

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05406

研究課題名(和文) ゲージ理論-重力理論双対性と可積分性を用いた強結合ゲージ理論の研究

研究課題名(英文) Study of gauge theory at strong coupling from gauge-gravity duality and integrability

研究代表者

佐藤 勇二 (Sato, Yuji)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：50312799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：弦理論において発見された、重力理論とゲージ理論が同じ理論の異なった記述であるというゲージ理論-重力理論双対性により、強結合ゲージ理論は古典重力により解析可能となる。我々は、双対性とその背後に現れる可積分性を用いて超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅を解析的に評価する手法を開発してきた。本研究では、これまでの我々の研究を発展させ、強結合散乱振幅を与える可積分系の大きな化学ポテンシャルによる散乱振幅の解析的展開法を6粒子散乱の場合に完成させた。また、本研究分野の総説となる、可積分性に基づいたゲージ理論-重力理論双対性に関する著書を出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強結合におけるゲージ理論の解析はハドロンの物理など自然界の理解に大変重要であるが、摂動的な取り扱いができないため困難であり、通常は大規模な数値計算により行なわれる。我々の成果は、強結合散乱振幅を解析的に評価するこれまでの我々の研究をさらに発展させた、新たなより広い運動学的領域に適用可能な結果であると共に、強結合ゲージ理論のダイナミクスの理解へ向け新たな方向性を与えるものである。また、4次元ゲージ理論、10次元超弦理論、2次元可積分模型の間の非常に興味深い関係も示している。

研究成果の概要(英文)： The gauge-gravity duality discovered in string theory states that certain theory of gravity and gauge theory are just different facets of the same theory. This duality enables us to analyze gauge theory at strong coupling by using classical gravity. We had developed analytical methods to evaluate strong-coupling scattering amplitudes of certain supersymmetric gauge theory based on this duality and the integrability behind it. In this research, we further developed and completed a method to analytically expand the strong-coupling amplitudes in terms of the large chemical potential of the integrable model which gave the amplitudes through the gauge-gravity duality. I also published a review in this field on the study of the gauge-gravity duality based on integrability.

研究分野：素粒子論

キーワード：弦理論 ゲージ理論-重力理論双対性 可積分性 強結合ゲージ理論 散乱振幅 熱力学的ペーテ仮説

1. 研究開始当初の背景

弦理論は重力を含む素粒子の統一理論の有力な候補であり、関連する諸分野に様々なアイデアを提供しながら、世界の主要研究機関で精力的な研究が続けられている。この弦理論の主要な研究テーマの一つに、重力・弦理論とゲージ理論が同じ理論の異なった記述であるとするゲージ理論-重力理論双対性(以下、ゲージ-重力双対性)がある。ゲージ-重力双対性には様々な応用があるが、双対性の背後に可積分性が存在することが明らかとなり、超対称ゲージ理論の強・有限結合におけるスペクトルや散乱振幅の解析など新たな研究分野が拓けた。

特に、4次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は5次元反ドジッター時空中の極小曲面の面積で与えられ、さらに、この極小曲面の面積は双対性に現れる可積分性を用いて評価されることも明らかとなった。我々は、こうしたゲージ-重力双対性と可積分性に基づき、4次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅を特定の運動量配位周りで解析的に評価する手法を開発すると共に、関連する可積分系の基本的問題を解決し学際的な研究領域を開拓してきた。

2. 研究の目的

本研究は、このような我々の成果をさらに発展させ、(i) 新たな運動学的領域での強結合散乱振幅など、新たな強結合物理量の解析的評価、(ii) これらの結果に基づく自然界の相互作用の理解に重要な強結合ゲージ理論ダイナミクスの解明、(iii) ゲージ理論・弦理論・可積分系にまたがる新たな研究分野の開拓、を目指すものである。

3. 研究の方法

まず、具体的な設定として、4次元極大超対称ゲージ理論の強結合6粒子散乱振幅を解析する。そのため、ゲージ-重力双対性を通して散乱振幅を与える等質 sine-Gordon 模型と呼ばれる可積分模型の熱力学的 Bethe 仮説(TBA)方程式を模型の化学ポテンシャルが大きい場合に線形化し、模型の擬エネルギー・自由エネルギーを(質量/化学ポテンシャル)の冪により展開する展開式を導く。技術的には、単一スケール可積分系の質量-結合関係の導出で用いられる手法と同様となる。ゲージ-重力双対性に従い、これらの展開式から強結合散乱振幅の新たな解析的展開式を得る。4次元極大超対称ゲージ理論は共形不変性を持ち、散乱振幅の非自明な部分(残余関数)は散乱粒子の運動量の交差比の関数として与えられる。この交差比の値も擬エネルギーの展開式から読みとることができる。このように、可積分模型の各パラメータに対して、強結合散乱振幅と対応する交差比(運動学的配位)が定まり、新たな運動学的領域での強結合散乱振幅が得られる。得られた結果は、TBA 方程式を数値的に解いた結果と比較し検証する。また、摂動論側の結果とも比較し、新たな運動学的領域における散乱振幅の構造に関する知見を得る。

さらに、等質 sine-Gordon 模型のクロスオーバー転移、上記の解析で用いた基底状態に対する TBA 方程式だけでなく励起状態に対する TBA 方程式を用いた解析、ゲージ-重力双対性により強結合散乱振幅を与える反ドジッター時空中の極小曲面の構成やその共形幾何に基づいた解析などにより、強結合散乱振幅・強結合ゲージ理論についてゲージ理論・弦理論・可積分系にまたがる多角的な解析を進める。

4. 研究成果

上記研究方法に従い、大きな化学ポテンシャルに対する強結合散乱振幅の展開法を6粒子振幅の場合に完成させた。我々の解析的展開式により6粒子強結合散乱振幅から運動学的因子を除いた残余関数(R^6)をプロットすると例えば以下の図1のようになる。ここで、等質 sine-Gordon 模型の化学ポテンシャルを aL 、粒子の質量パラメータを mL 、 L は $L = 10^3$ とした。実線は我々の解析展開式で $(m/a)^8$ まで取り入れた結果、点は数値的に TBA 方程式を解いて得た結果である。点線は漸近的な値を示したものである。6粒子散乱の場合、残余関数は3つの独立な運動量の交差比 u_i ($i = 1, 2, 3$) の関数となるが、対応する u_i を図2のようになる(上から順に u_1, u_3, u_2)。再び、実線は解析的な展開式による結果、各点は数値的に TBA 方程式を解いて得た結果、点線は漸近的な値を示したものである。

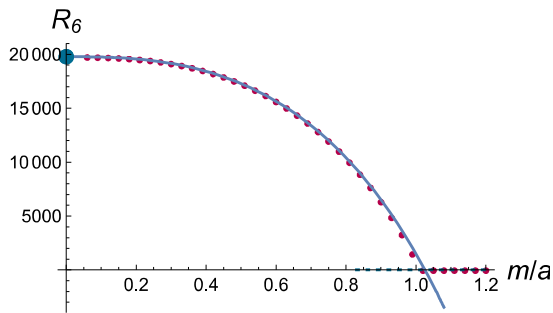


図 1 : 6 粒子残余関数

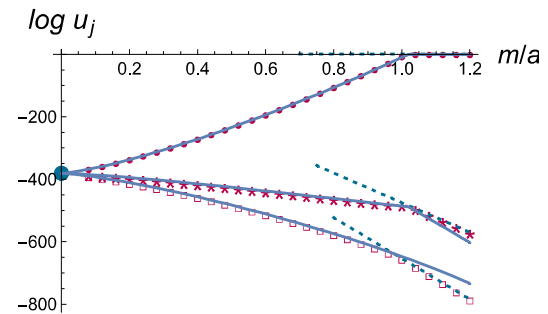


図 2 : 運動量の交差比

このように、広い運動学的な領域に渡り強結合散乱振幅が解析的に評価されていることが確かめられる。本研究以前に得られていた強結合散乱振幅では、残余関数が運動量の交差比の関数として定性的に摂動論（弱結合）側の結果と類似していることが知られていたが、摂動論側との比較を行なうと、新たな運動学的領域ではこうした類似性があまり見られないこともわかる。

これらの結果に加え、本研究では上記研究方法に従い、強結合散乱振幅、強結合ゲージ理論についてゲージ理論・弦理論・可積分系にまたがる多角的な解析を進めると共に、本研究分野の総説となる、可積分性に基づいたゲージ理論-重力理論双対性に関する著書を出版した。

我々はこれまでも、ゲージ-重力双対性と可積分性に基づき、強結合 4 次元ゲージ理論の散乱振幅を解析的に評価する独自の研究を行なってきた。本研究の成果は、このような研究を一層発展させ、より広い新たな運動学的領域に適用可能なものとなっている。強結合におけるゲージ理論の解析はハドロンの物理など自然界の理解に大変重要であるが、摂動的な取り扱いができないため困難であり、通常は大規模な数値計算により行なわれる。我々の研究は、強結合ゲージ理論のダイナミクスの理解へ向けた新たな方向性を与えるものである。また、4 次元ゲージ理論、10 次元超弦理論、2 次元可積分模型の間の非常に興味深い関係も示している。本研究での、共形幾何に基づいた反ドジッター時空中の極小曲面の解析や等質 sine-Gordon 模型の TBA 方程式の解析は、より一般的なゲージ-重力双対性、可積分模型と量子力学のスペクトルの対応に関する研究などにも発展すると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yuji Satoh, Yuji Sugawara	4. 巻 2022
2. 論文標題 Interactions of strings on a T-fold	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2022)121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Satoh, Yuji Sugawara	4. 巻 2022
2. 論文標題 Notes on a vanishing cosmological constant without Bose-Fermi cancellation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 no.5, 053B04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki	4. 巻 1808
2. 論文標題 MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2018)002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Takahiro Uetoko	4. 巻 1708
2. 論文標題 Non-supersymmetric D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2017)082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤勇二, 菅原祐二
2. 発表標題 Interactions of strings on a T-fold
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 勇二
2. 発表標題 弦理論における非幾何学的時空と宇宙項
3. 学会等名 北陸信越地区 素粒子論グループ合宿研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 勇二
2. 発表標題 素粒子物理学
3. 学会等名 福井理科教育研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Satoh
2. 発表標題 Conformal interfaces/defects and their applications
3. 学会等名 CEICO (Central European Institute for Cosmology and Fundamental Physics) seminar (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Satoh
2. 発表標題 World-sheet approaches to non-geometric backgrounds in string theory
3. 学会等名 String: T-duality, Integrability and Geometry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤克司, 佐藤勇二, 鈴木淳史
2. 発表標題 MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小路田俊子, 佐藤勇二
2. 発表標題 開弦の場の理論における conformal interface
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小路田俊子, 佐藤勇二
2. 発表標題 開弦の場の理論の古典解と conformal interface の関係
3. 学会等名 日本物理学会第 73 回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Satoh
2. 発表標題 A world-sheet approach to T-folds
3. 学会等名 New developments in AdS3/CFT2 holography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐藤 勇二	4. 発行年 2021年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 232
3. 書名 弦理論と可積分性 -ゲージ-重力対応のより深い理解に向けて-	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------