

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2022

課題番号：16K17704

研究課題名(和文) ゲージ・重力対応にもとづく非平衡・非定常現象の解明

研究課題名(英文) Non-equilibrium and non-stationary phenomena in gauge/gravity duality

研究代表者

木下 俊一郎 (Kinoshita, Shunichiro)

中央大学・理工学部・共同研究員

研究者番号：20548226

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：ゲージ・重力対応のモデルであるD3/D7系に基づき、回転電場の下での新しい非平衡定常系の提案およびその相構造を電場強度・周波数について明らかにした。また、従来の直流電流系について、線形摂動を詳細に調べることで系の安定性を広い電場領域にわたって明らかにした。ブラックホールからの回転エネルギーの引き抜き機構についてストリングと磁力線に共通する性質に基づいてその本質的な物理を解明した。ゲージ重力対応によればブラックホールに対応する量子系が存在するが、このような量子系においてホログラフィックなブラックホールの像を得るための実験的方法論の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゲージ・重力対応は理論的解析が困難である強く相互作用した量子系について、古典重力理論での理論的解析を可能とする強力な手段である。一方でその適用可能性の範囲および限界を精査することも必須であり、現実の実験系などで実現され得る非定常・非平衡系との比較検討は実験・理論両側面からの課題となる。本研究では、回転電場系という近年、実験的にも注目されている新奇な系について、D3/D7系という一例について新しい相構造を理論的に提案した。また、量子系から実験的にブラックホール像を得る方法論も提案した。ここでの現象が今後、実験的に実現・検証されるならゲージ・重力対応の有用性を実験的にも確立するものとなる。

研究成果の概要(英文)：On the basis of the D3/D7 system in the gauge/gravity duality, a new non-equilibrium steady state under a rotating electric field is proposed and its phase structure is elucidated in terms of electric field strength and frequency. The stability of the conventional DC current system is also clarified over a wide range of electric field by analyzing linear perturbations in detail. The essential mechanism of rotational energy extraction from a rotating black hole is elucidated on the basis of the properties common to strings and magnetic field lines. According to the gauge/gravity duality, there exists a strongly-correlated quantum material corresponding to a black hole, and we propose an experimental methodology to obtain a holographic image of the black hole in such a material.

研究分野：重力理論

キーワード：ゲージ・重力対応 ブラックホール D3/D7ブレーン フロッケ状態 回転エネルギーの引き抜き

1. 研究開始当初の背景

ゲージ・重力対応は、一つの極限において AdS 時空での古典重力理論と次元が低い境界上で強結合の共形場理論の間の等価性を主張しており、超弦理論に基づくブレーンを用いた構成からホログラフィック超伝導のようなより現象論的モデルまで、その概念を応用する系は拡大されてきた。ゲージ・重力対応がどこまで適用可能なのか、その範囲や限界を精査することも必要であり、特に非平衡や非定常現象への適用可能性はゲージ理論側での直接的な理論解析が困難な現象に対して古典重力理論での取り扱いという有用な手段を得ることを意味する。一方、非平衡・非定常現象は重力理論側でも理論的に扱われてきた例が限られているため、まず重力理論側で解くことが現実的である適切な問題設定を行った上で、ゲージ理論側で記述される現実の物性系などとの比較検討を見据えなければならない。

これまでにゲージ・重力対応の枠組みで非平衡・定常状態を構成できる例として D3/D7 ブレーン系を用い、10 次元中での D7 ブレーンの運動を数値的に求めるスキームを開発し背景の温度や電場を急激に変化させた場合の非平衡現象を調べた。このようなゲージ理論での相転移現象や非平衡現象といった、非定常で時間発展を伴うような現象の性質を調べるためには、対応する重力理論で記述された時空やブレーンのダイナミクスを考えることが必要とされる。

2. 研究の目的

ゲージ・重力対応を非平衡・非定常系に適用するにあたり、まず重力理論側での非平衡・非定常系を具体的に構築する。こうした重力理論におけるダイナミカルな過程の解析によって、ゲージ理論の強結合系の非平衡・非定常な物理現象の解明を目指す。また、現在進展している強結合系の実験などから得られる結果をもとに、非定常な時空の動学的あるいは熱力学的性質を詳らかにする。このような解析から、ゲージ・重力対応の妥当性および非平衡系への適用可能性の検証、理論的基礎づけである超弦理論への知見を求めていく。

3. 研究の方法

D3/D7 系は比較的単純な設定で、超弦理論に基づきゲージ理論側の対応理論がわかっている中で、重力理論側でも豊かな物性・現象を示すものである。このような系に対して、近年、物性物理でも理論的・実験的両側面から研究が進められている時間周期をもった非平衡系・フロッケ状態のような新奇な設定を与えることで、ゲージ・重力対応を用いた予言などを行っていく。

またブラックホールに代表される時空の持つ熱力学的性質についてエネルギー引き抜き機構の解明など定常を越えた過程について様々な側面から探っていく。

4. 研究成果

(1) D3/D7 模型は外部電場の印加により絶縁相・伝導相の転移が起きることが知られており、特に伝導相では電場によりジュール熱をとまなう伝導電流が生じ散逸のある非平衡定常状態となる。ここでは一定の周波数で電場の方向が回転している回転電場を印加し非平衡状態を D3/D7 系を用いて構成した。まずこのような状態は外部電場自体が時間に陽に依存しているため、通常の定常状態ではなく時間的に周期的なフロッケ状態となりうる。そこで 10 次元時空中の D3 ブレーンを背景とするプローブ D7 ブレーンに時間周期性を課して運動方程式を解くことにより、フロッケ状態に対応する D7 ブレーン解を具体的に構成した。さらに電場強度と回転周波数について D7 ブレーン解の振る舞いを詳細に調べることで、電場強度 E と回転周波数 Ω に対する絶縁・伝導相転移の相図を明らかにした(図 1)。特に周波数方向については特徴的な周期構造を示し、特定の周波数近傍では共鳴的に微小な電場強度でも伝導相への転移が起きうることを示した。これは分極に相当するベクトルメソンの凝縮現象とも解釈でき、物性系での同様な現象の存在可能性を指摘した。

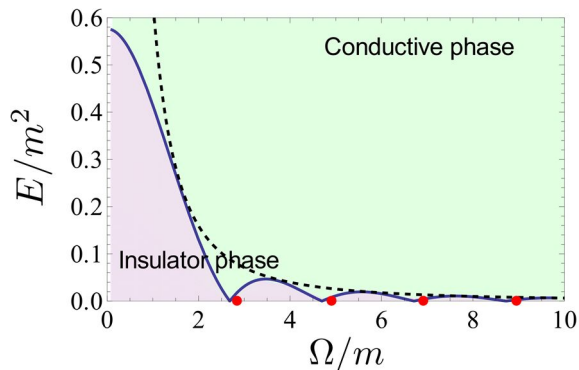


図 1

(2) ブラックホール時空の持つ熱力学的性質は、ゲージ・重力対応においてはゲージ理論側の状態の熱力学的性質の根拠の一つである。このようなブラックホールの持つ物理量であるエネルギーおよび角運動量の引き抜き現象は、粒子については Penrose 過程、波動については super-radiance など知られていた。ここでは超弦理論などでの基本的物体であるストリングやブレーン

ンといった空間方向に広がっている物体の一例として Nambu-Goto スtring を考え、回転ブラックホールからのエネルギー引き抜き機構を調べた。ブラックホールの回転パラメータと String の角速度に対してエネルギー生成率のパラメータ依存性を明らかにし (図 2: String の角速度 ω に対する単位張力あたりの角運動量流速 \hat{q} の関係) 生成しうるエネルギー流速の典型的なオーダーが光速の 5 乗を重力定数で割った Dyson 光度と String の張力という基本的な物理量で与えられることを示した。さらに Nambu-Goto String と電磁場の磁力線の運動学的な同一性に注目することにより、天体物理学で以前より盛んに議論されてきた電磁場による回転ブラックホールのエネルギー引き抜き機構: Blandford-Znajek 機構の本質が磁力線の張力によるものであることを明らかにした。

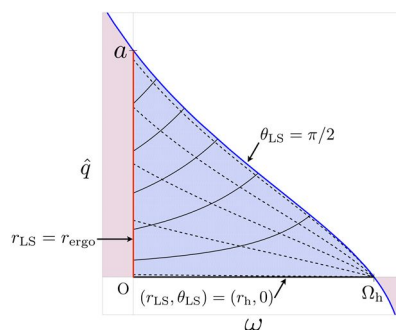


図 2

(3) ゲージ・重力対応の適用できる量子系が現実の物質系上に実現できた場合、その有限温度状態は仮想的な時空中でのホログラフィックなブラックホールに対応することになる。このようなブラックホールの存在を物質上での実験的操作により確認する手法として、物質に与えた入力に対する応答からホログラフィックなブラックホールの重力レンズ効果によって生じるアインシュタインリングの像を構成することを提案した。さらに具体的な計算例としてスカラー場を用い、ブラックホールの大きさや入力の位置に依存した構成され得る像の違いを示した。

(4) 時空のエネルギーはブラックホール熱力学においては重要なパラメータの一つである。一般にエネルギーは時空の時間並進対称性に由来する保存量であるため、動的時空での時空のエネルギーの定義にはあいまいさが残る。しかし球対称など時空計量が warped product であらわされる特別な場合は Kodama vector と呼ばれる量の存在により、動的時空であっても保存するエネルギーが定義できることが知られていた。ここでは warped product ではあらかわせない、3次元軸対称時空について Kodama vector を拡張することで、動的かつ角運動量をもつような時空についての保存エネルギーを定義した。

(5) D3/D7 模型での D7 ブレーンの配位は、絶縁・伝導相転移点近傍で同じ外部パラメータ (温度・電場) の下で複数の電流値をとる解が存在する。現実的にはどれか一つが実現すると考えられるが非平衡定常系であるため、熱力学的安定性による議論は重力側およびゲージ理論側ともに理論的に確立したものは現状知られていない。一方、系の線形摂動に対する動的安定性は、古典的な運動方程式で記述できる重力側ではロバストな概念である。そこで伝導相において D7 ブレーン上の摂動の準固有振動数を求めることにより、系の線形安定性を解析を行った。この結果、電流-電場曲線の折り返し点、つまり電場に対して複数の電流値が現れ始める点で背景解の安定性が切り替わり、一般的に電流値が高い配位の方が動的安定となることを示した。また、不安定となる配位ではある臨界波数より低い摂動モードが不安定となるため、臨界波数に対応して電流密度が非一様となる別の状態 (図 3) が存在しうることを指摘した。

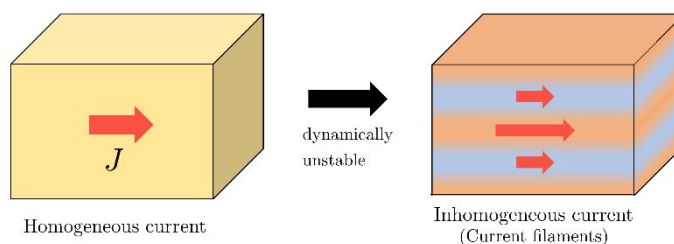


図 3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Chiba Takeshi, Kinoshita Shunichiro	4. 巻 106
2. 論文標題 Quantum clocks, gravitational time dilation, and quantum interference	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.124035	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 Shunichiro Kinoshita, Keiju Murata, Daichi Takeda	4. 巻 2304.01936
2. 論文標題 Shooting null geodesics into holographic spacetimes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Takeshi Chiba, Shunichiro Kinoshita	4. 巻 2304.04375
2. 論文標題 Note on the Time Dilation for Charged Quantum Clocks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Ishigaki Shuta, Kinoshita Shunichiro, Matsumoto Masataka	4. 巻 2022
2. 論文標題 Dynamical stability and filamentary instability in holographic conductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2022)173	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 Kinoshita Shunichiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Extension of Kodama vector and quasilocal quantities in three-dimensional axisymmetric spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.124042	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 Hashimoto Koji, Kinoshita Shunichiro, Murata Keiju	4. 巻 123
2. 論文標題 Einstein Rings in Holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 31602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.031602	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 Hashimoto Koji, Kinoshita Shunichiro, Murata Keiju	4. 巻 101
2. 論文標題 Imaging black holes through the AdS/CFT correspondence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 66018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.066018	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 木下 俊一郎、伊形 尚久	4. 巻 74
2. 論文標題 ブラックホールからエネルギーを引き抜く Blandford-Znajek機構の本質	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 542 ~ 547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.74.8_542	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 Kinoshita Shunichiro , Igata Takahisa	4. 巻 2018
2. 論文標題 The essence of the Blandford-Znajek process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 3300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty024	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 Hashimoto Koji , Kinoshita Shunichiro , Murata Keiju , Oka Takashi	4. 巻 2017
2. 論文標題 Holographic Floquet states I: a strongly coupled Weyl semimetal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2017)127	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 Shunichiro Kinoshita, Takahisa Igata, Kentaro Tanabe	4. 巻 94
2. 論文標題 Energy extraction from Kerr black holes by rigidly rotating strings	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.124039	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 Kinoshita Shunichiro, Murata Keiju, Oka Takashi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Holographic Floquet states II: Floquet condensation of vector mesons in nonequilibrium phase diagram	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2018)096	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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Shunichiro Kinoshita
2. 発表標題 Dynamical stability in holographic conductors
3. 学会等名 ExU International Workshop "Quantum extreme universe from quantum information" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下俊一郎
2. 発表標題 "Dynamical stability and filamentary instability in holographic conductors"
3. 学会等名 ブラックホール準固有振動研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunichiro Kinoshita
2. 発表標題 On geometrical origin of Kodama vector and its applications
3. 学会等名 Second Annual Meeting of the Extreme Universe Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunichiro Kinoshita
2. 発表標題 On geometrical origin of Kodama vector
3. 学会等名 The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木下俊一郎
2. 発表標題 Covariant formula of thermal entropy for probe brane systems
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木下俊一郎
2. 発表標題 D3/D7 system in circularly-polarized electromagnetic waves
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 木下俊一郎
2. 発表標題 円偏光電磁波中での有限密度ホログラフィックQCD
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木下俊一郎, 伊形尚久
2. 発表標題 Magnetic tension as the essence of the Blandford-Znajek process
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木下俊一郎, 橋本幸士, 村田佳樹, 岡隆史
2. 発表標題 Phase diagram of holographic QCD in rotating electric fields
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 木下俊一郎, 伊形尚久, 田辺健太郎
2. 発表標題 Energy extraction from Kerr black holes by rigidly rotating strings
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shunichiro Kinoshita
2. 発表標題 Energy extraction from Kerr black holes by rigidly rotating strings
3. 学会等名 KMI mini-workshop on General relativity in higher dimensions -recent progress and future perspective-
4. 発表年 2016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
---------	---------