

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01838

研究課題名（和文）強相関系における非平衡量子現象の理論

研究課題名（英文）Theory of Nonequilibrium Quantum Phenomena in Correlated Systems

研究代表者

川上 則雄（Kawakami, Norio）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10169683

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,100,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、強相関の非平衡量子現象に関する理論研究を行った。この目的のため、時間駆動系に対するフロケ理論や散逸・ロスの効果を扱う枠組みとして「非エルミート量子現象」の理論を用いた。さらに量子マスター方程式に基づき、実時間ダイナミクスに現れる新奇量子現象の探求を行った。固体系のみならず、冷却原子やフォトニック系なども対象として、強相関系の非平衡量子現象の包括的な理解を目指した。中でも、フロケ理論による新奇現象の探索、強相関の非エルミート系に関する理論構築、実時間ダイナミクスでの非平衡量子現象の研究には大きな成果が得られたと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非平衡量子系の研究が近年急速に進展しており、物性物理学のフロンティアとして基礎的で重要な課題を提出している。特に、物質に多様性と機能性をもたらす強相関系における非平衡量子現象はそのフロンティアに位置する重要なテーマであり、これに関する理論構築は、実験・理論の両側面から強く望まれる重要課題である。本研究で得られた非平衡強相関系の理論、中でもフロケ理論による新奇現象の探索、強相関の非エルミート系の理論構築、実時間ダイナミクスでの非平衡量子現象の研究は、非平衡と強相関効果の協奏により初めて生じる新奇な現象を含んでおり、物性物理の基本問題に関わる重要なものであると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have theoretically studied nonequilibrium quantum phenomena of strongly correlated systems. To this end, we have employed Floquet theory and non-Hermitian quantum theory that can describe the effects of dissipation/loss. Furthermore, based on the quantum master equation, we have explored novel quantum phases emerging in real time dynamics. Focusing on not only solid state systems but also cold atom systems and photonic systems, we have aimed at comprehensive understanding of nonequilibrium quantum phenomena of strongly correlated systems. In particular, we have obtained reasonable achievements for proposing novel phases based on Floquet theory, strengthening the theoretical foundation of non-Hermitian correlated systems, and exploring nonequilibrium phenomena in real-time dynamics.

研究分野：物性理論

キーワード：非平衡 強相関 非エルミート現象

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非平衡量子現象の急速な研究の進展

【**固体系**】 これまで固体凝縮系では、平衡状態や線形応答領域で多くの成果が得られてきた。近年の実験技術の向上(高強度短パルスレーザー・時間分解測定手法など)に伴い、非線形応答領域での新奇な非平衡量子現象が次々と報告されている。著しい例として、○レーザー誘起超伝導の実現や、極端非線形光学現象の開拓に基づく $Nb_{1-x}Ti_xN$ における超伝導ヒッグスモードの観測などがある。さらには、 Ca_2RuO_4 での直流電場によるモット絶縁体の破壊と巨大反磁性の観測も非平衡量子現象の著しい例となっている。このように、レーザーや直流電場を制御パラメータとして、非平衡状態を利用して物性をコントロールする「動的物性制御」を目指した研究が精力的に行われている。

【**冷却原子系**】 このような固体物理における精力的な研究と並行して、冷却原子系においても大きな研究の進展がみられている。冷却原子系では、レーザーや磁場を用いることによりポテンシャルや粒子間相互作用を自在に制御することができ、この操作性を活かすことで、冷却原子系特有の非平衡量子現象が観測されている。例えば、 ^{87}Rb 原子系での実時間ダイナミクスの実験的観測や、 ^{173}Yb 原子系での散逸を伴う近藤効果の実現などがある。

非平衡量子現象に関する理論 ~ 強相関効果の重要性 ~

上記のように、非平衡量子系の研究が近年急速に進展しており、物性物理学のフロンティアとして基礎的で重要なテーマを提出している。中でも、物質に多様性と機能性をもたらす強相関系における非平衡量子現象は重要なテーマであるが、困難な問題ゆえにその系統的な理解には程遠いのが現状である。強相関系は、高温超伝導や重い電子系などの伝統的な重要課題から、冷却原子系における新奇量子現象など、相互作用に起因する多彩な量子相を発現する舞台を提供している。そのフロンティアに位置する強相関の非平衡量子現象に関する理論構築は、困難な問題ではあるが、実験・理論の両側面から強く望まれる喫緊の重要課題である。

2. 研究の目的

上記のように、凝縮系物理において非線形応答領域での非平衡量子現象の研究が急速に進展している。本研究では、強相関効果に焦点をあて、レーザーや直流電場を制御パラメータとして非平衡状態の物性をコントロールする「動的物性制御」に関する理論研究を行う。強相関の非平衡量子現象を対象として、時間駆動系に対するフロケ理論、非平衡動的平均場などの強力な理論手法を駆使した解析を行い、さらに強相関系における散逸・ロス効果を扱う枠組みとして「強相関非エルミート量子現象」の理論を構築する。固体におけるレーザー誘起相転移、電場誘起の絶縁破壊現象などに加え、冷却原子系における時間依存量子現象を取り扱い、強相関系の非平衡量子現象の包括的な理解を目指す。

3. 研究の方法

強相関の非平衡量子現象を扱うために、非平衡系に対する強力な理論手法を駆使する。具体的には、周期時間駆動系のフロケ理論、非エルミート強相関系の厳密解、散逸系の実時間ダイナミクスを扱うための量子マスター方程式などを用いる。問題に応じてこれらの理論手法を使い分けることで系統的な取り扱いを行い、非平衡量子多体系の新奇な性質を明らかにする。

4. 研究成果

2019 年度は、主に非平衡系での超伝導、非エルミート強相関系での相転移を中心に研究を行った。以下に成果をまとめる。

非平衡系での超伝導の理論開拓: 開放系での粒子ロス効果を取り込んだ非エルミート BCS 理論の枠組みを構築した。その結果、散逸によって超伝導のリエンラント相転移が引き起こされることがわかった。また相転移点は「例外点」で特徴づけられることを明らかにした。

強相関平衡系での非エルミート多体物理: 平衡系にある強相関格子模型においても、カイラル対称性に守られた「例外トラス」が電子励起スペクトルに現れることを明らかにした。この理論では、強相関効果によって生じる自己エネルギーの虚部が有効的な非エルミート性を生み出す。この非エルミート性とカイラル対称性の組み合わせによって「例外点」を拡張した「例外リング」および「例外トラス」が、有限温度で生じることを明らかにした。

フロケ理論における高周波展開の開拓: 非平衡系の重要なテーマとして、時間周期駆動によるフロケ量子系を扱う基礎理論の構築を行った。特に、創発対称性を伴うフロケプレサーマル状態に関して新たな高周波展開の理論を提案した。さらにこの手法を時間結晶やトポロジカル量子相の操作・制御(フロケエンジニアリング)に応用した。

2020 年度は冷却原子系を中心に、以下に述べるいくつかの研究テーマに取り組んだ。

散逸ハバード模型での新奇量子状態: 2 体ロスを伴う 1 次元ハバードモデルにおいて、初期状態の反強磁性的な相関から時間とともに強磁性的な相関に反転が起きることを明らかにした。

同様に、1次元ハバードモデルに2体ロスが入ったリンドブラッド方程式の厳密解を求め、その非平衡での性質を明らかにした。

トポロジカルなサウレスポンプの2次元への拡張：断熱的な時間変化によるサウレスポンプはこれまで主に1次元系に対して議論されてきたが、これを2次元系に拡張し、その性質をトポロジカルな観点から明らかにした。さらに、冷却原子での実験を念頭において調和ポテンシャルトラップの影響も明らかにした。

量子 Scar 状態の研究：リュドベリー原子系を対象とし、系が無限温度に緩和しない Scar 状態の厳密な例を構築した。また、高周波で周期的にドライブしたフロケダイナミクスにおいて、マルコフ性が自発的に壊れ、新奇な現象に繋がる可能性があることを指摘した。

冷却原子系における非相反量子現象：これまで非相反現象の研究では、系の端に散逸が導入されることが多かったが、本研究では系に一樣に散逸がかけられた場合の自発的な整流効果について、冷却原子系での実験を念頭においた具体的モデルを提案した。さらに数値的にもこれが可能であることを確認した。

電子流体力学における幾何学的効果：純な強相関系を対象とした電子流体力学を幾何学的効果がある場合に拡張し、理論の定式化を行った。得られた表式を用いて、様々な新奇量子現象を理論的に予言した。これを観測するための具体的な実験のセットアップも提案した。

冷却原子系における強相関効果：冷却原子系では種々の量子現象に対する強相関効果が重要となるケースが多い。ここでは、相互作用により誘起されるトポロジカル相、サウレスポンプへの相互作用の影響とブレークダウン、引力ハバード相互作用による超伝導・電荷密度波・スピン密度波の競合などに関して研究成果を得た。

2021年度は前年度までの研究を継続するとともに、実時間ダイナミクスに現れる動的相転移や、2層グラフェンの新奇量子相に関するテーマにも研究を展開した。

実時間ダイナミクスに現れる動的相転移：まず2体ロスを含む冷却フェルミ系超流動のクエンチダイナミクスを考え、時間依存性に現れる特異な位相の振動現象(Chirping)を見出した。このChirping現象を見るためにジョセフソン接合を考え、ロスの影響が強くなるとこの系にダイナミカルな相転移が生じることを明らかにした。他の実時間ダイナミクスの典例として、時間周期的に駆動された非線形量子系を考えた。この系の実時間ダイナミクスに現れるトポロジカルな性質を調べ、非線形性に由来するトポロジカル相転移が現れることを見出した。また、乱れの効果によりこのトポロジカル相転移がならされることを示した。

ひねり2層グラフェン：ひねり2層グラフェンの電子状態に対して、3状態ポッツ Nematicity の出現条件を調べた。ギンツブルク・ランダウの現象論とミクロなモデルの平均場近似による計算で、ファンホープ特異点に対応する電子密度付近で、ネマティック状態への弱い1次転移が生じ、この相転移は超音波吸収の異常として検知できることを明らかにした。

磁場を含む電子流体力学の定式化：電子流体力学の定式化を磁場ありの場合に拡張した。これに基づき、磁場と幾何学的効果の絡み合いによって光学応答に非相反の性質を持つ特異な性質が現れることを明らかにし、これを観測するための実験のセットアップを提案した。

自己エネルギー虚部に起因する強相関非エルミート現象：非エルミートトポロジカル近藤絶縁体を理論的に解析した。自己エネルギーの虚部に起因する例外点が表面電子状態に特徴的な相関効果をもたらすことを見出した。

2022年度は主に非エルミート量子臨界系の普遍的性質と電子流体力学に基づく幾何学的効果に関する研究を行った。

非エルミート量子臨界系の研究：XXZ スピン鎖について、散逸下での普遍的性質を明らかにした。具体的には、ボゾン化法、厳密解、共形場理論を用いて相関関数とエネルギースペクトルを解析し、非エルミート XXZ スピン鎖が複素に拡張した $c=1$ 共形場理論のクラスに属することを明らかにし、その正当性を密度行列繰り込み群による数値計算で確認した。(2) 上記の解析を $SU(N)$ 内部対称性をもつ非エルミート量子多体系に拡張した。Haldane により提唱された「理想量子ガスによる記述法」を用いて、低エネルギー領域に現れる普遍的な性質を明らかにした。特に、相関関数の臨界指数に現れるスケーリング関係式を明らかにした。

電子流体力学理論の応用：電子流体力学を用いて幾何学的な効果と表面プラズモンの協奏による新奇現象について詳しく解析した。具体的には、プラズモン共鳴と光回折ゲートによる近接場の効果によって、量子非線形ホール効果が広い周波数領域に渡って増強されることを明らかにした。また、ベリー曲率双極子由来の光電流と光吸収エネルギーとの間に普遍的な関係式を見出した。さらに、振動磁場によって誘起される付加的な駆動力を考慮することによって、新しい光電流の発生メカニズムを提案した。

以上まとめたとように、4年間の研究によって、当初予定していた計画にほぼ沿った形で成果が得られた。特に、非平衡開放系における多体効果に関しては、かなり豊富な物理的内容を含む結果が得られたものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamamoto Kazuki, Kawakami Norio	4. 巻 107
2. 論文標題 Universal description of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids with SU(N) spin symmetry: Exact spectrum and critical exponents	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045110-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.045110	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 Toshio Riki, Kawakami Norio	4. 巻 106
2. 論文標題 Plasmonic quantum nonlinear Hall effect in noncentrosymmetric two-dimensional materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L201301-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.L201301	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, Tezuka Masaki, Ueda Masahito, Kawakami Norio	4. 巻 105
2. 論文標題 Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: Case study of a non-Hermitian XXZ spin chain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205125-1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.205125	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 川上則雄	4. 巻 60
2. 論文標題 多体系の物理と数理 --量子現象を中心として--巻頭言	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 5-6
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 Kimura Kazuhiro, Sigrist Manfred, Kawakami Norio	4. 巻 105
2. 論文標題 Probing three-state Potts nematic fluctuations by ultrasound attenuation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235153-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.035130	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 Peters Robert, Kimura Kazuhiro, Michishita Yoshihiro, Yoshida Tsuneya, Kawakami Norio	4. 巻 104
2. 論文標題 Surface exceptional points in a topological Kondo insulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235153-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.235153	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 Sano Ryotaro, Toshio Riki, Kawakami Norio	4. 巻 104
2. 論文標題 Nonreciprocal electron hydrodynamics under magnetic fields: Applications to nonreciprocal surface magnetoplasmons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L241106-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L241106	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 Mochizuki Ken, Mizuta Kaoru, Kawakami Norio	4. 巻 3
2. 論文標題 Fate of topological edge states in disordered periodically driven nonlinear systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043112-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043112	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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 松田冬樹、手塚真樹、川上則雄	4. 巻 56
2. 論文標題 冷却原子系におけるサウレスポンプの2次元への拡張とディオファントス方程式	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 409-416
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) なし	査読の有無 無
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, Kawakami Norio, Ueda Masahito	4. 巻 126
2. 論文標題 Exact Liouvillian Spectrum of a One-Dimensional Dissipative Hubbard Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110404-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.110404	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 Mizuta Kaoru, Takasan Kazuaki, Kawakami Norio	4. 巻 103
2. 論文標題 Breakdown of Markovianity by interactions in stroboscopic Floquet-Lindblad dynamics under high-frequency drive	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 L020202-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.L020202	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 Yamamoto Kazuki, Ashida Yuto, Kawakami Norio	4. 巻 2
2. 論文標題 Rectification in nonequilibrium steady states of open many-body systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043343-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043343	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 Mochizuki Ken, Kim Dakyeong, Kawakami Norio, Obuse Hideaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence in nonunitary Floquet systems with chiral symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 062202-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.062202	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 Mizuta Kaoru, Takasan Kazuaki, Kawakami Norio	4. 巻 2
2. 論文標題 Exact Floquet quantum many-body scars under Rydberg blockade	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033284-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033284	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 Yoshida Tsuneya, Peters Robert, Kawakami Norio, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Exceptional band touching for strongly correlated systems in equilibrium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 ptaa059-1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa059	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 Kawasaki Makio, Mochizuki Ken, Kawakami Norio, Obuse Hideaki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence and stability of multiple edge states of a \mathcal{PT} -symmetric non-Hermitian system by using non-unitary quantum walks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 ptaa034-1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa034	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 Matsuda Fuyuki, Tezuka Masaki, Kawakami Norio	4. 巻 89
2. 論文標題 Two-Dimensional Thouless Pumping of Ultracold Fermions in Obliquely Introduced Optical Superlattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114708-114708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114708	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 Toshio Riki, Takasan Kazuaki, Kawakami Norio	4. 巻 2
2. 論文標題 Anomalous hydrodynamic transport in interacting noncentrosymmetric metals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 032021-1-6(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.032021	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 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 Mochizuki Ken, Kawakami Norio, Obuse Hideaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Stability of topologically protected edge states in nonlinear quantum walks: additional bifurcations unique to Floquet systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 085702 ~ 085702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab6514	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 Rausch Roman, Potthoff Michael, Kawakami Norio	4. 巻 123
2. 論文標題 Magnetic Doubloon Bound States in the Kondo Lattice Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 216401-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.216401	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 Mizuta Kaoru, Takasan Kazuaki, Kawakami Norio	4. 巻 100
2. 論文標題 Floquet engineering of topological phases protected by emergent symmetries under resonant drives	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 052109-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.052109	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 Kimura Kazuhiro, Yoshida Tsuneya, Kawakami Norio	4. 巻 100
2. 論文標題 Chiral-symmetry protected exceptional torus in correlated nodal-line semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115124-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.115124	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, Adachi Kyosuke, Takasan Kazuaki, Ueda Masahito, Kawakami Norio	4. 巻 123
2. 論文標題 Theory of Non-Hermitian Fermionic Superfluidity with a Complex-Valued Interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 123601-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.123601	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 Mizuta Kaoru, Takasan Kazuaki, Kawakami Norio	4. 巻 100
2. 論文標題 High-frequency expansion for Floquet prethermal phases with emergent symmetries: Application to time crystals and Floquet engineering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020301-1-5 (R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.020301	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

〔学会発表〕 計54件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 45件)

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Fate of Topological Edge States in Nonunitary/Nonlinear Floquet Systems
3. 学会等名 Japan-Swiss Workshop on Trends in the Theory of Quantum Materials 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Critical Properties of Non-Hermitian Correlated Systems
3. 学会等名 Internal Workshop on Novel Quantum Systems 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda and N. Kawakami
2. 発表標題 Collective excitations and nonequilibrium phase transition in dissipative fermionic superfluids
3. 学会等名 Ultracold Atoms Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Toshio and N. Kawakami
2. 発表標題 Geometric nature of electron hydrodynamics and 2D plasmonic metamaterials
3. 学会等名 META 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda and N. Kawakami
2. 発表標題 Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: case study of a non-Hermitian XXZ spin chain
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda and N. Kawakami
2. 発表標題 Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: A case study of a non-Hermitian XXZ spin chain
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上則雄
2. 発表標題 非エルミート強相関系の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 兔子尾理貴、川上則雄
2. 発表標題 プラズモニック量子非線形ホール効果の提案：新しいテラヘルツ波検出器を目指して
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本和樹、川上則雄
2. 発表標題 SU(N)対称性を持つ散逸下の朝永Luttinger液体における普遍的性質：非エルミート可解模型によるアプローチ
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 K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tezuka, M. Ueda and N. Kawakami
2. 発表標題 Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda and N. Kawakami
2. 発表標題 Collective excitations and dynamical phase transition in dissipative fermionic superfluids
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda and N. 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 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本和樹、中川大也、手塚真樹、上田正仁、川上則雄
2. 発表標題 散逸の存在するXXZスピン鎖における朝永Luttinger液体の普遍的性質
3. 学会等名 日本物理学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田紘明、川上則雄、岡本亮、小布施秀明
2. 発表標題 2内部自由度量子ウォークによる量子探索効率の次元依存性と解析的評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上則雄
2. 発表標題 トポロジカル物質～基礎からひもとく普遍的性質～
3. 学会等名 第6回オンライン物理講話（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村和博、Manfred Sigrist、川上則雄
2. 発表標題 ひねり二層グラフェンの電子ネマティック揺らぎによるフォノンへの影響
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小布施秀明、川上則雄、岡本亮
2. 発表標題 非ユニタリー量子ウォークにおける表皮効果の理論と実証実験
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月健、水田郁、川上則雄
2. 発表標題 時間周期駆動された非線形系におけるエッジ状態とその安定性
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, and Norio Kawakami
2. 発表標題 Liouvillianity breaking in dissipative interacting Floquet systems under high-frequency drive
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, Y. Ashida, and N. Kawakami
2. 発表標題 Dissipation-induced current rectification in nonequilibrium steady states of open many-body systems
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, and N. Kawakami
2. 発表標題 Dissipation-induced collective excitations and nonequilibrium phase transition in dissipative 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 Riki Toshio, Kazuaki Takasan, Norio Kawakami
2. 発表標題 Anomalous Hydrodynamic Flow in Interacting Noncentrosymmetric Metals
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Mochizuki, Norio Kawakami, and Hideaki Obuse
2. 発表標題 Stability of topological edge states in nonlinear quantum walks: Bifurcations unique to Floquet systems
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryotaro Sano, Riki Toshio, Norio Kawakami
2. 発表標題 Nonreciprocal electron hydrodynamics in noncentrosymmetric metals under
3. 学会等名 Maglab Theory Winter School 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian Quantum Phenomena in Correlated Systems
3. 学会等名 International Conference on Localization 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Manfred Sigrist, Norio Kawakami
2. 発表標題 Probing three-state Potts nematic fluctuations by ultrasound attenuation
3. 学会等名 International Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Norio Kawakami
2. 発表標題 Correlation effects in non-Hermitian fermionic systems: Nonequilibrium phenomena
3. 学会等名 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norio Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian Properties of Dissipative Quantum Gases with Correlation
3. 学会等名 SUPERSTRIPES 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norio Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian quantum phenomena in correlated fermion systems
3. 学会等名 Emergent phenomena in ultracold atoms: merging topology, interaction, and dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norio Kawakami
2. 発表標題 Non-Hermitian quantum phenomena in correlated systems
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norio Kawakami
2. 発表標題 Hermitian/Non-Hermitian Kondo Effect in Ultracold Fermionic Systems
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Rausch, M. Potthoff and N. Kawakami
2. 発表標題 Magnetic doublon bound states in the Kondo Lattice Model
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Rausch, M. Potthoff and N. Kawakami
2. 発表標題 Doublon bound states in the Kondo Lattice Model
3. 学会等名 International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Interaction-driven symmetry protected exceptional torus with many-body chiral symmetry
3. 学会等名 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Exceptional-torus in strongly correlated nodal-line semimetals with many-body chiral symmetry
3. 学会等名 APS March Meetig 2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Exceptional torus in correlated nodal-line semimetals with chiral symmetry
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Interaction-driven exceptional torus with many-body chiral symmetry
3. 学会等名 Swiss-Japan bilateral workshop Trends in Theory of Correlated Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Interaction-driven symmetry protected exceptional torus with many-body chiral symmetry
3. 学会等名 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Chiral-symmetry protected Exceptional-Torus in correlated nodal-line semimetals
3. 学会等名 Internatilnal Conference on Topological Material Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami
2. 発表標題 Exceptional torus in correlated nodal-line semimetals with many-body chiral symmetry
3. 学会等名 International Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasana, M. Ueda and N. Kawakami
2. 発表標題 Fate of loss-induced superconductivity studied by non-Hermitian mean field theory
3. 学会等名 TPFC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasana, M. Ueda and N. Kawakami
2 . 発表標題 Phase Transitions in Fermionic Superfluidity with Dissipation
3 . 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasana, M. Ueda and N. Kawakami
2 . 発表標題 Theory of non-Hermitian fermionic superfluidity with dissipation
3 . 学会等名 International conference on topological materials science (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasana, M. Ueda and N. Kawakami
2 . 発表標題 Non hermitian fermionic superfluidity in dissipative ultracold atoms
3 . 学会等名 3rd epics tms alliance workshop (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasana, M. Ueda and N. Kawakami
2 . 発表標題 Non-Hermitian fermionic superfluidity subject to inelastic collisions in ultracold atoms
3 . 学会等名 4th Kyoto Beijing Tokyo workshop on ultracold atomic gases (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, and Norio Kawakami
2. 発表標題 High-frequency expansions for prethermal discrete time crystals
3. 学会等名 Time Crystals and Related Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, and Norio Kawakami
2. 発表標題 Floquet engineering of topological phases protected by emergent symmetries
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, and Norio Kawakami
2. 発表標題 Floquet engineering with resonant drives: Control of symmetry-protected topological phases
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, and Norio Kawakami
2. 発表標題 Emergence of robust symmetries in Floquet prethermal phases under a resonant drive
3. 学会等名 Frontier of Statistical Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, and Norio Kawakami
2 . 発表標題 Floquet prethermal phases with emergent symmetries under a resonant drive
3 . 学会等名 CEMS symposium on Emergent Quantum Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Toshio, K. Takasan, and Norio Kawakami
2 . 発表標題 Nonlocal Optical Responses of Ultrapure Metals in the Hydrodynamic Regime
3 . 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Toshio, K. Takasan, and Norio Kawakami
2 . 発表標題 The Effects of Berry Curvature on Electron Hydrodynamics in Noncentrosymmetric Metals
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Toshio, K. Takasan, and Norio Kawakami
2 . 発表標題 Electron Hydrodynamics in Noncentrosymmetric Materials
3 . 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Toshio, K. Takasan, and Norio Kawakami
2. 発表標題 Anomalous Nonlocal and Nonlinear Transport in Interacting Noncentrosymmetric Metals
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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