

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05501

研究課題名(和文) 冷却フェルミ原子系における非平衡量子現象の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study of nonequilibrium quantum phenomena in cold fermions

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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、近年急速に実験研究が進展している量子凝縮相の非平衡ダイナミクスに関する理論的研究を行った。冷却原子系の非平衡多体現象を中心として、光誘起による多体効果、非平衡量子相転移、実時間ダイナミクスなどの凝縮系物理の基本問題に理論的に取り組んだ。特に強相関のフェルミ系を対象として、周期駆動系に関するフロケ理論に加え、密度行列繰り込み群・厳密解などの強力な手法を駆使して、近藤不純物の非平衡ダイナミクスやレーザー誘起トポロジカル超伝導などに代表される、周期時間駆動により誘起される多体効果・量子相転移に関して豊富な物理的内容を含む結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子凝縮相の非平衡ダイナミクスの研究は、凝縮系物理と非平衡物理が融合した境界領域に位置しており、両分野の研究フロンティアにおいて新たなプラットフォームを形成している。中でも格好の研究舞台となっている冷却原子系では、人工的に格子の形、相互作用の強さ、磁場・電場をコントロールすることができ、今までにない新奇な物理現象の実現・観測が可能である。本研究で得られた、強相関冷却フェルミ原子系における光誘起による多体効果、非平衡量子相転移、実時間ダイナミクスに関する成果は、非平衡状態になることにより初めて生じる新奇な現象を含んでおり、凝縮系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 dynamics of quantum condensed matter phases, intensive experiments for which have been conducted in recent years. Focusing on nonequilibrium dynamics in ultracold atom systems, we have explored fundamental problems in condensed matter physics, such as laser-induced many-body effects, nonequilibrium quantum phase transitions and real-time dynamics. In particular, for strongly correlated Fermi systems, we have obtained quite a few of interesting results on many-body effects/quantum phase transitions induced by periodic drives, such as nonequilibrium dynamics of a Kondo impurity and laser-induced topological superconductivity, by using sophisticated theoretical methods including Floquet theory, DMRG, exact solution, etc.

研究分野：強相関系の理論

キーワード：冷却原子系 非平衡量子現象 強相関系 相転移

## 1. 研究開始当初の背景

### 非平衡量子凝縮系の急速な研究展開

近年の実験技術の飛躍的な進展に伴い、量子凝縮系の非平衡現象に大きな注目が集まっている。中でも、冷却原子系で実現される量子凝縮系の実験研究の急速な進展は特筆に値する。冷却原子系では、光や磁場を用いることにより系にかかる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る。冷却原子系の持つこの操作性を活かすことで、冷却原子気体を用いた非平衡量子現象はその利点を最大限に発揮できる。

### 人工ゲージ場による多彩な量子現象の実現

このような冷却原子系の研究をさらに活性化しているのが、人工的ゲージ場を使った量子現象であり、精力的に研究が進められている。このような人工的ゲージ場によって原子の位相を操作することで、原子に有効的な電荷を持たせて電磁場を有効的に生成することや、位相構造を付加することもできる。

### 周期駆動による非平衡ダイナミクス、非平衡量子相転移

上記の格子ポテンシャル・相互作用・人工ゲージ場などの高い制御性を利用し、時間周期駆動による量子多体系の研究に大きな進展がみられている。系を外場で駆動し、非平衡状態にすることによって初めて得られる量子状態があることがわかっている。例えば、冷却原子系においては光格子を時間周期的に高速で変調させることによって、トポロジカルな性質を付与することが可能であり、実験的にも観測されている。このように、周期駆動による系の操作によって新奇な非平衡量子相を実現でき、付随する非平衡量子相転移の研究も可能である。

## 2. 研究の目的

近年、急速に実験研究が進展している量子凝縮相の非平衡ダイナミクスの理論的研究を行う。この分野は凝縮系物理と非平衡物理が融合した境界領域に位置しており、新奇な現象が実験的に次々報告されている。中でも格好の研究舞台となっている冷却原子系では、人工的に格子の形、相互作用の強さ、磁場・電場をコントロールできる。本研究では、冷却フェルミ原子系の非平衡多体現象を中心として、光誘起による多体効果、非平衡量子相転移、実時間ダイナミクス、などの基本問題に理論的に取り組む。非平衡状態になることにより初めて生じる多体効果や量子相転移現象を中心に新奇現象を解明する。本研究では、

光励起により誘起される非平衡多体効果（近藤効果など）

量子多体系の実時間ダイナミクス（緩和、散逸効果など）

光格子系の凝縮相における非平衡量子相転移（モット転移、超流動転移など）

冷却原子系と固体系の非平衡量子ダイナミクスの包括的理解

等のテーマを中心に研究を進める。特に、複数の量子相が競合する系において光に誘起される相転移現象を明らかにする。

## 3. 研究の方法

冷却フェルミ原子系における量子凝縮相の非平衡ダイナミクスの研究を行う。特に、光誘起による量子多体現象、非平衡量子相転移、実時間ダイナミクスなどの現象に焦点をあて、フロケ理論に基づく解析的手法に加えて、密度行列繰り込み群などの数値手法を用いて研究を進める。

量子凝縮相における非平衡現象の理論研究では、量子多体系としての性質を保ちつつ非平衡効果を取り入れることが不可欠である。解析手法として、上記の一次元系に対する密度行列繰り込み群に加えて、ハバードモデル・近藤効果の厳密解、スレーブ粒子平均場、動的平均場近似などを援用して非平衡量子現象を系統的に扱う。

## 4. 研究成果

H28年度は光誘起の非平衡相転移、周期的外場中の不純物の非平衡ダイナミクス、開放系における非平衡効果について研究した。

### (1) 光励起により誘起される非平衡多体効果：

まず、レーザー誘起近藤効果とそれを用いた1次元強相関トポロジカル相(SPT相)の実現提案について、詳しい解析を進めた。冷却アルカリ土類原子系へのレーザー照射により1次元近藤格子系が得られ、1次元SPT相が実現されること示した。ボゾン化とくりこみ群を用いた解析により相図の詳細を決定し、このSPT相を保護している対称性を明らかにした。また、このSPT相は強結合極限でスピン系のHaldane相と一致するが、近藤格子系においては電荷の自由度が存在するため、SPT相を保護している対称性が空間反転対称性のみとなり、保護している対称性が強結合極限のHaldane相とは異なることが分かった。

### (2) 時間駆動された近藤不純物の非平衡ダイナミクス：

不純物スピンと結合した局所的な磁場を考え、磁場は任意の周期性を持つとする。近藤効果のToulouse極限を考えることで、この非平衡多体問題を正確に解いた。その結果、不純物スピンの平均値が磁場の強さに関して非自明な非単調性を示すことを明らかにした。また、高

周波領域で系が並進対称性を回復すること、そのとき系の性質は絶対零度と無限大の温度の状態の混合状態で記述されることを示した。

(3) 周期的に駆動された開放量子系の漸近的状态:

エネルギーと粒子の熱浴に結合した自由なフェルミ系を考えた。この系の高周波領域で現れる普遍的な性質のいくつかを明らかにした。特に、外場の周波数が系のエネルギーカットオフよりも十分大きい場合、低エネルギーの性質は、有効フロケハミルトニアンで与えられることを示した。また、この系への散逸の効果も考察し、系と熱浴の結合を強くするだけでは励起状態を抑制できないことを明らかにした。

H29年度は、レーザーにより誘起されたトポロジカル超伝導相、レーザーによる近藤効果の制御・相転移の誘起、周期的に時間駆動されたボーズハバード系などについて研究した。

(4) レーザー誘起によるトポロジカル超伝導:

トポロジカル量子相の典型例としてトポロジカル超伝導がある。しかしながら、超伝導の候補物質の系統的な探索はそれほど簡単ではない。ここでは、固体物理で多く発見されているd波超伝導体の薄膜にレーザーを照射することで、トポロジカル超伝導が発現することを示した。これと同様の効果は、磁場を印加することで提案されているが、レーザー誘起現象ではボルテックスが誘起されないため、超伝導状態を保持しやすいという特長を持つ。

(5) 時間駆動された近藤絶縁体:

スレーブボゾン法と呼ばれる理論手法を用いて、周期アンダーソンモデルを取り扱い、2つの重要な効果を見出した。一つは、動的局在と呼ばれるもので、これは電子ホッピングや混成を弱める働きがあり、近藤効果の抑制あるいは増幅効果を持つ。もう一つはレーザーに誘起された電子ホッピングと混成であり、これは磁場やスピン軌道相互作用の役割を果たす。これらの効果を基に、近藤絶縁体のレーザー誘起トポロジカル相転移の性質を明らかにした。

(6) 周期的に駆動されたボーズハバード系のプレサーマル・フロケ定常状態:

周期的に駆動された多体系で生じる heating への散逸の効果を検討した。特にエネルギーと粒子の熱浴に結合したボーズハバード系を考えた。散逸が無いときは、パラメトリック不安定性を示すことが知られている。弱い相互作用かつ弱い熱浴との結合の極限では、散逸の効果が大きくなると、パラメトリック不安定性が抑制され、安定な状態が出現することを見出した。ここで得られた結果は、周期駆動された系から放出したエネルギーが外部熱浴に吸収され、heating を抑制することを示している。

H30年度は、冷却原子系における強相関効果に重点を置いて研究を進めた。とくに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イクダウン、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が得られた。

(7) 相互作用により誘起される新奇トポロジカル相:

トポロジカル相に関する、残された重要な課題の一つにトポロジカル分類の相互作用によるリダクションがある。しかしながら、これを検証する実験舞台はほとんど提案されていなかった。本研究では、冷却原子系を用いて、相互作用による分類の  $Z \rightarrow Z_4$  へのリダクションの舞台を提案し、実験的な観測方法を詳細に調べた。

(8) サウレスポンプへの相互作用の影響:

近年、サウレスポンプは冷却原子系で実現され大きな興味を集めたが、これまで相互作用のない自由原子系が対象であった。ここでは、サウレスポンプへの相互作用効果を系統的に調べた。相互作用がある閾値を超えるとトポロジカル相のギャップが閉じ、サウレスポンプがブレイクダウンすることを示した。さらに相互作用の効果はエッジ状態に顕著に表れることを示した。ここでの結果は従来の非摂動的な扱いを超えたトポロジカルポンプの安定性の系統的な議論を可能とするものである。

(9) 近藤格子系における超伝導・電荷密度波・スピン密度波の競合:

冷却フェルミ原子系では近藤格子模型の実現に近い将来可能になると考えられている。フェッシュバハ共鳴を用いることで遍歴フェルミ原子間の引力相互作用を変化させることが可能となる。ここでは、引力相互作用を含む近藤格子系で超伝導・電荷密度波・スピン密度波の競合を調べた。その結果、超伝導とスピン密度波の共存相を見出し、超伝導がスピン密度波を増強することを明らかにした。

(10) この他にも、時間結晶や非エルミート強相関系の研究などにも成果が得られた。

以上まとめたように、3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、時間周期駆動によって誘起される多体効果・量子相転移に関しては、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 18 件)

1. T. Yoshida, R. Peters, N. Kawakami and Y. Hatsugai  
"Symmetry-protected exceptional rings in two-dimensional correlated systems with chiral symmetry", Phys. Rev. B 99, 121101(R)-1-5 (2019) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.99.121101
2. B. Lechtenberg, R. Peters and N. Kawakami, "Interplay between Charge, Magnetic and Superconducting Order in a Kondo Lattice with an Attractive Hubbard Interaction", Phys. Rev. B 98, 195111-1-11 (2018) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevB.98.195111
3. M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda, "Non-Hermitian Kondo Effect in Ultracold Alkaline-Earth Atoms", Phys. Rev. Lett. 121, 203001-1-6 (2018) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.203001
4. K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami, "Spatial-Translation-Induced Discrete Time Crystals", Phys. Rev. Lett. 121, 093001-1-6 (2018) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.093001
5. T. Yoshida, R. Peters and N. Kawakami, "Non-Hermitian perspective of the band structure in heavy-fermion systems", Phys. Rev. B 98, 035141-1-7 (2018) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.98.035141
6. K. Kimura, T. Yoshida, and N. Kawakami, "Topological properties of magnetically ordered heavy-fermion systems in the presence of mirror symmetry", J. Phys. Soc. Jpn. 87, 084705-1-9 (2018) (査読あり) DOI: 10.7566/JPSJ.87.084705
7. R. Peters, T. Yoshida, and N. Kawakami, "Magnetic states in a three-dimensional topological Kondo insulator", Phys. Rev. B 98, 075104-1-9 (2018) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.98.075104
8. M. Nakagawa, T. Yoshida, R. Peters, and N. Kawakami, "Breakdown of topological Thouless pumping in the strongly interacting regime", Phys. Rev. B 98, 075104-1-9 (2018) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevB.98.115147
9. T. Yoshida, I. Danshita, R. Peters and N. Kawakami, "Reduction of topological Z-classification in cold atomic systems", Phys. Rev. Lett. 121, 025301-1-6 (2018) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.025301
10. Tsuneya Yoshida, Akito Daido, Y. Yanase and Norio Kawakami, "Fate of Majorana modes in CeCoIn<sub>5</sub>/YbCoIn<sub>5</sub> superlattices", Phys. Rev. Lett. 118, 147001-1-6 (2017) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.147001
11. Kazuaki Takasan, Akito Daido, Norio Kawakami, and Youichi Yanase, "Laser-induced topological superconductivity in cuprate thin films", Phys. Rev. B 95, 134508-1-8 (2017) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevB.95.134508
12. K. Iwahori and N. Kawakami, "Stabilization of prethermal Floquet steady states in a periodically driven dissipative Bose-Hubbard model", Phys. Rev. A 95, 043621-1-8 (2017) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevA.95.043621
13. K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami, "Laser-irradiated Kondo insulators: Controlling Kondo effect and topological phases", Phys. Rev. B 96, 115120-1-15 (2017) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevB.96.115120
14. R. Peters and N. Kawakami, "Competition of striped magnetic order and partial Kondo screened state in the Kondo lattice models", Phys. Rev. B 96, 115158-1-6 (2017) (査読あり) DOI: 10.1103/PhysRevB.96.115158
15. M. Nakagawa and N. Kawakami, "Symmetry-protected topological phase transition in one-dimensional Kondo lattice and its realization with ultracold atoms", Phys. Rev. B 96, 155133-1-13 (2017) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.96.155133
16. Koudai Iwahori and Norio Kawakami, "Nonequilibrium dynamics of a periodically-driven Kondo impurity", Phys. Rev. A 94, 063647-1-11 (2016) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.94.063647
17. Robert Peters, Yasuhiro Tada, and Norio Kawakami, "Magnetism in f-electron superlattices", Phys. Rev. B 94, 205142-1-6 (2016) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.205142
18. Koudai Iwahori and Norio Kawakami, "Long time asymptotic state of periodically driven open bilinear system", Phys. Rev. B 94, 184304-1-6 (2016) (査読あり)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.184304

[学会発表](計 32 件)

1. Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami

- "Topological Properties of mirror symmetric Kondo half-metals"  
APS march meeting 2019, Boston, USA, March 4-8 (2019)
2. Kaoru Mizuta, Kazuaki Takasan, Masaya Nakagawa, and Norio Kawakami  
"Spatial-Translation-Induced Discrete Time Crystals"  
APS march meeting 2019, Boston, USA, March 4-8 (2019)
3. 川上則雄 (招待)  
"強相関係における非エルミート量子現象"  
非エルミート系および光学実験に関する研究会、北海道大学、札幌、2019年3月1日~2日
4. Riki Toshio, Kazuaki Takasan, Norio Kawakami  
"Applications of Electron Hydrodynamics to Nonlocal and Nonlinear Optical Effects"  
Topo Phases and Functionality of Correlated Electron Systems, Tokyo, Feb 18-20, 2019
5. Kazuki Yamamoto and Norio Kawakami  
"Fate of loss-induced superconductivity studied by non-Hermitian mean field theory"  
Topo Phases and Functionality of Correlated Electron Systems, Tokyo, Feb 18-20, 2019
6. Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami  
"Topological Properties of Magnetically Ordered Heavy-Fermion Systems: AFM phase & FM phase" BEC2018X, Tsukuba, December 9-13, 2018
7. Riki Toshio, Kazuaki Takasan, Norio Kawakami  
"Hydrodynamic optical response of electron fluids in ultrapure metals"  
International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science, Tokyo, Nov 7 - Nov 10, 2018
8. Kazuki Yamamoto and Norio Kawakami  
"Enhancement of the superconducting gap induced by dissipation", International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science, Tokyo, Nov 7 - Nov 10, 2018
9. N. Kawakami (Invited)  
"Correlation effects in non-Hermitian quantum systems"  
Japan-Swiss Workshop on "Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM 2018)"  
Oct. 8-10, 2018, Geneva, Switzerland
10. N. Kawakami (Invited)  
"Floquet Topological Phase Transitions in Correlated Systems"  
The Second TMS-PKU Alliance Workshop on "Topological Materials and Quantum Materials",  
September 25-28, 2018, Beijing, China
11. N. Kawakami (Invited)  
"Laser induced topological phases in correlated systems", Erice Workshop 2018: Majorana Fermions and Topological Materials Science, July 21-26, 2018, Erice, Italy
12. N. Kawakami (Invited)  
"Emergent topological phases in correlated systems by laser irradiation"  
New Trends in Topological Insulators  
July 16-19, 2018, University of Luxembourg, Luxembourg
13. Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami  
"Topological mirror Kondo semi-metals and half-metals in two-dimensional magnetic systems", International Conference on Magnetism  
San Francisco, July 15-20, 2018
14. K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami  
"Time crystals realized by spatial translation and its symmetry breaking"  
International Conference on Magnetism, San Francisco, USA, July 15-20, 2018
15. N. Kawakami (Invited)  
"Laser-induced topological phases in correlated systems"  
62nd CEMS Colloquium, June 27, RIKEN, Japan
16. N. Kawakami (Invited)  
"Floquet topological phases in correlated electron systems"  
KIAS-KAIST Workshop on Topology and Correlation, June 6-8, 2018, Seoul, Korea
17. 川上則雄  
"固体物理におけるトポロジー" (招待)  
ImPACT 未来開拓研究会 2018、富山市、2018年5月29日-30日
18. K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami (Invited)  
"Spatial-Translation-Induced Floquet Time Crystals"  
YITP workshop "Floquet theory: Fundamentals and Applications", Kyoto, April 9-20, 2018
19. Kazuhiro Kimura, Tsuneya Yoshida and Norio Kawakami  
"Theoretical study of 2D topological Kondo insulator in antiferromagnetic phase" TMS-EPiQS " 2nd Alliance Workshop: Topological magnets and topological

- superconductors, Kyoto, January 11-14, 2018
20. Kazuaki Takasan, Masaya Nakagawa and Norio Kawakami  
Laser-irradiated Kondo insulators: Controlling Kondo effect and topological phases APS March meeting, Los Angeles, USA, Mar. 5 - Mar. 9, 2018
  21. M. Nakagawa, T. Yoshida, R. Peters, and N. Kawakami  
"Breakdown of topological Thouless pumping in strongly interacting fermions"  
APS March Meeting 2018, Los Angeles, Mar. 5 - Mar. 9, 2018
  22. M. Nakagawa, S. Furukawa, T. Yoshida, R. Peters, and N. Kawakami  
"Topological pumping in strongly interacting bosons and fermions"  
The 2nd CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems, Tokyo, Jan. 15 - Jan. 17, 2018
  23. N. Kawakami (Invited)  
"Emergent phases in correlated topological materials"  
International workshop on "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases" Jan. 5- 8, 2018, Tsukuba, Japan
  24. 川上則雄 (招待)  
「電子系のトポロジー：トポロジカル絶縁体・超伝導体・半金属」  
仁科記念講演会、2017年12月6日、東京大学本郷キャンパス
  25. M. Nakagawa, S. Furukawa, T. Yoshida, R. Peters, and N. Kawakami  
"Strongly correlated topological pumping from symmetry-protected topological phases"  
Novel Quantum States in Condensed Matter 2017, Kyoto, Nov. 23, 2017
  26. N. Kawakami (Invited)  
"Electron correlations in low-dimensional topological systems"  
Workshop on spin, charge and energy currents in novel materials. Oct. 1-7, 2017, Hvar, Croatia
  27. K. Takasan, A. Daido, N. Kawakami and Y. Yanase  
"Laser-induced topological superconductivity in cuprate thin films"  
SCES2017, Prague, Czech, July 17-21, 2017
  28. M. Nakagawa and N. Kawakami  
"Interaction-Induced Crossover of Fermionic Symmetry-Protected Topological Phases in One Dimension"  
International Conference on Topological Materials Science 2017, Tokyo, May 10-13, 2017
  29. H. Obuse, K. Mochizuki, D. Kim, N. Kawakami  
"Floquet topological phases of non-unitary quantum walks with PT symmetry"  
Progress in Quantum Physics with Non-Hermitian Operators, August 8 - 12, 2016, Kyoto
  30. N. Kawakami (Invited)  
"Photo-induced Kondo effect in ultracold fermions"  
International workshop on "Exotic states of matter with SU(N) symmetry -Realizing SU(N) symmetries in condensed matter", July 4- July 15, 2016, Kyoto, Japan
  31. N. Kawakami (Invited)  
"Many-body proximity effects in f-electron superlattices"  
Collaborative Conference on 3D and Materials Research, June 20-24, 2016, Seoul, Korea
  32. Y. Ibe, H. Nakagawa and N. Kawakami  
"Weyl Semimetal in Heavy Fermion Systems without Inversion Symmetry",  
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, May 8-13, Hangzhou, China

〔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:// cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/](http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/)

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者: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。