

令和元年6月5日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17658

研究課題名(和文) ゲージ・重力対応を用いた非平衡物理の研究

研究課題名(英文) Nonequilibrium physics in AdS/CFT

研究代表者

村田 佳樹 (Murata, Keiju)

大阪大学・理学研究科・特任助教(常勤)

研究者番号：00707804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：物性系ではしばしば強いレーザーを用いることにより非平衡現象を駆動する。レーザーを系に当て続けると、放射のエネルギーと散逸が釣り合った状態に落ち着く。このような状態はフロケット状態と呼ばれ、光誘起現象を理解する上で重要な役割を果たしている。我々は重力側で、周期的に時間依存する電場を導入することにより、ホログラフィックなフロケット状態を実現し、その相構造を解明することに成功した。この研究は、非平衡物性物理学の一つの目標である「光」による物性の制御をホログラフィックに実現している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QCDや物性系などの強結合系の物理で、第一原理計算が最も困難なものは何であろうか？その一つは非平衡現象である。

その非平衡現象の理解は様々な場面で重要になる。例えば、RHICやLHCなどの重イオン衝突実験では系は本質的に非平衡になる。また、物性物理においては、強力なレーザーを用いて相転移現象を自在に制御すること(光誘起相転移)が大きな目標の一つになっており、冷却原子系やモット絶縁体などの非平衡過程の実験が最近盛んに行われている。本研究では、重力理論での計算を通して非平衡物理を解析する一つの道を開いたことになる。

研究成果の概要(英文)：In the condensed matter physics, the non-equilibrium process is often driven by a strong laser. When we irradiate the laser to a system for a while, the system will settle down to a state in which the irradiated energy and dissipation are balanced. Such a state is called the Floquet state and plays an important role to understand photo-induced phenomena. We realized holographic version of the Floquet state by introducing a time periodic electric field in gravity theory and revealed its phase structure.

研究分野：一般相対論

キーワード：ゲージ・重力対応

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

1. 研究開始当初の背景

QCD や物性系などの強結合系の物理で、第一原理計算が最も困難なものは何であろうか？ その一つは非平衡現象である。平衡過程に関しては格子 QCD 計算等が大きな成功を収めているのに対して、非平衡過程に関しては有効な方法論すら存在しないのが現状である。しかし、不運なことに、非平衡現象は様々な場面に現れる。例えば、RHIC や LHC などの重イオン衝突実験では系は本質的に非平衡になる。また、物性物理においては、強力なレーザーを用いて相転移現象を自在に制御すること(光誘起相転移)が大きな目標の一つになっており、冷却原子系やモット絶縁体などの非平衡過程の実験が最近盛んに行われている。

そこでゲージ・重力対応を使って考えてみよう。場の理論の非平衡現象は、重力側では時空のダイナミクスに帰着出来る。一般相対論において、時空のダイナミクスは初期値問題として明確に定式化されている。また、その数値計算方法についても深い歴史がある。ダイナミクスの扱いが比較的容易な重力理論側から、QCD や物性系などの非平衡物理にアプローチしようというのが、本研究での狙いであった。

2. 研究の目的

我々が定式化した数値計算法を用いて、重力理論を非平衡物理の有効理論として利用するための基礎を築くことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

我々は過去の研究で QCD の非平衡過程をゲージ・重力対応を用いて調べている。その応用として次は物性物理の非平衡過程を調べる。物性系における「電子と正孔」には、QCD における「クォークと反クォーク」との類似性がある。よって、ゲージ・重力対応の計算によって物性系の定性的な性質についても示唆が得られると考えられる。

物性系では主にレーザーで非平衡現象を駆動するので、我々も交流電場を考えることにする。特に、電流の時間依存性や緩和時間などを決定する。また、非平衡系での「相図」に対応するものを作成する。

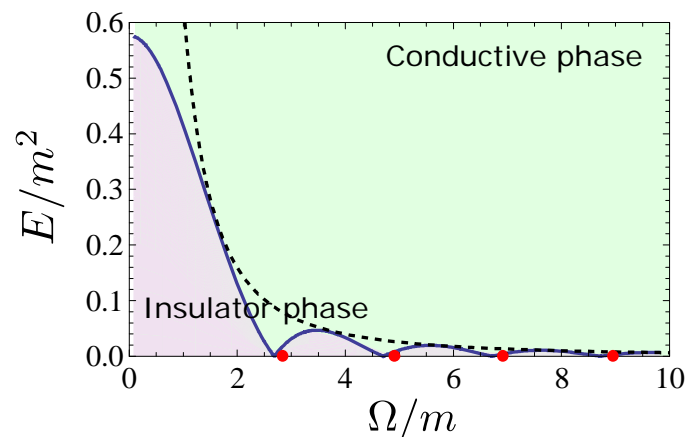
物性物理と対応させる利点の一つはその実験のしやすさにある。例えば、冷却原子系やモット絶縁体などにおいてはレーザーに対する応答は実験で精度よく測定されているので、それらを我々の結果と比較する。この研究は、物性系に起こり得る新たな現象を模索すると同時に、重力理論が非平衡物理の有効理論として機能することを裏付ける意義を持つ。

4. 研究成果

物性系ではしばしば強いレーザーを用いることにより非平衡現象を駆動する。レーザーを系に当て続けると、放射のエネルギーと散逸が釣り合った状態に落ち着く。このような状態はフロッケ状態と呼ばれ、光誘起現象を理解する上で重要な役割を果たしている。

我々は重力側で、周期的に時間依存する電場を導入することにより、ホログラフィックなフロッケ状態を実現した。絶縁体に周期電場を掛けると何か起きるだろうか？ 時間依存しない DC 電場の場合、電場が弱いと電流は流れないが、強くしすぎると絶縁破壊が起こり電流が流れ出す。つまり、ある閾値の電場 $E=E_c$ が存在し、その前後で絶縁相と伝導相の転移が起きるのである。AC 電場の場合は、電場の大きさ E に加えてその振動数 Ω がパラメータとして加わる。その重力側での計算結果が右図である。この図で興味深い点は、振動数をエキシトンの励起エネルギー近くに微調整するとほぼゼロの電場で相転移を起こせることである。エキシトン励起エネルギー近傍ではエキシトンが多く生成される。それにより、クーロン力がデバイ遮蔽され、エキシトンが束縛状態を作るのが難しくなる。その結果、弱い電場でも電流が流れるのである。

この研究は、非平衡物性物理学の一つの目標である「光」による物性の制御をホログラフィックに実現している我々は、最終的にはこれらの結果の実験的検証も視野に入れている。



5 . 主な発表論文等

{ 雑誌論文 }(計 11 件)

すべて査読有り。

1. Takaaki Ishii, [Keiju Murata](#),

"Floquet superconductor in holography"

arXiv:1804.06785 [hep-th]

Phys.Rev. D98 (2018) no.12, 126005

2. Koji Hashimoto, [Keiju Murata](#), Norihiro Tanahashi,

"Chaos of Wilson Loop from String Motion near Black Hole Horizon"

arXiv:1803.06756 [hep-th]

Phys. Rev. D98 (2018) no.8, 086007

3. Shunichiro Kinoshita, [Keiju Murata](#), Takashi Oka,

"Holographic Floquet states II: Floquet condensation of vector mesons in nonequilibrium phase diagram"

arXiv:1712.06786 [hep-th]

JHEP 1806 (2018) 096

4. [Keiju Murata](#),

"Fast scrambling in holographic Einstein-Podolsky-Rosen pair"

arXiv:1708.09493 [hep-th]

JHEP 1711 (2017) 049

5. Koji Hashimoto, [Keiju Murata](#), Ryosuke Yoshii,

"Out-of-time-order correlators in quantum mechanics"

arXiv:1703.09435 [hep-th]

JHEP 1710 (2017) 138

6. Koji Hashimoto, Shunichiro Kinoshita, [Keiju Murata](#), Takashi Oka,

"Holographic Floquet states I: A strongly coupled Weyl semimetal"

arXiv:1611.03702 [hep-th]

JHEP 1705 (2017) 127

7. Takaaki Ishii, [Keiju Murata](#), Kentaroh Yoshida,

"The fate of chaotic strings in a confining geometry "

arXiv:1610.05833 [hep-th]

Phys.Rev. D95 (2017) no.6, 066019

8. Koji Hashimoto, [Keiju Murata](#), Kentaroh Yoshida,

"Chaos in chiral condensates in gauge theories"

arXiv:1605.08124 [hep-th]

Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.23, 231602

9. Takaaki Ishii, [Keiju Murata](#),

"Dynamical AdS strings across horizons"

arXiv:1512.08574 [hep-th]

JHEP 1603 (2016) 035

10. Koji Hashimoto, Shunichiro Kinoshita, [Keiju Murata](#),

"Conic D-branes"

arXiv:1505.04506 [hep-th]

PTEP 2015 (2015) 8, 083B04

11. Takaaki Ishii, [Keiju Murata](#),

"Turbulent strings in AdS/CFT"

arXiv:1504.02190 [hep-th]

JHEP 1506 (2015) 086

[学会発表](計 33 件)
すべて発表者は研究代表者(村田佳樹)。

国際会議での招待講演

1. 2018.6.11-14
15th workshop on Non-Perturbative QCD(Paris)
"Oscillatory Electric Field in Holography"
2. 2018.2.18
The international kick-off workshop of "Discrete Geometric Analysis for Materials Design"
(新学術領域「次世代物質探索のための離散幾何」キックオフワークショップ) (Katahira,
Tohoku University)
"Holographic Floquet Weyl semimetal"
3. 2017.12.6-8
IPMU-KIAS-Kyunghee U. joint workshop (KIAS, Seoul)
"Fast scrambling in holographic Einstein-Podolsky-Rosen pair"
4. 2016.11.26-27
KMI mini-workshop on General relativity in higher dimensions -recent progress and future
perspective- (Nagoya University)
"The fate of chaotic strings in a confining geometry"
5. 2016.6.13-16
14th workshop on Non-Perturbative QCD(Paris)
"Electric field quench and turbulent meson condensation in AdS/CFT"

国内会議での招待講演

6. 2018.3.30
量子カオスとホログラフィー (京都大学) "量子カオスとブラックホール"
7. 2017.12.6-8
非平衡物理の最前線 -素粒子・宇宙から物性まで- (理研和光)
"重力と乱流・カオス"
8. 2017.5.26
Workshop on OTO correlators (非時間順序相関関数についての研究会) (大阪大学柴原キャン
パス)
"量子力学の OTO"
9. 2016.7.14
RIMS 研究集会『高レイノルズ数の流れを記述するモデルの数理』(京大数理研)
"時空の乱流"
10. 2015.1.7
乱流と QCD・重力(大阪大学)
"重力と乱流"

国際会議での通常発表

11. 2018.10.31-11.2
International Workshop on "Theoretical Particle Physics 2017" (Osaka University)
"Imaging black holes through AdS/CFT";
12. 2018.9.1-14
Dynamics in Strong Gravity Universe (YITP)
"Imaging black holes through AdS/CFT";
13. 2018.7.2-5
Holography and Extreme Chromodynamics(HoloQuark2018) (Santiago de Compostela,
Spain)

"Holographic Floquet state ~Oscillatory Electric Field in Holography~";

14. 2018.4.9-20

International Molecule Program on Floquet Theory : Fundamentals and Applications (YITP)

"Floquet superconductor in holography";

15. 2017.11.13-14

The international kick-off meeting of A01 theoretical group of "Discrete Geometric Analysis for Materials Design" (A01 理論班キックオフミーティング) (Nihonbashi office, RIKEN)

"Floquet Weyl semimetal in holography"

16. 2017.9.26-27

Gravitational Dynamics and Black Holes (Nagoya University)

"Fate of chaotic strings in a confining geometry"

17. 2016.10.24-28

The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation (Osaka city univ)

"Dynamical AdS strings across horizons"

18. 2016.6.27-7.1

Numerical Relativity and Holography(NumHol2016) (Santiago de Compostela, Spain)

"Turbulent strings in AdS/CFT"

19. 2015.12.7-11

The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation (YITP)

"Turbulent strings in AdS/CFT"

20. 2015.11.9-13

Developments in String Theory and Quantum Field Theory (YITP)

"Electric field quench and turbulent meson condensation in AdS/CFT"

21. 2015.7.12-18

14th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (Rome, Italy)

"Turbulent strings in AdS/CFT"

22. 2015.6.29-7.2

SPICE-Workshop on "Bad Metal Behavior in Mott Systems" (Mainz)

"Turbulent strings in AdS/CFT" (Poster)

国内会議での通常発表

23. 2019.3.14-17

日本物理学会 2019 年春季大会 (九州大学伊都キャンパス)

"Black resonators and geons in AdS5"

24. 2019.1.28-29

ブレーンとソリトンの量子異常が導くトポロジカル物質 (大阪大学)

"Imaging black holes through AdS/CFT"

25. 2019.1.12-14

第 20 回特異点研究会 『特異点と時空、および関連する物理』 (九州大学西新プラザ)

"Black resonators and geons in AdS5"

26. 2018.3.22-25

日本物理学会 2018 年春季大会 (東京理科大学)

"Fast scrambling in holographic Einstein-Podolsky-Rosen pair"

27. 2017.12.28-30

第 19 回特異点研究会 『特異点と時空、および関連する物理』 (大阪市立大学)

"AdS バルクのブラックホールは見えるか?"

28. 2017.9.12-15

日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学)
"Out-of-time-order correlator でカオスは測れるか?"

29. 2016.12.27-29
第 18 回特異点研究会『特異点と時空、および関連する物理』(立教大学)
"The fate of chaotic strings in a confining geometry"

30. 2016.9.21-24
日本物理学会 2016 年秋季大会 (宮崎大学 木花キャンパス)
"回転電場で作るホログラフィックワイル半金属"

31. 2016.3.19-22
日本物理学会 2016 年春季大会 (東北学院大学 泉キャンパス)
"AdS/CFT 対応を用いたクォーク 反クォーク対の動的解離現象の解析"

32. 2016.1.9-11
第 17 回特異点研究会『特異点と時空、および関連する物理』(慶應義塾大学)
"基本弦上でのホライズン生成"

33. 2015.9.25-28
日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学)
"Turbulent strings in AdS/CFT"

〔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
<http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/~keiju/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

(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。