

氏 名	いま い しん いち 井 慎 一
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2433 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	$SO \times USp$ duality cascade and $O3$ -plane in the conifold. ($SO \times USp$ 群の双対カスケード現象とコニフォールド空間上の 3 次元オリエンティフォールド)
論文調査委員	(主 査) 教 授 川 合 光 教 授 九 後 太 一 教 授 二 宮 正 夫

論 文 内 容 の 要 旨

97年末頃に Maldacena により提唱された AdS/CFT 対応は強結合の共形不変な場の理論のダイナミクスを AdS 空間上の超弦理論の低エネルギー有効理論である超重力理論から計算する手続きを与えた。さらに、この対応を共形不変性をもたない理論に拡張するための試みが多くなされ、繰り込み群の流れを重力理論の側で再現することもある程度可能になった。このような試みのひとつの目標はカラー閉じ込めを起こすことが知られる $N=1$ の超対称性をもつ Yang-Mills 理論の重力理論側での対応物を見つけることにある。この方向性の発展の一つの成果として Klebanov-Strassler によって見出された warped deformed conifold と呼ばれる IIB 型超重力理論の非常に面白い解がある。この解はコニフォールドと呼ばれる空間上の D3-brane (空間的に 3 次元の広がりをもつ膜体) と fractional D3-brane (2 種類が対になり D3-brane を形成する膜体) の系を表し、対応する場の理論は bi-fundamental 表現の物質場をもつ $SU(N+M) \times SU(N)$ 超対称ゲージ理論である。この理論のゲージ結合定数の繰り込み群の流れをみると長距離側に行くに従い $SU(N+M)$ 理論が強結合になり $SU(N)$ 理論は弱結合になっていく。 $SU(N+M)$ の力学的スケールに達するとこの理論での記述より Seiberg 双対の関係にある理論の方がよりよい記述を与える。面白いことに双対な理論は $SU(N-M) \times SU(N)$ とゲージ群のランクのみが異なる理論であり、さらに長距離側を見ていくとこのように Seiberg 双対の記述に移る過程が繰り返される。これが duality cascade と呼ばれる現象である。この duality cascade の最終段階では $N=1$ 超対称 Yang-Mills 理論と同じ universality class の理論に辿り着き閉じ込めやゲージノ凝縮などの $N=1$ 超対称 Yang-Mills 理論に特徴的な現象が起こる。Klebanov-Strassler の解はこのような豊かな繰り込み群の流れをうまく再現する面白い解となっている。

申請者は主論文において、この Klebanov-Strassler の古典解を $SO \times USp$ 型のゲージ理論に拡張した。 SO 群や USp 群は超弦理論の立場からはオリエンティフォールドと呼ばれるものを導入することで実現される。具体的にはもとの理論における、ある対称性をゲージ化することで得られる (オリエンティフォールド射影)。この対称性は超弦理論の有効理論である D3-brane 上のゲージ理論側でも、超重力理論側においても存在している。従って、これらの有効理論の対称性を詳細に調べることで有効理論の側でオリエンティフォールド射影がどのように見えるのかを決めることができる。申請者らは Klebanov-Witten らによって与えられた D3-brane 上のゲージ理論の対称性と超重力理論の対称性の対応を利用しオリエンティフォールド射影として適切な条件をみたすものを選びだしこれを決定した。このようにして決定したオリエンティフォールド射影を施して得られたゲージ理論は $SO \times USp$ 群のゲージ群をもっていることを示した。duality cascade を引き起こすには物質場の数などが適切に選ばれている必要があるが、上で得られた理論は正しく duality cascade を再現しさらに cascade の終点でのカラー閉じ込めなどの長距離での有効理論に特有の現象がおこることも確かめた。また、これらの現象が T-duality の関係にある type IIA 理論での NS5-brane と D4-brane の幾何学的配位にオリエンティフォールドを加えたものから読み取れる期待と一致することも確かめた。

ここまではゲージ理論での解析であるが、さらにゲージ理論側での作用からオリエンティフォールド射影の時空に対する

作用を読み取り、この作用の固定点が6次元の変形を受けたコニフォールド空間の頂点にある3次元球の北極と南極に位置し、オリエンティフォールドが4階反対称ゲージ場に対してそれぞれ $+1/4$ および $-1/4$ の電荷をもつことを示した。さらに Klebanov-Strassler の解がオリエンティフォールド射影のもとで不変であり $SO \times USp$ 群での解としても解釈できることを正当化する議論を与えた。これは通常の平坦な空間での D3-brane の解を被覆空間での解と解釈して3次元のオリエンティフォールドが重なっている系と見做せることと同様である。

最後に、オリエンティフォールド射影がある条件を満たす場の理論の対称性として扱う見方を応用することで、コニフォールド空間を含む一連の空間に対して同種のオリエンティフォールド射影を決定した。

論文審査の結果の要旨

Maldacena の AdS/CFT 対応のより少ない超対称性、より豊かなバラエティの理論への拡張 (Gauge/Gravity 対応) が近年発展を遂げている。このような状況のもと申請者は、コニフォールドと呼ばれる空間上での Gauge/Gravity 対応に着目した。

この空間上での D-brane 上のゲージ理論は一つの場の理論で記述することはできず、長距離を見ていくにしたがってゲージ群の大きさのみが異なる Seiberg の双対性の関係にある理論での記述を移り変ってゆく必要がある。この現象はこの文脈において duality cascade と呼ばれ非常に興味深い性質である。さらにこの cascade の最終段階ではカラーの閉じ込めやゲージノ凝縮など超対称 Yang-Mills 理論の特徴的な性質を示す。Klebanov-Strassler らにより duality cascade といった面白い繰り込み群の流れを超重力理論の側で再現するような古典解が見つけられている。

申請者らは主論文においてオリエンティフォールド射影と呼ばれる弦理論の手法を用いて、これらの現象を $SO \times USp$ 群に拡張した。オリエンティフォールド射影は幾何学的な部分と場の空間への作用から成っている。申請者らはオリエンティフォールド射影が射影を施す前の弦理論の対称性であり、弦理論の低エネルギー有効理論のレベルでも対称性としてあらわれることに着目した。そして、オリエンティフォールド射影としての自然な要請によりゲージ理論の対称性のなかからこれに相当するものを選びだした。このようにして決定した射影を施して得られた理論は $SO \times USp$ 群をゲージ群とし duality cascade を引き起こすことを確かめた。さらに申請者らは、このように決定したゲージ理論側での射影から逆に幾何学的な部分を抜きだしオリエンティフォールドの次元や数を決定した。また Klebanov-Strassler の解がこのオリエンティフォールド射影と両立し $SO \times USp$ に対応する解と解釈できること正当化した。最後にゲージ理論側での対称性としてオリエンティフォールド射影を扱うことによりコニフォールドを一般化した一連の空間に対しても同様の射影を決定した。

SO 群や USp 群は超対称性を動力学的に破るためにも必要とされるため現実的なモデルの構成への応用という観点からも申請者の仕事は意味をもつものである。また、これらの射影の決定手法や応用から申請者の弦理論全般に渡る幅広い見識と独自性を伺い知ることができる。

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。