

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03422

研究課題名(和文) 双極子相互作用する極低温原子気体の超固体相

研究課題名(英文) Supersolid phases of ultracold atomic gas with dipole-dipole interactions

研究代表者

藪 博之 (Yabu, Hiroyuki)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：60202371

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、ボース粒子とフェルミ粒子の混合気体への適用に向け、双極子相互作用する極低温原子気体における新しい相である超固体状態に対して理論的な研究を行った。超固体状態は双極子相互作用により不安定化したボース原子が量子ゆらぎとつりあっている状態である。特に、ジョセフソン振動による超固体のコヒーレンス性、双極子原子気体の集団励起モード、双極子原子ポーラロンの性質をとりあげ、数値的理論的な研究を行うために理論の構築、数値計算プログラムの開発、結果の解析を行った。結果として双極子相互作用する原子気体のこれまで知られていない性質が明らかになり、今後の研究の発展の基礎を与えた。結果は論文等で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却ボース・フェルミ混合気体を含む冷却原子気体の理論的実験的研究においては、これまで弱関連の場合の現象の解明が中心であったが、本研究では、より強い相関が存在する場合に理論的研究を行ない、双極子相互作用する原子を含む原子気体の不安定化混合原子気体と新しい相である超固体相および原子気体ポーラロンの系に対して、そのコヒーレンス性などの新しい見地から、その性質を明らかにした。これにより量子多体系理論の新たな知見を示したことが本研究の学術的意義である。現在、これらの系の実験的研究が進みつつあり、冷却原子系の新たな研究の出発点となりうるという意義も存在する。

研究成果の概要(英文)：We make theoretical studies on the supersolid state, a new phase of ultracold atomic gas of dipolar atoms, for its realization in the bose-fermi mixture. The supersolid is the state that is realized where the instability of the dipole interaction is balance with the quantum fluctuations. Specially, in the present studies, we take a coherent properties of supersolids using Josephson oscillation, collective excitation modes of dipolar atomic gas, polaron properties of dipolar atomic gas, and made theory construction, computer programs for numerical calculations, and the analysis of the results. As the results of the research, we clarified some unknown properties of the dipolar atomic gas, and gave the fundamental steps for future. The major results of the present research has been published.

研究分野：理論物理学(多粒子系量子力学)

キーワード：原子気体 双極子相互作用 ボース・アインシュタイン凝縮 フェルミ縮退 超固体 ポーラロン

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザートラップ・冷却された極低温原子気体の研究は、BEC やフェルミ縮退の成功以来、量子エレクトロニクス・有限量子多体論の新しい発展をもたらした。原子は量子統計性によりボース粒子とフェルミ粒子に分類され、ボース粒子は同じ状態に入ろうとしフェルミ粒子は退け合う相関をもち、BEC やフェルミ縮退などの量子凝縮状態が発現する。近年では、強い異方性をもつ双極子相互作用をする双極子原子の研究が進展し、原子気体の様々な新しい現象の存在が示されている。本科研費に基づく研究内容と関係する範囲で極低温原子気体の研究の進展をまとめると次のようになる：

(1) 近年になって、Dy (Stanford の研究グループ)、Er (Innsbruck の実験グループ) 原子など双極子相互作用する原子(双極子原子)の原子気体が実験的理論的に研究されてきた。双極子原子は、通常の原子気体のような s 波相互作用と双極子相互作用の二種類の相互作用をもち、原子気体の様々な新しい現象の存在が示されている。双極子相互作用の異方性により、引力方向に双極子が配向することによる原子気体の崩壊や、双極子相互作用する Dy-Er 混合フェルミ気体における相分離状態の構造が代表者や分担者らによって研究されてきた。

(2) 最近では、超流動秩序と空間的秩序が共存する超固体相の存在が理論実験両面から明らかになってきており、双極子相互作用と平均場近似を超えた量子ゆらぎの効果という見地からも興味を持たれている。双極子ボース原子の BEC が双極子の配向による強い引力により崩壊する系において、崩壊により原子密度が大きくなると平均場近似をこえた量子ゆらぎにより支えられ、新しい高密度相が現れることが理論的・実験的研究により明らかになってきたのである。この高密度相は双極子相互作用による不安定化が有限波数のモードのソフト化によって起きるため、凝縮相が空間的に局所化し周期性を持って現れる超固体となる。

(3) 二種類の統計性をもつ原子を混合したボース・フェルミ(BF)混合系では、粒子間(BF)相互作用により、集団励起状態、相分離、系の引力崩壊などの豊富なダイナミクスを示すことが、筆者や分担者の研究により弱相関での平均場近似を用いて理論的に研究されてきた。近年では、原子気体中において不純物の周囲にボース粒子の励起をまとった準粒子状態であるポーラロンの研究が盛んに行われるようになり、代表者と分担者は Lee-Low-Pines (LLP) 理論を拡張して一様系および調和振動子トラップ中のポーラロンをあつかう理論を構築した。

以上の研究上の進展の上で、本研究においては次の論点が研究開始当初の背景としてあった：

(1) 代表者らは、これまで BF 混合気体の研究を先端的かつ総合的に行ってきており、相分離や不安定性など粒子間相互作用により生じる BF 混合気体の相構造の理論的解明を、平均場近似など弱相関の場合に明らかにしてきた。近年の冷却原子系の研究はより強い相関がある場合の研究が進みつつあり、特に双極子相互作用の効果と冷却原子ポーラロンの研究の進展から、これまでの研究の発展としてより強い相互作用がある場合に BF 混合気体の相構造がどうなるかを明らかにする必要性が生じていた。それでは、ボース・フェルミ混合系のような 2 種類の異なる統計性を持つ原子気体において、BEC 状態が超固体状態に変化していく場合に、それがどのような役割を持ち、そのダイナミクスはどのように変化していくかを、特にコヒーレンスとの関係において明らかにするということが本研究の主たる背景としてあった。

(2) 代表者らは一様系および調和振動子トラップ中のポーラロンを理論的に計算するために、弱相関における Lee-Low-Pines (LLP) の方法および強相関における Chevy の方法を拡張した理論を構築し、原子気体ポーラロンの基本的な構造を明らかにしてきた。研究の発展として、原子気体ポーロンにおける周囲のボース粒子が双極子相互作用する場合にどのような現象が生じるかということがあり、特に BEC から超固体に変化するときに原子気体ポーラロンの性質がどのように変化するかを明らかにするという研究上の背景が存在した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、双極子ボース原子を含む BF 混合気体が現れる場合に理論的研究を行ない、超固体のダイナミクスが現れるかを明らかにし、実験結果を解明するとともに実験に対して新たな提言を行うことである。そのために必要な研究を行う。具体的には次の通りである：

(1) 双極子ボース原子を含む BF 混合気体での超固体相のダイナミクス：

代表者らは、これまでの研究で通常 BF 混合気体や双極子原子気体が相分離構造や不安定性をもつことを明らかにした。超固体相を含む BF 混合気体は、さらに豊富な相構造や集団励起運動のダイナミクスを持つことが予想される。本研究はこれまでの我々の研究を応用し、BF 混合気体での超固体相の相構造とダイナミクスをコヒーレンスと合わせて明らかにすることである。

(2) 超固体ボース・フェルミ混合気体におけるポーラロンの性質：

代表者らは、中間結合理論（LLP 理論）を拡張し、一様系および調和振動子トラップ中でポーラロンを扱う理論を構築してきた。これを双極子ボース気体に拡張した双極子ポーラロンの理論を構築し、これを超固体である双極子ポーラロンに拡張し、通常の BEC 状態から超固体に変化する時に、ポーラロンのエネルギーや準粒子中の励起の様相といった、ポーラロンの性質の変化を定性的・定量的に明らかにすることである。

(3) 極低温原子気体はクリーンな系として量子多体系理論の発展に役立つと考えられる。本研究は、平均場近似を超えて量子ゆらぎを取り込んだ現象を扱うという意味で、これまでの我々の研究を進展させ、量子多体系に対して新たな知見を得るという創造性がある。そのための関連した研究を行い、核物質における中間子凝縮など他の領域の研究の応用を議論する。

3. 研究の方法

本研究の研究方法について具体的に述べる。

(1) 双極子ボース原子を含む BF 混合気体での超固体相のダイナミクス：双極子ボース原子を含む BF 混合気体の計算において、双極子ボース気体は拡張 Gross-Pitaevskii (GP) 方程式を用いる。拡張 GP 方程式は、平均場近似である s 波相互作用項を含む GP 方程式に、双極子相互作用は V_{dd} と相互作用による量子ゆらぎを局所密度近似で取り入れる Lee-Huang-Yang 項で取り込んだ方程式である。虚時間緩和法により拡張 GP 方程式の解を数値的に求め、基底状態が結合定数によって BEC 状態になるか超固体状態になるかを確定する。その後、この解に複素位相を与えた解を初期条件として、実時間方程式を数値的に解いて系の時間発展を調べる。フェルミ気体は Thomas-Fermi-von Weisaecker (TFvW) 近似を用いて導入し、BF 間相互作用（結合定数 h ）を含むものが基礎方程式となる。特に次の点に着目して結果を解析する：

双極子ボース原子気体の場合に超固体の集団振動モードを時間発展により求め、超固体の複素位相の干渉からコヒーレンスの変化を交流ジョセフソン効果として調べた。

双極子ボース原子の超固体を含む BF 混合気体において虚時間緩和法により相構造を明らかにし、実時間方程式を解いて集団振動モードを求め、そのダイナミクスを明らかにする。

(2) 超固体 BF 混合気体におけるポーラロンの性質：原子気体ポーラロンは、フェルミ粒子などの不純物が原子凝縮状態などに中に存在する時、周囲のボース原子を励起させ分極させた準粒子状態である。代表者らは双極子原子におけるポーラロンを調べるため、弱相関の場合 LLP の方法および強相関の場合の Chevy の方法を用いて拡張した理論を構築しており、この方法を用いて研究を進める。まず、双極子相互作用を含む場合に理論を拡張し、双極子ポーラロンの基本的性質を明らかにする。超固体状態にあるボース原子気体中のポーラロンの性質を明らかにするために、上記 A) による拡張 GP 方程式を用いた理論と結合して、理論的数値的に解析し、超固体中のポーラロンの性質を明らかにする。特に次の点に着目して結果を解析する：

超固体ポーラロンを記述するための上記理論を構築し、解析的な分析を行う。

構築した理論を数値的に解析し、双極子ボース粒子が BEC 状態から超固体に変化する場合に、自由あるいはトラップされたポーラロンのエネルギーや周囲の配向励起がどのように変化するかを明らかにする。

(3) 上記(1)および(2)の理論的研究に基づき、原子気体実験の新しい提案を行う。また、高密度核物質など関係した分野への応用研究を行う。

4. 研究成果

この研究目的のために行った研究実績およびその成果について述べる：

(1) 双極子ボース原子を含む BF 混合気体での超固体相のダイナミクス：

双極子ボース気体に対して、平均場近似である s 波相互作用と双極子相互作用、量子ゆらぎを局所密度近似で取り入れる Lee-Huang-Yang 項を取り入れた拡張 Gross-Pitaevskii (GP) 方程式の虚時間緩和法による計算法を確立し数値計算を行った。相互作用パラメータを変化させた数値計算を行い、双極子ボース気体の基底状態が BEC 状態および超固体状態になる範囲を求めた。超固体状態が安定になる相互作用領域の双極子ボース気体の規定において、密度の大きい超固体が 2 個できる場合を選び、それぞれの超固体に異なる複素位相を与えた状態を初期状態として、実時間発展法により数値計算を行い、超固体がどのように時間発展を行うかを求めた。位相差を与えられた 2 個の超固体は原子の移動による振動（ジョセフソン振動）を起こすことが確認され、

BEC 状態から超固体状態への変化に対して振幅の減少と振動周期の増大がみられた。これは、BEC 状態から超固体状態への変化に対して超流動性によるコヒーレンスが失われていくことを示す。これらの結果をまとめて、日本物理学会において発表を行った。（宮川貴彦、藪博之「調和トラップ中における双極子ボース気体の超固体状態のダイナミクス」日本物理学会 2023 年春季大会（オンライン開催）2023/03/23）

(2) 双極子相互作用する原子多体系における1)の研究の応用として、双極子フェルミ原子と非双極子フェルミ原子の混合気体系における集団運動である振動励起モードの性質を明らかにする研究を行った。リング・ダイアグラム近似を用いて密度-密度相関関数を計算して集団モードを求める理論を定式化し、数値計算による解析を行った。この研究により双極子フェルミ原子と非双極子フェルミ原子の混合気体が双極子相互作用が大きい場合に系が不安定化することを明らかにし、その条件を求めた。研究結果は日本物理学会で発表した。(宮川貴彦、仲野英司、藪博之「双極子-非双極子フェルミ混合気体における密度相関」日本物理学会第77回年次大会(オンライン開催)2022/03/15)

その後の計算結果を含めて、不安定化の条件をより精密に求め、結果を国際会議で発表した。(Takahiko Miyakawa, Eiji Nakano, Hiroyuki Yabu, "Collective excitation mode in a dipolar and non-dipolar Fermi gas mixture" 29th International Conference on Low Temperature Physics, 2022/08/19) 密度-密度相関関数による双極子フェルミ原子と非双極子フェルミ原子の混合気体系の集団モードおよび系の不安定化について国際会議での発表の内容を会議紀要に論文(査読付き)として出版した。(Miyakawa Takahiko, Nakano Eiji, Yabu Hiroyuki, "Collective Excitation Modes in a Dipolar and Non-Dipolar Fermi Gas Mixture", JPS Conf. Proc. 38 (2023) 011014-1-6, 10.7566/JPSCP.38.011014)

双極子フェルミ原子と非双極子フェルミ原子の混合気体系における集団励起モードの解析と外部からの振動の応答に関する新たな計算結果から、相互作用の大きさに応じて系がどのように不安定化するかを明らかにし、その結果を査読付き論文としてまとめ出版した。(Takahiko Miyakawa, Eiji Nakano, and Hiroyuki Yabu Dynamical properties of Fermi-Fermi mixtures of dipolar and nondipolar atoms Phys. Rev. A 109 (2024) 053308-1-9, 10.1103/PhysRevA.109.053308)

(3) 双極子ボース気体に拡張した双極子ポーラロンの計算を、Chevyの方法を用いて強相関の場合に拡張した理論を構築し、双極子ポーラロンの分析を行った。結果は代表者と分担者により研究論文としてまとめられ査読付き論文として発表した。(Nishimura Kazuya, Nakano Eiji, Iida Kei, Tajima Hiroyuki, Miyakawa Takahiko, Yabu Hiroyuki, "Ground state of the polaron in an ultracold dipolar Fermi gas", Physical Review A 103 (2021) 033324-1-10, 10.1103/PhysRevA.103.033324) また、双極子ポーラロンに関する補足的な研究が分担者により行われ、査読付き論文として発表した。

また、双極子ポーラロンの Chevyの方法を用いた理論についての招待講演(国内)が分担者により行われた。(越智一成、高橋淳一、仲野英司、「超流動量子渦中でのボースポーラロンの基底状態の性質」熱場の量子論とその応用(2023,高エネルギー加速器機構))

超固体相である強相関双極子ボース気体での双極子ポーラロンにおいて、多体系としての性質を明らかにするため、双極子ポーラロン間の相互作用ポテンシャルの計算を行った。双極子ポーラロン間の相互作用ポテンシャルに対して解析的な研究を行い、ポテンシャルが磁性体の交換相互作用に現れるRKKY型であって双極子相互作用の異方性によりゆがんだ形になることを証明した。このポテンシャルを用いた双極子ポーラロンの束縛状態および散乱状態を数値的に計算し、二体問題の構造を明らかにした。結果は論文にまとめ、現在投稿中である。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Tajima Hiroyuki, Moriya Hajime, Horiuchi Wataru, Iida Kei, Nakano Eiji	4. 巻 106
2. 論文標題 Resonance-to-bound transition of 5He in neutron matter and its analogy with heteronuclear Feshbach molecules	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 45807
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.106.045807	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 Nishimura Kazuya, Nakano Eiji, Iida Kei, Tajima Hiroyuki, Miyakawa Takahiko, Yabu Hiroyuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Ground state of the polaron in an ultracold dipolar Fermi gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033324-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.033324	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 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 144424-1-14
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 043334-1-7
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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takahiko Miyakawa, Eiji Nakano, Hiroyuki Yabu
2. 発表標題 Collective excitation mode in a dipolar and non-dipolar Fermi gas mixture
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮川貴彦, 藪博之
2. 発表標題 調和トラップ中における双極子ボース気体の超固体状態のダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 越智一成, 高橋淳一, 仲野英司
2. 発表標題 超流動渦におけるケルボン フォノン相互作用ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 仲野英司
2. 発表標題 冷却原子系ポーラロンと周辺の話
3. 学会等名 基研・iTHEMS 国内モレキュール型研究会 2022 冷却原子気体における少数量子系の普遍的性質 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮川貴彦、仲野英司、藪博之
2. 発表標題 双極子-非双極子フェルミ混合気体における密度相関
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
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
研究分担者	宮川 貴彦 (Miyakawa Takahiko) (70439925)	愛知教育大学・教育学部・教授 (13902)	
研究分担者	仲野 英司 (Nakano Eiji) (70582477)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授 (16401)	

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
---------	---------