

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287087

研究課題名(和文)非平衡複合系における量子凝縮現象のマクロ量子論

研究課題名(英文) Macroscopic quantum theory of quantum condensation in nonequilibrium composite systems

研究代表者

小川 哲生 (OGAWA, Tetsuo)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：50211123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：非平衡複合系での多彩な量子現象を記述するマクロ量子論の構築を目標に研究を行い、一般論・具体論の両面から様々な成果を得た。主要な具体的成果は次の通りである。(1) 半導体励起子発光寿命におけるコヒーレンス(ポラリトン)形成の新描像の提唱、(2) 熱平衡相転移と非平衡凝縮現象の両方が起こる超伝導回路系の発見、(3) BEC-BCS-LASERクロスオーバーを記述する時間領域理論の構築、(4) 結合共振器QEDアレイ系での非平衡プラトー現象の発見、(5) 共振器QED系の放射光エネルギーを仕事と熱へ分ける方法の構築、(6) マクロ量子系としての断熱量子計算機の量子性と計算効率との関係

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to construct a macroscopic quantum theory for nonequilibrium composite systems. We have obtained results within the theories for both general and concrete systems. The main results are as follows.
(1) Proposed a new picture of the appearance of coherence (polariton) on the exciton lifetime in semiconductors, (2) Discovered a superconducting circuit system in which both the equilibrium phase transition and the nonequilibrium condensation can occur, (3) Constructed a time-dependent theory for BEC-BCS-LASER crossover, (4) Discovered nonequilibrium plateaus in a coupled cavity QED array system, (5) Constructed the method of decomposing the radiation energy into work and heat in cavity QED systems, (6) Discovered a relationship between the quantum feature and computational speedup for the adiabatic quantum computation.

研究分野：物性理論

キーワード：マクロ量子論 非平衡 量子熱機関

1. 研究開始当初の背景

半導体微小共振器において、物質と光との重ね合わせ状態であるポラリトン系での凝縮現象が観測されており、注目を集めている。ポラリトン系の特徴は、物質と光の複合量子系であると同時に非平衡開放系であるという点にある。このため、非平衡度を上げるとコヒーレンスがどの場(物質場か光場か全体か)に形成されるのかが変わり、多彩な凝縮現象を示す。ポラリトン系は、量子コヒーレンスを有する新たな高強度光源として期待されるとともに、非平衡統計力学における新たな学術的知見の獲得も期待される。しかし、系を古典的に扱うことはできず、かつ非平衡現象であることから、平衡熱力学や平衡統計力学での相転移論のような一般論を展開することが難しい。また一方で、近年の非平衡統計の研究においては、通常の平衡熱力学を越えた試みとして、エンタングルメントなどの非古典性を利用する「量子熱力学」の研究が盛んになりつつある。

2. 研究の目的

非平衡複合系において発現する多彩な量子凝縮現象を記述する「マクロ量子論」の構築を大目標とする。すなわち、量子凝縮現象を少数の物理量でもって特徴付け、系の詳細に依存しない普遍的一般理論の構築を目指す。量子凝縮状態およびその量子コヒーレンスの特徴付けと形成過程は具体的なモデル系で解析し、それらを帰納してマクロ量子論の構築を行う。このマクロ量子論によって量子凝縮現象・非平衡統計物理に関する普遍性を見出すとともに、具体的な系への還元によって各種の非平衡量子凝縮現象に新たな知見を得る。さらには、仕事や熱を量子コヒーレンスに変換する「量子熱機関」の一般論を展開し、具体的な系に適用する。また、関連する実験の解析や、普遍性の実験検証を提唱し、新たな物理現象および新たな普遍的概念の発見を目指す。

3. 研究の方法

量子凝縮状態や外部出力が有する巨視的・量子コヒーレンスの性質とその形成過程を具体的な系で理解した上で、それらを定量的に特徴付けうる少数個のマクロ物理量の同定、それらによって表現される有効方程式の導出を行う。また、これらの妥当性を、状態間遷移や量子コヒーレンスの制御の観点から検証し、非平衡量子凝縮現象に対するマクロ量子論を構築する。また、各系での量子コヒーレンスの生成と制御に関する知見と構築したマクロ量子論から、仕事や熱を量子コヒーレンスに変換する「量子熱機関」の一般論を展開し、具体的な系に適用する。関連する実験と理論解析との比較、マクロ量子論の実験検証、量子コヒーレンス生成機関の実現に関しても、実験グループと共同で行う。

4. 研究成果

(1) 半導体中の励起子間散乱からの発光について、その寿命の起源を実験グループと共に解析した。従来、散乱された励起子は速やかにポラリトンになると信じられていたため、発光寿命はポラリトンの試料からの脱出時間を反映していると思われてきた。しかし、ポラリトンの群速度から見積もられる脱出時間は、実験で観測された発光寿命より1桁短く、その理由は未解明なままとなっていた。本研究にて、実験結果と理論解析を改めて比較した結果、ポラリトンが励起子間散乱の直後ではなく、十分に時間が経った後に形成され、その形成時間が発光寿命を決定している可能性を見出した。すなわち、いまだ十分に理解が進んでいない励起子の発光現象について、励起子が光との間でどの様にコヒーレンス(ポラリトン)を形成していくのか、その理解のための格好の検討材料を発見した。また、発光寿命を決定するマクロ物理量として励起子のコヒーレンス体積の重要性を改めて示した。本研究成果により、発光過程の理解の促進も期待される。

(2) 非平衡複合系におけるマクロ量子論の構築のために、熱平衡下の相転移と非平衡下の凝縮現象の両方が起こる物理系を発見した。レーザー発振という非平衡凝縮現象は、単純にはディック模型で記述できると古くより知られている。さらに、1973年には超放射相転移と呼ばれる熱平衡下の相転移現象も示すことが知られていた。しかし、レーザー発振は古くより実現されているのに対し、超放射相転移を示す物理系はこれまで見出されてこなかった。それは、超放射相転移に必要な光と物質の超強結合領域において、多くの物理系がディック模型に帰着できなかったためである。そのような中、本研究では、特殊な超伝導回路であれば、ディック模型を実装でき、また超放射相転移を起こせることを見出した。この超伝導回路ではまた、レーザー発振も起こせるため、熱平衡下の相転移と非平衡下の凝縮現象の両方を実験的に同じ系で起こすことができる。今後、これらの移り変わりを理論・実験の両面から解析していくことで、マクロ量子論構築のための知見が得られる。

(3) 半導体量子井戸を共振器中に埋め込んだ構造中においては、非平衡性が重要な役割を果たすレーザー発振状態だけでなく、熱平衡統計力学に基づいて励起子ポラリトンのボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)や電子と正孔がクーパー対を形成する電子正孔BCS相といった秩序相の形成なども指摘されている。熱平衡領域から非平衡領域にまでわたるこれらの秩序相を統一的な視点で捉える理論を構築することは、量子凝縮現象・非平衡統計物理に関する普遍性を見出す指針を得るという意味において重要な課題の一つ

である。そこで我々はこれまで、これらの秩序相を統一的に記述できる BEC-BCS-LASER クロスオーバー理論を提唱してきた。しかしながら、この理論は定常状態についてしか取り扱うことができず、時間的に変化する現象の取り扱いには困難であった。今回我々は、非平衡 Green 関数の取り扱いを時間領域から解析しなおすことにより、BEC-BCS-LASER クロスオーバーを記述する時間領域理論を構築した。その結果、この物理系において近年観測された Fermi 端超蛍光が、電子正孔 BCS 相の前駆現象であることが明らかになった。電子正孔 BCS 相は理論的には存在が指摘されてきたが、実験的には依然として実現されていない。このため上記の結果は、電子正孔 BCS 相の実験的な実現を強く期待させるものである。さらには今回の研究によって、非平衡から熱平衡領域にまでわたる秩序相を統一的に取り扱う上での核心部分は、時間依存形式の緩和項にエネルギー準位（エネルギーバンド）の繰り込み効果を考慮することであることを見出した。このことは、平衡統計力学を包含する形で非平衡統計力学を構築する際の重要な指針になると考えている。

(4) 結合共振器 QED アレイ系では、共振器間の光子ホッピングが大きい領域でコヒーレント相が現れること知られている。共振器損失などが存在する非平衡状況下でのコヒーレント相の性質を、共振器損失と外部からの励起の二つの効果を取り入れた量子マスター方程式で解析した。まず、平均場近似レベルで非平衡定常状態での相図を決定した。さらに、コヒーレント相においてプラトー現象が起こることを発見した。この現象は準位間遷移を伴うポンプとロスの釣り合いから生じることを突き止め、非平衡開放系に特有の現象であることを論じた。

(5) 量子熱力学系の具体例として共振器 QED 系の一般論を考えた。共振器から光として放射されるエネルギーを全て仕事としてしまうと、カルノー効率を超えてしまう場合がある事がわかった。従って、放射光のエネルギーを仕事と熱に分ける必要があり、そのために共振器からのエネルギーが外部系にどのような形で受け取られるのかを調べた。外部系の量子マスター方程式を導出し、外部系の時間発展がハミルトニアンで書ける部分と書けない部分に分解することで、それぞれの時間発展の仕方に対応した外部系へのエネルギー流入を仕事と熱に割り振ることが可能となった。これは熱力学の第 1 法則に相当するものである。また、この仕事と熱への分解は光場の振幅が非ゼロの部分とゼロの部分という直感的な分け方と整合することも示した。

さらに、熱力学第 2 法則に相当する、エントロピー生成が満たすべき不等式を構築した。共振器 QED 系では外部系が真空（に極め

て近い）状態となるため、エントロピー生成の定義に困難が生じ得る。ここでは、絶対不可逆性の概念を援用することでそのような場合でも成立する不等式を導出した。また、導出の過程で、ゆらぎの定理を外部系が真空状態である場合へと拡張することに成功した。

(6) 断熱量子計算機をマクロ量子系とみなし、その時間発展中（計算の実行中）に現れる量子性と計算効率との関係を調べた。いくつかの具体的な断熱量子アルゴリズムにおいて、途中でマクロな量子的重ね合わせが現れることが計算の量子加速の必要条件となっていることを支持する結果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

Weilu Gao, Xinwei Li, Motoaki Bamba, and Junichiro Kono, Continuous Transition between Weak and Ultrastrong Coupling through Exceptional Points in Carbon Nanotube Microcavity Exciton Polaritons, *Nature Photonics*, 2018 (in press), 査読あり
DOI: 10.1038/s41566-018-0157-9

X. Li, M. Bamba, Q. Zhang, S. Fallahi, G. C. Gardner, W. Gao, M. Lou, K. Yoshioka, M. J. Manfra, and Junichiro Kono, Vacuum Bloch-Siegert shift in Landau polaritons with ultra-high cooperativity, *Nature Photonics*, 2018 (in press), 査読あり
DOI: 10.1038/s41566-018-0153-0

馬場基彰, 光と物質の超強結合は電磁場と電荷を相転移させるか?, *固体物理*, Vol. 52 (No. 9), 2017, 459~476, 査読あり

M. Bamba and N. Imoto, Circuit configurations which may or may not show superradiant phase transitions, *Physical Review A*, Vol. 96, 2017, 053857-1-11, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevA.96.053857

M. Yamaguchi, T. Yuge, and T. Ogawa, Markovian quantum master equation beyond adiabatic regime, *PHYSICAL REVIEW E*, Vol. 95, 2017, 012136-1/16, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevE.95.012136

T. Yuge, M. Yamaguchi, and T. Ogawa, Decomposition of radiation energy into work and heat, *PHYSICAL REVIEW E*, Vol. 95, 2017, 022119-1/11, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevE.95.022119

M. Bamba and N. Imoto, Maxwell boundary conditions imply non-Lindblad master equation, Physical Review A, Vol. 94, 2016, 033802-1~20, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevA.94.033802

M. Bamba, K. Inomata, and Y. Nakamura, Superradiant Phase Transition in a Superconducting Circuit in Thermal Equilibrium, Physical Review Letters, Vol. 117, 2016, 173601-1~5, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.173601

M. Bamba and T. Ogawa, Laser under ultrastrong light-matter interaction: Qualitative aspects and quantitative influences by level and mode truncations, Physical Review A, 2016, Vol. 93, 033811/1-10, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevA.93.033811

Tomohiro Tamaya, Akira Ishikawa, Tetsuo Ogawa, and Koichiro Tanaka, Diabatic Mechanisms of Higher-Order Harmonic Generation in Solid-State Materials under High-Intensity Electric Fields, Physical Review Letters, Vol. 116, 2016, 016601/1-5, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.016601

M. Bamba, S. Wakaiki, H. Ichida, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, and Y. Kanematsu, Theory of the lifetime of an exciton incoherently created below its resonance frequency by inelastic scattering, Physical Review B, Vol. 91, 2015, 235205/1-13, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.235205

Makoto Yamaguchi, Ryota Nii, Kenji Kamide, Tetsuo Ogawa, Yoshihisa Yamamoto, Generating functional approach for spontaneous coherence in semiconductor electron-hole-photon systems, Physical Review B, Vol. 91, 2015, 115129/1-40, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.115129

Tatsuro Yuge, Kenji Kamide, Makoto Yamaguchi, Tetsuo Ogawa, Cavity-Loss Induced Plateau in Coupled Cavity QED Array, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 83, 2014, 123001/1-4, 査読あり
DOI: 10.7566/JPSJ.83.123001

Motoaki Bamba, Tetsuo Ogawa, Stability of polarizable materials against superradiant phase transition, Physical Review A, Vol. 90, 2014, 063825/1-8, 査

読あり

DOI: 10.1103/PhysRevA.90.063825

[学会発表](計 35 件)

弓削達郎, 光放射系の非平衡ゆらぎの理論, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018, 東京理科大学

M. Bamba, K. Inomata, and Y. Nakamura, Phase transition and mode softening in superconducting circuit, DAQS2018, The 2nd CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems, 2018, RCAST, The University of Tokyo, Japan

弓削達郎, 断熱量子計算におけるマクロに異なる状態の重ね合せ, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017, 岩手大学上田キャンパス

馬場基彰, 相転移する超伝導導波路での光子質量制御, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017, 岩手大学上田キャンパス

馬場基彰, 光を照射しない光誘起相転移の探索, 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, 低次元, ダイナミクス, 2017, 東京大学物性研究所

M. Bamba, Quantum and thermal phase transitions in circuit QED system, NQS2017, Novel Quantum States in Condensed Matter 2017, 2017, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan

弓削達郎, マクロに異なる状態の重ね合せは量子アニーリングに現れるか?, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017, 大阪大学

馬場基彰, 無限に広がる光場と局在する物質の重ね合わせ状態, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017, 大阪大学

馬場基彰, 光と物質の超強結合が露わにする量子光学の未開拓領域, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017, 大阪大学

M. Bamba, Coherent Phase Transition in Superconducting Circuit, Light-Matter Interactions in Cavity & Circuit QED Systems in the Light of Quantum Technology - IWQD -, 2017, NII, Tokyo, Japan

M. Bamba, Coherent-incoherent phase transition of virtual photons in superconducting circuit, Virtual photons

in ultra-strongly coupled systems, 2017, RIKEN, Wako, Japan

M. Bamba, Super-radiant phase transition in superconducting circuit in thermal equilibrium, International Workshop on Ultra-Strong Light-Matter Interactions: theory and applications to quantum information, 2016, Bilbao, Spain

弓削達郎, 山口真, 小川哲生, 放射光のエネルギーを仕事と熱に分解する, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016, 金沢大学

山口真, 弓削達郎, 小川哲生, 非断熱領域におけるマルコフ型量子マスター方程式, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016, 金沢大学

馬場基彰, 猪股邦宏, 中村泰信, 超放射相転移が起きる超電導回路構造の提案, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016, 金沢大学

M. Yamaguchi and T. Ogawa, Unified picture of cooperative phenomena in semiconductor electron-hole-photon system, The 8th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE8), 2016, Edinburgh, UK

M. Bamba, T. Ogawa, and N. Imoto, Remaining Possibility of Super-Radiant Phase Transition by Ultra-Strong Interaction, 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, 2016, 東大寺総合文化センター

馬場基彰, 井元信之, Maxwell 境界条件は光子数の保存を求めない, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016, 東北学院大学泉キャンパス

弓削達郎, 小川哲生, 熱機関としてのレーザーのパワーと効率, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016, 東北学院大学泉キャンパス

馬場基彰, 小川哲生, 超強結合による超放射相転移の可能性はどこに残されているのか?, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015, 関西大学千里山キャンパス

②① 玉谷知裕, 石川陽, 小川哲生, 田中耕一郎, 固体の高次高調波発生に対する電子相関効果の理論, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015, 関西大学千里山キャンパス

②② 弓削達郎, 上出健仁, 小川哲生, 結合 QED

共振器系における非平衡プラトール, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015, 関西大学千里山キャンパス

②③ 馬場基彰, 小川哲生, 光と物質の超強結合下におけるレーザー ~ 電磁気描像への回帰~, 第 32 回量子情報技術研究会 (QIT32), 2015, 大阪大学豊中キャンパス基礎工学部国際棟シグマホール

②④ 山口真, 上出健仁, 新居良太, 小川哲生, 山本喜久, Fermi 端超蛍光と電子正孔 BCS 状態の関係性, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015, 早稲田大学早稲田キャンパス

②⑤ Tetsuo Ogawa, Tomohiro Tamaya, Koichiro Tanaka, Mechanism of high-order harmonic generation in semiconductors under strong electric field, The 5th International Symposium on Terahertz Nanoscience, 2014, Martinique, France

②⑥ Motoaki Bamba, Tetsuo Ogawa, Lasing in ultrastrong light-matter coupling regime, International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors, 2014, Bremen, Germany

②⑦ 馬場基彰, 小川哲生, 光と物質の超強結合による散逸の抑制と増進, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014, 中部大学春日井キャンパス

②⑧ 弓削達郎, 上出健仁, 小川哲生, 結合共振機 QED 列における非平衡定常状態の安定性解析, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014, 中部大学春日井キャンパス

②⑨ Tetsuo Ogawa, Makoto Yamaguchi, Equilibrium and nonequilibrium "condensation" in polariton many-body systems, 5th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena, 2014, Bled, Slovenia

③⑩ Tetsuo Ogawa, Theory of BEC-BCS-LASER crossover cavity polariton systems, International Workshop on Quantum Phenomena in Photo-controlled Systems, 2014, The University of Tokyo

③⑪ Motoaki Bamba, Tetsuo Ogawa, Estimation of the A^2 term from the analysis of lasing in ultrastrong coupling regime, The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, 2014, The Prince Hakone

③⑫ Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Ryota

Nii, Tetsuo Ogawa, Yoshihisa Yamamoto, BEC-BCS-Laser crossover theory in interacting electron-hole-photon systems, The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Sytems, 2014, The Prince Hakone

③③ Ryo Maezono, Pablo L. Rios, Tetsuo Ogawa, Richard J. Needs, Excitons and biexcitons in symmetric electron-hole bilayers, The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Sytems, 2014, The Prince Hakone

③④ Tomoyuki Horikiri, Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Yasuhiro Matsuo, Andreas Loeffler, Sven Hoefling, Yutaka Shikano, Tetsuo Ogawa, Alfred Forchel, Yoshihisa Yamamoto, Exciton-polariton condensation in high excitation density regime, The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Sytems, 2014, The Prince Hakone

③⑤ Tatsuro Yuge, Kenji Kamide, Makoto Yamaguchi, Tetsuo Ogawa, State freezing in nonequilibrium coupled cavity QED array, The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Sytems, 2014, The Prince Hakone

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 哲生 (Ogawa Tetsuo)
大阪大学・理学研究科・教授
研究者番号：50211123

(2) 研究分担者

馬場 基彰 (BAMBA Motoaki)
大阪大学・基礎工学研究科・招へい教員
研究者番号：30647970

(3) 研究分担者

弓削 達郎 (YUGE Tatsuro)
静岡大学・理学部・助教
研究者番号：70547380

(4) 研究分担者

山口 真 (YAMAGUCHI Makoto)
東海大学・理学部・講師
研究者番号：40733895