

氏 名 古川 友寛

学 位 の 種 類 博士 (理学)

学 位 授 与 年 月 日 令和4年3月24日

学 位 論 文 名 Brane transitions in a circle and Exceptional groups
(ブレーン変換と例外群)

論文審査委員 主査 教授 森山 翔文

副査 教授 糸山 浩

副査 准教授 西中 崇博

論文内容の要旨

基本的な4つの相互作用の統一理論としてM理論や弦理論が期待されている。M理論はM2ブレーンとM5ブレーンの理論であり、M2ブレーンの低エネルギー有効理論としてはABJM理論が知られている[Aharony, Bergman, Jafferis, Maldacena, 2008]。また、その拡張として多くの超共形Chern-Simons理論が存在する。これらの理論は、その対称性の高さから局所化法により行列模型に帰着する。我々の研究目的は、これらの行列模型や弦理論のもつ可積分構造を明らかにし、統一理論の理解を深めることである。これらの行列模型において、ゲージ群のランクを粒子数と見なすと、大分配関数をスペクトラル演算子のFredholm行列式で書き下すことができる。このときの演算子は、del Pezzo曲面から量子化を経て得られる演算子であり量子曲面とも呼ばれる。またIIB弦理論において、ABJM行列模型やその拡張は、5ブレーンと(5ブレーンと直交し1次元が円周コンパクト化されている)D3ブレーンで特徴付けられ、ゲージ群の異なるランクをもつ模型はHanany-Witten (HW) ブレーン変換[Hanany, Witten, 1996]により対応している。さらに、このような円周型のブレーン配位に対しては、HW変換でゲージ群のランクを下げる操作(双対性カスケード)を考えることもできる[Klebanov, Strassler, 2000]。この学位論文ではブレーン変換に関する次の結果を説明する：1. 量子曲面のもつ対称性(Weyl群)がHW変換を含んでいることからWeyl群の全体をブレーン変換と見なし、HW変換とは異なる新たなブレーン変換を提案する[Furukawa, Moriyama, Nakanishi, 2020]。2. Weyl群にカスケードを組み合わせることで、ブレーン配位空間にアフィンWeyl群が現れること、さらにカスケードの基本領域(カスケードの終着点)がその配位空間を空間充填できる多面体(多胞体)になっていることを示す[Furukawa, Matsumura, Moriyama, Nakanishi, 2021]。ここに現れたアフィンWeyl群は、可積分模型と関係の深い構造であり、今後更なる発展が期待できる。この結果から、任意のブレーン配位がカスケードの経路によらず、必ず有限な基本領域の1点と対応付くことが判明した。

論文審査結果の要旨

本博士論文は主に例外ワイル群を用いてブレーン変換を調べた学位申請者の論文 [T.F., S.Moriyama, T.Nakanishi, 2021] 及びプレプリント [T.F., K.Matsumura, S.Moriyama, T.Nakanishi, arxiv: 2112.13616] に基づいて書き下ろされたものである。

素粒子最終理論の有力な候補である M 理論の M2 ブレーンを記述する場の理論 (ABJM 理論) は、IIB 型超弦理論の円周上のブレーン配位の考察から生まれた。このブレーン配位は特に次の二つの興味深い側面を持つ。一つは M2 ブレーンの分配関数の解析に関連して発見された量子曲線による記述である。分配関数に対してランクを粒子数と見なして大正準集団に移行すると、分配関数はワイル群の対称性を持つ量子曲線のスペクトル演算子に置き換わる。もう一つはブレーン配位に対する Hanany-Witten ブレーン変換である。特に円周上に配置することで、継続的にブレーン変換を実行でき、カスケードをなす。これらの二側面を関連付けることにより、申請者は共同研究者とともに、ワイル群をブレーン変換に翻訳して新しいブレーン変換を提唱した。さらに、ワイル群を鍵に双対性カスケードを捉えることでアフィンワイル群の構造も発見した。申請者は、両共同研究とも積極的に議論を主導し、論文作成にも多大な寄与がある。

博士論文は申請者のこれらの研究成果に基づいて作成された。物理的な背景やこれまでの発展をまとめた後に、第 2 章で新しいブレーン変換を説明し、第 3 章でカスケードのアフィンワイル群の構造を説明し、第 4 章で申請者の視点で発展の方向性について議論した。また他の参考論文の解説を付録に収録した。申請者の視点から研究成果を論じた最先端の内容である。よって、本論文は博士 (理学) の学位を授与するに値するものと審査した。