

論文審査の結果の要旨

氏名

疋田 泰章

いわゆる超弦理論は、重力を含めた相互作用の統一理論へ向けてほとんど唯一の手掛かりとみなされ、様々な観点から研究されてきた。特にここ5~6年ほどのあいだに、超弦理論の捉え方自体に関してそれまでとは質的に異なった新しい段階に達しつつあると思わせるような数々の新知見が得られている。

このような発展のなかで目覚ましい発見として、重力理論とゲージ理論との新たな双対関係が判明したことがあげられる。もともと弦理論では、重力相互作用とゲージ相互作用が不可分のものとして一つの枠に包摂されている。これが弦理論の統一理論としての構造の反映であることは言うまでもないが、ここ数年の進展により、Dブレーンという弦理論の非摂動的な励起状態を用いてバルク時空の重力を、直接、バルク時空の境界上に定義されると考えられる極大超対称性なゲージ理論 ($\mathcal{N} = 4$ SYM₄=CFT₄) に基づき記述できることが明らかになった。特に、この有効ゲージ理論の大 N 極限および強結合領域が、重力で記述できるという予想 (AdS/CFT 対応) が成り立ち、従来までは取り扱いが困難であった強結合ゲージ理論の非摂動的側面を半古典的な重力理論によって解くことができる可能性を示唆している。さらに、ここ1年ほどの進展により、実は、半古典的重力理論を越えて、弦の質量がゼロでない励起状態の情報が、pp wave limit (以下、平面波極限と呼ぶ) という特別の極限においてゲージ理論側の無限個の場の積として構成できる特定の複合演算子と関係しているという予想が確からしくなっている。これにより、弦理論とゲージ理論のとの関係に関する理解は新たな段階に達しつつある。

本論文の目的は、これらの発展を動機として、AdS/CFT 対応のうち AdS₅/CFT₄ と並んで典型的な例である AdS₃ × S₃(×M₄) 時空上の超弦理論と2次元 CFT の間の双対関係 (AdS₃/CFT₂ 対応) における平面波極限を考察し、すでに多くの議論がなされている AdS₅/CFT₄ の場合と同様な予想が成り立ちうることを示すことである。この場合、CFT 側の理論は、D1ブレーンとD5ブレーンの複合系として実現できるが、この系は、適当な4次元時空 (M₄ = T⁴ ないしは K3 空間) 上の symmetric orbifold をターゲット空間とする非線形シグマ模型と同等と考えられている。一方、弦理論側の取り扱いに関して、本論文では、IIB 超弦理論のいわゆる S 双対性を用いて、D1/D5 系と S 双対関係にある F1-NS5 ブレーン複合系を扱う。後者は SL(2,Z) × SU(2) 群の Wess-Zumino-Witten (WZW) 模型として定式化できる。また、CFT 側の非線形シグマ模型の取扱いは、一般のモジュライパラメータを仮定しては解析が困難なので、より解析が容易な orbifold point と呼ばれる特別なモジュライ空間の点に注目して、弦理論側のスペクトルとの比較により、上記の予想を議論した。

次に各章の概要を述べる。序論である第1章では、まず本論文の動機を最近の弦理論とゲージ理論の間の双対関係に関する研究の進展と関係させて論じ、本論文の概要が提示されている。

第2章は、本論文全体への準備として、AdS/CFT 対応、Penrose 極限による平面波背景時空の構成、さらに弦の励起状態とゲージ理論側の演算子の対応に関する BMN(Bernstein-Maldacena-Nastase) の予想の要点をレビューしている。

つづいて、第3章では、まず本論文で扱う AdS₃/CFT₂ 対応をとりあげる動機を説明し、その平面波極限に関する必要事項をまとめている。CFT₂ 側の理論として、本来の D1/D5 系の代わりに、S 双対性により WZW 模型により定式化できる F1/NS5 系を取り扱う利点が議論されている。つづいて、この模型の平面波極限が、Nappi-Witten 模型として知られている模型を一般化したものに一致することが示されている。さらに、平面波極限での自由弦のスペクトルが、光円錐ゲージでの量子化により提示されている。以下の章では、このスペクトルに対応する CFT 側の演算子がどのようにして構成できるかが主な論点になる。

第4章では、CFT 側の議論に入る前に、WZW 模型の立場からのスペクトルの導出が論じられている。この型の模型ではよく用いられる自由場表示に基づき、流れ代数の表現をなす Hilbert 空間が構成され、前章で光円錐量子化により求めたスペクトルとの比較が行われ、横方向に運動量を持たない離散スペクトルの状態に関しては自然な対応があることが示されている。さらに自由場表示による弦の物理的状態に対応する頂点演算子の構成が与えられている。

第5章では、CFT 側の解析を行い、本論文の主要結果が導出される。まず、5.1 節では、F1/NS5 の背景時空の地平面近くの有効理論とみなされる symmetric orbifold $Symm^M(T^4)^M = T^4/S_M$ ($M = Q_1 Q_5$, Q_1, Q_5 はそれぞれ F1, NS5 の個数) 上の非線形シグマ模型の内容を簡潔にレビューされている。続いて、5.2 節で、弦理論側と CFT 側の平面波極限の比較がなされる。まず、すでに古典的な超重力理論の場合に知られている BPS 状態に関して、弦理論側の平面波極限での状態の個数は変化しないことを確認し、CFT 側の対応する極限における状態のなす空間とほぼ一致していることが示される。near BPS 状態については、まず T^4 方向に運動量を持たない場合に、弦理論側の DDF 演算子に対応する演算子を CFT 側で自然に構成できることが示されている。ただし、CFT 側の一般の状態には、弦理論側には存在しない状態を含むことが判明する。この余計な状態は、弦理論の摂動的な解析では見えない非摂動的な状態であろうという可能性が指摘されている。同様な解析を、 T^4 方向に運動量を持つ場合へも拡張できることが続いて論じられている。ただし、この場合も CFT 側の状態空間は弦理論側のそれより大きい。最後に、5.3 節では、前節で判明した弦理論側とのスペクトルの食い違いの原因に関する考察がなされている。本論文に用いた CFT 側の模型は、弦理論の観点からは orbifold 点と呼ばれる特異なモジュライ空間の点に対応することが指摘されている。この特異性のためたとえ near BPS 状態

であってもスペクトルがモジュライ依存になっている特別な状況にあると考えられるという主張がなされている。従って、この特異な点から非特異な領域へ理論を変形したときの理論の性質が問題になる。本論文で取り扱った NS flux ではなく本来の D ブレーンに対応した RR flux の場合について、変形によってより正確な対応をつける可能性が議論されているが、結論には達せず今後の課題として残される。

第 6 章では、以上の議論を、背景時空を離散群 Z_2 に関する商空間 $H_6 \times T^4/Z_2$ に代えた場合について拡張した議論がなされ、第 5 章とほぼ同様な結果を、この場合についても導いている。

終章では、以上の結果の要約が与えられた後、今後に残された課題が論じられている。

以上のように、本論文はゲージ理論と弦理論の双対関係として重要な AdS/CFT 対応に関して、従来までの研究を拡張する解析を行い、今後の研究にとっても有用な新知見を与えており、博士論文として評価できる内容を備えている。

なお本論文の結果はいずれも菅原祐二氏との共同研究に基づいているが、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

よって、審査委員会は全員一致で本論文が博士（理学）の学位を授与するのにふさわしいものであると判定した。