

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03658

研究課題名(和文) 超弦理論による、物質絶縁破壊と真空崩壊、そして乱流と熱化の研究

研究課題名(英文) Study on dielectric breakdown, vacuum decay, turbulence and thermalization by superstring theory

研究代表者

橋本 幸士 (Hashimoto, Koji)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：80345074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：強結合の場の量子論が有限温度に置かれた際の一般的な重力双対はブラックホール時空となり、この双対性を用いた、重力側での時間発展についてのダイナミクスを、ブラックホール時空の特殊な性質の現れとして研究を行なった。主に、次の三つの研究テーマにおける独自のアプローチが成功し、査読付き論文として発表し、それらを世界各国で研究成果発表した。(1)フロッケワイル半金属とフロッケディラック半金属の重力双対における動的な伝導度の導出。(2)量子力学における非時間順序積。(3)重力ブラックホール時空内の事象の地平面近傍のカオス。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミクロの物質系は、量子力学(場の量子論)を用いて理論的に記述されているが、粒子同士が強く相互作用する場合には、電気伝導度などの物理量の計算は困難が伴う。外から印加する電場が周期的に時間依存する場合(フロッケ状態と呼ぶ)は、時間変化する中での計算を実施する必要があり、量子効果が一般にどのようになるかはわかっていない。本研究では、強く相互作用する量子系が、ある場合には古典重力系と等価になるというホログラフィー原理を用い、重力側で古典的な計算を行うことで、物理量を計算した。例えば、フロッケのワイル半金属での伝導度には、電場に直交する向きの電流が流れることなどを示し、新しい物質の減少を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When a strongly coupled quantum field theory is at a finite temperature, its gravity dual, if exists, is a black hole spacetime. Using this duality, we examined time-dependent dynamics of the system in the gravity side, as an emergence of specific properties of the black hole spacetime. The following three research strategies turned out to be successful, and we published the results in refereed journals, and provided presentations at international conferences. (1) Derivation of dynamical conductivities for Floquet Weyl semimetals and Dirac semimetals using their gravity dual. (2) Out-of-time-ordered products in quantum mechanics. (3) Chaos near black hole horizons.

研究分野：超弦理論、理論物理学

キーワード：超弦理論 乱流 ホログラフィー原理 Dブレーン 電場応答

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) クォークの閉じ込めはゲージ理論の根源的問題であるが、外的な強電磁場による真空破壊は、類似な系における様々な観測/実験的研究によりブレークスルーが期待されていた。
- (2) 超弦理論で発見された「ホログラフィー」(AdS/CFT 対応)という数理は、強結合ゲージ理論の量子解析手法として拡大し、研究代表者は、そのクォーク/物性物理への応用の研究を行ってきた基礎があった。
- (3) 真空崩壊/絶縁破壊は時間依存プロセスであり、非平衡統計力学の困難である「熱化」と「乱流」を発生する。これらは、研究代表者と分担者らにより、ホログラフィーで計算が明らかにされつつあった。

2. 研究の目的

クォークの閉じ込め(絶縁物質)を電磁場で破壊するという非摂動プロセスは、外場非線形効果と不安定性の解析を伴い、量子解析による物理予言が困難である。そこで、超弦理論のホログラフィー(AdS/CFT 対応)をクォーク的ゲージ理論に適用し、時間依存破壊を非摂動量子論的に求め、熱化と乱流的破壊の予言を確立する。これは、非平衡物理の大問題である「熱化」「乱流」について、高次元重力理論の手法から定量的具体例を与える。また、ブラックホール形成解明の新手法を提供する。

3. 研究の方法

- (1) ホログラフィーによる不安定性研究と乱流現象、ゲージ理論の外場揺動において発生するメソン乱流凝縮の定量的な評価

一般に、物理理論に外的環境の変化が加わると相転移が起こるが、ミクロな理論から相転移を記述すること、とくに強結合の場の量子論でそれを実施することは、理論的な困難が大きい上、基礎物理の大問題としてのクォーク閉じ込め問題の根源である。相転移近傍の臨界現象のうち、クォークの非閉じ込め(あるいは強相関係の絶縁破壊)において、それを引き起こす要因が「非局在励起の凝縮」である可能性が古く Polyakov や Susskind により 1970 年代から語られているが、その証左は無い。

ホログラフィー(AdS/CFT 対応)を用い、この問いに答えるのが本申請課題である。プレプリント arXiv:1408.6293 で準備的に行った研究では、乱流現象の基礎を発見した。非閉じ込め臨界点近傍で、クォーク対が非局在化した高励起メソンのベキ的凝縮が理論的に観測された。また、時間変化した電場をかいた際にも同様の現象が見え始めていることを指摘した。これらの例では限られた種類の物理量のみを検証しており、普遍的な乱流現象、そして熱化との関連を見るには、次の物理量の定量的な評価が必要である:

- 時間変化する外場を司るパラメータ
- 外場揺動と乱流凝縮現象の連関、特に時間依存する凝縮真空期待値の評価
- 反ドシッター時空における不安定性とメソン凝縮の関連性
- 非平衡熱力学的な新物理量の探索

- (2) 重力不安定性のユニバーサリティの確立

反ドシッター時空内のプローブDブレーン上のゲージ理論の乱流と特異点形成を明らかにした我々の解析は、重力不安定性がさらに拡大したユニバーサリティの中にあることを示唆している。このユニバーサリティを示すため、数値的実験を様々な状況で試すとともに、ブラックホール形成の一般的性質とブレーン上の力学の対応をユニバーサルに解析的に検討する。

- ・数値相対論による時系列解析

ホログラフィーで一般相対性理論のアインシュタイン方程式を解く際、解析解が得られる見込みは低く、数値解析となる。計算初段階として Mathematica、実装段階として C を使用することとし、誤差判定を考慮する。

- ・初期条件非依存性、多種の外場摂動、次元依存性、非超対称性 ユニバーサリティの限界を確かめるため、また、1・2・3次元の物性に対応させるため、様々な次元と背景時空での特異点形成を計算する。特に、磁場が入った場合の不安定性の増幅や、背景荷電による破壊効果、結合定数となだれ現象の関係、熱化の外場時間変化依存性、の計算は、物性理論への示唆が大きい。

4. 研究成果

- (1) フロッケワイル半金属とフロッケディラック半金属の重力双対における動的な伝導度の導出:

AdS/CFT 対応を用いて、非平衡の状態における伝導度などの物理量を強相関電子系において調べるため、非平衡系として回転電場を用いた系における伝導度を具体的に計算する問題を考察した。回転電場は、非平衡系の代表的なものであり、レーザーなどの実験系と深

く関係している。非平衡であるにもかかわらず定常系であるため、時間発展を読むことが必要なく、転移などの性質を読み取ることがより容易になるであろうことが推測された。AdS/CFT 対応の辞書を用いることで、AdS 重力中の D7 プレーンの世界膜上に境界部分で回転電場を定常的に導入する。このことに成功したため、そこから具体的に電流を計算することができた。特に重要であるのは、それらから計算される伝導度の周波数依存性、電場の大きさの依存性、そして方向の依存性である。ホール伝導度が自発的に生成することが判明した。フロッケ系は、時間周期的な外場を物理系に作用することで、特殊な応答の性質を見出すことのできる、近年発展している手法であるが、強く結合した系の時間発展ダイナミクスを調べる本研究の上で、欠かせない優良な例となることが本研究で明らかになった。強結合ディラック物質すなわち量子色力学系について、重力双対を取り、重力側で電場の線形応答を、時間周期的な回転電場の背景において計算を行ったこの成果は、物質への応用が期待される。

- (2) 端状態のトポロジカル数の発見： ワイル半金属などの表面状態を詳しく調べた。超弦理論などで使用される高次元のワイル半金属などでは、表面状態にトポロジカル数が誘起されることが判明した。したがって、この結果は、表面状態にさらに端を導入すれば、そこにも表面状態が存在することを予想させる。これらの発見について、論文をまとめ、査読付き雑誌に投稿し、出版した。
- (3) 臨界現象における D プレーンの形のユニバーサリティの発見： 超弦理論の AdS/CFT 対応を用いて、ゲージ理論の相転移を記述する場合、クォークセクターなどに弱乱流的な様相が現れることが明らかになりつつあるが、AdS/CFT 対応におけるクォークセクターの一般の相転移現象には、プレーンが尖ることが知られており、これは critical embedding と呼ばれている。このとがった形をスペクトル分解すると、メソンの弱乱流的な凝縮と関係していると思われる。そこで、D プレーンが尖るメカニズムを解明し、そのスペクトル分解を一般的に行うことで、弱乱流が一般的に発生しうることを示した。
- (4) メソン凝縮のユニバーサリティの発見： このような弱乱流的なメソン凝縮が、空間次元によらずに成立するかどうかを確認する研究を行った。結果、次元に寄らずにベキ則に従う乱流的凝縮が数値的に確認されたほか、そのベキが、空間次元によっていることも確認された。
- (5) ブラックホールの事象の地平面におけるユニバーサルなカオスの発見： 強結合の場の量子論が有限温度に置かれた際の一般的な重力双対はブラックホール時空となり、この双対性を用いた、重力側での時間発展についてのダイナミクスを、ブラックホール時空の特殊な性質の現れとして研究を行なった。重力ブラックホール時空内の事象の地平面近傍のカオス：一般に動的な物理を重力側で特徴付ける際にはブラックホールの事象の地平面の性質を捨てる必要がある。そこで、地平面近傍のテスト粒子やプレーンなどを考え、その運動を具体的に解くことを行った。結果、地平面近傍にはカオスが現れ、その指数は期待されている指数と一般的に一致することも示された。
- (6) 量子力学における非時間順序積： 非時間順序積はカオスの度合いを測るものとして導入され、その特徴は重力双対での事象の地平面における赤方偏移に起因すると考えられているため、一般的な量子力学で、その初期的熱状態の時間発展を研究した。結果、古典カオス系であっても、非時間順序積による動的カオスの性質は一般的には発生し得ないことを示した。

上記のこれら研究テーマにおける独自のアプローチが成功し、全て査読付き論文として発表し、それらを世界各国において研究成果発表した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

- Kinoshita Shunichiro, [Murata Keiju](#), Oka Takashi, “Holographic Floquet states II: Floquet condensation of vector mesons in nonequilibrium phase diagram,” *Journal of High Energy Physics* 2018 (2018) 96
DOI: 10.1007/JHEP06(2018)096
- [Hashimoto Koji](#), Wu Xi, Kimura Taro, “Edge states at an intersection of edges of a topological material,” *Physical Review B* 95 (2017) 165443
DOI: 10.1103/PhysRevB.95.165443
- [Hashimoto Koji](#), [Murata Keiju](#), Yoshii Ryosuke, “Out-of-time-order correlators in quantum mechanics,” *Journal of High Energy Physics* 2017 (2017) 138
DOI: 10.1007/JHEP10(2017)138
- Tanahashi Norihiro, Ohashi Seiju, “Wave propagation and shock formation in the most general scalar-tensor theories,” *Classical and Quantum Gravity* 34 (2017) 215003
DOI: 10.1088/1361-6382/aa85fb

Murata Keiju, "Fast scrambling in holographic Einstein-Podolsky-Rosen pair,"
Journal of High Energy Physics 2017 (2017) 49
DOI: 10.1007/JHEP11(2017)049
Hashimoto Koji, Kinoshita Shunichiro, Murata Keiju, Oka Takashi, "Holographic
Floquet states I: a strongly coupled Weyl semimetal," Journal of High Energy Physics
2017 (2017) 127
DOI: 10.1007/JHEP05(2017)127
Hashimoto Koji, Tanahashi Norihiro, "Universality in chaos of particle motion near
black hole horizon," Phys. Rev. D95 (2017) 24007
DOI: 10.1103/PhysRevD.95.024007
Hashimoto Koji, Kimura Taro, "Topological Number of Edge States", Phys.Rev.B93
(2016) 195166
DOI: 10.1103/PhysRevB.93.195166
Hashimoto Koji, Kinoshita Shunichiro, Murata Keiju, "Conic D-branes," Progress of
Theoretical and Experimental Physics 2015 (2015) 083B04 1-26
DOI: 10.1093/ptep/ptv105
Hashimoto Koji, Nishida Mitsuhiro, Sonoda Akihiko, "Universal Turbulence on Branes
in Holography," Journal of High Energy Physics 1508 (2015) 135 1-28
DOI: 10.1007/JHEP08(2015)135

[学会発表](計 27 件)

発表者名 Norihiro Tanahashi
発表標題 Separability of Maxwell equation in rotating black hole spacetime and its
geometric aspects
学会等名 The 11th MSJ-SI The Role of Metrics in the Theory of Partial Differential
Equations(招待講演)(国際学会)
発表年 2018 年
発表者名 Norihiro Tanahashi
発表標題 Separability of Maxwell equation in rotating black hole spacetime and its
geometric aspects
学会等名 Workshop "Essential next steps for gravity and cosmology"(国際学会)
発表年 2018 年
発表者名 棚橋典大
発表標題 ブラックホール時空で運動する弦のカオスの普遍性
学会等名 日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学
発表年 2018 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 Holographic Floquet Weyl semimetal
学会等名 15th workshop on Non-Perturbative QCD(招待講演)(国際学会)
発表年 2018 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 Out-of-time-order correlator でカオスは測れるか?
学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
発表年 2018 年
発表者名 Norihiro Tanahashi
発表標題 Wave Propagation and Shock Formation in the Most General Scalar-Tensor
Theory
学会等名 Ninth Aegean Summer School, Sifnos Cultural Center(国際学会)
発表年 2017 年
発表者名 Norihiro Tanahashi
発表標題 Universality in Chaos of Particle and String Motions near Black Hole
Horizon
学会等名 The 3rd Karl Schwarzschild Meeting, Frankfurt Institute for Advanced
Studies(国際学会)
発表年 2017 年
発表者名 棚橋典大
発表標題 「ブラックホール時空で運動する弦のカオスの普遍性」
学会等名 宇宙物理・重力コロキウム、大阪市立大学(招待講演)
発表年 2017 年
発表者名 棚橋典大
発表標題 ブラックホール時空で運動する弦のカオスの普遍性
学会等名 日本物理学会秋季大会、宇都宮大学

- 発表年 2017 年
発表者名 棚橋典大
発表標題 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
学会等名 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
- 発表年 2017 年
発表者名 棚橋典大
発表標題 Wave propagation and shock formation in the most general scalar-tensor theories
学会等名 理論物理学コロキウム、立教大学
- 発表年 2017 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 Fate of chaotic strings in a confining geometry
学会等名 Gravitational Dynamics and Black Holes(国際学会)
- 発表年 2017 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 Fast scrambling in holographic Einstein-Podolsky-Rosen pair
学会等名 IPMU-KIAS-Kyunghee U. joint workshop(招待講演)(国際学会)
- 発表年 2017 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 量子カオスとブラックホール
学会等名 量子カオスとホログラフィー(招待講演)
- 発表年 2017 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 重力と乱流・カオス
学会等名 非平衡物理の最前線 -素粒子・宇宙から物性まで-(招待講演)
- 発表年 2017 年
発表者名 Keiju Murata
発表標題 量子力学のOTO
学会等名 Workshop on OTO correlators(招待講演)
- 発表年 2017 年
発表者名 橋本幸士
発表標題 Chaos and chiral condensate
学会等名 international workshop “Quantum gravity, string theory and holography” (招待講演)(国際学会)
- 発表年 2017 年
発表者名 橋本幸士
発表標題 Gauge theories and Chaos
学会等名 KPS meeting, Korea, Daejeon convention center(招待講演)(国際学会)
- 発表年 2017 年
発表者名 橋本幸士
発表標題 「場の理論のカオスとブラックホール」
学会等名 「熱場の量子論」(招待講演)
- 発表年 2017 年
発表者名 橋本幸士
発表標題 「カオス、クォーク、ブラックホール-AdS/CFT 対応による新たな創発時空の特徴づけについて」
学会等名 日本物理学会(招待講演)
- 発表年 2017 年
21 発表者名 橋本幸士
発表標題 Complexity and AdS/CFT: quantum othello game
学会等名 台湾理論科学センター年次研究会(招待講演)
- 発表年 2017 年
22 発表者名 Koji Hashimoto
発表標題 GRAVITY CHALLENGES STRONGLY CORRELATED MATTER: NON-EQUILIBRIUM PHASE DIAGRAM
学会等名 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW HORIZONS IN CONDENSED MATTER PHYSICS(招待講演)(国際学会)
- 発表年 2016 年
23 発表者名 Koji Hashimoto
発表標題 Edge states and D-branes
学会等名 “HOLOGRAPHY AND TOPOLOGY OF QUANTUM MATTER”(招待講演)(国際学会)
- 発表年 2016 年

- 24 発表者名 Koji Hashimoto
発表標題 Boundary conditions of Weyl semimetals
学会等名 International symposium “ BULK-EDGE CORRESPONDENCE 2016 ” (招待講演)(国際学会)
発表年 2016 年
- 25 発表者名 Koji Hashimoto
発表標題 Edge-of-edge states
学会等名 Workshop “ TOPOLOGICAL MATERIALS SCIENCE: INTENSIVE- INTERACTIVE MEETING ”
(招待講演)(国際学会)
発表年 2016 年
- 26 発表者名 橋本幸士, 木下俊一郎, 村田佳樹
発表標題 Conic D-branes
学会等名日本物理学会 2015 年秋季大会
発表年 2015 年
- 27 発表者名 木下俊一郎, 橋本幸士, 村田佳樹, 岡隆史
発表標題ホログラフィック QCD における AC 電場への応答
学会等名日本物理学会 2015 年秋季大会
発表年 2015 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 村田 佳樹

ローマ字氏名: Keiju Murata

所属研究機関名: 慶應義塾大学

部局名: 商学部

職名: 助教

研究者番号(8桁): 00707804

研究分担者氏名: 岡 隆史

ローマ字氏名: Takashi Oka

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 大学院理学研究科

職名: 研究員

研究者番号(8桁): 50421847

(2) 研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。