

氏 名	み 三 輪 光 嗣
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2993 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	String Field and Wilson Loop Operator in AdS/CFT Correspondence (AdS/CFT 対応における弦場とウィルソンループの対応の研究)

論文調査委員	(主 査) 教 授 畑 浩 之	教 授 川 合 光	助教授 福 間 將 文
--------	--------------------	-----------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本申請論文は弦理論とゲージ理論の間の双対性の一例である AdS/CFT 対応を、弦場とウィルソンループの間の対応として再解釈しようとするものである。

第 2 章では弦理論とゲージ理論の間の双対性に関する過去の研究が簡単にまとめられている。この双対性に関しては様々な研究が行われて来たが、ここでは弦という力学変数がゲージ理論側でどのように記述されるかといった点が議論されている。特に後半部分では論文の主題である AdS/CFT 対応が議論されている。AdS/CFT 対応は $AdS_5 \times S^5$ 時空上の IIB 型超弦理論と、4 次元で超対称電荷を 4 つ持った超対称ヤン-ミルズ理論 (SYM) の間の等価性を予想するものである。これまでにこの等価性の多様な側面が研究されて来たが、ここではこの対応のホログラフィー的な側面、及び近年見出された弦の振動状態と SYM の局所演算子 (BMN 演算子) の間の対応関係 (BMN 対応) 等が議論されている。

第 3 章で申請者は弦場の振動モードとウィルソンループの振動モードの間の対応関係を議論している。ここで用いられているウィルソンループは指数部分にゲージ場だけでなく 6 つのスカラー場をも含むものである。またそれに伴ってループも 4 次元時空方向だけでなく余剰な 6 次元方向にも伸びたものが考えられている。まず申請者はある基準となるループの配位に着目し、その周りの揺らぎに関してウィルソンループをテイラー展開している。さらにこうして得られた展開の各項を指数部分のスカラー場に関して冪展開する。このような二重の展開の後に得られる各項のうち、スカラー場の冪が高い項が BMN 演算子を正しく再現することになる。こうした BMN 演算子の導出の過程において弦の物理的揺らぎに対応するループの揺らぎを同定する際、ループに対する局所超対称条件が重要な役割を果たす。

次に第 4 章ではウィルソンループの運動方程式であるループ方程式の導出、及び弦場の運動方程式との比較が行われている。まずループ方程式を導出するために 3 章で用いられたウィルソンループがさらにフェルミオン場をも含む形に拡張されている。またそれに伴ってループもボソンの 10 個の座標以外にフェルミオンの 2 個の座標にも依存するものに拡張される。こうして拡張されたウィルソンループに対して比較的簡単な汎関数微分演算子を作用させることで SYM のループ方程式が導出されている。このようにして導出されたループ方程式はフェルミオンの座標に依存した方程式となるが、ここではフェルミオンの座標に関して 2 次の部分までループ方程式が導出されている。次に導かれたループ方程式と弦場の運動方程式の間の対応関係が議論されている。 $AdS_5 \times S^5$ 時空上の弦の場の理論は現時点では構成されていないため、申請者は自由な弦場の運動方程式のおよその対応物であるハミルトニアン条件と、ループ方程式の線形部分の比較を行っている。ループ方程式には発散する項が含まれているが、ここでは発散を正則化して発散の最高次の寄与を抽出している。こうした比較の結果、SYM に導入された短波長側のカットオフと AdS_5 時空の動径方向の座標を同一視することで、ループ方程式の線形部分と弦のハミルトニアン条件が同様の構造を持ちうるが見出されている。ここでの同一視は AdS/CFT 対応のホログラフィー的な側面と相性の良いものである。

論文審査の結果の要旨

弦理論とゲージ理論の間の双対性は古くから研究されているが、近年では特に弦理論の非摂動論的定式化の研究においてこの双対性が重要な役割を果たすと考えられている。本申請論文は弦理論とゲージ理論の間の双対性の一例である AdS/CFT 対応に関する研究成果をまとめたものである。

本申請論文においては AdS/CFT 対応における弦場とウィルソンループの間の対応関係が、次の2つの点に関して議論されている。

- 1) 弦場とウィルソンループの振動モードの間の対応関係。
- 2) 弦場とウィルソンループの運動方程式の間の対応関係。

弦場とウィルソンループの間の対応関係の研究は古くからなされている。しかし AdS/CFT 対応を弦場とウィルソンループの対応関係として再解釈する試みはこれまで十分には議論されていなかった。

まず第3章では1)の研究として、ウィルソンループをループの揺らぎに関して展開することで、弦の振動状態に対応する演算子 (BMN 演算子) が導出されている。ここで用いられている展開は、ある基準となるループに着目し、その周りの揺らぎに関してテイラー展開を行うといった非常に簡明なものである。またループに対して局所超対称条件を課すことで BMN 演算子の補正項も正しく再現されることが議論されている。弦場は弦の振動状態を用いて展開されるため、ここで申請者が見出した事実は弦場とウィルソンループの間に対応関係が存在することを強く示唆していると言える。

次に第4章では2)の研究として、4次元で超対称電荷を4つ持った超対称ヤン-ミルズ理論 (SYM) のループ方程式の導出、及び弦場の運動方程式との比較といった研究が行われている。ループ方程式の研究は古い歴史を持つが、ここで議論されている SYM に関しては、ループ方程式をフェルミオン座標の高次まで導出するという研究はこれまでなされていなかった。申請者は、ウィルソンループと汎関数微分演算子をフェルミオン場やフェルミオン座標を含む形に拡張し、フェルミオン座標に関して2次の項までループ方程式を導出することに成功している。またこうして導出されたループ方程式の線形部分の発散項に着目し、発散の最高次の寄与を結合定数の最低次までで評価して線形な汎関数微分方程式を導出している。次に申請者はこうして得られた線形方程式と $AdS_5 \times S^5$ 上の弦のハミルトニアン条件の比較を行っている。こうした比較の結果、SYM の短波長カットオフと AdS_5 の動径座標を同一視することで、両者が同様の構造を持ちうるという興味深い結果が得られている。ここではこのカットオフと座標の同一視の正当化は与えられていないが、この同一視が AdS/CFT 対応のホログラフィー的な側面と相性が良いことが議論されている。

以上のように申請者は AdS/CFT 対応において弦場とウィルソンループの間に興味深い対応関係が存在することを見出している。従って本申請論文は博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認める。また主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。