

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2012

課題番号：20340048

研究課題名（和文） ゲージ重力対応と非摂動的超弦理論の構築

研究課題名（英文） Gauge-gravity correspondence and the construction of non-perturbative string theory

研究代表者

米谷 民明 (YONEYA TAMIAKI)

放送大学・教養学部・教授

研究者番号 10091521

研究成果の概要（和文）：本研究計画の目的は、いわゆる超弦理論に基づき、重力を含む自然界のすべての基本相互作用の統一理論と構築する可能性を追求することです。特に、私達は（超）重力理論（一般相対性理論）とゲージ場の量子論の対応関係について研究することを主要テーマとしています。ゲージ場の量子論は電弱相互作用および核力（強い）相互作用を記述する標準的な理論です。この困難な課題に関して、私達は様々な新しい理論的方法論や道具を開発・発展させることにより、ゲージ重力対応および弦理論の非摂動的性質に関連した多くの新知見を得ました。この成果は、物理学者の夢として長年に渡って探求されてきた量子論と一般相対性理論の統一に向けて、有用な手掛かりになることを期待しています。

研究成果の概要（英文）：The purpose of the present research project is to pursue the possibility of constructing a unified theory of all fundamental interactions including gravity, on the basis of the so-called (super) string theory. In particular, we have investigated the correspondence between (super) gravity theory (or general relativity theory) and quantum gauge theories, the latter of which constitute standard theories for describing electro-weak and nuclear (or strong) interactions. We have uncovered several new facets of this remarkable correspondence and also of non-perturbative properties of string theory by developing new theoretical methods and tools in studying this difficult question. We hope that our new findings provide important clues toward the final goal of unifying quantum theory and general relativity, which continues to be a dream of modern physicists.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超弦理論、ゲージ重力対応、Dブレーン、超重重力理論、統一理論

1. 研究開始当初の背景

重力を含む自然界の相互作用の統一理論の構築へ向けて、超弦理論が着実に発展させられてきた。特に、ここ15年ほどの成果として最も重要なのは、超弦理論から、重力理論とゲージ理論には様々な意味での対応関係が存在することが判明したことである。この発展には、本研究代表者および分担者が長年に渡り重要な貢献をしている。しかし、この対応関係の背後にあるべき何らかの普遍的原理、および対応関係の系統的な定式化、さらにその統一理論における意味の理解、などの基本的問題に関してはまだまだ謎に満ちた状況にある。

2. 研究の目的

本研究では、この対応関係の詳細をさらに追求しつつ、その本質を探ること、および、なんらかの統一的原理に基づいた定式化の方法を探ることが主な目的である。

3. 研究の方法

主に以下のような方法により研究を進めた。

(1) ゲージ重力対応のさらなる検証には、ゲージ理論の非摂動的性質と重力理論の予言の比較が必要である。そのため、ゲージ理論の計算機シミュレーションの専門家と協力し、ゲージ理論における相関関数についての数値実験によるゲージ重力対応の検証を行う(分担:米谷)。

(2) ゲージ重力対応の統一的な定式化に向けて、Dブレーンの量子場理論の構築を試みる。また、バルク側の時空の対称性をゲージ理論から導く可能性について探る(分担:米谷)。

(3) 一般の曲がった時空における超弦理論の定式化に対して弦の世界膜の共形場理論における代数的アプローチ、および重力理論側とゲージ理論側双方において可積分性による解析を詳細に進める(分担:風間)。

(4) 超対称性を持つゲージ理論の非摂動的定式化を目指して超対称性の格子時空での定式化の方法を探る(分担:加藤)。

(5) 弦理論の非摂動的な定式化に向けて伝統的に追求されてきた弦の場の理論の構造についての理解を解析的方法による探る(分担:大川、加藤)。

(6) 超対称ゲージ理論においてその非摂動的性質を調べるために有効な物理量(特に相関関数)を計算するための解析的方法を開発する(分担:奥田)。

4. 研究成果

上記研究方法に述べた項目ごとに成果の概要を簡潔にまとめる。

(1) 0+1次元最大超対称ゲージ理論と10次元IIA型超重力理論との対応関係に基づいて以前に与えた予言を、計算機数値実験で検証する研究に関して大きな成果を挙げた。重力理論側からの予言が驚くほどの高精度でゲージ理論側で成り立つことを確かめた。

(2) Dブレーンの場の理論へ向けた最初の研究報告は2007年に発表した。本研究期間中は国際会議招待講演などでこの構想を発表しただけでなく、さらに発展させるための準備的考察を進めた。特に局所的対称性の対応関係の解明に向けて、バルク側の局所ワイル変換のゲージ理論側での表現に関して着想を得た。これまで未発表であるが、現在さらに考察を進めている。

(3) 曲がった空間での超弦の取り扱いに関して、ダイナミカルな側面、フォーマルな側面の両面に関して、未解決の難問である具体的振幅の計算に向けて前進した。また、 $N=4$ 超対称ヤン・ミルズゲージ理論のあるクラスの高い共形次元とスピンを持った非BPS的な複合演算子の3点関数を、対応するGKP弦と呼ばれる弦理論の古典解および理論の可積分性を駆使して強結合領域で計算する手法を開発した。特に、これまでにわかっていなかったGKP弦の頂点関数の寄与を、演算子・波動関数対応の方法を用いて完全に取り入れることにより、非BPS 3点関数の強結合領域での計算を完成させることに成功した。

(4) 超対称格子場の理論の構築へ向けて長年障害になっている部分を明確にし、ある種のNo-Go定理およびうまくいく場合の条件の抽出に関して進展を得た。また、格子上の超対称性の実現に関して新しい条件を提示し、それを満たすモデルを構築し、超場形式の構成や局所化の方法について実行可能性を示した。

(5) 開弦の場の理論における一般の共変ゲージを、共同研究者と共に閉弦の場の理論にも拡張し、対応する場の理論極限での共変ゲージとの対応関係を同定した(加藤)。境界を持つ共形場の理論における境界条件を変える演算子を用い、Berkovits型超弦の開弦の場の理論の解析解を構成した。さらに、ゲージ固定条件を詳細に調べることにより、伝播関数を具体的に与えた。開弦の場の理論の古典解のパラメーターとその古典解が記述する境界を持つ共形場の理論のパラメーターを対応付ける手法を提案し、Siegelゲージでのマ

ージナル変形に対応する数値解に具体的に適用して、解のモジュライ空間の覆い方という長年の難問に関して精度の高い結果を得た(大川)。

(6) localization の方法を用いて超対称ゲージ理論の 't Hooft演算子の期待値の研究を進めた。さらに多様体上のゲージ理論でループ演算子の期待値を計算し、Hitchinモジュライ空間の変形量子化との関係を与えた。三次元球面上の超対称ゲージ理論に存在する非局所的演算子であるvortexループ演算子の期待値をlocalization法により計算し、双対性のもとでWilsonループ演算子と移り変わることを示した。また、ALE空間上の超対称性理論でのインスタントンの数え上げの問題を調べ、異なる計算方法の間の簡潔な関係式を見つけた。

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 28 件)

(主要なものを 13 件記載)

1 Matej Kudrna, Toru Masuda, Yuji Okawa, Martin Schnabl and Kenichiro Yoshida, "Gauge-invariant observables and marginal deformations in open string field theory," JHEP, 1310 (2013) 103(査読有)

2 Yuji Okawa, "Analytic Methods in Open String Field Theory," Progress of Theoretical Physics, 128 (2012) 1001-1060(査読有)

3 Yoichi Kazama and Shota Komatsu, Wave functions and correlation functions for GKP strings from integrability JHEP 1209, 2012, 022(査読有)

4 Gomis, J., Okuda, T., Pestun, V. Exact Results for 't Hooft Loops in Gauge Theories on S^4 . JHEP, 1205, 141, 2012(査読有)

5 Masako Asano and Mitsuhiro Kato, "Closed string field theory in a-gauge", JHEP, 1209, 2012, 121(査読有)

6 M. Hanada, J. Nishimura, Y. Sekino, and T. Yoneya, Direct test of the gauge-gravity correspondence for Matrix theory correlation functions, JHEP, 1112, 2011(査読有)

7 Tamiaki Yoneya, Towards Quantum Field Theory of D-Particles, Prog. Theor. Phys. Suppl. 188, 2011, 63(査読有)

8 T. Okuda and J. Penedones, String scattering in flat space and a scaling limit of Yang-Mills correlators, Phys. Rev. D, 83, 2011, 086001-1-086001-6(査読有)

9 Yoichi Kazama and Naoto Yokoi, Operator Formulation of Green-Schwarz Superstring in the Semi-Light-Cone Conformal Gauge Prog. Theor. Phys. 125, 2011, 265-334(査読有)

10 M. Hanada, J. Nishimura, Y. Sekino, and T. Yoneya, Monte Carlo studies of Matrix theory correlation functions, Phys. Rev. Lett. 104, 2010, 151601-1-151601-4(査読有)

11 T. Horigane and Y. Kazama, Exact Quantization of a Superparticle in AdS₅ x S⁵, Phys. Rev. D81, 2010, 045004-1-04504-22(査読有)

12 M. Asano and M. Kato, General linear gauges and amplitudes in open string field theory, Nucl. Phys. B, 2009, 348-372 (査読有)

13 M. Kiermaier, Y. Okawa, Exact marginality in open string field theory: a general framework, JHEP, 0911, 2009, 041-1-041-62(査読有)

[学会発表] (計 23 件)

(招待講演のうち、主要なものを 7 件記載)

1 Takuya Okuda, Simons Summer Workshop in Mathematics and Physics, (招待講演) "Wilson-'t Hooft operators and the 4D/2D correspondence", Simons Center for Geometry and Physics (Stony Brook), USA, 2012/8/13.

2 Takuya Okuda, Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology, (招待講演) "Techniques for exact calculations in four-dimensional SUSY gauge theories",

Kusatsu, Gunma, Japan, 2012/01/15, 17, 19

3 Takuya Okuda,

(招待講演) 4th Taiwan String Workshop, "Exact results for 't Hooft loops in gauge theories on S^4 " と "Line operators on $S^1 \times R^3$ and quantization of the Hitchin moduli space", National Chiao Tung University, Taiwan, 2011/12/16 と 2011/12/17

4 T. Yoneya,

Towards quantum field theory of D-particles (招待講演)、International workshop on String Field Theory and Related Topics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 京都 2010 年 10 月 19 日

5 米谷民明,

弦理論とは何か—回顧と展望 (特別講演)、日本物理学会第 6 5 回年次大会、岡山大学津山キャンパス、2010 年 3 月 20 日

6 T. Yoneya,

Matrix theory, supermembrane and gauge/gravity correspondence, (招待講演)、International Workshop on Membrane, Minimal Surfaces and Matrix Limits, Albert Einstein Institute, Potsdam, Germany, 2009 年 10 月 19 日

7 大川祐司,

The boundary state from open string fields (特別講演)、日本物理学会 2009 年秋期大会、甲南大学岡本キャンパス、2009 年 9 月 11 日

[図書] (計 2 件)

1 米谷民明,

「現代物理学の論理と方法」 (放送大学教育振興会) 2012, 総ページ数 292 のうち、執筆ページ 3-104, 204-241, 261-279 ページ、および全体の監修

2 米谷民明,

「力と運動の物理」 (放送大学教育振興会) 2012, 総ページ数 297 のうち、執筆ページ 3-100, 202-292

[その他]

ホームページ等

From recent research papers

<http://hepl.c.u-tokyo.ac.jp/~tam/index.html>

Recent papers

<http://hepl.c.u-tokyo.ac.jp/~tam/kazama.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米谷 民明 (YONEAYA TAMIAKI)
放送大学・教養学部・教授
研究者番号：10091521

(2) 研究分担者

風間 洋一 (KAZAMA YOICHI)
東京大学・総合文化研究科・教授
研究者番号：60144317

加藤 光裕 (KATO MITSUHIRO)
東京大学・総合文化研究科・教授
研究者番号：80185876

大川 祐司 (OKAWA YUJI)
東京大学・総合文化研究科・准教授
研究者番号：10466823

奥田 拓也 (OKUDA TAKUYA)
東京大学・総合文化研究科・助教
研究者番号：90595646