

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05838・19K21028

研究課題名（和文）量子少数クラスターにより発現する普遍的な量子多体物性

研究課題名（英文）Universal quantum many-body phenomena induced by quantum few-body clusters

研究代表者

遠藤 晋平（Endo, Shimpei）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：30824453

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：強く相関する量子少数系および多体系の示す普遍的な挙動の研究を行った。まず、角運動量が大きな量子3体問題について、相互作用形状の詳細を取り込む新たな手法の開発を行った。その結果原子間相互作用の長距離部分に由来する特有の効果が現れることを発見した。また量子3体相関がどのように量子多体現象に強い3体相関を示しうるかを調べた。その結果、強い3体相関に由来する量子相が発現するような系が冷却原子で観測可能なパラメータ領域に存在することがわかった。また普遍的な少数多体現象を詳細に解説する記事・講義ノートを日本語で初めて出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却原子気体の実験で近年3原子が集まったクラスター状態が観測された。この発見以後、量子少数系を探る研究が急速に進展した。驚くことに、量子少数クラスターは、冷却原子、原子核、物質中の電子など全く異なる系が同じ挙動を示しうるようになってきた。本研究ではそのような性質が従来研究されてこなかった、より複雑な場合において、同様に成立するかを探る研究であり、原子・原子核・電子など幅広い系について量子力学の示す本質をとらえようとするものである。また、本研究において出版した講義ノートは普遍的な少数多体現象を日本語で解説した初めての文献であり、次世代が量子の世界の本質を理解する一助になるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：We have studied universal behaviour of few- and many-body quantum systems with resonant interactions. Firstly, we study 3-body systems with large angular momentum. We have found that the long-range part of inter-atomic interactions can induce specific behaviour for the 3-body systems with large angular momenta. We have also studied how such 3-body phenomena can induce strong 3-body correlations in a many-body quantum system. In particular, we have found that there appears a new quantum phase induced by a strong 3-body correlations induced by the presence of 3-body states. We have also published a japanese article which describes in details the universality of few- and many-body quantum systems.

研究分野：冷却原子気体

キーワード：冷却原子気体 量子少数多体問題

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冷却原子気体実験により、2006年にEfimov状態と呼ばれる3粒子束縛状態が史上初めて観測された[1]。この3粒子束縛状態は、興味深いことにあらゆる相互作用が発散的に強い量子系において普遍的に現れる。そのため、冷却原子においてこの3粒子束縛状態の性質を探ることで、類似の強相関量子系である原子核・固体中の電子の挙動、超新星爆発において現れる中性子星の挙動を知ることにつながることを期待されている[2]。とくに定量的にどの程度普遍性が厳密に成立するかを探ることは、冷却原子をこれらの系の量子シミュレータとしてどの程度有用かを図る指針となる。

また、3粒子束縛状態と類似の普遍性が4粒子以上の系でも成立するかが重要な未解決の問題としてある。特に近年、4粒子、5粒子束縛状態も冷却原子において観測された[3]。また、強く相互作用するボース原子気体において3体相関の兆候が観測される[4]など、少数系と多体系をつなぐ方向性の実験観測が進展している。

2. 研究の目的

本研究では以下の2つのテーマに着目し、取り組んだ：

(1) 3粒子束縛状態の普遍的な挙動：角運動量が大きな3粒子系も普遍的挙動を示すか？

従来の量子少数系研究では、角運動量の小さな系を探る研究が主流であった。これは冷却原子のような極低温の系においては、角運動量の小さな成分が主要な寄与となるためである。しかし近年の実験技術の発展により、高次の角運動量チャンネルの効果が重要となる系が実現された[5]。そのため実験に先駆けて、高次の角運動量チャンネルの量子少数系に対する効果を理論的に探る研究が重要となっている。

(2) 普遍的な挙動を示す3粒子束縛状態により駆動される新しい量子多体现象

Efimov状態と呼ばれる3粒子束縛状態が普遍的な挙動を示し、原子・原子核などの幅広い系で同様に振る舞うことはわかっていた。それではEfimov状態によって駆動される普遍的な量子多体现象も存在するのだろうか？この問いの答えるためには、Efimov状態に起因する強い3体相関を正確に取り込み、量子多体問題を扱う必要がある。従来の量子多体理論においては2体相関までを正確に取り込む一方、3体以上の相関を無視することが多く、上記のような量子多体现象は見落とされてきた。本研究により、そのような新しい量子現象を発見することを目指した。

これらの研究を行うことで量子少数系および多体系の示す普遍的な挙動を理解することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 3粒子束縛状態の普遍的な挙動の研究

従来の量子少数系研究では、角運動量の小さな系を探る研究が主流であった。本研究では、従来用いられてきた手法[6]を、より角運動量の大きな量子系に拡張した。角運動量がS波のみが寄与する量子系においては、3粒子シュレディンガー方程式はチャンネル結合のない1チャンネルの積分方程式に帰着した。これを数値的に解くことで量子3体問題を厳密に解けた。一方、本研究で探った角運動量の大きな量子系においては、複数の角運動量チャンネルが結合した連立積分方程式を導出し、それを数値的に解いた。

(2) 量子多体系の研究

Efimov状態由来の強い3体相関を正確に取り込むため、ビリアル展開という手法を用いた。この手法は高温領域では量子縮退度を特徴づけるフガシティーという物理量が小さいことを利用し、状態方程式を高温極限から摂動展開する手法である。興味深いことに、ビリアル展開のN次項は量子N体問題の解から厳密計算できる。そのため、少数系の知見から多体系の状態方程式を正確に決定できる。本研究では3体相関までを正確に取り込むため、3次ビリアル展開を用いた。

4. 研究成果

(1) 3粒子束縛状態の普遍的な挙動の研究

角運動量の大きな量子3体系を研究したところ、相互作用の形状により顕著な違いがあることがわかった。原子核の間に働く核力のような短距離型の相互作用の場合、角運動量チャンネルが結合した連立線型積分方程式はよく収束することがわかった。一方、原子の間に働くvan der Waals相互作用のような遠距離まで到達するような相互作用の場合、角運動量チャンネルが結合した連立線型積分方程式の収束性に相互作用の遠距離部分が影響することがわかった。

Efimov状態などの量子少数系が普遍的な挙動を示すことは、角運動量が0の系では確立しており、原子と原子核で類似の挙動を示すことがわかっていた。本研究により、角運動量が大きな系では、原子と原子核で違う性質を示しうることが示唆された。このことは量子少数系の普遍性という性質については、角運動量が重要な役割を果たしていることを示唆し

ている。高温・高密度な量子系においては、普遍性が成立せず、原子・原子核・固体電子などの物質の個性が出るのが従来知られていた。本研究は、普遍性を示す極低温・低エネルギー量子系と、普遍性を示さない高温・高密度な量子系の間をつなぐものである。

(2)量子多体系の研究

ビリアル展開を用いて Efimov 状態に駆動される量子多体现象を探った。その結果、ビリアル展開が適用可能な温度・密度領域で、Efimov 状態に駆動された相が存在することがわかった。この相は、原子たちがバラバラになった相と連続的につながる(クロスオーバーする)相であるため、厳密な相境界が存在しない。しかし状態方程式をはじめとする種々の物理量に対する 3 体相関の寄与が 1 体・2 体の寄与と比べて大きく、3 体相関が強く効く相だとみなせる。この相を特徴づける物理量を計算し、冷却原子実験においてこの相を観測・判別する方法を提案した。

これらの研究成果の一部を国内外の会議において発表を行った。またその成果をまとめた論文を執筆し、出版を予定している。

また、上記(1)(2)の研究と関連する成果として、以下の研究活動も行った

(3)量子少数系の示す普遍的挙動を解説した講義ノートの出版[7]

Efimov 状態などの量子少数系に関する研究は 2006 年に冷却原子気体実験で観測されて以降急速に進展した。特に 2009-2014 年での進展は顕著であり、それらの進展をまとめた英語のレビュー論文も 2016-2018 年ごろに複数出版された。一方、日本語による包括的な解説・レビューが少なく、学部・大学院生が量子少数系の普遍性を探る研究をはじめづる障害となっていた。

京都大学において行った集中講義をもとに、Efimov 状態などの量子少数系について日本語で詳細に解説した講義ノートを出版した。この文献による次世代の量子少数系の育成も期待され、大学院生の指導なども行っている。

(4)ビリアル展開を用いた量子多体系研究の解説の出版[8]

ビリアル展開を用いた量子多体系研究の解説(会議プロシーディング)の出版を行った。特に、ユニタリーフェルミ気体と呼ばれる強相関量子多体系に対してビリアル展開を適用した研究を解説した記事を執筆した。ユニタリーフェルミ気体に対してビリアル展開を用いて高温領域の状態方程式を調べた理論[9, 10, 11, 12, 13]や実験研究[14, 15]は複数あるが、それらの結果のいくつかは矛盾する値を与えるものだった。本解説ではそれらを比較・整理し、どの理論値・実験値が正確か、値が異なる理由の分析を行った。

- [1] T. Kraemer, et al., Nature 440, 315 (2006).
- [2] P. Naidon and S. Endo, Rep. Prog. Phys. 80, 056001 (2017).
- [3] F. Ferlaino et al, PRL 102 140401 (2009);
Zenesini, et al., New J. Phys. 15 043040 (2013).
- [4] R. J. Fletcher, et al., Science 355, 377 (2017)
- [5] X.C. Yao, et al., Nature Physics 15, 570 (2019)
- [6] P. Naidon, S. Endo, M. Ueda, Phys. Rev. A 90, 022106 (2014)
- [7] 遠藤晋平, 「量子少数系にけるユニバーサルティと Efimov 状態の物理」
原子核研究 第 64 巻 1 号 90 頁 (2019)
- [8] S. Endo "Virial expansion coefficients in the unitary Fermi gas"
SciPost Phys. Proc. 3, 049 (2020)
[Proceedings for the 24th European Few Body Conference]
- [9] Rakshit, Daily, Blume, Phys. Rev. A 85, 033634 (2012).
- [10] V. Ngampruetikorn, M. M. Parish and J. Levinsen, Phys. Rev. A 91, 013606 (2015)
- [11] Yan, Blume, Phys. Rev. Lett. 116, 230401 (2016),
- [12] S. Endo and Y. Castin, J. Phys. A 49, 265301 (2016),
- [13] R. Rossi, et al., Phys. Rev. Lett. 121, 130406 (2018)
- [14] M. J. H. Ku, et al. Science 335, 347 563 (2012),
- [15] S. Nascimbene, et al., Nature 463, 1057 (2010).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|------------------|
| 1. 著者名 Endo Shimpei | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Virial expansion coefficients in the unitary Fermi gas | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 SciPost Physics Proceedings | 6. 最初と最後の頁 49 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21468/SciPostPhysProc.3.049 | 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 Endo Shimpei, Endo Takako, Komatsu Takashi, Konno Norio | 4. 巻 22 |
| 2. 論文標題 Eigenvalues of Two-State Quantum Walks Induced by the Hadamard Walk | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Entropy | 6. 最初と最後の頁 127 ~ 127 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/e22010127 | 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 遠藤晋平 | 4. 巻 64(1) |
| 2. 論文標題 量子少数系にけるユニバーサリティとEfimov状態の物理 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 原子核研究 | 6. 最初と最後の頁 90 ~ 105 |
| 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 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13件（うち招待講演 7件/うち国際学会 3件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 西浦 大樹、遠藤 晋平 |
| 2. 発表標題 二成分Bose系におけるEfimov状態の普遍的挙動 |
| 3. 学会等名 日本物理学会年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 遠藤 晋平、田島裕之 |
| 2. 発表標題 3成分Fermi気体の状態方程式におけるEfimov状態の効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 遠藤 晋平 |
| 2. 発表標題 ユニタリー原子気体における量子少数多体問題の研究 |
| 3. 学会等名 日本物理学会年次大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 遠藤 晋平 |
| 2. 発表標題 冷却原子におけるクラスターの普遍性：現状と展望 |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」スクール（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 遠藤 晋平 |
| 2. 発表標題 冷やすとは？ |
| 3. 学会等名 第3回若手放談会：エキゾチック核物理の将来（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Endo Shimpei |
| 2. 発表標題 Universality of few-body clusters and their applications to many-body systems |
| 3. 学会等名 2nd workshop ``Clusters in quantum systems: from atoms to nuclei and hadrons" (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 遠藤 晋平 |
| 2. 発表標題 Universal few-body clusters in cold atoms |
| 3. 学会等名 第1回 冷却原子研究会「アトムの会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Endo Shimpei |
| 2. 発表標題 Universal few-body clusters in cold atoms |
| 3. 学会等名 24th European conference on few-body problems in physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Endo Shimpei |
| 2. 発表標題 Few-body aspects of cold atoms |
| 3. 学会等名 New aspects of few-nucleon systems and related topics (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 遠藤晋平 |
| 2. 発表標題 Universal few-body physics and clusters with ultracold atoms |
| 3. 学会等名 第2回RIBF若手放談会（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 遠藤晋平 |
| 2. 発表標題 3体Bose系における有限角運動量チャンネルの効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shimpei Endo |
| 2. 発表標題 Universal few-body physics in cold atoms |
| 3. 学会等名 Reimei Workshop: Universal physics in Many-Body Quantum Systems -- From Atoms to Quarks -- (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shimpei Endo |
| 2. 発表標題 Universal few-body clusters in ultracold atoms |
| 3. 学会等名 Clusters in quantum systems: from atoms to nuclei and hadrons |
| 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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|