

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2017

課題番号：24540248

研究課題名(和文) 重力/ゲージ理論双対性の可積分構造に基づいたグルーオン散乱振幅の研究

研究課題名(英文) Study of gluon scattering amplitudes based on integrability in gauge-gravity (string) duality

研究代表者

佐藤 勇二 (SATO, Yuji)

筑波大学・数理解物質系・助教

研究者番号：50312799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：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重力理論/ゲージ理論双対性とその背後に現れる可積分性に基づき超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅の研究をおこなった。特に、可積分系に付随する様々な手法を用いることにより、強結合散乱振幅を解析的に評価する方法を定式化した。また、UV領域の共形摂動とIR領域での散乱理論の見方を組み合わせることにより、概念的にも新たな量子可積分モデルの解析手法を開発し、強結合散乱振幅を与える可積分モデルの厳密な質量-結合関係を導いた。これらの成果は、ゲージ理論・弦(重力)理論・可積分系にまたがる学際的な成果となっている。

研究成果の概要(英文)：The gauge/string duality states that certain gauge theories and theories of strings/gravity are different descriptions of the same theories. We studied the scattering amplitudes of a supersymmetric gauge theory at strong coupling based on this duality and the integrability behind it. In particular, by using various approaches associated with integrable systems, we gave formulations which enable us to analytically evaluate the strong-coupling amplitudes. We also developed a method, which is even conceptually new, to analyze quantum integrable models by combining the picture from conformal perturbation theory in the UV regime and that from scattering theory in the IR regime. We thereby derived the exact mass-coupling relation of an integrable model for strong-coupling amplitudes. These are interdisciplinary achievements which cover gauge theory, string theory/gravity and integrable systems.

研究分野：素粒子理論

キーワード：弦理論 強結合ゲージ理論 重力理論/ゲージ理論双対性 可積分性 グルーオン散乱振幅 極小曲面
熱力学的ベータ仮説

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重要な候補であり、関連する諸分野に様々なアイデアを提供しながら現在も活発な研究が続いている。この弦理論の近年の大きな成果の一つに、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重力理論/ゲージ理論双対性の発見がある。この双対性の研究は、その背後にある可積分性の発見により、超対称ゲージ理論/曲がった時空中の弦理論の全ての結合領域でのスペクトルが解析できるようになるなど、大きく進展していた。また、我々はこの双対性と可積分性に基づき、粒子の運動量が2次元になる運動学的配位に対して強結合散乱振幅を求める解析的手法の開発を進めていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、このような我々の成果をさらに発展させ、強結合散乱振幅の構造およびゲージ理論の強結合ダイナミクスを解明してゆくことである。特に、具体的な目標は、

(1) より一般の運動学的配位に対して強結合散乱振幅の解析的評価法を開発すること

(2) 我々の手法で得られた散乱振幅の運動量依存性を検証するため、散乱振幅を与える可積分模型の質量と結合定数の厳密な関係(質量-結合関係)を求め、

(3) 我々の方法を形状因子など他の物理量に対しても拡張してゆくこと

などであった。

3. 研究の方法

上記の目的に向け、これまでの我々の研究成果、可積分系の分野の様々な知見・手法に基づき研究を推し進めた。具体的には以下の通りである:

(1) 粒子の運動量が3次元的な運動量配位の場合に、強結合散乱振幅を与える可積分模型の Y/T -関数と境界エントロピー (g -関数) の関係、バルクおよび境界の共形摂動を用いて強結合散乱振幅を解析した。

(2) 粒子の運動量が4次元な一般的な運動量配位の6点振幅の場合に、強結合散乱振幅を与える可積分模型の量子ロンスキアン関係式などを用いて強結合散乱振幅を解析した。

(3) Wiener-Hopf 法などに基づき、化学ポ

テンシャル・質量が共に大きな極限で上記可積分模型および対応する強結合散乱振幅を解析した。

(4) 2次元可積分模型は多くの場合、質量項が小さなUV領域では共形場理論の摂動として、また、質量項が大きなIR領域では厳密なS-行列を持つ散乱理論として記述される。このような2つの見方を組み合わせることにより、強結合散乱振幅を与える可積分模型の質量-結合関係を解析した。

4. 研究成果

上述の方法に従い、より一般の運動学的配位に対する強結合ゲージ理論散乱振幅の解析的評価、可積分模型の質量-結合関係について以下の成果を得た。

(1) 粒子の運動量が3次元的な運動量配位の場合の強結合散乱振幅について、散乱振幅を与える熱力学的ベータ仮説(TBA)方程式中の質量項が小さい場合の解析的評価法を開発し、6点、7点強結合散乱振幅の解析的展開式を得た。これは Z_n (n : 粒子数) 対称性を持つ運動量配位の周りでの展開となる。適切に規格化された散乱振幅は、強弱結合でよく似た振舞いを示すことを明らかにした。

(2) 粒子の運動量が4次元的な運動量配位の場合の6点強結合散乱振幅について、TBA方程式の質量項が小さい場合の((1)とは異なる)解析的評価法を開発し解析的展開式を得た。これは Z_6 対称性を持つ運動学的配位の周りでの展開となる。適切に規格化された散乱振幅は、強弱結合でよく似た振舞いを示すことを明らかにした。

(3) 粒子の運動量が4次元的な運動量配位の場合の6点強結合散乱振幅について、TBA方程式の質量・化学ポテンシャルが大きい場合の解析的評価法を開発し解析的展開式を得た。これは Z_6 対称性を持つ運動学的配位での散乱振幅とcollinear/soft極限での散乱振幅を内挿する展開となっている。上記のように規格化した場合でも散乱振幅は強弱結合で異なる振舞いを示すため、全結合領域での散乱振幅の構造を調べる上でも有用な展開となっていることが明らかとなった。また、質量パラメータを変化させることにより、当初の予期を超えた大きな運動量空間の領域に展開が適用可能であることも明らかとなった。

(4) 可積分模型を解析する新たな手法を開発するとともに、粒子の運動量が2次元な運動量配位の場合の10点強結合散乱振幅を与える可積分模型の厳密な質量-結合関係式

を導いた。

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は大変重要であるが、摂動的な取り扱いができないため大変困難であり、通常は大規模な数値計算を用いておこなわれる。我々の結果は、強結合ゲージ理論の散乱振幅・ダイナミクスの解析に対する新たな方向性を与えるものである。また、我々の結果は、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す学際的な成果ともなっている。

こうした成果は、多くの国際・学際的研究会を含む研究会・セミナーで発表され、注目を集める研究となっている。特に、質量-結合関係に関する成果は、我々の強結合散乱振幅の小質量展開の定式化を(対応する10点振幅の場合に)完結させるものである。また、概念的にも新たな量子可積分模型の解析手法を与えると共に、当該分野の20年来の問題を解決する重要な成果となっており、我々の分野で最も評価の高い論文雑誌の一つである Physical Review Letters に掲載された。

強結合ゲージ理論ダイナミクスの解明、弦理論・ゲージ理論・可積分系にまたがる新たな研究分野の開拓に向けて、本研究をさらに発展させていくことができると考えている。例えば、次のような研究が考えられる：

(1) 強結合散乱振幅を与える可積分模型のくりこみ群を用いた散乱振幅の解析

(2) 形状因子など、他の強結合物理量への我々の手法の応用

(3) 質量-結合関係を得る際に開発した手法による、場の理論の非摂動効果の研究

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11件)

(我々の分野では著者の順は原則としてアルファベット順です。)

Zoltan Bajnok, Janos Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gabor Zsolt Toth, "On the mass-coupling relation of multi-scale quantum integrable models", Journal of High Energy Physics 1606 (2016) 071, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP06(2016)071.

Zoltan Bajnok, Janos Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gabor Zsolt Toth, "Exact mass-coupling relation for the homogeneous sine-Gordon model", Physical Review Letters 116 (2016) 181601, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.116.181601.

Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, "Quantum Wronskian approach to six-point gluon scattering amplitudes at strong coupling", Journal of High Energy Physics 1408 (2014) 162, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP08(2014)162.

Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito and Yuji Satoh, "Null-polygonal minimal surfaces in AdS4 from perturbed W minimal models", Journal of High Energy Physics 1302 (2013) 067, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP02(2013)067.

[学会発表](計27件)

Yuji Satoh, "Analytic expansions of strong-coupling amplitudes in N=4 SYM" (invited talk), Amplitudes in Asia 2015, 2015.

Yuji Satoh, "Quantum wronskian relation and gluon scattering amplitudes at strong coupling" (invited talk), Finite-size Technology in Low Dimensional Quantum System (VII), 2014.

Yuji Satoh, "MHV amplitude around regular-polygonal limit" (invited talk), Kavli IPMU Workshop on Gauge and String Theory, 2013.

Yuji Satoh, "MHV amplitude around the regular-polygonal limit" (lectures), Eotvos Spring School on Recent Advances in AdS/CFT, 2013.

佐藤 勇二, "AdS 空間中の極小曲面とグルーオン

散乱振幅” (招待講演),
RIMS 研究集会「部分多様体の微分幾何学の深化」,
2013.

佐藤 勇二,
“Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems” (招待講演),
研究集会「場の数理とトポロジー」,
2013.

Yuji Satoh,
“Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability” (invited talk),
Light-Cone Physics: Hadronic and Particle Physics,
2012.

Yuji Satoh,
“Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems” (invited talk),
Yukawa International Seminar (YKIS) 2012 “From Gravity to Strong Coupling Physics” ,
2012.

Yuji Satoh,
“Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems” (invited talk),
APCTP-CQueST-IEU Workshop on ‘‘Quantum Integrability and its Applications’’,
2012.

Yuji Satoh,
“Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability” (invited talk),
Progress in Quantum Field Theory and String Theory,
2012.

〔その他〕

プレプリント

Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki,
“MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations” ,
UTHEP-718, arXiv:1805.07556 [hep-th].

ホームページ等

<http://www-het.ph.tsukuba.ac.jp/~ysatoh/index.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 勇二 (SATOH, Yuji)
筑波大学・数理物質系・助教
研究者番号：50312799