

Title	M2-branes in M-theory and exact large N expansion( Abstract_要旨)
Author(s)	Nosaka, Tomoki
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2016-03-23
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k19496">https://doi.org/10.14989/doctor.k19496</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

( 続紙 1 )

京都大学	博士(理学)	氏名	野坂 朋生
論文題目	M2-branes in M-theory and exact large $N$ expansion		

(論文内容の要旨)

重力と量子論を統一する量子重力理論の構築は、理論物理学における最も基礎的で重要な問題の一つである。その候補の一つとして弦理論があるが、複数の弦理論の存在が知られており、それらの等価性を保証し統一する理論として M 理論が提唱されている。M 理論の基本的な構成物は、M2ブレーンと呼ばれる膜状の物体であろうと考えられているものの、どのような理論で記述されるのかが分かっていない。その手がかりとして、ABJM理論を一般化した、一連の 3 次元  $U(N)$  超対称共形 Chern-Simons ゲージ理論が、特殊な空間内 (orbifold 空間内) に存在する M2ブレーンを記述する理論であると考えられており、様々な観点からの検証が行われている。特に、このゲージ理論のある極限において双対な半古典的超重力理論との対応関係や、ゲージ理論におけるインスタントン効果と M2ブレーンが空間内に巻きつくダイナミクスとの対応関係が物理的に興味深い。前者は、主に摂動的効果の検証を与え、後者は非摂動的効果の検証を与える。本博士論文では、野坂氏とその共同研究者が最近行った 3 次元  $U(N)$  超対称共形 Chern-Simons 理論の分配関数に関する研究をレビューした。先に述べたように、この理論は様々な orbifold 上の M 理論における  $N$  枚重なった M2ブレーンの系を記述すると考えられている。彼らはこの理論の分配関数が、量子統計力学における、ある種の  $N$  粒子理想フェルミ気体の分配関数と形式的に等価な構造を持つという Marino と Putrov の発見 [Marino-Putrov, J. Stat. Mech. 1203 (2013) P03001] に基づき、分配関数のラージ  $N$  展開を解析した。特に、[Moriyama-Nosaka, JHEP11 (2014) 164] では  $1/N$  に関する摂動的補正を全オーダーで厳密に決定することに成功した。彼らはさらに [Moriyama-Nosaka, PhysRevD. 92. 026003] において  $1/N$  に関する非摂動的効果を調べた。この効果は AdS/CFT 対応の文脈では、定性的にはユークリッド的閉 M2ブレーンが背景時空の 3 次元サイクルに巻き付く事による寄与 (インスタントン効果) として理解できる。彼らは、分配関数のある極限において、これらのインスタントン寄与を解析し、orbifold を特徴付けるパラメータに依存した計 4 種類のインスタントンの寄与が存在する事を示した。分配関数においてインスタントン効果は、各種類のインスタントン 1 個分の作用を基本的単位とする指数展開により与えられるが、その展開の係数を調べることにより各インスタントン効果のダイナミクスを知ることができる。彼らは、それらの内 3 種類のインスタントンの展開係数を具体的に求め、以下に述べるような興味深い構造を発見した。各種類のインスタントン効果の指数は、それぞれ、

1個のインスタントンの作用×インスタントン数として表されるが、異なる種類のインスタントンの数が互いに特定の関係にある場合には指数が同じになるため、単一のインスタントン効果として現れる。彼らは、このような縮退する場合においては、常に、各種類のインスタントン効果の係数が発散する一方で、全体としては、逆符号の発散が相殺する事により有限の寄与が得られるという事を発見した。これは古典的超重力理論の描像だけからは説明できない新しい性質である。さらに、[Moriyama-Nosaka, JHEP05(2015)022]では、orbifoldが $(\mathbb{C}^2/\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{C}^2/\mathbb{Z}_2)/\mathbb{Z}_k$ という特殊な場合に制限することで全ての種類のインスタントンの係数を完全に決定し、それらが local del Pezzo 5 と呼ばれるCalabi-Yau多様体上の精密化位相的弦理論の自由エネルギーによって表されることを発見した。

M理論を正確に定式化することは、M理論が統一理論として機能するためには必要なことであり、その枠組みにおける最も重要な未解決課題の一つである。一方、本論文で扱われているように、特殊な背景におけるM理論については様々な提案がなされており、これらの提案を検証し、拡張し、物理的見方を与えることは、課題の解決に向けての重要なステップであると考えられ、最先端の研究課題となっている。本博士論文では、特に3次元U(N)超対称共形Chern-Simons理論によって記述されると考えられている、orbifold上のM2ブレーンを考え、その分配関数を研究した。分配関数の厳密な表式は、局所化のテクニックや理想フェルミ気体の描像に基づき形式的に得ることができるが、超重力理論やM理論のダイナミクスとして理解するためには、なんらかの物理的パラメータに基づいて解釈する必要がある。野坂氏とその共同研究者たちは、いくつかのパラメータについて、高い有限次数、または、無限次数のオーダーまで分配関数を展開する方法を開発し、それらの表式を求めた。この方向の研究は、日本人の幾つかのグループが互いに競い合いながら展開され、世界の最先端のレベルにあり、野坂氏のグループもまた、他の追随を許さない結果を得ている。特に、厳密な分配関数を厳密に展開するということを行っているため、展開でありながらも厳密な言及を得ることになる。縮退したインスタントン効果において、発散が正確に相殺して有限となることや、位相的弦理論の分配関数との一致などは、厳密な計算をとおしてのみ任意性なく言及可能な結果であると思われる。最先端の課題であること、他の追随を許さないレベルの高さと厳密性などに特徴があり、本博士論文に記述されている結果の価値は非常に高いと考えられる。

博士論文の内容は、技術的説明が大部分を占め、相当な読み込みを行わないと正確に理解することはできないものであったが、公聴会における発表は、技術的拘泥にとらわれることなくポイントをわかりやすく説明した比較的明瞭なものであった。聴衆からは、理想フェルミ気体において粒子数を化学ポテンシャルに置き換えるラプラス変換や、分配関数の摂動的パートを記述しているAiry関数による表示、M2ブレーンが巻きつくサイクルの寄与の評価、位相的弦理論との一致の意義、また将来の方向の見込みなどについて質問がなされた。全体としては、技術的質問に対しては比較的明瞭に回答した一方で、物理的解釈に関する質問については、幾分不明瞭感を覚えた。これは、現時点においてM理論の枠組みが未知であり、明確に答えるためには更なる研究が必要であることを反映しているように思われた。野坂氏の博士論文で行われたように、ゲージ理論に基づき厳密な結果を積み上げる方向も一つの重要な方向であることは明らかである。公聴会後に行われた審査委員による話し合いでは、全員一致で、野坂氏の博士論文は価値あるものと認められた。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月12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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降