

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740165

研究課題名(和文)弦理論における時空の描像

研究課題名(英文)Pictures of the spacetime in string theory

研究代表者

山口 哲(Yamaguchi, Satoshi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90570672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：弦理論をコンパクト化した理論において、その理論にある粒子のスペクトルを求める問題は、基本的で重要な問題である。我々はトーリックCalabi-Yau多様体中のD4-D2-D0のBPS状態の数え上げについて深く調べ、特に2次元の結晶融解モデルから導出されることを示した。また、AdS/CFT対応においては、非局所演算子と対応するブレーンについて調べた。実際、重力側とCFT側で様々な物理量を計算し、それらが一致することを示した。これらはAdS/CFT対応の有力な証拠である。

研究成果の概要(英文)：The spectrum of the particles which appears in the compactified string theory is an interesting and important problem. We investigate the spectrum of BPS particles made of D4-, D2-, D0-branes in the string theory compactified by toric Calabi-Yau manifolds. We found that this spectrum is derived by a crystal melting model in 2 dimensions. We also investigate non-local operators and corresponding branes in AdS/CFT correspondence. We calculated various quantities in the gravity side and the CFT side and find perfect agreement. They are non-trivial evidences of AdS/CFT correspondence.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：弦理論 AdS/CFT対応 M理論

1. 研究開始当初の背景

重力の理論として最も成功した Einstein の一般相対論は、重力場を時空の幾何学として記述したものである。これを量子化することは、理論物理学のもっとも大きな課題といってよい。弦理論は重力の量子論のもっとも有力な候補である。

素朴には時空の幾何学である重力を量子化すると時空に離散的な構造が現れることが期待できる。実際トポロジ的弦理論や AdS/CFT 対応において、このような離散的な構造が見え隠れしていた。

2. 研究の目的

研究の目的は弦理論に現れる時空の離散的構造をさらに追求し、量子論的な弦理論についての深い洞察を得ることである。さらに、この研究を通じて幾何学の対象としての弦理論的時空の構築に向けての第一歩を進めることである。

3. 研究の方法

3つの方向から進める。1つめの方向は位相的弦理論や BPS 状態の数え上げからのアプローチである。D6-D2-D0 結合状態の BPS 状態の数え上げは、ある場合には組合せ論的な模型「結晶融解模型」に帰着する。これを、D4-D2-D0 結合状態にも拡張した場合にどうなるかを考える。

2つめの方向は超対称場の理論での局所化の計算である。局所化とは超対称性をもつ場の理論において物理量を厳密に計算する手法である。この方法を用いて曲がった時空での場の理論の物理量を厳密に計算し、例えば AdS/CFT 対応を通じて量子重力に対する知見を得ることが出来る。

3つめの方向は AdS/CFT 対応からのアプローチである。特に CFT で非局所演算子を考えた場合には、重力側ではブレーンを考えていることになる。このブレーンの持つ電荷が離散的であることが、時空が離散的であることにつながっている。この非局所演算子の AdS/CFT 対応を通じて時空の幾何学にアプローチする。

4. 研究成果

超弦理論を Calabi-Yau 多様体でコンパクト化した場合、4次元で $N=2$ の超対称性をもつ理論になる。この理論の BPS 状態のスペクトルは、連続パラメータの変形により「壁越え」と呼ばれる飛びが生じる。特に Calabi-Yau 多様体として conifold をとって来て D6-D2-D0 の結合状態を数えると結晶の描像になる。我々は conifold で D4-D2-D0 の BPS 状態の数え上げの問題を考察した。Kontsevich-Soibelman の壁越え公式を用いることにより、様々な部屋での BPS 状態の数の生成関数を得た。特に flop を含むような壁越えを考えることにより D4 ブレーンのト

ポロジが変わる場についても BPS 状態の数がどのように変化するかを完全に計算した。これらの結果は、これまで知られていた曲率が小さい極限での結果と無矛盾であり、それらの間の量子効果が大きい部分を完全につないだ最初の結果である。

また我々は、上で得られた BPS 状態の数を出すような統計模型 (triangular partition 模型) を考案し、これが実際正しく BPS 状態の数を出すことを証明した。

この系に対して、さらに双対性を使って Conifold から平らな時空のプレーンの系にうつって基本弦の状態に焼きなおすことにより、限界安定の壁が実際に時空の中で見えるような描像を得た。この描像での BPS 状態の数は、上で得たものと完全に一致することを示した。

続いて我々は Conifold に限らず、もっと一般的なトーリック Calabi-Yau 多様体についても D4-D2-D0 の結合状態の BPS 状態の数え上げを考察した。例えば ALE 空間を考えると Affine Lie 代数の指標が現れることが分かった。これは数学で知られていた、インスタントの数え上げの場合と無矛盾である。この結果は、ALE 空間での弦理論を考えると隠れた Affine Lie 代数の対称性があることを示唆していて、とても興味深い。また、一般のトーリック多様体の場合の統計模型についても考察した。我々は D4-D2-D0 結合状態の数え上げの問題はやはり統計模型に帰着できることを示した。この統計模型は時空の離散的な構造を表しているようである。

曲がった空間での超対称ゲージ理論は、超弦理論や、2次元の共形場理論との関係から、興味深い研究対象である。我々は、Pestun による S^4 上の超対称ゲージ理論の局所化による計算を拡張し、変形のパラメータが一般的な場合に2次元の共形場理論との関係を見出すために S^4 以外の曲がった空間に関して局所化による計算を試みた。局所化に使う、Q-完全な部分の作用を計算し、性質のいい場合には、これが正定値になることを示した。

2つの共形場理論をつなぐ壁 (インターフェイス) の入った場の理論でスケール不変性を保つものをインターフェイス共形場理論と呼ぶ。我々は4次元 $N=4$ 超対称 Yang-Mills 理論においてインターフェイス共形場理論を考察し、特に試験粒子との間に働く力のポテンシャルを求めた。一方、AdS/CFT 対応においては、この量は D ブレーンを挿入したうえで、基本弦の世界面の作用で計算できる。これらと比較した結果、完全な一致を見た。これは AdS/CFT 対応の新しい証拠と言える。

我々はまた、インターフェイスとカイラル・

プライマリー演算子の期待値を計算した。一方、AdS/CFT 対応においては、この量は D ブレーンを挿入したうえで、GKPW 処方により計算できる。これらと比較した結果、完全な一致を見た。これは AdS/CFT 対応の新しい証拠と言える。また、インターフェイスの上に 't Hooft 演算子をおいたものの重力双対についても考察した。

境界をもつ場の理論は、弦理論や物性理論等、様々な場面で有用である。我々は特に 3 次元の超対称性を持つ様々な場の理論で境界を考察した。特に境界が超対称性を半分保つための条件を求め、それらの双対性における振る舞いについて調べた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

[1] K. Nagasaki and S. Yamaguchi, “'t Hooft Operators on an Interface and Bubbling D5-Branes,” *Phys.Rev. D89* (2014) 046002, arXiv:1309.3125 [hep-th], 査読あり.

[2] T. Okazaki and S. Yamaguchi, “Supersymmetric Boundary Conditions in Three Dimensional N = 2 Theories,” *Phys. Rev. D87* (2013) 125005, arXiv:1302.6593 [hep-th], 査読あり.

[3] K. Nagasaki and S. Yamaguchi, “Expectation values of chiral primary operators in holographic interface CFT,” *Phys.Rev. D86* (2012) 086004, arXiv:1205.1674 [hep-th], 査読あり.

[4] K. Nagasaki, H. Tanida, and S. Yamaguchi, “Holographic Interface-Particle Potential,” *JHEP* 1201 (2012) 139, arXiv:1109.1927 [hep-th], 査読あり.

[5] T. Nishinaka, T. Okada, T. Okazaki, and S. Yamaguchi, “Evidence for Duality of Conifold from Fundamental String,” *JHEP* 1110 (2011) 051, arXiv:1107.3660 [hep-th], 査読あり.

[6] K. Nagasaki and S. Yamaguchi, “Towards the localization of SUSY gauge theory on a curved space,” *Int.J.Mod.Phys. A27* (2012) 1250029, arXiv:1106.4975 [hep-th], 査読あり.

[7] T. Nishinaka and S. Yamaguchi, “Statistical model and BPS D4-D2-D0 counting,” *JHEP* 1105 (2011) 072, arXiv:1102.2992 [hep-th], 査読あり.

[8] T. Nishinaka and S. Yamaguchi, “Wall-crossing of D4-D2-D0 and flop of the conifold,” *JHEP* 1009 (2010) 026,

arXiv:1007.2731 [hep-th], 査読あり.

[学会発表](計 23 件)

S. Yamaguchi, “Wilson surface and AdS₇/CFT₆ correspondence,” Progress in the synthesis of integrabilities arising from gauge-string duality at KKR Hotel Biwako and Biwako-Kusatsu Campus, Ritsumeikan University, March 4-7, 2014.

S. Yamaguchi, “Wilson surface and AdS₇/CFT₆ correspondence,” Integrability, Symmetry and Quantum Space-Time at YITP, Kyoto University, January 7-9, 2014.

K. Nagasaki, S. Yamaguchi, “'t Hooft operators on an interface and bubbling D5-branes,” PASCOS 2013, Taipei, Nov. 24, 2013, Taiwan.

長崎 晃一, 山口 哲, “Young 図と泡状 D5 ブレーン解との対応,” 場の理論と超弦理論, 京都大学, 2013 年 8 月 19 日-23 日.

K. Nagasaki, S. Yamaguchi, “Bubbling D5-brane,” KIAS-YITP joint workshop 2013, “String Theory, Black Holes and Holography,” Kyoto, Jul. 03, 2013.

長崎 晃一, 山口 哲, “泡状 D5-brane と AdS/CFT 対応,” 日本物理学会 第 68 回 年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26 日-3 月 29 日.

S. Yamaguchi, “3-dimensional N=2 SUSY theories with boundary,” Yukawa International Seminar (YKIS) 2012 “FROM GRAVITY TO STRONG COUPLING PHYSICS,” Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, 15-19 Oct 2012.

岡崎 匡志, 山口 哲, “境界を持つ 3 次元超対称理論と双対性,” 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 11 日 - 9 月 14 日

長崎 晃一, 山口 哲, “Young 図と泡状 D5 ブレーン解との対応,” 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 20 日 - 9 月 23 日.

長崎 晃一, 山口 哲, “カイラルプライマリ演算子の期待値とホログラフィックインターフェイス CFT,” 基礎研究会「場の理論と弦理論」, 基礎物理学研究所, 2012 年 7 月 23 日 - 7 月 27 日.

K. Nagasaki, S. Yamaguchi, “D3/D5 system and holographic interface CFT,” Progress in Quantum Field Theory and String Theory, Osaka City University, 3-7 Apr 2012.

長崎 晃一, 山口 哲, 谷田 寛明, “D3/D5 ブレーン系とホログラフィックインターフェイス CFT,” 日本物理学会 第 67 回

年次大会,関西学院大学, 2012年3月24日 - 3月27日.

山口哲, "Holographic Interface," 行列模型とその周辺, 立教大学, 2012年2月20日 - 2012年2月21日.

K. Nagasaki, S. Yamaguchi, H. Tanida, "Wilson loop in D3-D5 system and AdS/CFT correspondence," The 6th Asian Winter School, Kusatsu Gunma, 10-20 Jan 2012.

岡崎 匡志, 山口 哲, 西中崇博, 岡田崇, "Evidence for Duality of Conifold from Fundamental String," 日本物理学会 2011年秋季大会, 弘前大学, 2011年9月16日 - 9月19日.

長崎 晃一, 山口 哲, 谷田 寛明, "D3-D5系の Wilson ループと AdS/CFT 対応," 日本物理学会 2011年秋季大会, 弘前大学, 2011年9月16日 - 9月19日.

長崎 晃一, 山口 哲, "曲がった時空上の超対称ゲージ理論の局所化について," 場の理論と弦理論, 基礎物理学研究所, 2011年7月25日 - 2011年7月29日.

山口哲, "BPS 状態の数え上げと壁越え現象," 場の理論と弦理論, 基礎物理学研究所, 2011年7月25日 - 2011年7月29日.

岡崎 匡志, 西中 崇博, 山口 哲, "ブレーン配位と BPS 状態の数え上げ," 日本物理学会 第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011年3月25日 - 3月28日.

長崎 晃一, 山口 哲, "曲がった時空での超対称ゲージ理論の局所化による厳密解," 日本物理学会 第 66 回年次大会(於新潟大学, 2011年3月25日 - 3月28日).

- 21 S. Yamaguchi, "Polynomial structure in topological string," RIMS International Conference on Noncommutative Geometry and Physics, at Kyoto, Nov. 1-5, 2010.
- 22 西中 崇博, 山口 哲, "Wall Crossing of D4/D2/D0 on the Conifold," 日本物理学会 2010年秋季大会, 九州工業大学, 2010年9月11日 - 9月14日.
- 23 S. Yamaguchi, "String theory on CY manifolds," Summer Institute 2010 (Cosmology & String), Fuji-Yoshida, Yamanashi, Aug. 4-14, 2010.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 哲 (YAMAGUCHI, Satoshi)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 90570672