

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：63903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800181

研究課題名(和文) 微小共振器ポラリトン凝縮体生成過程の量子ダイナミクスの解析

研究課題名(英文) Quantum Dynamics on Creation of Exciton-Polariton Condensation in Microcavity

研究代表者

鹿野 豊 (Shikano, Yutaka)

分子科学研究所・協奏分子システム研究センター・特任准教授

研究者番号：80634691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：微小共振器ポラリトン凝縮体における凝縮体生成過程を解析するのに必要な解析的な道具に関する研究を行った。また、現、横浜国立大学の堀切准教授らの実験結果を解析することにより、我々のモデルの妥当性に関して議論を行った。また、研究経過においてフォノンダイナミクスの重要性を認識し、イオントラップにおける原子物理系において解析を行った。

研究成果の概要(英文)：We studied methodology to analyze the condensation dynamics on the micro semiconductor cavity exciton polariton and discussed the comparison between our model and the experimental data obtained by Professor Tomoyuki Horikiri et al. Furthermore, during this project, we found the importance on the phonon dynamics and analyzed the ion trap systems from the viewpoint of the phonon dynamics.

研究分野：光物性

キーワード：ポラリトン フォノン 半導体物性 光ルミネセンス 量子ダイナミクス 量子制御

1. 研究開始当初の背景

共振器ポラリトンは励起子と共振器の強結合によって生成される準粒子(ボーズ粒子)である。実験的には量子井戸と半導体の積層構造を利用し微小共振器を作成し、外からレーザーを照射することで量子井戸のところに励起子を生成させ、共振器ポラリトンから共振器の外に漏れてきたフォトルミネセンスを観測することで測定を行う。入射レーザーの強度をあげていくと、分光器を用いた運動量分布の観測からフォトルミネセンスの強度が低エネルギー側の共振器ポラリトン分岐の基底状態付近からの発光が非線形に増幅することによりポラリトン凝縮体が確認された。この凝縮体の生成過程においては、ポラリトンの寿命、電子の寿命、正孔の寿命、共振器の寿命と時間スケールの異なったダイナミクスがあることで、ポラリトン凝縮体が熱平衡状態として扱えるかどうかは定かでない。しかし、これまでに行われてきた実験は入射レーザーの強度がポラリトン凝縮体程度(閾値)で実験を行うことにより、熱平衡状態のボーズ・アインシュタイン凝縮体の理論の枠組みで説明可能であった。しかし、入射レーザーの強度を更にあげていくと、励起子の密度が共振器内で飽和し、励起子と共振器の強結合は弱結合となり、共振器内で反転分布が起こり、そこからの発光が確認されると予想されていた。しかし、大阪大学の小川哲生教授や国立情報学研究所の山本喜久教授の研究グループから理論的に高励起領域であっても励起子と共振器の強結合が残るという結果が予言され、研究協力者である国立情報学研究所の堀切智之博士研究員による実験から励起子と共振器の弱結合としては扱うことの出来ないということが示唆されている。そこで研究代表者の鹿野と研究協力者の堀切は共同で、温度依存性について低温の高励起領域では通常のレーザー発振とは異なるということを示し、そのスペクトルが定性的には説明できるものの定量的に説明できる理論がないということを複数の学術論文にまとめている最中である。これまでの理論的な枠組みでは、ポラリトン凝縮体構造を仮定していること、パルスレーザーを用いた実験なのにも関わらず定常状態解を仮定していることが原因で実験結果を定量的に説明することが出来ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非平衡グリーン関数の方法を用いて、ポラリトン凝縮体生成過程を含めたフォトルミネセンスの時間変化のダイナミクスを取り扱うことの出来るモデルを確立することである。しかし、微小共振器の寿命やレーザー照射下のサンプルの局所的な温度など実験から未だに決められていないパラメータも多い。また、入射レーザー、電子、正孔、共振器、励起子、共振器ポラリトン、フォノンと異なる時間スケールのダイ

ナミクスが関与していることから、モデルを無数に構築することが可能である。そのため、実験結果を反映した現象論的モデルを構築することが重要であると申請者は考えている。

本研究で非平衡グリーン関数を用いる利点は、平衡状態に対する理論やその線形応答で書き表すことの出来ない非平衡領域でも現象を記述することができることである。しかし、これまで非平衡グリーン関数での取り扱いでは単一モードのダイナミクスを記述は行えるものの、凝縮体構造および時間スケールの異なるダイナミクスにおいては理論を拡張する必要がある。本研究の理論的に独創的な点は、非平衡グリーン関数の理論の枠組みを拡張することにある。また、本研究はフォノンにおける効果を陽に取り入れることを目標とする。これは、ポラリトン凝縮体からの発光は通常のレーザーとは異なる振る舞いを示すことが実験的に知られている。その顕著な違いは、ポラリトン凝縮体からのフォトルミネセンスが低励起および高励起領域に関わらずバンチングするという点である。つまり、ポラリトン凝縮体が熱平衡状態に近い状態であったとした時、そこからの発光は位相が揃っているはずであると考えられるのでコヒーレント状態であると考えられるが、この実験結果はフォノンによるノイズの効果によりバンチングをしていると考えられる。ここから得られる教訓は、フォノンが平衡状態に緩和するよりも前に微小共振器からの発光が得られているということになる。このことは非マルコフノイズの解析が必要になり、非平衡グリーン関数と組み合わせることで理論体系を拡張することが出来ると考えられる。

3. 研究の方法

共振器ポラリトンが熱平衡状態にあると考えてもよいとされている低励起領域においてフォノンの効果を取り入れた量子ダイナミクスを計算できるモデルを考える。この領域では、これまであまり時間分解データがとられてこなかったことから、高精度のストリークカメラを所有している研究協力者の堀切にお願いをし、時間分解した高次の自己相関関数の測定を行い、ポラリトン凝縮体からの発光にどのようなノイズが寄与しているのかというのを実験的に測定していただく。この現実的に測定できる程度の3次および4次の自己相関関数からフォノンと共振器ポラリトンまたは励起子との相互作用を決定できるスキームを構築する。また、凝縮体ではないポラリトンはパルスレーザーを入れてから数百ピコ秒後に発光が確認できる、凝縮体が生成されると基底状態への遷移が増強され早くなることが観測されている。

そこで、本研究の方法論としてフォノンの取り扱いを様々な物理系に対して応用し、そ

の基本的な性質および応用までを調べることとした。

4. 研究成果

メインテーマである高励起状態における励起子・ポラリトン凝縮体の発光依存性に関しては、論文で発表したようにこれまでは考えられてこなかった励起子・ポラリトン凝縮体の可能性を示唆することが出来た。具体的には、励起子・ポラリトンがプラズマ状態となり反転分布が形成されることが一般的に高励起状態では予想されてきたが、それと反する結果を得ており、低温・高励起状態における反転分布のないレーザー転移の可能性を示唆する結果となった。また、それを端として、理論的には反転分布のないレーザー発振の可能性とその原理についての考察を行った。その際、フォノンの取り扱いに注意しなければならず、フォノンの一般的な取り扱いに関する性質を調べることとなった。

フォノンの一般的な性質を調べるのに適する系としてイオントラップを用いた集団振動の系を用いることが量子情報技術の発展から考えると非常に簡便で良いと考えた。そこで、大阪大学の占部研究室と共同研究を始め、空間的に離れたフォノンをアハロノフ・ボーム効果を使って相対的に位相をつけ干渉させる実験を提案し、実証に成功した。これはフォノンの基本的な性質を調べると共に、量子基礎論に対して大きな進展があったものと思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Atsushi Noguchi, Yutaka Shikano, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe
Aharonov-Bohm effect in the tunnelling of a quantum rotor in a linear Paul trap
Nature Communications **5**, 3868 (2014)
[6pages], 査読有.
DOI: 10.1038/ncomms4868

Ali Ü. C. Hardal, Peng Xue, Yutaka Shikano, Özgür E. Müstecaplıoğlu, and Barry C. Sanders
Discrete time quantum walk with nitrogen-vacancy centers in diamond coupled to a superconducting flux qubit
Physical Review A **88**, 022303 (2013)
[11pages], 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevA.88.022303

Tomoyuki Horikiri, Yasuhiro Matsuo, Yutaka Shikano, Andreas Löffler, Sven Höfling, Alfred Forchel, and Yoshihisa Yamamoto

Temperature Dependence of Highly Excited Exciton Polaritons in Semiconductor Microcavities
Journal of the Physical Society of Japan **82**, 084709 (2013) [10pages], 査読有. DOI: 10.7566/jpsj.82.084709

[学会発表](計16件)

鹿野 豊

“ダイヤモンド窒素格子欠陥中の電子スピンを用いた計測手法”
第70回日本物理学会年次大会「スピン分光法の最近の現状と展望」(領域3, 領域7, 領域5)
早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都, 新宿区 (2015.3.22)

鹿野 豊

“実験家の協働で見えてきた統計的考え方の重要性と期待”
第9回日本統計学会春季集会
明治大学中野キャンパス, 東京都, 中野区 (2015.3.8)

鹿野 豊

量子測定を用いたコヒーレンス形成・デコヒーレンスダイナミクスの解明”
Workshop on Exploration into quantum nature in the light of quantum measurement
東北大学東京分室, 東京都, 中央区 (2015.2.11)

鹿野 豊

“イオントラップを用いたフォノン干渉と量子基礎実験-量子基礎論から見たマイクロイオントラップへの期待-”
マイクロイオントラップ講演会
大阪大学基礎工学部国際棟, 大阪府, 豊中市 (2014.12.25)

鹿野 豊

“情報理論的アプローチの理論再構築の限界”
Nagahama Workshop “From Quantum to Life”
長浜バイオ大学, 滋賀県, 長浜市 (2014.11.15)

Yutaka Shikano

“Optomechanics of Quantum Rotor”
Quantum Technologies Based On Hybrid Emitter - Solid State Systems
University of Strasbourg, Strasbourg, France (2014.9.24)

Yutaka Shikano

“Aharonov-Bohm Effect with Quantum Tunneling”
Quantum Theory: from Problems to

Advances
Linnaeus University, Vaxjo, Sweden
(2014.6.9)

Yutaka Shikano
“ Toward the Polariton Lasing ”
BIT 's 3rd Annual World Congress and
EXPO of Advanced Materials-2014
Chongqing Yuelai International
Conference and EXPO Center, Chongqing,
China (2014.6.7)

野口 篤志, 鹿野 豊, 豊田 健二, 占部
伸二
“ トンネル効果中のアハロノフ・ボーム
効果 ”
QIT30,
名古屋大学, 愛知県, 名古屋市
(2014.5.13)

Yutaka Shikano
“ Observation of Aharonov-Bohm effect
with quantum tunneling ”
Fifth Nagoya Winter Workshop on
Quantum Information, Measurement, and
Foundations
Nagoya University, Nagoya, Aichi,
Japan (2014.3.3)

Yutaka Shikano
“ On Fluctuation-Dissipation Theorem
in Non-equilibrium Steady State ”
ELITES thermal noise workshop 2
Jena University, Jena, Germany
(2013.8.30)

鹿野 豊
“ 反転分布のないレーザー発振に向け
て ”
第3回光科学異分野横断萌芽研究会
強羅静雲荘, 神奈川県, 箱根町
(2013.8.10)

鹿野 豊
“ 反転分布のないレーザー発振に向け
て ”
NAIST グリーンフォトンクス研究会「有
機レーザーを目指して」
奈良先端科学技術大学院大学, 奈良県,
生駒市 (2013.8.2)

Yutaka Shikano
“ How to implement the discrete time
quantum walk in the hybrid quantum
system? ”
九州大学 Math-for-Industry 研究所共同
利用研究会「量子ウォーク数理の新展
開: 物質制御への応用」
九州大学, 福岡県, 福岡市 (2013.6.21)

Yutaka Shikano
“ Quasi-Magnon Dynamics on Hybrid
Superconducting Qubit and Nitrogen
Vacancy Centers in Diamond ”
1st Awaji International Workshop on
“ Electron Spin Science and
Technology: Biological and Materials
Science Oriented Applications ”
Awaji Yumebutai International
Conference Center, Awaji, Hyogo, Japan
(2013.6.17)

Ali Ü. C. Hardal, Peng Xue, Yutaka
Shikano, Özgür E. Müstecaplioglu, and
Barry C. Sanders
“ Quasi-Magnon Dynamics on Hybrid
Superconducting Qubit and Nitrogen
Vacancy Centers in Diamond ”
QIT28,
北海道大学, 北海道, 札幌市
(2013.5.28)

[図書] (計 0 件)
[産業財産権] (計 0 件)

[その他]
ホームページ等
<http://qm.ims.ac.jp/>
報道関係等

AERA 2014 年 12 月 29 日 1 月 5 日 合併号
「日本を突破する 100 人」.

6. 研究組織

(1) 研究代表者
鹿野 豊 (Shikano, Yutaka)
分子科学研究所・協奏分子システム研究セ
ンター・特任准教授
研究者番号: 80634691

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: