

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06932

研究課題名(和文) 超弦理論を活用した現実的な動的な非平衡現象へのアプローチ

研究課題名(英文) An approach toward dynamical phenomena based on the gauge-gravity correspondence in string theory

研究代表者

棚橋 典大 (Tanahashi, Norihiro)

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・助教

研究者番号：50581089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論に基づいて提案されたゲージ・重力対応を用いれば、量子色力学(QCD)におけるクォーク・グルーオンプラズマなどのダイナミクスを古典重力理論によって簡単に解析することが可能となる。この対応関係に基づいて場の理論における動的現象の諸性質を解明することを目標として、1. AdS時空で運動する点粒子と弦の運動が示すカオス性について、2. 摂動伝搬の非線型効果と特異点形成の2つの課題について研究を行った。前者については、この系においてはカオスの振る舞いが発生してその強度は系の温度に関係していること、後者については、この系では衝撃波形成現象が抑制されるという良い性質が存在することが判明した。

研究成果の概要(英文)：Based on the gauge-gravity correspondence predicted by the string theory, we can study the dynamics of field theories such as the quantum chromodynamics (QCD) in a simple way by mapping the problem to the classical gravity side via the correspondence. Using this technique, we studied various properties of dynamical phenomena in the field theory. In this project we tackled 1. chaos of the particle and string in AdS black hole spacetime, and 2. nonlinear effect in wave propagation and singularity formation. For the former, it turned out that chaotic behavior emerges due to the effect of the temperature of the system in the setup we focused on. For the latter, it was found that the singularity formation process such as the shock wave formation is suppressed in the models considered in the gauge-gravity correspondence, which implies that these models are healthy in the sense that they admit time evolution without singularity formation.

研究分野：重力理論・宇宙論

キーワード：ゲージ・重力対応 重力理論 カオス現象 素粒子理論

1. 研究開始当初の背景

超弦理論に基づいて提案されたゲージ・重力対応を用いれば、量子色力学(QCD)におけるクォーク・グルーオンプラズマなどのダイナミクスを古典重力理論によって簡単に解析することが可能となる。これまでに、この手法は空間的に一様な系など比較的単純な系に応用されており、より一般的な状況に適用できるように本手法を拡張することが当初の目的であった。

QCDの構成要素であるクォークの対応物は元々のゲージ・重力対応関係には存在していないため、Dプレーンと呼ばれる物体を系に導入し、それによって生ずる新たな種類の粒子をクォークと同定することが必要となる。この操作に対応して、重力理論側では負の宇宙項を持った時空である反ドジッター(AdS)時空とその中で運動する張力を持った膜状物体に注目することになる。上記の対応関係に基づき、この膜状物体の時間変化を調べることでQCD理論の動的な振る舞いを明らかにできる。本研究課題でもこの膜状物体の運動に注目し、その運動にまつわる諸現象に関する研究を推進することとした。

2. 研究の目的

・AdS時空で運動する点粒子と弦の運動が示すカオス性について

QCDにおける動的現象に関連する近年の研究の進展の一つとして、有限温度の場の理論における量子カオスの強度には上限があり、その上限値は系の温度だけで決まる普遍的な値をとるといふ仮説が近年になって提唱された(J. Maldacena, S. H. Shenker, D. Stanford, "A bound on chaos", J. High Energ. Phys. (2016) 106)。この仮説にゲージ・重力対応を適用すれば、ブラックホールを含む時空における弦や膜状物質の運動についても、そのカオス性の強度には普遍的な上限値が存在する、という予言が得られる。そこで、本研究課題で注目していたAdS時空で運動する膜状物体の運動を解析することにより、上記の仮説を検証することを試みることにした。

・摂動伝搬の非線型効果と特異点形成

本研究計画で注目する重力理論側の系はAdS時空の中で運動する膜状物体で与えられるが、その運動方程式は非線型方程式となっており、それに従う振動の振る舞いについては不明な点が多い。この点に関連して、申請者の先行研究では波動伝搬における非線型性について研究を行い、その結果として非線型効果により特異点形成をはじめとする顕著な現象が起きることが明らかとなった。本研究課題では、今回注目する膜状物体の運動

について類似の特異点形成過程などが起こらないか、もし起こるならばそれに対応して素粒子理論における示唆が得られないかなどについて調査を進めることとした。

3. 研究の方法

・AdS時空で運動する点粒子と弦の運動が示すカオス性について

Maldacenaらによって提案された仮説は、有限温度の場の理論におけるカオスの強度を示すリアプノフ指数が、系の温度 T を用いて $2\pi T/\hbar$ という値で上限づけられるというものであった。この結果をゲージ・重力対応に基づいて検証するためには、重力理論側で漸近AdS時空におけるブラックホールを考え、その時空の中で実現される運動についてリアプノフ指数を求めればよいと考えられる。この対応関係において、古典重力理論側で温度に相当するものはブラックホールの表面重力である。この考察に基づき、このブラックホールの表面重力が、ブラックホール時空における運動のカオス性とその強度にどのように影響をもたらすかについて調査を行うこととした。

QCDにゲージ・重力対応を適応して得られるのは、漸近AdS時空における弦や膜状物体である。これらは広がりを持った物体であり、その運動は複雑なものとなる。そのため、これらの物体の運動の特徴の一部を再現しつつ解析を単純化するものとして、ブラックホール時空における点粒子の運動をまず解析することにした。その結果を踏まえる形で、その次に漸近AdS時空における弦の運動を調べることにした。この点粒子や弦の運動についてリアプノフ指数を求め、その大きさをブラックホール表面重力の大きさと比較することにより、リアプノフ指数の上限に関する仮説が満たされているかどうかを検証することを試みた。

・摂動伝搬の非線型効果と特異点形成

本研究で注目している弦や膜などの広がりを持った物体の運動のトイモデルとみなせる、最も一般的なスカラー場の理論における波動伝搬と衝撃波形成現象に関して研究を行うこととした。このスカラー場の理論には、膜状物体の摂動が従う方程式も含まれるため、この理論に関して調査することで、本来のターゲットであった膜状物体に関する情報も得られると期待される。

この理論について解析するための手法としては、申請者の先行研究であるラブロック重力理論における解析手法を採用した。この手法は、波動の伝搬方向を明らかにするための特性曲線法をこの種の理論に適用可能なように定式化したものである。ラブロック重力理論と上記の最も一般的なスカラー場の

理論のラグランジアンは互いに類似した構造を持っていることが知られており、したがって波動伝搬面の構造を調べるための手法も大きな修正を施すことなく活用できると期待された。この手法を用いることにより、このスカラー場の理論における波動伝搬と衝撃波形成現象について解析を行うこととした。

4. 研究成果

・ AdS 時空中で運動する点粒子と弦の運動が示すカオス性について

初年度においてはブラックホール地平面近傍で運動する粒子が見せるカオスを解析し、その結果として先述のカオス強度の上限に関する予言が成立することの状況証拠が得られた。粒子の起動が十分にブラックホール地平面に近い場合には粒子の起動にカオス性が発生し、そのカオス性の強度を示すリアプノフ指数がブラックホール表面重力の強度で上限づけられることが解析的・数値的に確認された。

第2年度には、この研究を AdS ブラックホール時空中で運動する弦の場合に拡張することを試みた。ゲージ・重力対応に基づけば、この系は有限温度の媒質中に置かれたクォーク・反クォーク対とそれらをつなぐグルーオンの力線であると解釈される。この系において、弦がブラックホールに十分近づく場合にはその運動にカオスの振る舞いが発生し、その強度の指標となるリアプノフ指数はブラックホール温度よりも小さい値を取ることが本研究により示された。これらの結果は、当初場の理論の立場から予言されていたカオス強度上限の予想を支持する結果となっておりと同時に、ブラックホール地平面の古典カオスと場の理論におけるカオスとの間に対応関係が成立することの状況証拠を与えるものとなっている。

上記の結果を発表論文[1]として発表したほか、第2年度の成果をまとめた以下の論文を発表しており、現在学術雑誌にて査読中である。また、上記の研究成果を参考に、AdS 時空中における膜状物体の運動のカオスとそのゲージ・重力対応に基づく解釈に関する研究を今後推進する予定である。

・ 橋本幸士、村田佳樹、柵橋典大、“Chaos of Wilson Loop from String Motion near Black Hole Horizon”, arXiv:1803.06756 [hep-th](Phys. Rev. D 誌に投稿、現在査読中)

・ 摂動伝搬の非線型効果と特異点形成

特性曲線法に基づいた解析を最も一般的なスカラー場の理論に適用した結果として、張力を持った膜状物体の運動を記述する DBI 模

型が正準的運動項を持つ理論模型については衝撃波形成が起こらない一方で、ラグランジアンに何らかの修正が加えられた場合には一般に衝撃波形成が必ず起こることが判明した。したがって、本研究で注目する膜状物体の運動においては、衝撃波形成のような特異な現象は起こらず比較的良い性質を示すということが判明した。その一方で、今後何らかの一般化を系に施す場合には特異点形成現象などの特異な現象が起こりえることも示唆された。

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2件、全て査読あり)

[1] 柵橋典大、橋本幸士、“Universality in Chaos of Particle Motion near Black Hole Horizon”, Phys. Rev. D 95 (2017) 024007 DOI: 10.1103/PhysRevD.95.024007

[2] 柵橋典大、大橋勢樹、“Wave propagation and shock formation in the most general scalar-tensor theories”, Class. Quantum Grav. 34, 215003 (2017) DOI: 10.1088/1361-6382/aa85fb

[学会発表](計29件)

1. 柵橋典大、橋本幸士、村田佳樹、「ブラックホール時空中で運動する弦のカオスの普遍性」、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学、2018年3月23日
2. 柵橋典大、「ブラックホール地平面の幾何学」、九大幾何学セミナー、九州大学、2018年2月16日
3. 柵橋典大、“Robinson-Trautman solutions with a scalar field” (ポスター発表), The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG27), 東広島芸術文化ホールくらら、2017年11月27日
4. 柵橋典大、“Wave Propagation and Shock Formation in the Most General Scalar-Tensor Theory”, 素粒子論研究室セミナー、京都大学、2017年10月25日
5. 柵橋典大、“Wave Propagation and Shock Formation in the Most General Scalar-Tensor Theory”, Ninth Aegean Summer School, Sifnos Cultural Center, ギリシャ、2017年9月19日
6. 柵橋典大、橋本幸士、村田佳樹、「ブラックホール時空中で運動する弦のカオスの普遍性」、日本物理学会秋季大会、宇都宮大学、2017年9月14日
7. 柵橋典大、「ブラックホール地平面における粒子と弦の運動のカオス」、京都大学基礎物理学研究所・研究会「熱場の量子論とその応用」、京都大学、2017年8月29日

8. 棚橋典大, “Universality in Chaos of Particle and String Motions near Black Hole Horizon”, The 3rd Karl Schwarzschild Meeting, Frankfurt Institute for Advanced Studies, ドイツ, 2017年7月24日
9. 棚橋典大, “Wave propagation and shock formation in the most general scalar-tensor theories”, 理論物理学コロキウム, 立教大学, 2017年7月11日
10. 棚橋典大, 「ブラックホール地平面における粒子と弦の運動のカオス」, 宇宙論セミナー, 神戸大学, 2017年6月28日
11. 棚橋典大, 「ブラックホール地平面における粒子と弦の運動のカオス」, 宇宙物理・重力コロキウム, 大阪市立大学, 2017年6月9日
12. 棚橋典大, “Wave propagation and shock formation in the most general scalar-tensor theories”, 宇宙論セミナー, 東京工業大学, 2017年5月24日
13. 棚橋典大, “Wave propagation and shock formation in the most general scalar-tensor theories”, 宇宙論セミナー, 京都大学基礎物理学研究所, 2017年5月11日
14. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos” (ポスター発表), Workshop “Quantum Gravity, String Theory and Holography”, 京都大学, 2017年4月6日
15. 棚橋典大, 橋本幸士, 「ブラックホール地平面におけるカオスの普遍性について」, 日本物理学会年次大会, 大阪大学, 2017年3月19日
16. 棚橋典大, 「最も一般的なスカラー・テンソル理論における因果構造と衝撃波形成」, 若手による重力・宇宙論研究会, 京都大学, 2017年3月1日
17. 棚橋典大, 「最も一般的なスカラー・テンソル理論における因果構造と衝撃波形成」, 天体核研究室中間発表会, 京都大学, 2017年2月21日
18. 棚橋典大, “Causal structure and Shock formation in The most general scalar-tensor theories”, Conference “Testing Gravity 2017”, サイモンフレーザー大学, カナダ, 2017年1月26日
19. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos”, String theory seminar, プリティッシュコロンビア大学, カナダ, 2017年1月23日
20. 棚橋典大, 「Dilaton 場を伴う Robinson-Trautman 解」, 第18回特異点研究会, 立教大学, 2016年12月29日
21. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos”, IX Black Hole Workshop, University of Minho in Guimaraes, ポルトガル, 2016年12月19日
22. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest

- of Chaos”, CENTRA seminar, Instituto Superior Tecnico, ポルトガル, 2016年12月13日
23. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos”, DAMTP informal seminar, ケンブリッジ大学, イギリス, 2016年12月9日
24. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos”, Gravity Seminar, サウサンプトン大学, イギリス, 2016年12月8日
25. 棚橋典大, “Causal structure and Shock formation in The most general scalar-tensor theories”, ICG Gravity Meeting, ポーツマス大学, イギリス, 2016年12月7日
26. 棚橋典大, “Classical and Quantum Chaos”, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos”, 素粒子論研究室セミナー, 北海道大学, 2016年12月2日
27. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos”, KMI mini-workshop on General relativity in higher dimensions -recent progress and future perspective-, 名古屋大学, 2016年11月26日
28. 棚橋典大, “Black Hole Horizon is a Nest of Chaos” (ポスター発表), The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 大阪市立大学, 2016年10月24日
29. 棚橋典大, 大橋勢樹, 「最も一般的なスカラー・テンソル理論における因果構造と衝撃波形成」, 日本物理学会秋季大会, 宮崎大学, 2016年9月21日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

特になし。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.math.kyushu-u.ac.jp/~tanahashi/index.html>

・アウトリーチ活動:

摂南大学における一般聴衆を対象とした講演会「重力波が紐解く宇宙の謎」(基礎物理学研究所特任助教 齊藤遼氏との共同講演)に招待講演者として参加し、重力理論・実験に関するレビュー講演を行った(2016年6月)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

棚橋 典大 (TANAHASHI, Norihiro)

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・助教

研究者番号: 50581089

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし