

論文審査の結果の要旨

氏名

高 柳 匡

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超対称性なゲージ理論に基づき記述できることがほぼ明らかになった。また逆に、このゲージ理論はいわゆる大 N 極限でさらに強結合領域のゲージ理論であるが、それが実は重力理論と双対関係にあることから、これまで取り扱いが困難であった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。この意味で、種々の曲った時空での弦理論の構造を解明することはますます重要なテーマの一つになっている。

本論文では、これらの発展を動機として、通称 Melvin 時空 (Melbin background) と呼ばれる特殊ではあるが時空構造とゲージ場のフラックスが絡み合った特徴的な背景時空のもとでの弦理論、なかでも特に D ブレーンの性質を詳しく解析することにより、さらなる知見を得ることを主たる目標として、以下の 3 点に焦点を当てて論じた。

1. Melvin background のもとでの II 型閉弦理論を正確な取り扱いが可能な orbifold 上の共形場理論との関係を明らかにすること。これに関しては、Russo-Tseytlin による先行する研究に基づき、 C/Z_N orbifold 共形場との関係を具体的な分配関数の計算により明らかにした。
2. 通常の Melvin background は、いわゆる NS-NS 場や R-R 場のフラックスチューブを伴った D ブレーンで超対称性を破るが、フラックスを高次元に拡張することにより超対称性を保った構成を与えた。
3. 上で構成した自由共形場理論に基づき、Melvin background のもとでの弦理論の構造を D ブレーンをプローブとして調べた。特に、D ブレーン上に存在するゲージ場のフラックスにより、D ブレーンの複合状態が束縛状態として拡がりを得て安定化する新しい機構を解明した。

項目 2 および 3 の結果は、本論文提出者の論文によって初めて明らかにされた結果である。

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の発展と関係させて簡潔に論じた後、Melvin 背景時空の特徴と、それに関してこれまで弦理論においてなされた主要な研究のうち本論文に直接関係する仕事を紹介されている。

第 2 章は、第 3 章以降への準備として、Melvin background 計量が導入され、D ブレーン状態の構成、超対称性の破れ、また、そのことに基づいて予想されている type II と type 0 の弦理論の間の双対性の要点が議論されている。

第 3 章では、まず、NS-NS 場を加えた Melvin background のもとでの弦理論が正確に解けることを示した Russo-Tseytlin による先行する結果をレビューし、T 双対関係や粒子スペクトルの構造を論じた後、light-cone の Green-Schwarz 定式化により分配関数の精密な計算が行われている。

続いて第 4 章で、本論文の最初の主要結果である、 C/Z_N orbifold 共形場による前章で導出された分配関数の解釈を論じる。フラックスの強さ (q) とコンパクト化の半径 (R) が関係 $qR = k/N$ (k, N は互いに素な整数) のときには、前章で導出した分配関数が C/Z_N orbifold 共形場のものと R がゼロや無限大の極限で正確に一致することが示されている。また、本章の最後では、超対称性の破れによって生ずる閉じた弦のタキオン状態、およびその凝縮機構に関する興味深い予想を展開している。

第 5 章では、前章で論じた通常の Melvin background を高次元に拡張することによって導入されるパラメタの自由度を利用すれば、超対称性を保つことが可能であることが指摘され、その具体的な例が構成されている。さらに、前章までと同様にして、分配関数は ALE 多様体の orbifold に対応する共形場の理論によって記述できることが示されている。さらに超対称性の存在を裏付ける事実として分配関数が恒等的にゼロであることが確かめられている。

これらの議論の後、第 6 章と第 7 章において Melvin background の性質を D ブレーンをプローブとして調べるといふ主要テーマに進む。まず D ブレーンの閉じた弦の状態 (境界状態、boundary state) としての定式化を第 6 章で与える。具体的には、第 3 章で議論された自由共形場理論により D ブレーンの境界状態をいわゆる Cardy 条件を満たすという要請に基づき構成し、orbifold の場合の境界状態との比較を行い、D ブレーンが前章で示された orbifold との関係と調和する振る舞いをすることを確かめている。たとえば、D0 ブレーンは単独では原点にしか静的には存在できないが、NS-NS 場の強さに対応するパラメタ β が $\beta\alpha'/R = k/N$ を満たすときには、D0 が N 個集まることにより原点から連続的に静的な意味で移動できることを示している。

続いて、自由場表現と Melvin 計量との関係を用いて、もとの Melvin background の立場からの D ブレーンの解釈が論じられる。特に、自由場表現で得られた原点から移動できる N 個の複合 D0 状態は、Melvin 計量の座標に対応する時空的な解釈の立場では、 N 個の D0 ブレーンと k 個の D2 ブレーンの束縛状態とみなし得ることを T 双対性を用いて示

している。このとき、時空のトポロジ的な性質は自明であるので、系の安定性を保証する機構が何かは興味深い問題である。第7章において、この安定性の機構についての考察がなされている。D ブレーンの有効理論として知られているいわゆる DBI 作用を用いた半古典的な解析により、安定化は D ブレーン上のゲージ場のフラックスと NS-NS の B 場のフラックス ($H = dB$) の存在によることが示されている。最後に、この機構と他の非自明な背景のもとでの D ブレーンの性質との比較や、高次元 Melvin background への拡張を論じている。終章では、本論文の主要な結果を要約し閉弦のタキオン凝縮への応用等、今後の可能性を論じて論文を終えている。

以上のように、本論文は Melvin background のもとでの弦理論の詳細な分析を行って、非自明な背景時空のもとでの弦理論のふるまい、特に D ブレーンの性質に関して多くの有用な新知見を与え、博士論文として高水準の内容を備えている。

なお本論文の第3章以下の結果はいずれも上杉忠興氏との共同研究に基づいているが、論文提出者が主導的に行った研究であり、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。