

氏名	ひやく たけ よし ふみ 百 武 慶 文
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2440 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 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	Dielectric 効果および Myers 効果による D-branes の解析

論文調査委員 (主 査) 教 授 二 宮 正 夫 教 授 川 合 光 助 教 授 國 友 浩

論 文 内 容 の 要 旨

重力の量子論として提唱された超弦理論は、現在では重力理論と場の理論を解析する土台として活発に研究されている。そしてこのような研究の背景には、ディリクレ膜 (D-brane) と呼ばれる高次元空間に広がりを持つ物体が重要な役割を果たしている。D-brane は重力理論ではソリトンの物体として記述されるが、一方でその世界体積上には場の理論が構成される。主論文 1 は D-brane の世界体積上の場の理論を様々な背景時空の下で解析し、D-brane の興味深い特徴を引き出している。特に D0-brane から、閉弦、非 BPS D1-brane および D2-brane のような一見全く異なる自由度を構成している点がこの論文の特色である。

論文の 2 節から 4 節までは D-brane の性質に関する詳細なレビューである。まず 2 節では、D-brane の世界体積上の有効理論 (ボゾン部分のみ) を構成しており、その手順を図示すると以下のように表される。

D0-brane 作用

↓ T 双対性, 共形不変性, ゲージ不変性

D p -brane 作用 ($p=1, \dots, 9$)

↓ 非アーベリアン化

M 枚重なった D9-brane 作用

↓ T 双対性

M 枚重なった D p -brane 作用 ($p=0, 1, \dots, 8$)

すなわち最も簡単な D0-brane の作用を出発点として、T 双対性、世界体積上での共形不変性およびゲージ不変性と無矛盾となるように一般の D p -brane の作用を構成している。そして得られた D p -brane の作用は Born-Infeld 型と Chern-Simons 型の作用の和で表される。Born-Infeld 作用を平坦な時空のまわりで展開すると、10次元時空の超対称 Yang-Mills 理論を ($p+1$) 次元に次元削減して得られるボゾン部分の作用と同じ作用が得られ、また Chern-Simons 作用は D-brane と Ramond-Ramond ポテンシャルとの結合項を表している。

3 節では D-brane と反 D-brane の対の系、あるいは非 BPS D-brane の系におけるタキオン凝縮機構について議論しており、具体的に II B 型超弦理論において時空を埋め尽くす D9-brane と反 D9-brane の対の系を考察している。これら D9-brane と反 D9-brane の間に張る開弦の振動モードからは負質量の場に相当するタキオン場が現れるが、これは場の理論の真空が不安定な状態にあることを意味する。従ってタキオン場は凝縮を起し、その結果 D9-brane と反 D9-brane は完全に対消滅して II B 理論の真空あるいは D7-brane のような空間次元の低い D-brane が生成される。タキオン凝縮は超弦理論にどのような D-brane が存在するかを分類する手段にもなり特に K 理論との対応関係を見出すことができる。また 5 節では、タキオン凝縮機構は D-brane の幾何の変形過程で起こる現象である、という観点から D2-brane と M 個の D0-brane の束縛状態の系の安定性を議論している。

4節は D2-brane と M 個の D0-brane の束縛状態の系において見られる、球状の配位の dielectric 効果および Myers 効果についてレビューしている。これは電磁気学における誘電効果に相当し、一様 R-R 外場の下に置かれた D2-brane と M 個の D0-brane の系は球状に膨らんで安定になるという現象である。興味深いことに、この現象は D2-brane の作用から解析することもでき (dielectric 効果, dielectric D2-brane), また M 個 (M は十分大きいとする) の D0-brane に対する作用から同じ結果を再現することもできる (Myers 効果)。従って Myers 効果を利用することで、M 個の D0-brane の作用から D2-brane の自由度を構成することが可能となる。なお giant graviton と呼ばれる、11次元の $AdS_7 \times S^4$ の背景時空において球状に膨らんで運動する M2-brane についても解説しているが、これは電磁気学において一様磁場中を運動する電気双極子に相当する。

5節では Myers 効果を利用して、II A 型理論の不安定な非 BPS D1-brane を構成している。まず球状の dielectric D2-brane は空間 3 次元中 (x^{1-3}) で膨らんでいるが、このうち x^3 空間を周期 f でコンパクト化した系を考えよう。周期 f を小さくしていくと、やがて球状の dielectric D2-brane はコンパクト化された空間に収まり切れなくなる。従ってその過程ではタキオン凝縮機構が生じ、D2-brane は被覆空間で見てシリンダー状の配位に遷移すると予想される。このタキオン凝縮の過程を追うことは一般には困難であるが、この論文では凝縮後の準安定な配位を具体的に構成することで、この過程の際に D0-brane が放出されることを予想している。そしてこの現象を双対な描像である Myers 効果の側から再構成しており従って準安定な状態にあるシリンダー状の D2-brane を M 個の D0-brane の作用から構成することに成功しているといえる。(ただし数値計算に拠る部分が多い。)

6節では、N 枚重なった NS5-brane の背景時空における D2-brane 等の dielectric 効果および Myers 効果について解析し、特に M 個の D0-brane の自由度から閉弦の自由度を構成している。N 枚の NS5-brane 背景時空は 11 次元時空の理論である M 理論に持ち上げることができ、 x^{11} 方向に一定間隔で N 枚ずつ並んだ M5-brane と見なすことができる。このような M5-brane の背景時空において、 x^{11} 方向に関して巻き付数と運動量を持つトーラス状に膨らんだ M2-brane の運動を解析すると、これは背景時空のフラックスによって有限サイズに広がって安定になることが分かる。この系を II A 型超弦理論で解釈すると、トーラス状に広がる D2-brane に電束と磁束が存在する状態に見える。このようなトーラスは空間 \mathcal{G} 中の配位であるが、運動方程式から電束に沿うサイクルが大きく広がり、それと比べてもう一つのサイクルは十分小さいことが分かる。ここで電束の本数は閉弦の本数に対応する量子数であり、磁束の本数は D0-brane の数に対応する量子数であるので、安定な配位はほぼ閉弦状であるといえる。そしてこのような閉弦は M 個の D0-brane との束縛状態なので、これを Myers 効果の側から解析することもでき、実際に M2-brane 作用あるいは D2-brane 作用から得られるハミルトニアンを M 個の D0-brane 作用から完全に再現することができる。また特に閉弦の本数に対する量子化条件を行列によって書き下すことに成功している。

以上がこの論文の大筋であるが、まとめると dielectric 効果および Myers 効果を通して M2-brane, D2-brane, 閉弦, 非 BPS D1-brane および D0-brane の間の関係を調べた。II A 理論の物体である D2-brane, 閉弦, 非 BPS D1-brane および D0-brane は特に M 理論では M2-brane の様々な配位に対応した状態であり、これらの物体間には密接な対応関係があると期待されるが、この論文では特に最も簡単な D0-brane の自由度からその他の自由度を再現することに成功している。

論文審査の結果の要旨

申請者は、最近超弦理論において発見されたソリトンのようなディリクレ膜 (D-brane) と呼ばれる物体が、超弦理論に及ぼす非摂動的な効果を研究した。D-brane は高次元の空間に拡がりを持ち、その世界体積上にある種の場の量子論が構成される。このような場の理論を色々な背景時空がある場合に分析し、D-brane の重要な性質を見出すことが、この主論文の目的である。実際申請者は、D0-brane から開いた弦や非 BPS D1-brane, 更には D2-brane の自由度を構成することに成功した。

論文の 2 節から 4 節までは D-brane の性質に関する詳細なレビューである。まず 2 節では、D-brane の世界体積上の有効理論 (ボゾン部分のみ) を構成する。すなわち最も簡単な D0-brane の作用を出発点として、T 双対性, 世界体積上での共形不変性およびゲージ不変性と無矛盾となるように一般の D_p -brane の作用を構成している。そして得られた D_p -brane

の作用は Born-Infeld 型と Chern-Simons 型の作用の和で表される。Born-Infeld 作用を平坦な時空のまわりで展開すると、10次元時空の超対称 Yang-Mills 理論を $(p+1)$ 次元に次元削減して得られるボゾン部分の作用と同じ作用が得られ、また Chern-Simons 作用は D-brane と Ramond-Ramond ポテンシャルとの結合項を表している。

3節では D-brane と反 D-brane の対の系、あるいは非 BPS D-brane の系におけるタキオン凝縮機構について議論しており、具体的に II B 型超弦理論において時空を埋め尽くす D9-brane と反 D9-brane の対の系を考察している。これら D9-brane と反 D9-brane の間に張る開弦の振動モードからは負質量の場に相当するタキオン場が現れるが、これは場の理論の真空が不安定な状態にあることを意味する。従ってタキオン場は凝縮を起こし、その結果 D9-brane と反 D9-brane の対は完全に対消滅して II B 理論の真空あるいは D7-brane のような空間次元の低い D-brane が生成される。タキオン凝縮は超弦理論にどのような D-brane が存在するかを分類する手段にもなり、特に K 理論との対応関係を見出すことができる。また5節では、タキオン凝縮機構は D-brane の幾何の変形過程で起こる現象である、という観点から D2-brane と N 個の D0-brane の束縛状態の系の安定性を議論している。

4節は D2-brane と M 個の D0-brane の束縛状態の系において見られる、球状の配位の (dielectric 効果および Myers 効果) についてレビューしている。これは電磁気学における誘電効果に相当し、一様 R-R 外場の下に置かれた D2-brane と M 個の D0-brane の県は球状に膨らんで安定になるという現象である。興味深いことに、この現象は D2-brane の作用から解析することもでき (dielectric 効果, dielectric D2-brane), また M 個 (M は十分大きいとする) の D0-brane に対する作用から同じ結果を再現することもできる (Myers 効果)。従って Myers 効果を利用することで、 M 個の D0-brane の作用から D2-brane の自由度を構成することが可能となる。なお giant graviton と呼ばれる、11次元の $AdS_7 \times S^4$ の背景時空において球状に膨らんで運動する M2-brane についても解説しているが、これは電磁気学において一様磁場中を運動する電気双極子に相当する。

5節では Myers 効果を利用して、II A 型理論の不安定な非 BPS D1-brane を構成している。まず球状の dielectric D2-brane は空間 3次元中 (x^{1-3}) で膨らんでいるが、このうち x^3 空間を周期 f でコンパクト化した系を考えよう。周期 f を小さくしていくと、やがて球状の dielectric D2-brane はコンパクト化された空間に収まり切れなくなる。従ってその過程ではタキオン凝縮機構が生じ、D2-brane は被覆空間で見てシリンダー状の配位に遷移すると予想される。このタキオン凝縮の過程を追うことは一般には困難であるが、この論文では凝縮後の準安定な配位を具体的に構成することで、この過程の際に D0-brane が放出されることを予想している。そしてこの現象を双対な描像である Myers 効果の側から再構成しており、従って準安定な状態にあるシリンダー状の D2-brane を M 個の D0-brane の作用から構成することに成功しているといえる。(ただし数値計算に拠る部分が大きい。)

6節では、 N 枚重なった NS5-brane の背景時空における D2-brane 等の dielectric 効果および Myers 効果について解析し、特に M 個の D0-brane の自由度から閉弦の自由度を構成している。 N 枚の NS5-brane 背景時空は11次元時空の理論である M 理論に持ち上げることができ、 x^{11} 方向に一定間隔で N 枚ずつ並んだ M5-brane と見なすことができる。このような M5-brane の背景時空において、 x^{11} 方向に関して巻き付数と運動量を持つトーラス状に膨らんだ M2-brane の運動を解析すると、これは背景時空のフラックスによって有限サイズに広がって安定になることが分かる。この系を II A 型超弦理論で解釈すると、トーラス状に広がる D2-brane に電束と磁束が存在する状態に見える。このようなトーラスは空間 S^3 中の配位であるが、運動方程式から電束に沿うサイクルが大きく広がり、それと比べてもう一つのサイクルは十分小さいことが分かる。ここで電束の本数は閉弦の本数に対応する量子数であり、磁束の本数は D0-brane の数に対応する量子数であるので、安定な配位はほぼ閉弦状であるといえる。そしてこのような閉弦は M 個の D0-brane との束縛状態なので、これを Myers 効果の側から解析することもでき、実際に M2-brane 作用あるいは D2-brane 作用から得られるハミルトニアンを M 個の D0-brane 作用から完全に再現することができる。また特に閉弦の本数に対する量子化条件を行列によって書き下すことに成功している。

以上がこの論文の大筋であるが、まとめると dielectric 効果および Myers 効果を通して M2-brane, D2-brane, 閉弦, 非 BPS D1-brane および D0-brane の間の関係を調べた。II A 理論の物体である D2-brane, 閉弦, 非 BPS D1-brane および D0-brane は特に M 理論では M2-brane の様々な配位に対応した状態であり、これらの物体間には密接な対応関係があ

ると期待されるが、この論文では特に最も簡単な D0-Brane の自由度からその他の自由度を再現することに成功している。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

主論文およ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した結果、合格と認めた。