

論文内容の要旨

論文題名 Boundary states for rolling D-branes in NS5-background
(NS5 ブレイン背景場における D ブレインの境界状態)

氏名 高柳 博充

時間発展する背景場中での弦理論の研究は、初期宇宙論などへの応用は勿論、我々の量子重力や量子宇宙論に対する概念的な理解が深まる事にも繋がる点で非常に重要な研究テーマである。しかしそのような背景場中での弦理論の直接的な解析、つまり弦の世界面を用いた解析、は非常に困難であるため、多くの場合は有効場の理論での解析に留まっている。その中で(平坦な時空中での)非 BPS な D ブレインの動的な崩壊過程は、Sen が与えた弦の世界面での定式化がきっかけとなり近年詳細に研究された。非 BPS な D ブレインは開弦のタキオンを含むため不安定で、開弦のタキオン凝縮を起こすことで崩壊するが、その様子は静的な D ブレインである $SU(2)$ "境界状態" (世界面を用いた弦理論中で D ブレインを記述するもの)のウィック回転で記述される。

一方曲がった時空中での D ブレインや弦の時間発展はさらに興味深い問題だが、その中で NS5 ブレインへ向かって落ちてゆく D ブレインの時間発展、つまり NS5 ブレインと D ブレインが束縛状態を作る動的な過程は非常に興味深い。というのは、近年の Kutasov による D ブレインの DBI 有効作用を用いた解析によると、NS5 ブレインへ落ちてゆく D ブレインの時間発展と前述の非 BPS な D ブレインの崩壊過程との間に類似性を見出せるからである。具体的には、NS5 ブレインと D ブレインの間の距離と開弦のタキオンを同一視することで両者の有効作用が一致する。つまり、この落ちてゆく D ブレインは開弦タキオン凝縮の幾何

的な記述となっていることが期待できる。そしてもしこの幾何的な記述が正しければ、それを用いて開弦のタキオン凝縮の理解がさらに深まることが期待される。しかしタキオンの質量スケールはストリング長の逆数なので、厳密にはタキオンは有効作用で扱えず弦理論で扱わなければならない。そのため、この幾何的な記述が本当に正しいかどうかを世界面を用いた弦理論で確かめる必要がある。

そこでこの博士論文では NS5 ブレイン背景場中で落ちてゆく D ブレインの時間発展を D ブレインの境界状態を用いて調べた。NS5 ブレイン背景場上の弦理論は 5+1 次元のミンコフスキー時空と $N=2$ 超対称リウビル理論, $N=2$ 超対称ミニマルモデルの直積で記述される。今回境界状態を構成する上で非常に重要なのは、この落ちてゆく D ブレインも今までに知られている静的な D ブレインのウィック回転で記述することができる点である。今回の議論で本質的なのは動径方向と時間方向の二次元方向であるが、D ブレインの古典的な軌道をウィック回転するとヘアピン状の D ブレインとなる。ウィック回転後の(ユークリッド)二次元方向は $N=2$ リウビル理論で扱われるが、確かに $N=2$ リウビル理論にはそのような形のブレインが存在していて、“クラス 2”ブレインと呼ばれているものがまさにそれであることを発見した。一つの境界状態は理論の一つの表現に相当しているが、このクラス 2 ブレインは $N=2$ リウビル理論の連続表現に相当している。通常リウビル理論において、境界状態の波動関数は運動量空間で議論されるため一見分かりにくいだが、フーリエ変換で位置空間移ると確かに波動関数はヘアピン状の D ブレインのある場所にピークを持つ波束となっていることがわかった。さらに古典極限,つまり NS5 ブレインの数を無限大とする極限,の下ではこの波動関数の波束が狭まり、デルタ関数となって完全に一致する。

後はこのクラス 2 ブレインの(逆)ウィック回転を考えればよい。しかし、このクラス 2 ブレインの波動関数を単純に運動量空間でウィック回転をすると物理的でないものになってしまう。というのは、その様にして得られた波動関数は(閉弦の)紫外発散を持つからである。これは位置空間の波動関数に実はヘアピンの位置をしている階段関数が掛かっている事に起因する。階段関数は解析関数では無いためこれが単純なウィック回転を妨げている。そもそも NS5 へ落ちてゆく D ブレインはヘアピン D ブレインの位置空間でのウィック回転であったので、今回の波動関数も位置空間でウィック回転をするべきである。以上を踏まえて、位置空間での波動関数から階段関数を取り去ってウィック回転したものが NS5 に落ちてゆくブレインの波動関数であると提唱した。このように構成した波動関数は確かに落ちてゆくブレインの軌跡にピークを持った波束となっていて、さらにその波動関数を持つ境界状態から構成されるエネルギー運動量テンソルは確かに古典極限で低エネルギー有効作用から得られる結果と一致するので、この提唱は妥当である。提唱された波動関数を逆フーリエ変換で運動量空間に戻すと、運動量空間で単純にウィック回転したものに対して収束因子が掛かったものとなっていて紫外領域での振る舞いを物理的なものとして

いることがわかった。

次に得られた境界状態を用いて、NS5 に落ちてゆく D ブレインから (制動放射のため) 放出される閉弦の分布を調べた。これは非 BPS ブレインの崩壊に対する Lambert, Liu, Maldacena の同様な解析と比較することで、前述の Kutasov の提唱した幾何的な記述の弦理論レベルでの妥当性を調べるのが動機である。Lambert, Liu, Maldacena の解析は、非 BPS ブレインの崩壊において放射確率は弦の質量が高くなるに従い指数的に減少するが、閉弦の状態密度が指数関数的に増えるのでそれらが相殺しあった結果、閉弦の放射の分布が高い質量で冪発散するというものであった。この発散は境界状態で D ブレインを取り扱う際には D ブレインの質量を無限大と見なしていることに起因していて、崩壊過程で D ブレインの持つエネルギーの殆どが高い質量を持った閉弦として放射されるという結論である。一方 NS5 に落ちてゆく D ブレインから放射される閉弦の放射分布も非 BPS ブレインの崩壊の場合と全く同じ冪で発散をすることが分かった。この結果は Kutasov の提唱が弦理論レベルでも妥当であることを示している。

このように開弦タキオン凝縮の幾何的な記述に対する妥当性に関して肯定的な結果が得られたので、上記の NS5 ブレインに落ちてゆく D ブレインの解析を定数の電場を含む D ブレインの場合に拡張してより一般の場合での幾何的な記述の妥当性について調べた。その際に D ブレイン上の定数電場が T 双対性の下でローレンツ加速と等価であるという事実は、境界状態を具体的に構成する上でも、得られた結果を物理的かつ直感的に理解をする上でも非常に有用である。実際に先ほど得られた境界状態にローレンツ加速と T 双対を施して得られた境界状態の波動関数のピークは電場を含む D ブレインの軌跡と一致し、またその境界状態から構成された保存カレントは低エネルギー理論のそれと古典極限で一致することが確かめられた。よってこれは NS5 背景場中を落ちてゆく、電場を含む D ブレインの境界状態に正しくなっている。

このようにして得られた境界状態を用いて閉弦の放射分布を再び調べた。非 BPS ブレインの場合は放射確率が (T 双対で移った系では) ローレンツ加速の γ 因子の効果でより早く減少するため、放射の分布が高い質量では指数で減衰することが知られているが、NS5 に落ちてゆく D ブレインの場合も電場の効果で定性的には同じ振る舞いをする事が確かめられた。しかし定量的には放射分布が NS5 ブレインの数に依存する結果となり、厳密な意味での幾何的記述にはなっていないことがわかった。

ここで素朴におきる疑問は、放射分布はローレンツ不変量なので電場の効果で結果が変わるのは奇妙であるという点である。その疑問に対しても博士論文で考察を与えた。まず動いている D ブレインからは動いている弦が主に放出される。そのため加速方向をコンパクト

ト化して T 双対を取るとそのコンパクト化方向に巻きついた弦が主に放出されるという帰結が得られる。つまり前の議論では、この巻きついた弦が(コンパクト化の半径が無限大となって)理論から無くなるので放射分布が電場に依存することがわかる。これは動いている D ブレインの系では(T 双対性では半径が逆数となるので)コンパクト化の半径が 0 となってローレンツ対称性が完全に破れていることに相当している。このような考察の下、電場がかかっている方向をコンパクト化した場合に D ブレインからの閉弦の放射分布を再評価してみると、確かにその方向に巻きついた閉弦に主に崩壊し、NS5 ブレインの数に依存しない元の暴発散をする結果に戻ることが確かめられた。