弦の場の理論についての研究を行った。弦の場の理論から与えられる古典的な運動方程式の解と共形場の理論の対応があると期待している。一方、近年、シナブルによって弦の場の理論における厳密解が構成され、大きなブレイクスルーとなった。その解を構成するためのゲージ固定条件やフレームを利用、応用することで更なる発展が現在進んでいる。

特にこの解の構成にあたって、弦の場の理論における状態の部分代数を構成することで、これまで複雑だった計算がより単純なものに抽出され、更なる応用がされ始めている。

例えば、シナブルが示したタキオン解で登場していたファントム項が存在しない解の構成や、境界条件変更演算子を用いた解の構成がこの部分代数を用いて単純な形で表すことが出来る。

一方、弦の場の理論において、あるゲージ不変な量が存在する。これはエルウッドによって、最初の真空における閉弦の 1 点の円盤振幅と、開弦の場の理論における古典解周りで構成される真空における閉弦の 1 点の円盤振幅との差であるということが示された。ただし、これは上述の部分代数を用いたもので構成されていない。

そのため部分代数を用いてこのエルウッドの関係式を示すことが主な研究である。

実際、この部分代数を用いたファントム項なしのタキオン解を用いてエルウッドの関係式が成り立っていることを示すことができた。ファントム項は取り扱いが微妙で、極限の順番などに曖昧さが残ることが知られているため、より扱いやすい部分代数で様々な量の計算が可能になることを具体的に示したことは、弦の場の理論の進展にとって重要な意義がある。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① T. Kuroki and F. Sugino,
``Spontaneous supersymmetry breaking in matrix models from the viewpoints of localization and Nicolai mapping,`` Nucl. Phys. B844, (2011) 409-449.

Y. Chizaki and S. Yahikozawa,
``Low Energy Action of 'Covariant' Superstring Field Theory in the NS-NS pp-Wave Background,`` Int. J. Mod. Phys. A26, (2011) 809-848

T. Kuroki, A. Miwa and S. Okuda,
``Deformation of half-BPS solution in ABJM model and instability of supermembrane,`` arXiv:1102.3277 [hep-th], to appear in JHEP.

③ 奥田論史、理研シンポジウム「場と弦の理論の新展開に向けて」、
2010年12月17日(金)～12月19日(日)、理化学研究所 和光キャンパス

④ 奥田論史、日本物理学会第66回年次大会 「Membrane stability in ABJM model」