

論文の内容の要旨

論文題目 **Boundary state and dynamics of noncommutative D-brane**
(非可換 D-brane の境界状態と動力学)

氏名 佐藤可直

背景・動機

弦理論はゲージ理論と重力を量子的に統一するほぼ唯一の有望な候補として活発な研究がなされている。弦理論において Dp-brane と呼ばれる p 次元状の物体が必然的に表れ、様々な側面で重要な役割を果たしている。D-brane は開弦の端が束縛される超曲面であり、その上に開弦の場の理論が実現される。特に N 枚の Dp-brane 上には低エネルギー極限において $(p+1)$ 次元超対称 Yang-Mills 理論が実現される。この時、スカラー場は D-brane の超曲面に垂直な方向の変位を表す。すなわち D-brane はそれ自身が動的な物体である。一方で D-brane は閉弦の源としても働き、D-brane から放射される閉弦は境界状態により記述される。D-brane は弦理論の非摂動的性質や開弦・閉弦双対性の研究において重要であり、その本質的な理解を得ることが求められている。複数枚の D-brane が存在する時、その上の開弦の場は一般に非可換であり、D-brane の位置を決定する事が出来なくなる。これは D-brane の形状が曖昧になる事を意味している。この結果として複数枚の D-brane から高次元の D-brane が形成される事がある。この現象はいくつかの系では確かめられているが、一般に完全な理解は得られていない。この様に複数枚の D-brane が存在する時には開弦の場の順序の問題が生じる。D-brane 上の開弦の低エネルギー有効作用である DBI 作用に対しては対称化トレースの処方が提案されたが、 α'^4 より高次では正しくない事が知られている。また境界状態に対しては Wilson ループを用いた経路順序の処方が提案されているが、その正統性は確認されていない。

これらの状況を踏まえ、本学位論文では以下の研究について議論を行う。

- 複数枚の D-brane 上に任意の時間依存する開弦の励起が存在する系の境界状態を構築し、運動方程式・作用・閉弦との結合の導出によってその正統性を示す。(第 4 章)
- 高次元 D-brane とそれらを構成する複数の低次元 D-brane の等価性を利用して D-brane の動力学的研究を行う方法を実証する。特に D0/D2-brane 系におけるタキオン凝縮を解析し、D0-brane の溶解過程の記述を行う。(第 5 章)

第 1 章においてこれらの研究の背景・動機を説明する。第 2 章において D0-brane 系の超重力電流密度の、弦理論の disk 振幅・行列理論ポテンシャル・DBI 作用による導出を復習する。第 3 章において D-brane の境界状態を復習し、複数 D-brane 系への拡張について議論する。第 6 章において本学位論文のまとめを行う。

複数 D-brane の境界状態

境界状態は D-brane から放射される閉弦を記述しており、閉弦との結合・D-brane 間のポテンシャル・遠方における閉弦の古典解などの導出に用いられる。単数の D-brane に対しては、D-brane 上のスカラー場・ゲージ場が任意の配位を持つ場合を含めて一般の境界状態が与えられている。一方で複数の D-brane を記述する境界状態については開弦の場に対する経路順序の処方が提案されているが、その正統性の証明は与えられていない。本学位論文の第 4 章において、複数枚の D-brane を記述する境界状態に対する Wilson ループを用いた経路順序の処方の正統性を、D0-brane 系の運動方程式・有効作用・閉弦との結合の導出により示す。

本学位論文では任意の個数の D0-brane 系を記述する境界状態を、スカラー場が任意の時間依存する配位を持つ場合について構築する。経路順序を用いて定義された境界状態は、無限個の D0-brane が非可換 D2-brane を形成する場合には経路積分を用いて評価する事が出来る。しかし経路積分法は非可換 D2-brane 上に開弦の励起が存在する場合や、一般の複数 D-brane 系に対しては適用が難しい。一方、閉弦状態の生成消滅演算子を用いた解析では α' 展開において任意の D-brane の境界状態を評価する事が可能である。本学位論文では生成消滅演算子を用いた解析により、ボソン・超弦理論の両方において α'^2 の次数まで境界状態の計算を行う。

構築された境界状態は α' の全次数で BRST 不変であり、スカラー場が運動方程式を満たす時のみ発散を含まない。すなわち D0-brane の配位が on-shell である場合に境界状態はよく定義される。この様に境界状態が発散を含まない条件から開弦の場の運動方程式が導かれる。また D-brane 上の開弦の励起を含めて構築された境界状態と閉弦状態との相互作用を調べることにより、D0-brane 上の開弦の場の閉弦への結合が計算される。このような解析の結果は、disk 振幅・行列理論ポテンシャルから導出された D0-brane 系の正しい超重力電流・電荷密度、および DBI 作用の開弦場に対する線形部分を再現する。これらの結果は境界状態に対する Wilson ループを用いた経路順序の処方が正しいこと示す。高次の α' 補正も同様の方法により計算可能であり、正しい結果を導くか確かめることは重要な課題である。

非可換 D-brane の動力学

複数の D-brane が存在する系に特徴的な現象として高次元 D-brane の生成が挙げられる。特に平坦時空中で無限個の D0-brane が一様磁場を伴った D2-brane を生成する事が知られている。すなわち D2-brane 上の非可換 (noncommutative) ゲージ理論と無限個の D0-brane 上のスカラー場の理論は等価である。このような観点に立つと D2-brane の動力学をその構成要素である無限個の D0-brane を用いて解析する事が可能である。本学位論文の第 5 章において、D0-brane の行列配位を用いて D0/D2-brane 系のタキオン凝縮の解析を行い、D0-brane の溶解過程を記述する。この研究は非可換 D-brane と低次元 D-brane の等価性を利用した D-brane の動力的な研究方法を実証している。

一様磁場中の D2-brane 上の D0-brane は、D2-brane 上の非可換ゲージ理論のソリトン解として記述される。このような D0-brane はタキオンモードの存在の為に不安定であり、タキオン凝縮を起こすことにより D2-brane へ溶解し一様な D0 電荷を形成する。D2-brane 上の非可換ゲージ場は D0-brane の無限次元行列配位と対応しているため、本学位論文の第三章において導出された D0-brane の閉弦への結合を用いてエネルギー運動量テンソル・基本弦電荷・D-brane 電荷の密度分布を引き出す事が出来る。これらの分布を具体的に評価する為に、任意のモードに対するべき展開で電荷分布を計算する方法を与える。また運動方程式を数値的に解くことにより、エネルギー・D0-brane 電荷の密度分布が時間発展とともに拡散していく事を示す。

この系のタキオンモードの質量二乗は α'^0 オーダーであるため低エネルギー有効理論による記述がタキオン凝縮の全過程において正しい結果を与える。またタキオン凝縮の過程で 0-0, 0-2, 2-0 弦は 2-2 弦へと変化するため自由度消滅の困難を伴わない。さらに D2-brane 上の平面を有限な範囲に制限する事により、無限個の自由度から有限個を取り出す事が出来る。この様にして取り出された有限自由度を用いた解析結果は D0-brane の拡散が制限された領域の境界を越えるまで有効であり、領域を無限大に広げ自由度を無限個に戻す極限を取る事によって、解析結果が有効である時間を長くする事が可能である。この様に D0/D2-brane 系のタキオン凝縮は non-BPS D-brane の消滅に伴った困難を回避しており、タキオン凝縮の研究の観点からも有意義である。

本学位論文における D0/D2-brane 系のタキオン凝縮の解析は、複数の低次元 D-brane による高次元非可換 D-brane の形成を利用した D-brane 系の動力的な解析方法を実証している。一般の非可換 D-brane に対してもこのような解析方法が適用可能であり、低次元 D-brane 系との等価性の研究において有用であると期待される。

結論

本学位論文において以下のような結果を得た。

- 複数 D-brane 系を記述する境界状態の正統性を α'^2 の次数まで示した。
- D0-brane の行列配位を用いた非可換 D-brane の動力的な解析手法を D0/D2-brane 系のタキオン凝縮を対象として実証した。

これらの研究は、弦理論において D-brane の果たす役割のより深い理解、特に非可換 D-brane における α' 高次補正や、低次元 D0-brane 系との一般的な等価性の理解への貢献が期待される。