

論文審査の結果の要旨

氏名 木村 圭助

近年の超弦理論研究の最も重要なトピックの一つとして、いわゆる「AdS/CFT 対応」の解明の問題がある。これは AdS (Anti-de-Sitter 空間) を含む時空中の重力理論 (閉弦の理論) と AdS 空間の境界上で定義される CFT (共形不変な場の理論) が等価であることを主張する非常に深い内容を持った予想である。最も多くの精密な「証拠」が得られているのは、5次元の AdS 空間 AdS_5 と 5次元球 S^5 の直積空間上の弦理論と AdS_5 の境界をなす 4次元時空中の $N = 4$ 超対称ヤン・ミルズ型ゲージ理論の対応であるが、超対称性をもっと低い場合の例も多数調べられてきている。これらはすべて 10次元の超弦理論の枠内での対応だが、AdS/CFT 対応はさらに超弦理論の強結合領域を記述する 11次元の「M理論」の場合にも拡張されると考えられおり、その典型的な例として、 $AdS_4 \times S^7$ 上の重力理論 (M理論) と AdS_4 の境界をなす 3次元時空中の CFT との対応がある。しかしながら、M理論自体の理解が未だ不十分であること等より、この場合の CFT が具体的にどのような理論であるのかはこの 10年間謎であった。この問題に対して、昨年大きな進展が見られた。まず、Bagger と Lambert、および Gustavsson により、通常の Lie 代数を拡張した 3-代数と呼ばれる代数の構造を利用して、望ましい性質を備えた 3次元 CFT (「BLG モデル」) が構成された。この理論はかなり特殊なものであったが、その後別の観点から、Aharony, Bergman, Jafferis および Maldacena によって BLG モデルをその例として含むより一般的な「ABJM モデル」と呼ばれる理論が提唱された。そして現在このモデルの詳細な性質およびそれをさらに拡張したモデルの構成と性質の研究が盛んに行われている。

本学位論文はこうした状況の中で、特に ABJM モデルのさらなる一般化に対して幾つかの有用な新しい知見を加えたものであり、7つの章から構成されている。

第1章の序論では、本論文の主題である 3次元の超対称チャーン・サイモンズ (CS) 型ゲージ理論に関する最近の進展の概要、および本論文の結果の要約が述べられている。

第2章は、その進展の中で中心的な役割を果たした ABJM モデルのレビューに充てられている。このモデルは $N = 6$ 超対称性を持つ特殊な CS 型理論であり、その真空の構造の解析から、11次元時空中のある種の 8次元空間の特異点近傍に N 枚の M2 ブレーンが存在する場合の低エネルギーでの振る舞いを記述する共形不変理論であると考えられている。

第3章では、ABJMモデルを拡張したオービフォールド上のM2ブレーンの理論について概観し、さらに論文提出者等による新しい構成法が述べられている。この方法は、4次元の“ellipticモデル”の構成法を3次元の $N = 3$ CS型abelianゲージ理論に対して拡張したもので、その真空のHiggs相における構造が新たな種類の複素4次元空間のオービフォールドになること、またそれがM理論のブレーン配置から得られるものと解釈できることが示されている。

第4章と第5章は、第6章で述べられる、3次元 $N = 2$ クイヴァー(箆)型チャーンスイモンズゲージ理論の研究で有用となる基本的な方法の解説に充てられている。まず第4章では、4次元の $N = 1$ 超対称クイヴァーゲージ理論を構成するためにA. Hanany等によって開発された「ブレーン・タイリング」の方法について述べている。ブレーン・タイリングとは、二次元のトーラスに巻き付いた N 枚のD5ブレーンをNS5ブレーンの境界で幾つかの領域に区切ったような配位のことであり、あたかもトーラス面上のタイル模様のように見えることから、そのように名付けられたものである。これらのブレーンをその端に持つ開弦の低エネルギー励起状態の理論としてクイヴァーゲージ理論が現れるのであるが、一方ブレーン・タイリングのグラフには、そうした4次元ゲージ理論を10次元時空中の弦理論として実現する際の、残りの6次元部分をなす特異なカラビ・ヤウ多様体の代数幾何学的情報もコードされている。その意味でブレーン・タイリングの手法は、どのようなカラビ・ヤウ特異点上のブレーンの理論がどのようなクイヴァーゲージ理論を生み出すのかを効率よく知るための強力な手段となっている。

第5章では、このブレーン・タイリングの方法の拡張としてS.Leeによって導入された「ブレーン・クリスタル」の方法について解説している。これはD5ブレーンの代わりにM理論に現れるM5ブレーンを用い、それらを2次元トーラスの代わりに3次元トーラスに巻き付けることで得られる立体的な配位であり、こんどは6次元の物体を3次元分巻き付けるので、残りの3次元時空中でのゲージ理論の構成に有用である。

本学位論文の中核をなすのが、次の第6章であり、次の三つの新しい成果が得られている。(1) 元来タイプIIB超弦理論に対して開発されたブレーン・タイリングの手法をタイプIIA理論に拡張し、これを用いて、様々な $D=3$ $N=2$ CS型クイヴァーゲージ理論を構成できることを示した。(2) さらに、1枚のM2ブレーンの場合の真空のmoduli空間の構造をゲージ不変なオペレーターの完全系を構成することにより調べ、ある仮定のもとにそれが、複素4次元のToric Calabi-Yau coneを表すことを示した。(3) また、ブレーン・タ

イリングと、それをもう一次元上げたブレーン・クリスタルの方法との関係を示唆した。

最終第7章は、本論文の成果のまとめとこれからの展望に充てられている。

以上見てきたように、本学位論文(特に第3章および第6章)において、学位申請者は、超弦理論およびそれを統括すると思われる M 理論における双対性の構造に関して、これからの研究に役立つ幾つかの新しい知見を見出しており、高く評価される。なお、第3章及び第6章の結果は、今村洋介氏との共著論文に基づくものであるが、論文提出者の寄与が十分であると判断される。したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。