

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17729

研究課題名(和文)超伝導擬スピンのコヒーレント量子制御の基礎理論

研究課題名(英文)Theory of coherent quantum control of superconductors' pseudospins

研究代表者

辻 直人(Tsuji, Naoto)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：90647752

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)：超伝導体のミクロな量子状態を表す超伝導擬スピンをテラヘルツ光によってコヒーレントに制御する基礎理論を構築した。多軌道超伝導体においては各軌道の擬スピンのジョセフソン結合するが、擬スピンの集団運動であるヒッグスモードやレゲットモードを光の非線形効果によって誘起できることを明らかにした。また、d波超伝導体に対して非線形テラヘルツカー効果の理論解析を行い、d波ヒッグスモードがはじめて実験的に観測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ光によって超伝導体の量子状態、すなわち超伝導擬スピンを動的に制御する新しい道が開けた。このことによってヒッグスモードやレゲットモードなどの超伝導擬スピンの集団運動の性質が明らかになっただけでなく、テラヘルツ光によって超伝導体のクーパー対の対称性を検出する新たなスペクトロスコピー法が生まれた。今後この研究をさらに発展させることで、光によって超伝導を動的に発現するメカニズムの解明につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：We have constructed a fundamental theory for coherent terahertz-light control of superconductors' pseudospins, which represent microscopic quantum states of superconductors. In multiorbital superconductors, pseudospins are interacting via Josephson coupling, with which we showed that one can induce collective motions of pseudospins such as Higgs and Leggett modes by nonlinear optical effects. For d-wave superconductors, we theoretically studied nonlinear terahertz Kerr effects, and observed d-wave Higgs mode experimentally for the first time.

研究分野：物性理論

キーワード：光物性 超伝導 非平衡

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導体において最近、テラヘルツ光を用いた擬スピン共鳴と呼ばれる基本的な現象の発見が実験と理論の両面で同時になされた[1][2]。超伝導体のミクロな量子状態は、電子のスピンと類似した「擬スピン」と呼ばれるものの集団で表される[3]。擬スピンは、 z 成分が準粒子の密度、 xy 成分がクーパー対の密度と位相を表す。これまではポンプ・プローブ分光により超伝導体のインコヒーレントなダイナミクスの観測が主になされてきたが、クーパー対の量子コヒーレンスを保った擬スピンの歳差運動がテラヘルツ光で観測され、さらにテラヘルツ光によって擬スピンの歳差運動を共鳴的に増幅することができたのはこれが初めてである。擬スピンを外部から制御するという観点からは、磁性体との比較でいえば、核磁気共鳴(NMR)や電子スピン共鳴(ESR)が発見された段階によりやく到達したと言える。であるならば、超伝導体の擬スピンと磁性体の実スピンとのアナロジーをさらに押し進めて、スピン系やスピントロニクスで知られている様々な現象を超伝導擬スピンのコヒーレントな量子制御に応用できないだろうか。これは擬スピンを制御するという基本的な興味にとどまらず、常伝導状態から超伝導を動的に発現させるという、超伝導の新たな可能性を切り拓くと期待できる。

2. 研究の目的

超伝導体において最近発見されたテラヘルツ光による擬スピンの歳差運動の共鳴現象を土台に、スピン系やスピントロニクスで培われたアイデアを応用して、超伝導擬スピンのコヒーレントな量子ダイナミクスの制御を可能にする基礎理論の構築に取り組む。また、 d 波超伝導体などの非従来型超伝導体の電子状態をコヒーレントに光で量子制御する方法を開発する。それらを応用して、高温で超伝導が動的に発現するメカニズムの理論的な提案を目指す。

3. 研究の方法

超伝導擬スピンの量子制御の基礎理論を確立するために、時間依存平均場近似をもとに、擬スピンの理論モデルにジョセフソン結合やベリー位相の効果を取り込んだ新たなモデルを構築する。平均場近似を超えてフォノンの遅延効果を取り入れるために格子モデルを不純物モデルに置き換えて解析する手法である非平衡動的平均場理論を応用し、ミグダル近似を用いて非平衡不純物問題を解く。実際の物質においては不純物の影響は無視できないので、不純物効果を取り入れるためにボルン近似を用いて解析する。現実物質と対応させた解析をする際には密度汎関数理論にもとづいた第一原理計算を利用し、電子やフォノンのバンド構造を求め、電子格子相互作用の大きさなどを見積もる。

4. 研究成果

(1) 多軌道の超伝導体においては、各軌道の超伝導擬スピン同士がジョセフソン結合したモデルで表される。超伝導状態として擬スピンが xz 成分を持つ場合を考えると、擬スピンの集団運動として各軌道の x 成分が振動するヒッグスモードと、軌道間で y 成分が交互に振動するレグレットモードが知られている。これらは光に対して線形応答しないが、非線形領域まで行くと光で励起できることを示した[4]。特に三次高調波の共鳴によってヒッグスモードやレグレットモードが観測できる可能性について議論した。多軌道超伝導体である NbN において観測された三次高調波の共鳴の由来を調べるために、入射光と透過光の偏光角度依存性を理論・実験の両面から調べ、三次高調波はほとんど角度依存性を持たないことを明らかにした[5]。この結果を第一原理計算を用いた解析と比較することで、三次高調波の共鳴が主にヒッグスモード由来であることがわ

かった[6]。超伝導体におけるヒッグスモードの研究の最近の進展についてレビューした総説を出版した[7]。

(2) 電子と格子が強く相互作用する強結合超伝導体においては、フォノンの遅延効果が一般に無視できないと考えられる。これは平均場の枠組みを超えた強相関効果に属し、新たな解析手法を必要とする。我々は非平衡動的平均場理論を電子格子相互作用系に拡張し、フォノンの遅延効果を考慮しながら電子と格子のダイナミクスを扱うことができる手法を開発した[8][9]。この手法を応用することで、強結合超伝導体において通常のヒッグスモードとは別にフォノンと超伝導秩序が結合した新たな集団励起モードが存在することを明らかにした[10]。ヒッグスモードの緩和の仕方が、温度を上げることによってべき減衰から指数関数減衰に変化することもわかった[11]。また、フォノンを光によって共鳴振動させたときに超伝導秩序が増強されるかを調べ、光が照射されている最中は有効的な電子格子相互作用が増強されるが、それにまさる有効温度上昇の効果によって超伝導自体は抑制されることがわかった[12]。銅酸化物高温超伝導体などでは強い電子間相互作用による強相関効果が重要な役割を果たすと考えられている。非平衡状態においてそのような効果を扱うために時間依存揺らぎ交換近似という手法を開発し、二次元ハバード模型に应用することで運動量に依存した緩和が起きることを明らかにした[13]。さらに、超伝導臨界温度以上でも存在する超伝導揺らぎの効果が光励起によってどのように変化するかを、時間依存ギンツブルク・ランダウ方程式を解析することで調べた[14]。

(3) 光励起することで、ベリー位相の効果を動的に生み出すことができる。その例として、時間に周期的な外場によってトポロジカルな相に変化するフロケットトポロジカル絶縁体が知られている。我々は Brillouin-Wigner 摂動法を高周波数展開に应用することでフロケットトポロジカル絶縁体を系統的に扱うことができる手法を開発し、様々な格子モデルに应用することで多彩なトポロジカル相が現れることが明らかになった[15]。非平衡によってトポロジカルな性質を含む様々な物性が制御できることをレビューした解説記事を出版した[16]。

(4) 銅酸化物高温超伝導体をテラヘルツレーザーによって励起することで、励起されている最中に電場振幅の 2 乗に比例したコヒーレントな振動モードが観測された[17](図 1)。これは、光励起によって光学応答が変化する非線形テラヘルツカー効果の一種である。パルス光の偏光角度を制御することで、角度に依存する成分と依存しない成分に分解することができる。平均場近似の解析によって、角度に依存しない成分は主に d 波超伝導のヒッグスモード由来であることが示唆された。キャリアドーパ量を変化させることで、アンダードーパ領域に近づくに従って角度に依存しないコヒーレント成分の割合が増大することがわかった。また、様々なクーパ対の対称性を持つ超伝導体をテラヘルツ光によって励起したときに得られる応答スペクトルを理論的に分類し、ヒッグスモードを観測することでクーパ対の対称性を逆に検出できるヒッグススペクトロスコーピー法を提案した[18]。

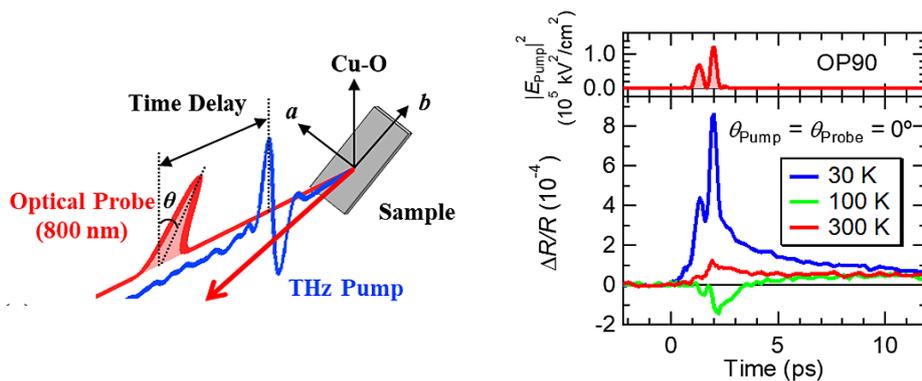


図 1. (左) 銅酸化物高温超伝導体に対するテラヘルツポンプ・光学プローブ分光の概念図。(右) 得られた反射率変化のシグナルをポンプ光の電場振幅の 2 乗と比較したもの。文献[17]より。

<引用文献>

- [1] R. Matsunaga, N. Tsuji, et al., *Science* **345**, 1145 (2014).
- [2] N. Tsuji and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **92**, 064508 (2015).
- [3] P. W. Anderson, *Phys. Rev.* **112**, 1900 (1958).
- [4] Y. Murotani, N. Tsuji, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **95**, 104503 (2017).
- [5] R. Matsunaga et al., *Phys. Rev. B* **96**, 020505(R) (2017).
- [6] N. Tsuji and Y. Nomura, arXiv:2004.00286.
- [7] R. Shimano and N. Tsuji, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11**, 103 (2020).
- [8] 村上雄太, 辻直人, 青木秀夫, 「非平衡動的平均場理論の最近の進展と光誘起ダイナミクス」, 固体物理, Vol. 53, No. 5, 1(209), 2018.
- [9] N. Tsuji, Y. Murakami, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **94**, 224519 (2016).
- [10] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **93**, 094509 (2016).
- [11] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **94**, 115126 (2016).
- [12] Y. Murakami, N. Tsuji, M. Eckstein, and P. Werner, *Phys. Rev. B* **96**, 045125 (2017).
- [Editors' Suggestion]
- [13] S. Sayyad, N. Tsuji, A. Vaezi, M. Capone, M. Eckstein, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **99**, 165132 (2019).
- [14] R. Iwazaki, N. Tsuji, and S. Hoshino, *Phys. Rev. B* **100**, 104521 (2019).
- [15] T. Mikami, S. Kitamura, K. Yasuda, N. Tsuji, T. Oka, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **93**, 144307 (2016).
- [16] 辻直人, 「非平衡と物性」, 数理科学 2019 年 1 月号.
- [17] K. Katsumi et al., *Phys. Rev. Lett.* **120**, 117001 (2018). [Editors' Suggestion]
- [18] L. Schwarz, B. Fauseweh, N. Tsuji et al., *Nat. Commun.* **11**, 287 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 L. Schwarz, B. Fauseweh, N. Tsuji, N. Cheng, N. Bittner, H. Krull, M. Berciu, G. S. Uhrig, A. P. Schnyder, S. Kaiser, D. Manske	4. 巻 11
2. 論文標題 Classification and characterization of nonequilibrium Higgs modes in unconventional superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 287(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41467-019-13763-5	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 該当する
1. 著者名 Ryo Shimano, Naoto Tsuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Higgs mode in superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annual Review of Condensed Matter Physics	6. 最初と最後の頁 103-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050813	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 Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Norio Kawakami, Masahito Ueda	4. 巻 124
2. 論文標題 Dynamical sign reversal of magnetic correlations in dissipative Hubbard models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 147203(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.147203	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 Ryuta Iwazaki, Naoto Tsuji, Shintaro Hoshino	4. 巻 30
2. 論文標題 Effects of Periodic Drive on Superconductors above the Transition Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011047(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSCP.30.011047	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 Tsuji Naoto, Shitara Tomohiro, Ueda Masahito	4. 巻 98
2. 論文標題 Bound on the exponential growth rate of out-of-time-ordered correlators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012216(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.012216	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 Naoto Tsuji and Philipp Werner	4. 巻 99
2. 論文標題 Out-of-time-ordered correlators of the Hubbard model: Sachdev-Ye-Kitaev strange metal in the spin-freezing crossover region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115132(1-20)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.115132	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 該当する

1. 著者名 Sayyad Sharareh, Tsuji Naoto, Vaezi Abolhassan, Capone Massimo, Eckstein Martin, Aoki Hideo	4. 巻 99
2. 論文標題 Momentum-dependent relaxation dynamics of the doped repulsive Hubbard model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165132(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.165132	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 該当する

1. 著者名 Murakami Yuta, Tsuji Naoto, Eckstein Martin, Werner Philipp	4. 巻 96
2. 論文標題 Nonequilibrium steady states and transient dynamics of conventional superconductors under phonon driving	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045125(1-19)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.045125	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 該当する

1. 著者名 Matsunaga Ryusuke, Tsuji Naoto, Makise Kazumasa, Terai Hirotaka, Aoki Hideo, Shimano Ryo	4. 巻 96
2. 論文標題 Polarization-resolved terahertz third-harmonic generation in a single-crystal superconductor NbN: Dominance of the Higgs mode beyond the BCS approximation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020505(R)(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.020505	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 Tsuji Naoto, Shitara Tomohiro, Ueda Masahito	4. 巻 97
2. 論文標題 Out-of-time-order fluctuation-dissipation theorem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012101(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012101	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 Katsumi Kota, Tsuji Naoto, Hamada Yuki I., Matsunaga Ryusuke, Schneeloch John, Zhong Ruidan D., Gu Genda D., Aoki Hideo, Gallais Yann, Shimano Ryo	4. 巻 120
2. 論文標題 Higgs Mode in the d-Wave Superconductor Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _{8+x} Driven by an Intense Terahertz Pulse	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 117001(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.117001	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 該当する

1. 著者名 Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji, Hideo Aoki	4. 巻 94
2. 論文標題 Damping of the collective amplitude mode in superconductors with strong electron-phonon coupling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115126(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.115126	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 該当する

1. 著者名 Andreas J. Herrmann, Naoto Tsuji, Martin Eckstein, Philipp Werner	4. 巻 94
2. 論文標題 Nonequilibrium dynamical cluster approximation study of the Falicov-Kimball model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245114(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.245114	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 該当する

1. 著者名 Naoto Tsuji, Yuta Murakami, Hideo Aoki	4. 巻 94
2. 論文標題 Nonlinear light-Higgs coupling in superconductors beyond BCS: Effects of the retarded phonon-mediated interaction	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224519(1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.224519	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 Naoto Tsuji, Philipp Werner, Masahito Ueda	4. 巻 95
2. 論文標題 Exact out-of-time-ordered correlation functions for an interacting lattice fermion model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 011601(R)(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.011601	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 該当する

1. 著者名 Motoharu Kitatani, Naoto Tsuji, Hideo Aoki	4. 巻 95
2. 論文標題 Interplay of Pomeranchuk instability and superconductivity in the two-dimensional repulsive Hubbard model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075109(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.075109	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 Yuta Murotani, Naoto Tsuji, Hideo Aoki	4. 巻 95
2. 論文標題 Theory of light-induced resonances with collective Higgs and Leggett modes in multiband superconductors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104503(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.104503	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 -

[学会発表] 計53件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Higgs mode from conventional to unconventional superconductors
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Higgs mode resonance in third harmonic generation in superconductors: Impact of impurity effects
3. 学会等名 Ultrafast and Nonlinear Dynamics of Quantum Materials (Paris Ultrafast 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Out-of-time-order fluctuation-dissipation theorem
3. 学会等名 IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Machine learning quantum Monte Carlo simulations for strongly correlated electron materials
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Spin freezing crossover and SYK strange metal
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 Higgs mode in superconductors and Anderson's theorem
3. 学会等名 第9回「凝縮系理論の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻直人、野村悠祐
2. 発表標題 超伝導体のヒッグスモードが切り拓く物理
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本和樹、中川大也、辻直人、上田正仁、川上則雄
2. 発表標題 散逸下のBCS超流動における実時間ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻直人、野村悠祐
2. 発表標題 超伝導体NbNにおける三次高調波のヒッグスモード共鳴と不純物効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻直人、Philipp Werner
2. 発表標題 機械学習を用いた強結合展開型の連続時間量子モンテカルロ法
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川大也、辻直人、川上則雄、上田正仁
2. 発表標題 散逸下のHubbard模型における負温度量子磁性
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 非平衡動的 average 場理論の最近の進展
3. 学会等名 第2回動的 average 場近似計算に関する情報交流会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Out-of-time-order fluctuation-dissipation theorem and the universal bound on chaos
3. 学会等名 The 7th CEMS Research Camp on `Dynamics'（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 非時間順序揺動散逸定理とカオスの上限
3. 学会等名 金沢大学量子ダイナミクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 多軌道系における spin freezing crossover と SYK strange metal
3. 学会等名 第八回「強相関電子系理論の最前線」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 量子状態統計における揺らぎの定理
3. 学会等名 物性研究所短期研究会「量子情報・物性の新潮流」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直人、上田正仁
2. 発表標題 量子状態統計における揺らぎの定理
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sharareh Sayyad, Naoto Tsuji, Abolhassan Vaezi, Massimo Capone, Martin Eckstein, Hideo Aoki
2. 発表標題 SO(4) DMFT+FLEX formalism for d-wave superconductivity
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 動的平均場理論に対する量子モンテカルロ法の最適基底選択問題
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩崎龍太、辻直人、星野晋太郎
2. 発表標題 光励起された系の超伝導ゆらぎによる伝導度
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sharareh Sayyad*, Naoto Tsuji, Abolhassan Vaezi, Massimo Capone, Martin Eckstein, and Hideo Aoki
2. 発表標題 Momentum-dependent relaxation dynamics in the doped 2D Hubbard model
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻直人、Philipp Werner
2. 発表標題 八バード模型における非時間順序相関関数: spin freezing crossoverとSYK模型
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Out-of-time-order fluctuation theorem
3. 学会等名 The Third Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Self-learning continuous-time quantum Monte Carlo and optimization of the single-particle basis
3. 学会等名 PRESTO International Symposium on Materials Informatics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Out-of-time-order fluctuation-dissipation theorem and the universal bound on chaos
3. 学会等名 Black Holes, Quantum Chaos, and Solvable Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Terahertz-pulse-induced Higgs mode in d-wave superconductors
3. 学会等名 New trends in theory for experiments at advanced light sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Out-of-time-ordered correlators, fluctuation-dissipation theorem, and the universal bound
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Out-of-time-ordered correlators and fluctuation-dissipation theorem
3. 学会等名 The 2nd Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Nonlinear optical response in superconductors: the contribution of Higgs mode and density fluctuation
3. 学会等名 Non-Linear Effects and Short-Time Dynamics in Novel Superconductors and Correlated Spin-Orbit Coupled Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Higgs amplitude mode and charge density fluctuations in the nonlinear optical response of superconductors
3. 学会等名 International workshop on strong correlations and angle-resolved photoemission spectroscopy (CORPES17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Bound on the exponential growth rate of out-of-time-ordered correlators
3. 学会等名 Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Nonlinear light-Higgs coupling in superconductors - Effects of the phonon-mediated retarded interaction
3. 学会等名 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions (PIPT6) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 強電場下での強相関係・超伝導体の非平衡ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会領域5シンポジウム「極短パルスコヒーレント光源が拓く固体のサブフェムト秒電子ダイミクス」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 銅酸化物超伝導体におけるテラヘルツ光とヒッグスモードの結合
3. 学会等名 第七回「強相関電子系理論の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Polarization-resolved THz spectroscopy for Higgs mode in superconductors
3. 学会等名 The 5th CEMS Topical Research Camp on `Photon & Material' (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 偏光分解した光で見る超伝導体のヒッグスモードと電荷密度揺らぎ
3. 学会等名 物性研究所短期研究会 光で見る・操る電子物性科学の最前線 ~強相関、トポロジー、低次元、ダイナミクス~ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 物性とOTO
3. 学会等名 非時間順序相関関数についての研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直人、設楽智洋、上田正仁
2. 発表標題 非時間順序相関関数が示す指数増大率の普遍的な上限
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直人、設楽智洋、上田正仁
2. 発表標題 非時間順序揺動散逸定理
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松永隆佑、辻直人、牧瀬圭正、寺井弘高、青木秀夫、島野亮
2. 発表標題 超伝導体NbNの偏光分解テラヘルツ三次高調波発生: ヒッグスモードの支配的寄与とBCS近似の破綻
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上雄太、辻直人、Martin Eckstein、Philipp Werner
2. 発表標題 フォノン励起下における非平衡超伝導状態
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoto Tsuji, Yuta Murakami, Hideo Aoki
2. 発表標題 Higgs mode and density fluctuations in the nonlinear optical response of superconductors
3. 学会等名 CEMS-QPEC Topical Meeting on Superconductivity under Extreme Conditions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji, Hideo Aoki
2. 発表標題 Amplitude modes in strongly coupled phonon-mediated superconductors
3. 学会等名 International Research School: Electronic States and Phases Induced by Electric or Optical Impacts (IMPACT 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoto Tsuji, Yuta Murakami, Hideo Aoki
2. 発表標題 Nonlinear optical response in electron-phonon coupled superconductors: Effects of Higgs amplitude mode
3. 学会等名 International symposium on new horizons in condensed matter physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Motoharu Kitatani, Naoto Tsuji, Hideo Aoki
2. 発表標題 Superconductivity and Pomeranchuk instability in two-dimensional repulsive Hubbard model
3. 学会等名 International symposium on new horizons in condensed matter physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 強相関系における非時間順序相関関数
3. 学会等名 第6回強相関電子系理論の最前線 -若手によるオープン・イノベーション- (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 超伝導体におけるヒッグスモードと光の非線形相互作用
3. 学会等名 基研研究会「超伝導研究の最先端：多自由度、非平衡、電子相関、トポロジー」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 非平衡動的な平均場理論と強結合超伝導体の量子ダイナミクス
3. 学会等名 物性研究所パソコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の今と未来」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辻直人、Philipp Werner、上田正仁
2. 発表標題 相互作用する格子フェルミオン系における厳密な非時間順序相関関数
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 Out-of-time-order correlation function in strongly correlated systems
3. 学会等名 動的な平均場近似計算に関する情報交流会(ワークショップ)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直人、村上雄太、青木秀夫
2. 発表標題 超伝導体におけるヒッグスモードの光共鳴と三次高調波発生: 遅延相互作用を取り入れた解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 村上雄太、辻直人、青木秀夫、Philipp Werner
2. 発表標題 強結合超伝導体におけるヒッグスモードの緩和の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 室谷悠太、辻直人、青木秀夫
2. 発表標題 2バンド超伝導体における振幅および位相の集団励起と非線形光学応答の理論
3. 学会等名 日本物理学会
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