

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05421

研究課題名（和文）量子エンタングルメントに関するS行列理論と弦理論の研究

研究課題名（英文）Research on S-matrix and string theory for quantum entanglement

研究代表者

関 穰慶（Seki, Shigenori）

大阪公立大学・数学研究所・特別研究員

研究者番号：60373320

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）：弾性散乱の終状態2粒子のエンタングルメント・エントロピーの公式が関-Peschanskiによって与えられたが、その中には発散が含まれていたため、これを2通りの方法で正則化した。こうして改良された公式を用いて、TevatronとLHCによる実験データから、高エネルギー陽子-陽子散乱のエンタングルメント・エントロピーを評価した。

これまで弦の2点振幅はゼロになると考えられてきたが、我々は、新しくmostly BRST exact演算子を導入することにより、演算子形式で、開弦の2点振幅がゼロではないことを示した。さらに、この演算子は開弦タキオンの3点、4点振幅にも利用できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弾性散乱の終状態のエンタングルメント・エントロピー公式が、我々の正則化によって改良されたことにより、実際のような弾性散乱について、具体的にエンタングルメント・エントロピーを評価することを可能にした。これは、加速器などの散乱実験に対して、エンタングルメントという新しい視点を開くものである。

我々が見つけたmostly BRST exact演算子は、弦理論の振幅を演算子形式で求めるための新しい方法を与えている。特に、これまでの一般的理解を覆し、2点振幅を得ることに成功した。今後、1点、0点振幅への応用も興味深い。

研究成果の概要（英文）：Although Seki and Peschanski gave the formula of entanglement entropy for the two-particle final state in an elastic scattering, it includes divergence. We regularized it in two ways in order to improve the formula. Following this formula, we evaluated the entanglement entropy in the high-energy proton-proton scattering by the use of the data given by Tevatron and LHC.

So far one has been believed that a two-point function in a string theory vanishes. However, we showed in the operator formalism that the open string two-point amplitude does not vanish by newly introducing a mostly BRST exact operator. Furthermore, this operator is available for three and four-point amplitudes of open string tachyons.

研究分野：素粒子論

キーワード：エンタングルメント・エントロピー 陽子散乱 弦理論 弦の2点振幅 mostly BRST exact演算子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) エンタングルメントは量子論における興味深い現象であり、特に 2000 年代より、素粒子論や量子重力と関連して、さまざまな分野で盛んに研究されている。このきっかけと考えられる研究として、笠-高柳による AdS/CFT 対応を用いたエンタングルメント・エントロピー公式(文献)や、Maldacena-Susskind による ER=EPR 予想(文献)が挙げられる。しかしながら、粒子の高エネルギー散乱によって生じるエンタングルメントについては、あまり議論がなされてこなかった。

関(研究代表者)-Sin(文献)は、AdS/CFT 対応を通して、グルーオン散乱におけるエンタングルメントと、弦の世界面上の因果構造について調べた。また、関-Park-Sin(文献)は、S 行列理論を用いて、弾性散乱における終状態 2 粒子のエンタングルメント・エントロピーを定式化し、さらに、関-Peschanski(文献)によって、そのエンタングルメント・エントロピーを散乱断面積などの物理量で表す公式が導かれた。

(2) 弦理論の n 点振幅を求める際、従来のゲージ固定法では、n 点のうちの 3 点の位置を固定することにより、ゲージ固定されていた。したがって、3 点より少ない 2 点振幅では、固定しきれない対称性が残り、その残った無限大のゲージ体積によって、2 点振幅は 0 になると考えられてきた。しかしながら、Erbin-Maldacena-Sklirou(文献)は、ゼロではない 2 点振幅が得られることを、経路積分形式で示した。

2. 研究の目的

(1) 関-Peschanski(文献)によって与えられた、弾性散乱における終状態 2 粒子のエンタングルメント・エントロピー公式を用いて、実際の加速器による散乱実験のデータから、エンタングルメント・エントロピーを評価する。

(2) 実際の散乱現象では、弾性散乱ではなく、終状態が色々な粒子からなる非弾性散乱がしばしば現れる。そこで、関-Peschanski による弾性散乱のエンタングルメント・エントロピーの導出法を応用し、非弾性散乱の終状態におけるエンタングルメントを解明する。

(3) 弦の散乱によって生じるエンタングルメントを考えたい。そのために、弦の散乱振幅に対する理解を深める。

3. 研究の方法

(1) 関-Peschanski によるエンタングルメント・エントロピー公式には、ヒルベルト空間の無限大体積に起因する発散が含まれているという欠点がある。この発散を正則化する手法を開発し、エンタングルメント・エントロピー公式を改良する。

具体的な散乱現象に対してエンタングルメント・エントロピーを評価するために、高エネルギー陽子-陽子散乱に着目する。この散乱に関する実験データは、Tevatron や LHC(重心系エネルギー 1,800~13,000GeV)の加速器実験から得ることができる。このデータを、改良されたエンタングルメント・エントロピー公式に適用することで、陽子-陽子散乱の終状態 2 陽子の間のエンタングルメント・エントロピーを評価する。このとき、公式の中の微分散乱断面積は、diffraction peak 模型を仮定することで処理する。

(2) 関-Peschanski(文献)では、S 行列理論の中で部分波展開を用いることにより、弾性散乱のエンタングルメント・エントロピー公式を導出した。そこで、非弾性散乱においても、部分波展開を活用することにより、終状態の粒子間のエンタングルメントを解析する。

(3) Erbin-Maldacena-Sklirou(文献)は、経路積分形式で弦の 2 点振幅を導いたので、本研究では、演算子形式による弦の 2 点振幅の導出法を開発する。その導出の過程で、ゲージ固定のための新しい演算子を見つける。また、この新しいゲージ固定法が、3 点、4 点振幅などの他の振幅の計算にも矛盾なく適用できるかどうかを調べる。

4. 研究成果

(1) 関-Peschanski(文献)のエンタングルメント・エントロピー公式に現れる発散に対して、2 通りの正則化を提案した(文献)。一つは、カットオフ関数を導入する方法である。カットオフ関数として、階段関数またはガウス関数を採用した。そして、これらの関数の中のパラメータを全散乱断面積と関係づけることができた。もう一つは、ヒルベルト空間の無限大体積を、カットオフ関数を用いることなく、直接、全散乱断面積と関係づける正則化方法を提案し、この方法を volume regularization と名付けた。

以上の正則化を用いたことにより、具体的に、様々な弾性散乱における終状態のエンタングルメ

ント・エントロピーを評価できるようになった。

(2) 前述の2通りの正則化で改良されたエンタングルメント・エントロピー公式を用いて、高エネルギー陽子-陽子弾性散乱における終状態のエンタングルメント・エントロピーを評価できた(文献)。いずれの正則化を用いても、エネルギーが上昇するにつれて、エンタングルメント・エントロピーは増加することがわかった。

(3) 非弾性散乱の終状態2粒子(ただし、入射2粒子とは異なる)に注目し、部分波展開を用いて、エンタングルメント・エントロピーの定式化を行なった。この解析は、回折散乱に対しても、同様に応用できると思われる。

(4) 関-高橋(文献)は、演算子形式を用いて、開弦の2点振幅がゼロではないことを示し、経路積分形式による Erbin-Maldacena-Skliros(文献)と同じ結果を再現することができた。このとき、新しく導入された演算子が mostly BRST exact 演算子

$$E(z) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dq \frac{i}{q} [Q_B, e^{-iqX^0}]$$

である。これにより、2点振幅は、2点+mostly BRST exact 演算子からなる3点関数から求めることができた。

(5) この mostly BRST exact 演算子の有用性を確認するため、開弦タキオンについて、色々な振幅を求めた。関-高橋(文献)は、タキオン3点+mostly BRST exact 演算子からなる4点関数から、タキオン3点振幅が正しく求められることを示した。さらに、タキオン2点+2個の mostly BRST exact 演算子からなる4点関数から、タキオン2点振幅を求められることも分かった。岸本-佐々木-関-高橋(文献)では、開弦タキオン4点+mostly BRST exact 演算子からなる5点関数から、Veneziano 振幅(開弦タキオン4点振幅)を再現することに成功した。以上の結果から、「n点振幅が、n点+mostly BRST exact 演算子からなるn+1点関数から得られる」と予想した。

<引用文献>

S.Ryu, T.Takayanagi, Aspects of Holographic Entanglement Entropy, Phys.Rev.Lett. 96 (2006) 181602.

J.Maldacena, L.Susskind, Cool Horizons for Entangled Black Holes, Fortsch.Phys. 61 (2013) 781.

S.Seki, S.J.Sin, EPR=ER and Scattering Amplitude as Entanglement Entropy Change, Phys.Lett. B735 (2014) 272.

S.Seki, I.Y.Park, S.J.Sin, Variation of Entanglement Entropy in Scattering Process, Phys.Lett. B735 (2014) 147.

R.Peschanski, S.Seki, Entanglement Entropy of Scattering Particles, Phys.Lett. B758 (2016) 89.

H.Erbin, J.Maldacena, D.Skliros, Two-Point String Amplitudes, JHEP 07 (2019) 139.

R.Peschanski, S.Seki, Evaluation of Entanglement Entropy in High Energy Elastic Scattering, Phys.Rev. D100 (2019) 076012.

S.Seki, T.Takahashi, Two-point String Amplitudes Revisited by Operator Formalism, Phys.Lett. B800 (2020) 135078.

S.Seki, T.Takahashi, Reduction of Open String Amplitudes by Mostly BRST Exact Operators, Phys.Lett. B822 (2021) 136664.

I.Kishimoto, T.Sasaki, S.Seki, T.Takahashi, The Veneziano Amplitude via Mostly BRST Exact Operator, Nucl.Phys. B974 (2022) 115647.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kishimoto Isao, Sasaki Tomoko, Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 974
2. 論文標題 The Veneziano amplitude via mostly BRST exact operator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115647 ~ 115647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2021.115647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 822
2. 論文標題 Reduction of open string amplitudes by mostly BRST exact operators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136664 ~ 136664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136664	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Seki Shigenori	4. 巻 2343
2. 論文標題 Refined formulation and evaluation of entanglement entropy in elastic scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020013 ~ 020013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0047808	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shigenori Seki	4. 巻 17
2. 論文標題 String Two-Point Amplitude Revisited by Operator Formalism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Particles and Nuclei Letters	6. 最初と最後の頁 663 ~ 665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S1547477120050313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Peschanski Robi, Seki Shigenori	4. 巻 100
2. 論文標題 Evaluation of entanglement entropy in high energy elastic scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 076012 ~ 076012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.076012	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 該当する

1. 著者名 Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 800
2. 論文標題 Two-point string amplitudes revisited by operator formalism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135078 ~ 135078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seki Shigenori	4. 巻 2040
2. 論文標題 Entanglement entropy of scattering particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 20017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5079059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 岸本 功, 関 穰慶, 高橋 智彦
2. 発表標題 新しいゲージ固定法を用いた閉弦の2点振幅の理解
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東國 沙紀, 岸本 功, 関 穰慶, 高橋 智彦
2. 発表標題 mostly BRST exact演算子を用いた開弦1ループ振幅の計算について
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本 功, 甲賀 まこ, 関 穰慶, 高橋 智彦
2. 発表標題 ゴースト数2をもつ新たな閉弦頂点演算子について
3. 学会等名 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shigenori Seki
2. 発表標題 Two-point string amplitudes revisited
3. 学会等名 Amplitudes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 String amplitudes given by mostly BRST exact operator
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸本功, 北出智巳, 佐々木智子, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 Mostly BRST Exact演算子によるVeneziano振幅の導出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本功, 北出智巳, 佐々木智子, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 BRST形式によるdilaton tadpole振幅の導出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigenori Seki
2. 発表標題 Entanglement produced by scattering
3. 学会等名 17th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigenori Seki
2. 発表標題 Formulation and Evaluation of Entanglement Entropy in Elastic Scattering
3. 学会等名 KEK Theory Seminar
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤綾, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 4次元超対称非線形シグマ模型と双対性について
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigenori Seki
2. 発表標題 String two-point amplitude revisited by operator formalism
3. 学会等名 Supersymmetries and Quantum Symmetries - SQS'19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Robi Peschanski, 関穰慶
2. 発表標題 Reformulation and Evaluation of Entanglement Entropy in High Energy Scattering
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本功, 北出智巳, 関穰慶, 高橋智彦, 津田明日華
2. 発表標題 タキオン真空における世界面の構造について
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigenori Seki
2. 発表標題 Two-point String Amplitudes Revisited by Operator Formalism
3. 学会等名 Seminaire de matrices, cordes et geometries aleatoires
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 Improved string amplitudes in operator formalism
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigenori Seki
2. 発表標題 Entanglement Entropy of Scattering Particles
3. 学会等名 14th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Robi Peschanski, 関 穰慶
2. 発表標題 Effective Size of Particle from Entanglement Entropy in Scattering
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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		
フランス	IPhT, CEA-Saclay		