

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03499

研究課題名(和文)多自由度Bose-Einstein凝縮体の一般的理論の構築とその実装

研究課題名(英文)Development of framework for multi-component Bose-Einstein condensates and its application

研究代表者

渡部 昌平(WATABE, Shohei)

東京理科大学・理学部第一部物理学科・講師

研究者番号：90726895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多自由度・多体系の観点からBECの理論構造の理解を深めることを目的の縦糸に、またBECをはじめ冷却原子気体の新たな性質を引き出すことを横糸に研究を行った。結果として、多自由度BECの一般的な関係式を導出し、それをspin-1, spin-2 BECに演繹して、これらの系の厳密な関係式を与えた。また、一成分BECの多体行列理論を構築し、多体近似理論に適用した。さらに一粒子励起と集団励起が共通の音波モードを持つというBECの従来知見に対して近年投げられた疑義の矛盾点を指摘した。この他に、BECのソリトンの位相差を観測する手法、量子空間探索のスケーリング仮説などの提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で内部自由度を持つBECの厳密な関係式の一つを導出できた。これに加え、演繹的に具体的な系の厳密な関係式を導出可能になった点に学術的意義がある。また、一成分BECで多体行列理論を整備したことで、煩雑なBECの関係式を見通し良くすることに成功した。BECの従来知見に向けられた近年の疑義に対して矛盾点を指摘し正しい理解を得られた点にも学術的意義がある。また、BEC中のソリトンには位相差という特徴があるものの、これまで実験の観測手法がなかった。今回、その観測手法を提案することに成功した。その他にも冷却原子気体や量子探索のダイナミクスにおける新しい非自明な知見を得られた点にも学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We have studied the structure of the theory of BEC from the aspect of the multi-degrees of freedom and many-body systems. We also studied interesting properties of ultracold atomic gases. As a result, we have derived one of general exact relations for multi-component BECs, and applied it to the spin-1 and spin-2 systems. We also developed the many-body matrix theory for scalar BECs, and applied it to the many-body approximation theory. We pointed out the inconsistency of the recent doubts raised against the conventional knowledge of BECs that both single-particle and collective excitations have a common sound mode. We also proposed an experimental method for observing the phase jump of solitons in BECs, and a scaling hypothesis for the quantum spatial search.

研究分野：凝縮系物理理論

キーワード：BEC 多自由度 多体理論 恒等式 一粒子励起 集団励起 量子ダイナミクス ソリトン

1. 研究開始当初の背景

Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) の研究は、1995 年の冷却原子気体における Bose-Einstein 凝縮の実現 [Anderson, et al. 1995; Davis, et al. 1995, (ノーベル賞受賞対象)] を機に、急速に研究が進んできた分野である。もともと BEC の研究は、1938 年に発見された超流動液体ヘリウム(ノーベル賞受賞対象)から進展が始まり、巨視的量子現象の一つとして現在でも凝縮系物理学における基礎的かつ重要な研究対象となっている。また、超流動液体ヘリウムだけでなく磁性絶縁体 [Nikuni, et al. 2000] やエキシトン-ポラリトン系 [Kasprzak, et al. 2006, Amo, et al. 2009; Yoshioka, et al. 2011] で BEC が実現したことで、物性物理学内でも分野横断的に研究が進展している。さらに 1998 年の spin 自由度を持った spin-1 BEC の実現を経て、 ^{52}Cr の spin-3 の BEC も実現されている。この多自由度 BEC は秩序変数に多様性があり、凝縮系物理だけでなく高エネルギー物理など他分野の視点も巻き込んで学際的に研究が進展している。

2. 研究の目的

上記の BEC の理論研究については、平均場理論に基づく Gross-Pitaevskii 方程式や、平均場から二次までの揺らぎをとり入れた Bogoliubov 理論による解析が主である。しかし、単一成分 BEC で発展してきた BEC の厳密な理論や多体理論は、近年学際的研究が進展している内部自由度を持つ BEC に対してはほとんど理解されていない。そのため、多自由度 BEC の背後にある統一的な多体理論の理論的構造を明らかにすることは興味深い重要な研究課題である。本研究の目的は、このような BEC の多自由度性・多体理論・厳密な関係式を縦系として BEC の多体理論の構造について理解を深めることにある。また、横系として冷却原子気体の多様な物性を引き出すことも研究の目的である。縦系に関連して、単一成分 BEC で知られていた“一粒子励起と集団励起の一致性”という従来の知見に近年疑義が投げかけられている。多自由度 BEC の多体理論に関する本研究を通じて、その疑義を検証することも目的となる。

3. 研究の方法

縦系の目標に関しては、Green 関数を用いた多体理論の構造に興味があり、Green 関数・Feynmann diagram を用いて解析を行う。また、多体理論の構築を通して厳密な関係式を議論する。横系の目的に関しては、対象とする物理現象に応じて最適な方法を採用する。

4. 研究成果

一成分 BEC については、Hugenholtz-Pines の関係式が知られている。これは BEC の gapless 励起を保証する Ward-高橋恒等式の一つである。本研究では、外部磁場中での多成分 BEC における Hugenholtz-Pines 関係式について一般形を導出し、それらを spin-1 BEC や spin-2 BEC の強磁性相・ポラー相・ネマティック相などに演繹的に適用することで、各相の厳密な関係式を導出した。また、それらの恒等式を実験的に示す方法を提案した。

また、BEC 相の Feynmann diagram を効率的に計算する手法として、一成分 BEC の多体行列理論を構築した。多体行列理論を用いて、Gavoret-Nozieres の理論の再定式化と、乱雑位相近似への実装を示し、数値計算による密度応答関数と一粒子励起スペクトルの性質を議論した。また、“BEC の一粒子励起は集団励起の音波モードと異なる”という近年の主張に対して、これらの結果が Bogoliubov 不等式・Josephson 総和則という厳密な関係式を破る矛盾点も指摘した。

多成分の冷却原子気体として Bose-Fermi 混合系の流体力学領域と collisionless 領域の dipole モードの変化を議論した。この研究で、一つの collisionless モードは流体力学領域の in-phase モードに、もう一つの collisionless モードが流体力学領域で純粋な減衰モードに変化するすことを見出した。この純粋な減衰モードは量子統計性に関係ないもので、Fermi-Fermi 混合系の実験で phase locking と呼ばれた減衰モードとの関係を指摘した。

また、BEC 系のソリトンの実験ではこれまで密度の凹みを観測することで、そのダイ

ナミクスが研究されてきた。一方で、BEC のソリトンには巨視的波動関数における位相のとびという特徴がある。この位相のとびのダイナミクスがどのようになるかを観測する実験についてはその手法が議論されてこなかった。本研究では、Raman pulse・rf pulse・干渉を組み合わせ、ソリトンの位相差を観測する手法を提案した。

BEC 系のソリトンの別の観点として、光学格子中の原子気体における超流動相の soliton がある。この soliton には、系のパラメータに応じてこれまで3つのタイプのソリトン(in-phase soliton, out-of-phase soliton, wavelet)の存在が知られてきた。今回の研究では相図上を系統的にパラメータ探索し、新たに hybrid soliton と命名した4つ目のソリトンを発見した。また、Mott ローブを挟んだ超流動相間で励起がどのように伝搬するかを明らかにし、インピーダンス整合との関係を指摘した。

最後に、量子系のダイナミクスとして、フラクタル格子上の量子空間探索の研究を行った。この研究で、フラクタル格子の格子点数に対して、有効的な計算時間がべき的になり、そのべき指数がフラクタル図形を特徴付けるユークリッド次元・フラクタル次元・スペクトル次元・スケーリング係数の組み合わせで与えられるという、スケーリング仮説を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shohei Watabe	4. 巻 22
2. 論文標題 Strong connection between single-particle and density excitations in Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 103010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/abb2b6	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 Shohei Watabe	4. 巻 103
2. 論文標題 Hugenholtz-Pines theorem for multicomponent Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.053307	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 Yuma Watanabe, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni	4. 巻 104
2. 論文標題 Propagation of phase-imprinted solitons from superfluid core to Mott-insulator shell and superfluid shell	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW A	6. 最初と最後の頁 43314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.104.043314	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 S. Watabe	4. 巻 135
2. 論文標題 Identities and Many-Body Approaches in Bose-Einstein Condensates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACTA PHYSICA POLONICA A	6. 最初と最後の頁 1222
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12693/APhysPoIA.135.1222	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 Yoji Asano, Shohei Watabe, Tetsuro Nikun	4. 巻 201
2. 論文標題 Dipole Mode of Trapped Bose-Fermi Mixture Gas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 58-64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02334-z	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 Yoji Asano, Shohei Watabe, Tetsuro Nikun	4. 巻 101
2. 論文標題 Dipole oscillation of a trapped Bose-Fermi-mixture gas in collisionless and hydrodynamic regimes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW A	6. 最初と最後の頁 13611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.013611	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 Rei Sato, Tetsuro Nikuni, Shohei Watabe	4. 巻 101
2. 論文標題 Scaling hypothesis of a spatial search on fractal lattices using a quantum walk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW A	6. 最初と最後の頁 22312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.022312	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 Yoji Asano, Masato Narushima, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni	4. 巻 196
2. 論文標題 Collective Excitations in Bose-Fermi Mixtures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-2105-y	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 Kazuhiro Tamura, Shohei Watabe and Tetsuro Nikuni	4. 巻 2110.01265
2. 論文標題 Analysis of shape change of droplet in dipolar Bose-Hubbard model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	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) なし	査読の有無 無
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 Kazuma Ohi, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni	4. 巻 2205.05956
2. 論文標題 Observing phase jumps of solitons in Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	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) なし	査読の有無 無
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28件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 田村和太, 渡部昌平, 二国 徹郎
2. 発表標題 ボースハバードモデルの双極子相互作用による droplet の形状変化
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺優雅, 渡部昌平, 二国 徹郎
2. 発表標題 調和トラップ中の Bose-Hubbard model におけるダークソリトンのダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比屋根芳周, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 モーメント法を用いた有限温度 BEC 気体における集団励起
3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大井一真, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 有限温度の BEC におけるダークソリトンの解析
3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Tamura, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Analysis of shape change of droplet in dipolar Bose-Hubbard model
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Watanabe, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Propagation of dark soliton from superfluid core to Mott-insulator shell and superfluid shell
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村和大, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 双極子ボースハバードモデルの秩序構
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 稲吉健, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 Bose-Hubbard モデルにおける二粒子状態のRenyi エンタングルメントエントロピー
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 大井一真, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 有限温度のBEC におけるダークソリトンの減衰過程
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 麻野曜司, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 調和トラップ中のBose-Fermi 混合気体における集団振動の衝突領域から無衝突領域までの解析
3. 学会等名 日本物理学会2019 年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺優雅, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 調和トラップ中のBose-Hubbard 模型におけるダークソリトン
3. 学会等名 日本物理学会2020 年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村和大, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 双極子ボースハバードモデルの相境界近傍における準安定構造
3. 学会等名 日本物理学会2020 年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoji Asano, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Dipole mode of trapped Bose-Fermi mixture gas
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoji Asano, Masato Narushima, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Collective excitations in Bose-Fermi mixtures
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Ohya, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikun
2. 発表標題 Decay of phase-imprinted dark soliton in Bose-Einstein condensate at non-zero temperature
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shohei Watabe
2. 発表標題 Many-Body Effect in Bose-Einstein Condensate and Application of Ultracold Quantum Gases
3. 学会等名 13th International School on Theoretical Physics : Symmetry and Structural Properties of Condensed Matter (SSPCM2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shohei Watabe, Shu Tamagai, Rei Sato, Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Scaling Hypothesis of Spatial Search on Fractal Lattice Using Quantum Walk
3. 学会等名 APS March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shohei Watabe, Yuya Seki, and Shiro Kawabata
2. 発表標題 Energy gap scaling of quantum annealing based on Wajnflasz-Pick model
3. 学会等名 APS March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻野曜司, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 調和トラップ中の Bose-Fermi 混合気体における集団振動の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤嶺, 為我井脩, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 量子ウォークを用いたフラクタル格子上の空間探索
3. 学会等名 日本物理学会 第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村和大, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 双極子ボースハバードモデルの有限温度効果と相図
3. 学会等名 日本物理学会 第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuma Watanabe, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Dynamics of Phase-Imprinted Solitons of Ultracold Bosons in an Optical Lattice
3. 学会等名 29th ANNUAL INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Watabe
2. 発表標題 Hugenholtz-Pines Theorem for Multicomponent Bose-Einstein Condensates
3. 学会等名 29th ANNUAL INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Tamura, Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Analysis of shape change of droplet in dipolar Bose-Hubbard model
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids - QFS2021 International Online Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Watanabe, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Dark solitons of ultracold bosons in optical lattices
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids - QFS2021 International Online Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Watabe
2. 発表標題 Scaling Hypothesis of Spatial Search on Fractal Lattice Using Quantum Walk
3. 学会等名 Virtual QBIC Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Watanabe, Shohei Watabe, and Tetsuro Nikuni
2. 発表標題 Effect of spin fluctuations in ultracold bosons coupled to dynamical Z2 gauge fields
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李志揚, 渡部昌平, 二国徹郎
2. 発表標題 球対称スピン軌道相互作用によって誘起される Fulde-Ferrell 相におけるクエンチダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 第 77 回年次大会 (国際学会)
4. 発表年 2022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