

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03811

研究課題名（和文）時間結晶を用いたレーザー周波数下方変換の基礎理論

研究課題名（英文）Fundamental theory for laser frequency down-conversion using time crystals

研究代表者

辻 直人 (Tsuji, Naoto)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：90647752

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：固体電子系の様々なモデルに対して振動電場を加えて駆動したときのダイナミクスを、非平衡動的平均場理論などをもとに計算した。その結果、駆動電場の周波数とは異なる周波数で振動する電流成分が存在することを明らかにした。通常は非線形応答効果によって駆動電場の周波数の整数倍の周波数が現れるが、それ以外にも整数倍にならない周波数成分が現れることがわかった。特に、振動電場の周波数よりも低い周波数の電流が発生する場合があることを見出した。また、超伝導などの長距離秩序を伴うような系の場合に、ヒッグスモードやレゲットモードなどの集団励起モードが振動電場に対する応答にどのように寄与するかを調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、固体電子系において様々なメカニズムで駆動電場の周波数よりも低い周波数で振動する電流成分が発生することがわかった。このことは、レーザー光の強度を高く保ちながら周波数を下方変換する技術に応用することができるかと期待される。また、その研究過程で固体電子系が示す様々な集団励起モードが光応答に対してどのように寄与するかが明らかになった。これらは、固体中のミクロな電子状態の性質を解明することにつながるだけでなく、レーザー光を用いて電子状態を高速に制御し、あるいは光によって超伝導をはじめとした長距離秩序を誘起・増幅することへの足掛かりになると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the dynamics of electron systems driven by ac electric fields for various models based on the nonequilibrium dynamical mean-field theory and other methods. We found that there exists an electric current oscillating with frequencies different from those of the driving fields. Usually, integral multiples of the frequency of the driving fields may appear due to nonlinear response effects. However, it was found that other frequency components that are not integral multiples can also appear. In particular, a current with frequencies lower than the frequency of the driving fields may be generated. We also investigated how collective excitations such as the Higgs and Leggett modes contribute to the response to oscillating electric fields in systems with a long-range order such as superconductivity.

研究分野：物性理論

キーワード：非平衡 時間結晶 超伝導

1. 研究開始当初の背景

レーザーは、身の回りで使われる光デバイス、精密計測や光通信、分光測定など、ありとあらゆる分野で応用されている。ところが、最先端の技術をもってしても、高強度を保ったままレーザーの発振周波数を制御すること、発振されたレーザー光の周波数を自由に変調させることは容易ではない。

一方で、時間結晶という新概念が2012年に提案された[1]。通常の結晶は、原子間の相互作用により自発的に空間の並進対称性が破れて周期的な構造が現れる。また、電荷密度波のように格子の周期の2倍のパターンが自発的に発生するのも空間の(離散)並進対称性の破れの一つである。時間結晶とは、この現象の時間版とでもいうべきものであり、時間に周期的な外場を加えた時に、自発的に時間の(離散)並進対称性が破れて外場の周期の整数倍(周波数は整数分の一倍)で振動する状態のことである。理論的な提案の後、2017年にイオンをレーザーによってトラップした系と、窒素空孔中心がドーブされたダイヤモンド結晶において、時間結晶が実験的に実現されたことが報告された。ただし両者ともスピン系、もしくはスピン系と見なせるシステムになっており、振動には電流を伴わない。それでは、固体中で電荷を持った電子をレーザーで駆動することで、入射したレーザー周波数の整数分の一倍で振動する電流を伴うような時間結晶状態を作ることはいけるだろうか？これが本研究のきっかけとなった学術的問いである。

2. 研究の目的

本研究では、固体中で時間結晶という新しい物質のかたちを実現することで、レーザー周波数を下方変調する新技术を理論提案することを目的とする。そのために、申請者がこれまでの研究で明らかにしてきた、非対称波形のパルス電場を固体電子に照射すると電子の運動量分布がシフトするという原理[2]を応用する。非対称な電場波形を持つパルスレーザーをトレインにして繰り返し固体に照射して、電子の運動量分布を次々にシフトさせるアイデアをもとに、時間結晶の状態を固体で実現する原理の確立を目指す。また、非対称パルス以外の方法でもレーザーの周波数を下方変換する方法を模索する。これらの原理を、申請者がこれまで開発してきた非平衡動的平均場理論[3]などをもとに実証することを目指す。

3. 研究の方法

相互作用する電子系のモデルに対して様々な波形のパルス電場を印加したときのダイナミクスを、非平衡動的平均場理論などを用いて数値的に解析する。最初に解析が容易な電子系のモデルとして、Falicov-Kimball (FK) モデルを扱う。このモデルに非対称波形を持つパルス電場のトレインを印加したときに、時間結晶の状態が安定して生成されるかを確かめる。その後、Hubbard 模型などのより一般的な固体電子系のモデルについて非平衡動的平均場理論を用いて解析する。そのためには、非平衡動的平均場理論のソルバーとして、弱結合摂動法や非交差近似の方法を使う。

4. 研究成果

(1) 固体中での時間結晶の実現、およびそれを用いたレーザー周波数の下方変換技術の開発に向けて、非平衡動的平均場理論を用いた解析を行った。まず初めに、解析が容易な電子系のモデルとして FK 模型を扱った。このモデルは、非平衡動的平均場理論の枠組みで相互作用する多体電子

系のダイナミクスを数値的に厳密に解析できることが知られている。FK 模型に周期的な振動電場を加えたときのダイナミクスを計算したところ、モット絶縁体相において駆動電場とは異なる周波数で振動する電流成分が存在することがわかった。特に、振動電場の周波数よりも低い周波数の電流が発生する場面があることを見出した。通常の(非)線形応答理論では、駆動電場と同じ周波数もしくはその整数倍の周波数の応答しか現れないので、従来の外場に関する摂動論では理解することができない新しい現象である。その周波数は相互作用パラメーターに一致することがわかり、振動電場の周波数には依存しない。様々な相互作用の強さや駆動電場の振幅、周波数について数値計算を行い、非整合な周波数の振動が現れる条件を調べた。また、Hubbard 模型についても同様の解析を行い、強相関領域において駆動電場の周波数とは整合しない周波数の振動を持つ電流成分が現れることがわかった。

さらに、不純物を含んだ超伝導体に対しても解析を行なった。電子間に働く有効引力相互作用は平均場近似を用いて、不純物散乱は自己無撞着ボルン近似を用いることで時間発展を計算した。その結果、レーザーの周波数が超伝導ギャップに対応する周波数より大きい場合に、入射したレーザーの周波数とは異なる周波数で振動する電流成分が発生することがわかった。特に入射光の周波数から超伝導ギャップの分だけ下がった周波数の成分が含まれることが明らかになった。これはレーザー光によって誘起された超伝導ヒッグスモードと入射光が干渉することで現れる誘導ラマン散乱と解釈することができる。

(2) 電子間相互作用と電子格子相互作用の両方を含んだ電子系をポンプ光によって駆動したときにどのような光が放射されるかを調べるため、Hubbard-Holstein 模型を解析した[4]。ポンプ光は古典的に扱い、放射される光は量子的だが摂動近似の範囲で扱った。非平衡動的平均場理論に基づいてモデルの時間発展を計算し、各周波数について放射されるフォトン数を 2 点相関関数の計算に帰着して求めた。その結果、ポンプ光によって駆動されることで、入射する光よりも放射される光の方が小さな周波数を持つストークス・ラマン光だけでなく、放射される光の方が大きな周波数を持つ反ストークス・ラマン光の強度が大きく増幅されることがわかった。この現象はハイパーラマン散乱と呼ばれる周波数混合プロセスによって説明することができ、光で駆動されたモット絶縁体の非熱的な準定常状態における電子分布の特徴を反映する。

(3) 時間に周期的な光電場によって駆動された超伝導体におけるヒッグスモードの解析を行った[5]。特に振動電場の周波数の 2 倍が超伝導ギャップに一致するときにヒッグスモードと共鳴し巨大な三次高調波が発生することが知られている。第一原理計算により NbN 超伝導体に対して三次高調波の偏光角度依存性を解析した。その結果、不純物散乱が支配的になるとヒッグスモードの寄与は等方的になり、準粒子の寄与は角度依存性を残す。実験結果と比較することで、三次高調波に対するヒッグスモードの寄与が準粒子に比べて優勢であることがわかった。また、多層超伝導体における集団励起モードの解析[6]、量子開放系における超伝導相の集団励起モードに関する研究[7]などを行った。さらに、超伝導体のヒッグスモードを含む物性物理における集団励起モードの研究の最近の発展を総説にまとめた[8]。

(4) 時間に周期的な光電場によって駆動された超伝導体において、別の周波数の光を入射させた時に三次高調波が増幅する現象について解析を行なった[9]。この現象は 5 次の非線形効果によって理解することができる。BCS 近似に基づいて対応する 5 次の非線形感受率を評価し、共鳴点で最も速く発散する寄与を抜き出した。その結果、ヒッグスモードの自己相互作用や光との高

次の非線形結合を通して3次高調波の強度を共鳴的に変調させることができることがわかった。また、光によって駆動された超伝導体において現れるフロッケ多体状態を解析した[10]。方法としては、BCS理論をフロッケ・ケルディッシュ形式に拡張したものを用いた。その結果、一粒子スペクトルにフロッケサイドバンドや超伝導ギャップとは別のギャップ構造が現れることがわかった。また、電場の周波数が大きい場合に電場駆動によって常伝導相から超伝導相に転移する場面があることが見出された。周期外場によって誘起されるフロッケ状態についての最近の発展を総説にまとめて出版した[11]。

(5) 多バンド超伝導体に対して振動電場を印加したときの応答を、線形応答理論を用いて解析した。多バンド超伝導体はバンド毎に複数の超伝導秩序変数を持ち、それらの位相の差が集団的に振動する集団励起モード(レゲットモード)が存在する。レゲットモードは従来線形応答領域で観測されないと考えられていたが、1次元の簡略化した理論モデルに対して解析を行うことで線形応答領域にレゲットモードが現れることがわかった[12]。さらに、レゲットモードが光に対して線形に応答するのは熱力学的な自由エネルギーにリフシツ不変量と呼ばれる対称操作によって変わらない不変量が存在するときであることを見出した[13]。また、この項が現れるのはどのような時かを群論を利用してすべての結晶構造とクーパー対の対称性に対して調べ上げ、その分類理論をカゴメ超伝導体に対して適用した。これらの成果についてプレスリリースを出した[14]。

<引用文献>

- [1] F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **109**, 160401 (2012).
- [2] N. Tsuji, T. Oka, H. Aoki, P. Werner, Phys. Rev. B **85**, 155124 (2012).
- [3] H. Aoki, N. Tsuji, M. Eckstein, M. Kollar, T. Oka, P. Werner, Rev. Mod. Phys. **86**, 779 (2014).
- [4] P. Werner, M. Eckstein, N. Tsuji, Phys. Rev. B **108**, 245157 (2023).
- [5] N. Tsuji, Y. Nomura, Phys. Rev. Research **2**, 043029 (2020).
- [6] N. Zierys, K. Takasan, N. Tsuji, submitted to Phys. Rev. B (arXiv:2403.08734).
- [7] K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda, N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **127**, 055301 (2021).
- [8] N. Tsuji, I. Danshita, S. Tsuchiya, Encyclopedia of Condensed Matter Physics (2nd ed.), **1**, 174 (2024).
- [9] 辻直人、「超伝導体における三次高調波の光増強現象と不純物効果」、日本物理学会年次大会、東京工業大学、2022年9月。
- [10] H. Zhang, K. Takasan, N. Tsuji, “Floquet many-body theory for light-driven superconductivity”, 日本物理学会年次大会、東北大学、2023年9月。
- [11] N. Tsuji, Encyclopedia of Condensed Matter Physics (2nd ed.), **1**, 967 (2024).
- [12] T. Kamatani, S. Kitamura, N. Tsuji, R. Shimano, T. Morimoto, Phys. Rev. B **105**, 094520 (2022).
- [13] R. Nagashima, S. Tian, R. Haenel, N. Tsuji, D. Manske, Phys. Rev. Research **6**, 013120 (2024).
- [14] 東京大学理学部プレスリリース、「超伝導秩序が光に反応するのはどのようなときか？ - 光に線形で応答する超伝導秩序を持つ物質の分類理論を構築」、2024年1月。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kamatani Takumi, Kitamura Sota, Tsuji Naoto, Shimano Ryo, Morimoto Takahiro	4. 巻 105
2. 論文標題 Optical response of the Leggett mode in multiband superconductors in the linear response regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094520(1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.094520	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 Yamamoto Kazuki, Nakagawa Masaya, Tsuji Naoto, Ueda Masahito, Kawakami Norio	4. 巻 127
2. 論文標題 Collective Excitations and Nonequilibrium Phase Transition in Dissipative Fermionic Superfluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 055301(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.055301	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 中川 大也、辻 直人、川上 則雄、上田 正仁	4. 巻 77
2. 論文標題 冷却原子気体における開放量子多体系の物理	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 88 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.77.2_88	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 Nakagawa Masaya, Tsuji Naoto, Kawakami Norio, Ueda Masahito	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) 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 Tsuji Naoto, Nomura Yusuke	4. 巻 2
2. 論文標題 Higgs-mode resonance in third harmonic generation in NbN superconductors: Multiband electron-phonon coupling, impurity scattering, and polarization-angle dependence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043029(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043029	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 Iwazaki Ryuta, Tsuji Naoto, Hoshino Shintaro	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) 10.7566/JSPSC.30.011047	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 Werner Philipp, Eckstein Martin, Tsuji Naoto	4. 巻 108
2. 論文標題 Nonequilibrium DMFT approach to time-resolved Raman spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245157(1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.245157	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 Nagashima Raigo, Tian Sida, Haenel Rafael, Tsuji Naoto, Manske Dirk	4. 巻 6
2. 論文標題 Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors: An application to Leggett modes in the linear response regime in Kagome lattice models	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013120(1-27)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.6.013120	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 Matsui Chihiro, Tsuji Naoto	4. 巻 2024
2. 論文標題 Exact steady states of the impurity-doped XXZ spin chain coupled to dissipators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 033105 ~ 033105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ad2b5c	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	4. 巻 1
2. 論文標題 Floquet states	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Encyclopedia of Condensed Matter Physics (2nd ed.)	6. 最初と最後の頁 967 ~ 980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-323-90800-9.00241-9	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, Danshita Ippei, Tsuchiya Shunji	4. 巻 1
2. 論文標題 Higgs and Nambu-Goldstone modes in condensed matter physics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Encyclopedia of Condensed Matter Physics (2nd ed.)	6. 最初と最後の頁 174 ~ 186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-323-90800-9.00256-0	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55件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Higgs-mediated nonlinear optical response and its amplification in superconductors
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (NQS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Nonlinear terahertz spectroscopy of superconductors: Higgs mode and beyond
3. 学会等名 Trends in the Theory of Quantum Materials 2022 (TTQM2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Floquet many-body theory for driven BCS superconductors: With potential application to the nonlinear responses
3. 学会等名 FoPM International symposium (University of Tokyo) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 高エネルギー超伝導物性物理学の創出
3. 学会等名 JST 創発的研究支援事業「融合の場」第1回公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 超伝導体における三次高調波の光増強現象と不純物効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井千尋、辻直人
2. 発表標題 不純物を含む散逸付き XXZ 鎖の定常状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牛原啓、高三和晃、辻直人
2. 発表標題 多体系に適用可能な量子マスター方程式を用いたエネルギー流の解析
3. 学会等名 量子情報と量子基礎論の諸側面
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 礒山和基、辻直人、島野亮
2. 発表標題 s波超伝導体NbNにおけるHiggsモードの量子干渉測定
3. 学会等名 第14回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 牛原啓、高三和晃、辻直人
2. 発表標題 多体系に適用可能な量子マスター方程式を用いたエネルギー流の解析
3. 学会等名 計算物理春の学校2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, Norio Kawakami
2. 発表標題 Theory of collective excitations and nonequilibrium phase transition in dissipative fermionic superfluids
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 超伝導体の5次非線形光応答とヒッグスモードの自己相互作用
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 礒山和基、辻直人、寺井弘高、島野亮
2. 発表標題 BCS超伝導体NbNにおけるHiggsモード共鳴テラヘルツ第3高調波発生の光誘起増強現象
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 超伝導体における相転移ダイナミクス ~最近の話題~
3. 学会等名 初期宇宙の相転移ダイナミクスに迫る物性実験勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 Fluctuations, nonlinear response, and chaos
3. 学会等名 「量子・熱・情報」ミニワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Tsuji
2. 発表標題 Spin freezing crossover in multi-orbital systems and SYK strange metal
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online, "Quantum Technology meets Quantum Matter" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kamatani, N. Tsuji, S. Kitamura, T. Morimoto
2. 発表標題 Optical responses of Higgs and Leggett modes in multiband superconductors
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda, N. Kawakami
2. 発表標題 Dissipation-induced collective excitations and nonequilibrium phase transition in fermionic superfluids
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 機械学習・推定モデルを用いた量子モンテカルロ法と多軌道系への応用
3. 学会等名 物性研究所短期研究会「量子多体計算と第一原理計算の新展開」(FQCS2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 量子干渉と揺らぎの定理
3. 学会等名 オンライン研究会「量子多体系の熱力学 - 数理の発展と展望」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌谷拓実, 北村想太, 辻直人, 森本高裕
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた超伝導体におけるヒッグスモード
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020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 フェルミ超流動における散逸が誘起する集団励起の理論
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020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 光を自然放出するFermi原子系における散逸誘起 ペアリング超流動
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌谷拓実, 北村想太, 辻直人, 森本高裕
2. 発表標題 マルチバンド超伝導体におけるレゲットモード
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻直人, 中川大也, 上田正仁
2. 発表標題 ペアリング状態の異常な電磁場応答
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Leggett mode and Lifshitz invariant in multiband superconductors
3. 学会等名 ENS Paris-UTokyo workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Quantum many-body scar states with light-matter interaction
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chihiro Matsui, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Steady state of the impurity-doped XXZ spin chain coupled to dissipators
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Imai, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Systematic construction of unconventional d -pairing states in multi-body interacting systems
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Electronics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske
2. 発表標題 Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors and it's application to Leggett modes
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Electronics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Microscopically-derived quantum master equation for a boundary-driven Hubbard model and its application to nonlinear thermoelectric effect
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Electronics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shunsuke Nishimura, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Asymmetric spin transport in the U(1)-symmetric random unitary circuits with quantum feedback control
3. 学会等名 Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske
2. 発表標題 Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors and its application to Leggett modes
3. 学会等名 Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Floquet Many-body Theory for Light-driven Superconductors
3. 学会等名 Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Thermal transport in an open Hubbard model: Quantum master equation approach
3. 学会等名 Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Niklas Ziereis, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Light-driven interlayer propagation of collective mode excitations in layered superconductors
3. 学会等名 Quantum Matter Out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Analysis of energy current in the Hubbard model based on microscopically-derived quantum master equations
3. 学会等名 Physics of Open Quantum Systems (Statphys28 satellite meeting) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Floquet Many-body Theory for Driven BCS Superconductors: Nonlinear Response and Drive-induced Phase Transition
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Analysis of energy current in spin chains based on quantum master equations applicable to many-body systems
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Niklas Yutaka Aeneas Ziereis, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Light-Induced Pseudospin Precession In Josephson Coupled Layered Superconductors
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Analysis of energy currents based on quantum Master equations applicable to many-body systems
3. 学会等名 Perspectives on Non-Equilibrium Statistical Mechanics (YSF-YITP Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoto Tsuji
2. 発表標題 Nonequilibrium superconductivity in high energy states
3. 学会等名 Dynamical Control of Quantum Materials (DCQM23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 Recent development of Higgs mode in condensed matter physics
3. 学会等名 対相関から対凝縮相への微視的アプローチ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻直人
2. 発表標題 マルチバンド超伝導体におけるLeggettモードとLifshitz不変量
3. 学会等名 強相関電子系のフロンティア研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井渉平、辻直人
2. 発表標題 非従来型超伝導多体傷跡状態の系統的な構成法
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 今井渉平、辻直人
2. 発表標題 三体相互作用系における非従来型 ペアリング状態
3. 学会等名 超伝導研究の発展と広がり
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻直人、Martin Eckstein、Philipp Werner
2. 発表標題 光励起されたモット絶縁体の時間分解ラマン分光の理論
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井渉平、辻直人
2. 発表標題 三体相互作用を持つ系におけるp波 ペアリング状態
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 牛原啓、高三和晃、辻直人
2. 発表標題 多体系に適用可能な量子マスター方程式に基づくエネルギー流の解析
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村俊祐、高三和晃、辻直人
2. 発表標題 U(1)対称ランダム量子回路での量子フィードバック制御による非対称なスピン輸送
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永島来悟、Sida Tian、Rafael Haenel、辻直人、Dirk Manske
2. 発表標題 マルチバンド超伝導体におけるリフシツ不変量の分類とLeggett モードへの応用
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井千尋、辻直人
2. 発表標題 不純物を含む散逸付きXXZ鎖の定常状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske
2. 発表標題 マルチバンド超伝導体におけるLifshitz不変量の分類とLeggettモードへの応用
3. 学会等名 計算物理春の学校
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中本大河、高三和晃、辻直人
2. 発表標題 量子電磁場と超強結合したMott絶縁体
3. 学会等名 計算物理春の学校
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 永島 来悟、Rafael Haenel、Sida Tian、辻 直人、Dirk Manske
2. 発表標題 マルチバンド超伝導体におけるリフシット不変量の分類とLeggettモードへの応用
3. 学会等名 超伝導研究の発展と広がり
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji
2. 発表標題 Floquet many-body theory for light-driven superconductivity
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2023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			
ドイツ	マックスプランク固体物理研究所	ハンブルグ大学		
スイス	フリブール大学			
カナダ	ブリティッシュコロンビア大学			