

氏 名 住友 洋介

学位 (専攻分野) 博士 (理学)

学位記番号 総研大甲第 1233 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 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 Multiple M2-branes and Janus Couplings

論文審査委員	主 査	准教授	磯 暁
		准教授	西村 淳
		教授	小玉 英雄
		准教授	筒井 泉
		教授	北澤 良久
		教授	石橋 延幸 (筑波大学)

論文内容の要旨

超対称性を持つ重力理論を構成するうえで、構成可能な最大の次元は 11 次元である。このことから、11 次元超重力理論を低エネルギー有効理論に持つ M 理論の存在が期待されている。だが、M 理論に含まれるべき基本的物体の性質が良くわからず、その正体は長年謎のままであった。

2008 年に、M-theory の定式化に関する劇的な発展があった。3 次元場の理論において $\mathcal{N} = 8$ の超対称性を持つ Chern-Simons 理論が Lie 3-algebra $[X, Y, Z]$ を用いることによって定式化された (BLG)。この理論には最初 $SO(4)$ の gauge 対称性を持つものしか存在しないと思われていた。だが、群構造の正定性を緩めることによって $\text{tr} T^a T^b$ が負の符号を持つ、Lorentzian BLG 理論が存在することが示された。この Lorentzian BLG 理論は交換子による Lie 代数によって描けているので、Lie 3-algebra の際に不明であった M2-brane の枚数の議論が可能であることから注目を浴びた。

拘束条件の解として 1 方向に定数の真空期待値を与えると、Lorentzian BLG 理論は D2 の有効理論そのものになってしまうが、我々は拘束条件の解として座標依存したのも許されることを指摘した。この拘束条件を用いた解を用いると、座標依存した coupling を持つ理論となり、さらに任意の方向に拡張することによって $SO(8)_R$ の対称性を保って議論を行った。通常の D2 有効理論では結合定数が質量次元をもつので conformal 不変な理論ではないが、座標依存した coupling では元々存在した conformal 対称性を保ち、かつ $SO(8)_R$ な理論の構成ができる。このことから、これは D2 ではなく M-theory としての物理の側面を表していると考えられる。

さらに、M-theory が超弦理論からの duality mapping によって得られることを用いて、3 次元 $\mathcal{N} = 6$ Chern-Simons 理論が構成された (ABJM)。これは level が逆の 2 つの Chern Simons 理論に、Chern-Simons 項の前の量子化された係数から orbifold 化されることを考慮し、bi-fundamental な Klebanov-Witten 型の superpotential を結合して得られた模型である。この理論は D-brane を用いた構成より始めているので、枚数の議論が可能な Lie 代数構造の $U(N) \times U(N)$ の bi-fundamental の gauge 構造を持っているが、驚くことに、 $N = 2$ の時には $SO(4)$ の BLG 理論を再現していることがわかった。

我々は、当初不明であったもう一つの BLG 理論である Lorentzian BLG 理論を ABJM 理論から scaling 極限を取ることによって導出できることを示した。これは、ABJM 理論の bi-fundamental な gauge 構造から Inönü-Wigner 収縮を行うことによって Lorentzian BLG 理論の gauge 構造が得られることに起因している。なお、本研究により ABJM 理論に BLG 理論全体が、少なくとも古典的には含まれていることがわかった。

ABJM 理論の dual な時空は、M2-brane が orbifold 化された $AdS_4 \times S^7 / \mathbb{Z}_k$ であることが提唱された。 k が十分大きいときには 11 次元時空から 1 次元 compact 化した IIA 重力理論における $AdS_4 \times CP^3$ になる。これは k が十分大きい際に $\mathcal{N} = 6$ (特に $SU(4)_R$) の対称性が反映していることと合致しており dual な時空だと考えられる。我々の scaling 極限は $k \rightarrow \infty$ であるのでこの時空を考える。 $AdS_4 \times CP^3$ 時空における probe brane の有効作用を評価したところ、座標依存した coupling をもち、 $SO(8)_R$ まで対称性が高くなっていることがわかった。これは、Lorentzian BLG が持つ性質をすべて持っており、さらに CP^3 空間から非自明な $SO(8)_R$ を理解できることから、Lorentzian BLG 理論は $AdS_4 \times CP^3$ 時空における probe brane であることを指摘した。

また、M2-brane には brane と直交する 8 次元方向が存在するが、この 8 次元多様体は超重力方程式の解として非常に様々なものが存在することができる。これらは M2-brane の多様性を意味しており、M 理論の理解の為には 11 次元超重力解の理解も重要なことである。特に、8 次元 Einstein 多様体のうち非一様な多様体は低エネルギーの M2-brane を記述しており、我々の 4 次元の世界と M 理論とを繋げるうえで重要な役割を果たす。このような多様体のうち、 CP^2 上に $SU(2)$ Hopf fibration している多様体が非一様化したものを得ることができた。この多様体は、特性上 orbifold の特異点が存在するが、その特異点が非一様化することによって隠されているようになっており、全体として特異点の存在しない時空になっている。

本論文では上記事柄について、土台となった研究に関する詳細な review も含めて記述する。

論文の審査結果の要旨

住友洋介さんの博士論文は、いくつかの弦理論を統一的に扱うと考えられているM理論に関する研究であり、特にそのソリトン解であるM2ブレインの有効理論を扱っている。

通常の弦理論が10次元で定式化されるのに対して、M理論は11次元で定式化されるのを大きな特徴としているが、場の理論の極限が11次元超重力理論で与えられるという事以外には、その構造はほとんど知られていなかった。最近、このM理論に関する新しい定式化が Bagger Lambert および Gustavssonにより提案された(以下BLGと略記)。特に、M理論のソリトン解であるM2ブレインを記述する共形不変性をもつ3次元超対称場の理論が与えられた。またその直後に、Aharonyたちにより、BLG模型とは異なる理論も提案され、世界的に大きな注目を集めている。

住友さんは、博士論文のもととなる3本の論文において、これらの新しいM理論の定式化についての重要な研究を行った。特に、これら二つの定式化がある主の極限操作一致することを証明し、二つの定式化の間関係を明らかにした。またM2ブレインの極限として、時空依存性があるD2ブレインの理論が導かれる事、この時空依存性のために、D2ブレインの理論でありながら一般化された共形不変性をもつこと、などを明らかにした。これらの研究により、M2ブレインの理論として定式化された上記の二つの提案の相互関係が明らかになり、今後のM理論の発展にも重要な寄与を与えた。その後も、住友さんはM理論における新しい重力解の解析などを行っている。

住友さんの論文はすでに2本がPhysical Review D 誌に掲載され、これ以外に投稿中の論文が1本、JHEPに掲載された論文が1本と、博士論文の業績として素晴らしい成果を挙げている。

博士論文そのものに関しても、この分野の包括的なレビューからはじまり、これまでに住友さんが研究してきたM2ブレインの新しい性質についてまとめあげている大作であり、とても完成度の高い博士論文である。

以上まとめると、住友さんの博士論文には十分なオリジナリティがあり、また充実したレビュー部分など博士論文としての完成度はとても高いものである。