

論文の内容の要旨

論文題目: Open Superstring Field Theory Applied to Tachyon Condensation

(開いた超弦の場の理論とそのタキオン凝縮への応用)

氏名 大森 一樹

弦の場の理論は、弦理論を時空でのゲージ対称性に基づいて非摂動的に定式化しようという試みである。しかしその定式化がなされて以来、非摂動領域での妥当性については疑問視されてきた。それに対し、近年のタキオン凝縮の問題への応用を通じて、開弦の場合に限ってはDブレーインの崩壊という非摂動的現象を正しく記述しているのではないかと思われるようになってきた。本論文では、開いた超弦の場の理論の定式化と、そのタキオン凝縮の問題への応用について議論する。

Dブレーインとは、弦理論においては開弦の端点が移動することのできる超曲面として定義される。ボソンの弦理論においてDブレーインを考えると、その上の開弦のスペクトル中にはタキオンモードが含まれることがわかる。A. Sen は、このタキオンがDブレーインの不安定性を表していると考え、以下の予想を行った：

- (1) タキオンのポテンシャルには極小点が存在し、そこでは負のエネルギー密度がDブレーインのテンションを相殺する。
- (2) タキオンが凝縮した後に残る真空（以下タキオン真空と呼ぶ）のまわりには開弦の自由度がなく、閉弦理論の真空と同一視される。
- (3) 不安定なDブレーイン上で lump 解を構成すると、それは低い次元のDブレーインを表す。

この予想は、レベルトランケーションと呼ばれる近似法を用いることによって弦の場の理論の枠内で示されてきた。しかし、タキオン真空を表す厳密解は未だ見つかっていない。そこで、Rastelli, Sen, Zwiebach らは逆にタキオン真空を直接記述する理論の形を提案し、そこでDブレーンに対応する解を構成しようとした。このタキオン真空のまわりの弦の場の理論 (vacuum string field theory, 以下 VSFT と呼称) では、作用に現れる運動項がゴースト変数のみで書かれると仮定する。この仮定により、運動方程式は物質部分とゴースト部分に分離し、しかも物質部分の方程式は $*$ 積の下で2乗すると元に戻るという射影演算子によって満たされることがわかる。実際、そのような弦の場の配位が厳密に構成され、それがDブレーンを表しているという証拠が提示されてきた。このように、ボソンの弦理論における不安定なDブレーン系の崩壊についてはかなりの理解が得られたが、近年ではさらにその時間発展に関する研究もなされるようになってきた。この研究は、弦の場の理論ではなく、主に境界をもつ共形場理論 (boundary conformal field theory, BCFT) を用いて進められてきたが、この方法ではバルクに存在する閉弦との相互作用を直接取り扱うのが困難である。そこで、ここでは閉弦と開弦の両方を力学的な自由度とみなす開-閉弦の理論においてDブレーンの崩壊がどのように記述されるかを考察し、さらに簡単な場の理論的モデルにおいてDブレーンが閉弦に崩壊していく様子を表す解を具体的に構成する。

これまではボソンの弦の場合における研究結果をまとめてきたが、以下はこれを超弦の場合に拡張することを考える。RNS 形式と呼ばれる超弦理論の定式化においては、ある一つの物理的状態に対応する頂点演算子が無数に存在し、picture という量子数によってラベルされる。超弦の場の理論を定義する際には、弦の場がどの picture に属するかを指定しなくてはならない。Witten は初め、NS セクターの弦の場を -1 -picture にとって理論を定義した。この場合、非自明な作用を構成するためには3次の相互作用項に picture-changing operator を挿入しなくてはならないことがわかる。ところが、この理論を用いて弦の散乱振幅を計算しようとする、picture-changing operator 同士が1点で衝突し、発散を生じるという問題点が指摘された。その後、NS セクターの弦の場を 0 -picture にとるように理論を変更すれば作用が3次であるという特徴を保ったまま上記の発散の問題が解決できるということが提案された。この理論は今日 modified cubic superstring field theory と呼ばれている。この理論では、少なくとも形式的には容易に R セクターの弦の場も導入することができ、作用が10次元時空における超対称変換の下で不変であることも示される。しかし、この理論では2次の運動項にも picture-changing operator を挿入しなくてはならず、また慣習的なものとは異なる 0 -picture の場を使用しているため、この理論が摂動的な超弦理論の結果をうまく再現しているかどうかは自明ではない。ここでは、NS massless sector について詳しく調べた。その結果、通常の Maxwell 作用を再現するためには全ての場を完全に off-shell にしたままではだめで、いくつかの補助場を積分しなければならないということがわかった。ゲージ場も含めて全ての場を完全に on-shell にすると、物理的状態は -1 -picture のものと一致するということを付言しておく。

さらに、この理論を GSO(-) セクターを含むように拡張することによって超弦の場合のタキオン凝縮の問題を調べることができる。この理論にレベルトランケーション法を適用して真空解を探すと、そのエネルギー密度は最低次の段階で予想値のおよそ 97.5% を再現するが、近似の精度を上げていってもなかなか値が収束していかないということがわかった。この予想外の振舞いは、弦の場を慣例的ではない 0-picture にとっていることと関連しているのではないかと思われる。さらに、超弦理論のタキオンポテンシャルは 2 重に縮退した真空を持つため、キンク的な配位を持った解が存在し、それが 1 次元低い安定な BPS D ブレインを表しているということが予想されている。ここでは実際にそのような解が存在し、そのエネルギー密度が予想されている BPS D ブレインのテンションに一致するということが最低次の近似で示した。

一方、Berkovits は、modified cubic theory でも picture-changing operator に伴う問題は解決されていないと考え、picture-changing operator を全く使わずに作用を書き下す方法を提案した。この理論では、作用は無限に多くの相互作用項を含んでおり、cubic 理論に比べて非常に複雑な形となっている。さらに、この理論に R セクターの場を取り入れることは容易ではなく、時空の超対称性の構造もよくわかっていないが、タキオン凝縮の過程では R セクターの場が非零の真空期待値を獲得しないので、NS セクターに限って議論することが可能である。この理論でのタキオン真空解の性質は比較的良好に調べられており、そのエネルギー密度は近似の精度を上げるにつれて予想値に向かって収束していくということが示されている。私はこの理論におけるキンク解について調べ、最低次の一つ上のレベルで予想される D ブレインに対応する解が存在することを確かめた。

従来、これら 2 つの理論は全く異なるものであり、状況証拠から Berkovits の理論の方が正しく、modified cubic 理論は誤りであると考えられてきた。それに対し、私はこれら 2 つの理論が実は両方とも（ある範囲内では）正しく、何らかの関係があるという可能性について調べた。その証拠として、例えば、各々の理論で古典解を探すときには拘束条件付きの運動方程式を解くことになるが、それらの方程式の集合は両方の理論で同じであるということが挙げられる。また、どちらの理論も正しい散乱振幅を与えるということも示されている。もしこれら 2 つの理論が両者とも妥当であるということがわかれば、開いた超弦の場の理論に対して何らかの双対な記述が得られたことになり、興味深いと思われる。

私はさらに、上で述べた VSFT の超弦の場合への拡張を試みた。その動機としては、ボソンの弦の場合にそうであったように、超弦でも D ブレインに対応する古典解が解析的に求まることが期待されるというだけでなく、超弦特有の現象、例えば不安定な D ブレインの崩壊に伴う時空の超対称性の回復の機構などが開弦の場の理論の立場から調べられるのではないかと期待がある。私は超弦の場合のタキオン真空に対して予想される性質と、ボソンの弦のときに提案された処方箋を用いて、ゴースト変数のみで書かれた運動項の具体的な形を提案した。しかし、この理論において D ブレインに対応する古典解は未だ構成されていない。その上、この理論に対して

レベルトランケーションを適用すると、予想される解がきちんと構成できないという結果になった。これは、ゴースト運動項の仮定が超弦の場合には正しくないということを表しているのかもしれない。

弦の場の理論におけるこれからの課題としては、

- 今のところ開弦と閉弦の間の相互関係 (open-closed duality など) がはっきりしていないということ、
- 閉弦のタキオン凝縮はまだよく理解されていないということ、
- 閉じた超弦の場の理論の定式化とその解析、

などが挙げられる。