

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14619

研究課題名(和文) ゼロモード量子揺らぎを考慮した非一様Bose-Einstein凝縮系の解析

研究課題名(英文) Analysis for inhomogeneous Bose-Einstein condensate system including quantum fluctuation of zero-mode

研究代表者

高橋 淳一 (Takahashi, Junichi)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・特任助教

研究者番号：60732211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はゼロモードの量子揺らぎが重要となる物理現象を解明することを目標としたものである。研究期間内では、2成分Bose-Einstein凝縮系、冷却原子系で実現されたポーロン系、原子核のアルファ凝縮系、粒子の流入流出が伴う非平衡凝縮系を対象にゼロモード量子揺らぎに関する研究を行った。特に、本研究期間内ではゼロモード量子揺らぎが顕著に表れる系として、2成分凝縮体とアルファ凝縮系が有力であることを示すことができた。また、冷却原子系のポーロン系や非平衡凝縮系についてはゼロモード量子揺らぎを解析する土台となる基礎方程式を導くことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1成分凝縮体を用いたこれまでの解析では、ゼロモード量子揺らぎは粒子数を極端に小さくすることでしか観測はできないと結論付けられていた。一方、2成分系では現実的な状況でゼロモード量子揺らぎが観測できる可能性がある。今後、ゼロモード量子揺らぎが物理量に効く領域があることが実験的に確認されれば、今まで正当な理由なく無視されてきたゼロモードを理論に組み込む必要が出てくるだろう。また、アルファ凝縮系の研究では、160のHoyle様状態においてアルファ凝縮が実現している可能性を示唆する結果を導いた。Hoyle状態でアルファ凝縮が実現されているか否かは未解決であり、本研究はアルファ凝縮側の一つの論拠となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to elucidate the physical phenomenon in which the quantum fluctuation of zero mode is important. During the research period, we have conducted research on zero-mode quantum fluctuations for the two-component Bose-Einstein condensation, the polaron realized by the cold atomic systems, the alpha condensation state of the nucleus, and the driven-dissipative excitonic condensation. We have shown that the two-component condensed system and the alpha condensed system are promising systems in which zero-mode quantum fluctuations appear prominently during this study period. We also succeeded in deriving the basic equations that form the basis for analyzing zero-mode quantum fluctuations for polaron and driven-dissipative condensates.

研究分野：数理物理、物性基礎

キーワード：ゼロモード Bose-Einstein凝縮 アルファ凝縮 ポーロン 2成分系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自発的対称性の破れ (Spontaneous symmetry breakdown ; SSB) は、高い対称性を持つ系が、自身より低い対称性を持つ系へと変化する機構であり、凝縮系・素粒子・宇宙物理など幅広い分野に現れる。SSB が起こる際、南部-Goldstone の定理により、ゼロモード (南部-Goldstone モード) が現れることが知られている。ゼロモードは運動量  $p=0$  でエネルギー 0 となる長波長の振動モードであり、破れた対称性の名残として現れる。しかし、ゼロモード由来の量子揺らぎを考慮している研究はほとんどない。この理由は、ゼロモードが物理量の計算において赤外発散を引き起こすためである。この困難を回避するため、「ゼロモードの量子揺らぎを単純に落としてしまう」という Bogoliubov 近似が用いられる。この近似は確かに一様系においては有効である。なぜなら、「平面波展開が有効である一様系においてゼロモードは運動量  $p=0$  の一点に過ぎず、物理量の計算に出てくる運動量積分においては連続変数の積分の一点であるため効いてこない」と考えられるためである。しかし、平面波展開が有効でない非一様系の場合はこの論理は成り立たないため、Bogoliubov 近似を非一様系に使用してよいという明確な根拠はない。それにも関わらずゼロモード量子揺らぎの影響は小さいとされ、無視されてきた。一方で我々は近年、ゼロモード量子揺らぎを定量的に評価するための手法を開発した[引用]。この手法により様々な物理系に対するゼロモード量子揺らぎを評価する土壌が整った。

### 2. 研究の目的

前述のように、我々はゼロモードの量子揺らぎを定量的に評価する手法を開発した。そこで本研究では、この揺らぎを取り入れた計算を行うことにより、ゼロモード量子揺らぎが起源となる新たな物理現象を探ることを目的とした。特に、論文[引用]にて明らかにした非一様系は一様系に比べゼロモードの量子揺らぎが重要になるという性質を鑑み、トラップされた Bose-Einstein (BE) 凝縮系や原子核のアルファ凝縮系を研究対象とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 2成分 BE 凝縮系におけるゼロモード量子揺らぎの解析

異種ボソン粒子を混合した 2成分 BE 凝縮系を想定する。この系はそれぞれの BE 凝縮体に関する大域的位相対称性の破れに伴い 2つのゼロモードが現れる。このゼロモード同士は一般に相互作用するため、うまく制御することにより 1成分系よりも量子揺らぎをエンハンスすることができる可能性がある。ここでは、外部パラメータ (凝縮粒子数・粒子間相互作用の強さ) を変えることにより、量子揺らぎを制御可能か調査する。

#### (2) ポーラロン系に関する研究

冷却原子系では原子ガス中に少数原子を埋め込んだ系が実現した。このとき少数原子は媒介となる原子ガスの存在により元の原子とは異なった性質を持つこととなる。これは結晶中の電子ポーラロンと似ているため、そのアナロジーからこの系もポーラロンと呼ばれる。ポーラロン系における少数粒子は媒質揺らぎの影響を受けるため、この少数原子のダイナミクスは媒質揺らぎを反映するはずである。そのため、適切に情報を取り出すことができれば媒質 BE 凝縮体の量子揺らぎに対する良いプローブとなる可能性がある。本研究では、トラップされたポーラロンの記述を実空間で行うところから始め、その後はダイナミクスなど不純物の情報を取り出しプローブとしての可能性について調査する。

#### (3) アルファ凝縮系における励起スペクトルの計算

$^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  原子核に現れる Hoyle 状態 (Hoyle 様状態) はアルファ粒子の凝縮状態である可能性が指摘されている。アルファ粒子の凝縮状態が実現されているならば、この系ではゼロモード量子揺らぎが何らかの物理量に無視できない影響として現れるはずである。本研究では、ゼロモードを考慮したうえでエネルギースペクトルを求め、実験で得られた励起スペクトルとの比較を行う。

#### (4) 粒子の流入流出が伴う非平衡凝縮体に関する研究

ゼロモード揺らぎが大きく寄与する可能性のある系として非平衡凝縮体に着目し、その定式化を行う。ここでは、流入散逸を考慮したエキシトン凝縮体を想定し、Keldysh Green 関数法を用いて運動方程式を導出する。ここで得られた運動方程式をもとに、まずは定常状態について外部パラメータ依存性などを調査する。

### 4. 研究成果

### (1) 2成分BE凝縮系におけるゼロモード量子揺らぎの解析

我々の手法を2成分系に適用することで2つのゼロモード量子揺らぎを記述する正準演算子の様々な積が現れることを明らかにした。その係数の外部パラメータ依存性を計算することにより、外部パラメータとゼロモード量子揺らぎの関係性を明確にした。さらに、粒子数インバランスかつ引力領域で、ゼロモード揺らぎを増大させることができることを見出した。

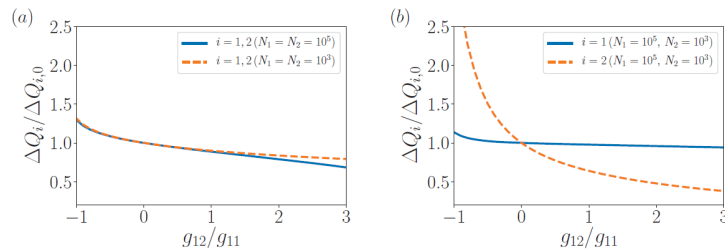


図 2 成分のゼロモード量子揺らぎ

### (2) ポーラロン系に関する研究

本研究では、第一段階としてポーラロンの実空間定式化を行った。ここでは、場のハミルトニアンから始め、凝縮体を記述する Gross-Pitaevskii 方程式と不純物のダイナミクスを記述するシュレディンガー方程式を求めた。これらは互いの解である凝縮体の秩序変数と不純物波動関数を含む自己無撞着方程式となることを示した。論文では、凝縮体側が不純物から受ける影響に焦点を当て、不純物による凝縮体の変形や量子揺らぎの一種である量子デブリーションの変化について解析した。この計算により凝縮体と不純物間に働く相互作用の符号により、量子デブリーション変化の符号が変わることを見出した。

つづいて、複数のポーラロン間に働く媒介相互作用に関する研究を行った。ボーズ・ポーラロンの場合、媒介相互作用にはゼロモードであるフォノンが重要な役割を果たす。そのため、この媒介相互作用に対しゼロモード揺らぎが質的な変化を与える可能性がある。本研究では、トラップの端にポーラロンをセットし、 $t=0$  で時間発展させトラップ中心で衝突する状況を想定した。粒子間相互作用の強結合領域と弱結合領域に対し、ダイナミクスを計算することで媒介相互作用が系の密度分布にどのように反映されるか調べた。特に、弱結合領域において衝突時の密度分布関数を得ることができれば媒介相互作用の空間分布を求めることができることを見出した。

さらに、媒質粒子と不純物が Rashba 型スピン軌道相互作用する系を想定し、その時間発展を調べた。ここでは、Caldeira-Leggett 型のモデルハミルトニアンを採用し、経路積分形式を通じて、不純物が従う半古典的 Langevin 方程式を導出した。この方程式を様々な初期条件に付いて解析することにより、このような条件下での不純物ダイナミクスの詳細を明らかにした。本研究は第一ステップとして半古典近似で行ったが、半古典近似せずに解析を行えば量子揺らぎに対するプローブとしての性能を評価することが可能となる。これは今後の課題である。

### (3) アルファ凝縮系における励起スペクトルの計算

160 原子核は  $0_6^+$  (15.1 MeV) が Hoyle 様状態となる。我々はこの状態にある 4 つのアルファ粒子が BE 凝縮していると仮定し、その励起スペクトルを計算した。このとき、従来の Bogoliubov 励起に加えゼロモード励起が存在するとすれば、 $0_6^+$  直上のエネルギースペクトルをよく再現することを明らかにした。

12C については先行研究で Hoyle 状態直上のエネルギースペクトルをよく再現することを報告していたが、さらにこの理論を拡張し、基底状態についても同様の議論ができるか調査した。仮に、基底状態でアルファ凝縮状態が実現しているとする、その BE 凝縮率は非常に小さくなるはずである。そこで、本研究では凝縮率が極端に小さい状況 (5%~10%) を想定した計算を行った。その結果、この領域でもスペクトルが実験と一致することを示し、これを理由に 12C 原子核が "超固体" 性を有する可能性について言及した。

### (4) 粒子の流入流出が伴う非平衡凝縮体に関する研究

レーザーにより励起が誘起される電子-正孔系を考えた。この系に対する Gorini-Kossakowski-Lindblad-Sudarshan 方程式を導き、これをもとに Keldysh 作用を作製した。この作用から電子-正孔対の相関に対する運動方程式を求め、その定常解を求めることに成功した。これにより、このような系における定常状態の解析やダイナミクスを求める土壌が整った。ただし、本研究は現状一様系に対する定式化のみ成功しており、今後はトラップ系に対しても同様の定式化を検討する必要がある。また、半古典的な解析を超えて明示的に量子揺らぎを取り込む形式を求めなければならない。これらは今後の課題である。

#### < 引用文献 >

Y. Nakamura, J. Takahashi, and Y. Yamanaka, Physical Review A **89**, 013613 (2014)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hata Tomohiro, Nakano Eiji, Iida Kei, Tajima Hiroyuki, Takahashi Junichi	4. 巻 104
2. 論文標題 Dissipation-relaxation dynamics of a spin-1/2 particle with a Rashba-type spin-orbit coupling in an ohmic heat bath	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.144424	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 Takahashi Junichi, Tajima Hiroyuki, Nakano Eiji, Iida Kei	4. 巻 103
2. 論文標題 Extracting nonlocal interpolaron interactions from collisional dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.043334	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 Takahashi J, Yamanaka Y, Ohkubo S	4. 巻 2020
2. 論文標題 Bose-Einstein condensation of dilute alpha clusters above the four- threshold in 160 in the field theoretical superfluid cluster model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa117	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 Tajima Hiroyuki, Takahashi Junichi, Nakano Eiji, Iida Kei	4. 巻 102
2. 論文標題 Collisional dynamics of polaronic clouds immersed in a Fermi sea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.051302	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 Takahashi Junichi, Hayaki Yuto, Yamanaka Yoshiya	4. 巻 2319
2. 論文標題 Quantum fluctuations of zero-modes for trapped two-component Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037070	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 Imai R., Takahashi J., Oyama T., Yamanaka Y.	4. 巻 2319
2. 論文標題 Semiclassical analysis of driven-dissipative excitonic condensation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037248	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 Tajima Hiroyuki, Takahashi Junichi, Mistakidis Simeon, Nakano Eiji, Iida Kei	4. 巻 9
2. 論文標題 Polaron Problems in Ultracold Atoms: Role of a Fermi Sea across Different Spatial Dimensions and Quantum Fluctuations of a Bose Medium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9010018	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 Takahashi J., Imai R., Nakano E., Iida K.	4. 巻 100
2. 論文標題 Bose polaron in spherical trap potentials: Spatial structure and quantum depletion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 023624-1, 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.023624	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 Ohkubo S, Takahashi J, Yamanaka Y	4. 巻 2020
2. 論文標題 Supersolidity of the $\alpha$ cluster structure in the nucleus $^{12}\text{C}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa043	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 -

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 高橋淳一, 田島裕之, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 ブラックホール衝突におけるHawking輻射と重力波発生過程の量子シミュレーションに向けた理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋淳一, 田島裕之, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 Extracting profiles of non-local inter-polaron interactions from collisional dynamics
3. 学会等名 第7回クラスター階層領域研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋淳一, 田島裕之, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 粒子密度分布のみを用いた2ポーラロン間非局所相互作用の推定法
3. 学会等名 KEK理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hata, E. Nakano, K. Iida, H. Tajima, and J. Takahashi
2. 発表標題 Dissipation and relaxation dynamics of mobile magnetic impurity with Rashba type spin-orbit coupling in an ohmic heat bath
3. 学会等名 SuperFluctuations (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋淳一, 山中由也
2. 発表標題 2 成分Bose-Einstein 凝縮体における ゼロモード量子揺らぎの空間依存性
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 田島裕之, 高橋淳一, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 ポーラロンクラウドの衝突ダイナミクス
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 高橋淳一, 田島裕之, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 量子ダイナミクスからポーロン間非局所相互作用を抽出する方法の提案
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋淳一, 早木悠斗, 山中由也
2. 発表標題 2成分Bose-Einstein凝縮系におけるゼロモード量子揺らぎの解析
3. 学会等名 日本物理学会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋淳一, 今井良輔, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 調和トラップに捕捉されたボーズ・ポーラロンの空間分布と量子デブリーション
3. 学会等名 2018年度四国理論物理学セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Takahashi, Y. Hayaki, Y. Yamanaka
2. 発表標題 Quantum fluctuations of zero modes for trapped two-component Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Imai, J. Takahashi, T. Oyama, Y. Yamanaka
2. 発表標題 Semiclassical Analysis of Driven-Dissipative Excitonic Condensate
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 高橋淳一, 今井良輔, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 トラップ中のボーズ・ポーラロンにおける空間構造と量子デプリーション
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井良輔, 高橋淳一, 大山京尋, 山中由也
2. 発表標題 駆動散逸のある電子正孔系におけるBCS型状態
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井良輔, 高橋淳一, 大山京尋, 山中由也
2. 発表標題 非平衡場の量子論による駆動散逸励起子BCSの解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
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
---------	---------