

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400350

研究課題名(和文)非平衡強相関係・超伝導体の理論

研究課題名(英文)Theory of nonequilibrium strongly correlated systems

研究代表者

岡 隆史 (Oka, Takashi)

大阪大学・理学研究科・招へい研究員

研究者番号：50421847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではトポロジカル物質、量子スピン系、強相関電子系(モット絶縁体)、量子色力学(QCD)真空など様々な量子状態が強力なレーザー光の元でどのような非平衡相転移をみせるのかを分野横断的に理論研究した。対象は多彩ではあるが、背景となるアイデアは「フロケ・エンジニアリング」(=振動外場による制御)と共通している。様々な物質は高速に振動する外場の元では熱せられると同時に外場のない状態とは異なる力を感じる(直感的な比喻としてはヘリコプターは回転翼の力で上向きの力を静的に得る)。逆にこの性質を利用することで通常では存在できない望ましい性質を物質に発現させることが可能となる。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically studied the nonequilibrium phase transitions that can be induced by periodic driving in various quantum many-body systems such as topological materials, quantum magnets, strongly correlated electron systems (Mott insulator), as well as the QCD vacuum. Although the target of the research were diverse, we had a very simple and common idea. This is "Floquet engineering", i.e., control of materials through periodic driving forces.

研究分野：非平衡量子多体系

キーワード：強相関電子系 トポロジ 非平衡

1. 研究開始当初の背景

遷移金属化合物、有機電子錯体などの物質群(強相関電子系)はその強い電子間相互作用ゆえに他の物質とは際だった特性を示す。しかしながら従来の研究は平衡状態における電子秩序に関するものが中心であった。近年、薄膜の加工技術、レーザー技術の向上などによって、強相関電子系の**非平衡状態**(非線形 IV-特性、ポンプ=プローブ分光における強励起状態)などに興味が向けられつつある。この新しい分野は現在、学理的興味(**量子多体系の非平衡統計力学、非平衡相転移**)と産業的興味(**強相関エレクトロニクス**)が絡み合いながら急速に進展しつつある。

強相関系の非平衡状態に関する理論的研究は極めて萌芽的な段階にある中、申請者はこれまで、最も基礎的な現象であるモット絶縁体における絶縁破壊現象、および、強相関エレクトロニクスの根幹に位置する巨大電気抵抗効果(CERM)について、世界に先駆けて理論を発表し、不揮発性メモリへの応用も提案した。強相関電子系の時間発展を厳密に解析できる方法としては、現在、時間依存密度行列繰り込み群が広く知られており、我々はこの手法を初めて2005年に Hubbard モデルに対して適用した。さらに、我々は最近、強相関電子系の相転移の研究において重要な手法である動的平均場理論を非平衡系に対して拡張した。また、銅酸化物における d-波超伝導体のように異方的超伝導体の非平衡状態を解析する手法として非平衡揺らぎ交換近似を開発した。この手法を力学方程式の方法と組み合わせることで実時間ダイナミクスへ拡張する。

2. 研究の目的

本研究では非平衡状態にある強相関電子系の理論解析を行う計算手法の開発とともに、実際の物理現象に適用することで平衡系に

は存在しない新現象の探索を行っていく。特に興味を持っているのは以下の二つの問題である。

(a-1) **電子・格子結合**: 現実の物質においては電子系が電場/レーザー光から吸収したエネルギーは電子・光子相互作用を通して熱として系から逃げていく。熱浴としての格子系を結合させることによって初めて現実的な非平衡定常状態の研究が可能となる。本研究では Hubbard+Holstein モデルを対象として非平衡 FLEX を拡張する。

(a-2) **磁性秩序**: 現実の銅酸化物の絶縁体相においては反強磁性のスピン秩序が存在する。レーザーによって磁性秩序を制御する方法を探索する。

3. 研究の方法

レーザーによって駆動された量子系はフロッケの方法を使うことによって定常系の物理にマップすることが可能である。磁性体やトポロジカル物質、そして強相関物質に対するフロッケ・エンジニアリング、すなわち周期外場による物性制御の理論を確立する。

4. 研究成果

本研究の成果はトポロジカル物質、量子スピン系、強相関電子系(モット絶縁体)といった物性分野の対象に加え、量子色力学(QCD)真空のレーザー励起へとまたがる学際的なものである。しかしながら背景となるアイデアは物質のフロッケ・エンジニアリングということで共通している。特に円偏光レーザーは時間反転対称性を破るため静磁場と似た働きをする。例えば2次元物質に照射すると量子ホール絶縁体を実現する。このアイデアを3次元ディラック物質に適用すると光誘起ワイル電子系が実現する。一方、量子スピン系に同じく円偏光レーザーを照射するとカイラルスピン液体とよばれる、3スピン項が有限期待値を持つ状態が実現することを明らかにした。また、実験グループと協力して強力なレーザー光によってモット絶縁体が金属化する絶縁破壊現象の世界初となる検証を行った。

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15件)

T. Oka, L. Bucciantini, "Heterodyne Hall effect in a two-dimensional electron gas", *Physical Review B* **94**, 155133 (2016).

T. Mikami, S. Kitamura, K. Yasuda, N. Tsuji, T. Oka, H. Aoki, "Brillouin-Wigner

theory for high-frequency expansion in periodically driven systems: Application to Floquet topological insulators”, *Physical Review* **B 93**, 144307 (2016).

S. Ebihara, K. Fukushima, T. Oka, “Chiral pumping effect induced by rotating electric fields”, *Physical Review* **B 93**, 155107 (2016).

M. Sato, S. Takayoshi, and T. Oka, “Laser-Driven Multiferroics and Ultrafast Spin Current Generation”, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 147202 (2016)

R. Citro, E. G. Dalla Torre, L. D’Alessio, A. Polkovnikov, M. Babadi, T. Oka, E. Demler, “Dynamical stability of a many-body Kapitza pendulum”, *Annals of Physics* **360**, 694 (2015).

K. Hashimoto, S. Kinoshita, K. Murata, T. Oka, “Meson turbulence at quark deconfinement from AdS/CFT”, *Nuclear Physics* **B 896**, 738 (2015).

K. Hashimoto, S. Kinoshita, K. Murata, T. Oka, “Turbulent meson condensation in quark deconfinement”, *Phys. Lett. B* **746**, 311 (2015).

B. Mayer, C. Schmidt, A. Grupp, J. Bühler, J. Oelmann, R. E. Marvel, R. F. Haglund Jr, T. Oka, D. Brida, Al. Leitenstorfer, Al. Pashkin, “Tunneling breakdown of a strongly correlated insulating state in $V O_2$ induced by intense multiterahertz excitation”, *Phys. Rev.* **B 91**, 235113 (2015).

M. A. Sentef, M. Claassen, A. F. Kemper, B. Moritz, T. Oka, J. K. Freericks, T. P. Devereaux, “Theory of Floquet band formation and local pseudospin textures in pump-probe photoemission of graphene”, *Nat. Com.* **6**, 7047 (2015).

H. Dehghani, T. Oka, A. Mitra, “Out-of-equilibrium electrons and the Hall conductance of a Floquet topological insulator”, *Physical Review* **B 91**, 155422 (2015).

R. Anzaki, K. Fukushima, Y. Hidaka, T. Oka, “Restricted phase-space approximation in real-time stochastic quantization”, *Annals of Physics* **353**, 107 (2015)

K. Hashimoto, T. Oka, A. Sonoda, “Electromagnetic instability in holographic QCD”, *JHEP* **06**, 001(2015).

S. Takayoshi, M. Sato, T. Oka, “Laser-induced magnetization curve”, *Physical Review* **B 90**, 214413 (2014).

H. Dehghani, T. Oka, A. Mitra, “Dissipative Floquet topological systems”, *Physical Review* **B 90**, 195429 (2014).

S. Takayoshi, H. Aoki, T. Oka, “Magnetization and phase transition induced by circularly polarized laser in quantum magnets”, *Physical Review B* **90**, 085150 (2014)

[学会発表](計11件)
国際会議招待講演に限定する：

Takashi Oka: International research school: Electronic states and Phases Induced by Electric or Optical Impacts (IMPACT2016), 8/23-9/2, Cargès, France, 2016.

Takashi Oka: The Low Energy Electrodynamics in Solids 2016 (LEES2016), 5/29-6/3, Kyoto, Japan, 2016.

Takashi Oka: Interacting Quantum Systems out of Equilibrium, Rice university, 4/5-6, Houston, USA, 2016.

Takashi Oka: “International Conference on Superconductivity and Magnetism”-ICSM2016, 4/24-30, Fethiye, Turkey, 2016.

Takashi Oka: (discussion leader) Gordon conference on “Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems”, 2/14-19, Lucca, Italy, 2016

Takashi Oka: “Quantum Magnets 2015”, 9/13-15, Kolymbari, Crete, Greece, 2015.

Takashi Oka: "Workshop on Emergence in driven solid-state and cold atom systems", 8/31-91, Zentrum fur Optische Quantetechnologien, Hamburg, Germany, 2015

Takashi Oka: SPICE workshop "Bad metal behavior in Mott systems: from holographic duality to memristive synaptic devices and beyond", 6/29th – 7/3, Mainz, Germany, 2015.

Takashi Oka: "CMSI International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations", 2/18-21, Tokyo, Japan, 2015

Takashi Oka: "Yukawa International Seminar 2014 (YKIS2014): Nonequilibrium Phenomena in Novel Quantum States", 12/3-5, Kyoto, Japan, 2014

Takashi Oka: 第67回(26年度)藤原セミナー「物理現象の実時間発展と外場による時間操作」" Real-time dynamics of physical phenomena and manipulation by external fields ", 9/15-19, Tomakomai, Japan, 2014.

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.pks.mpg.de/~oka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 隆史 (OKA, Takashi)

大阪大学・理学研究科・招へい研究員

研究者番号: 50421847

(4) 研究協力者

高吉 慎太郎 (TAKAYOSHI, Shintaro)

佐藤 昌寛 (SATO, Masahiro)