

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03501

研究課題名（和文）極低温冷却ボース・フェルミ混合原子気体における粒子相関効果と新しい相

研究課題名（英文）Particle correlation effects and new phases of ultra cold Bose-Fermi mixtures

研究代表者

藪 博之 (Hiroyuki, Yabu)

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） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二種類の異なる原子から成る極低温ボース・フェルミ混合原子気体において、中間的な大きさの多体粒子相関が存在する現象、双極子相互作用する原子を含む混合原子気体および原子気体ポーラロンに対して、量子多体理論の方法を用いた理論構築を行い、相構造およびその性質を明らかにする理論的研究を行った。双極子フェルミ原子を含む混合原子気体では、相分離による異方的ALS構造の存在および、そのヒステリシス構造を明らかにした。原子気体ポーラロンに対しては、有限トラップ中でのポーロンの角運動量の分布を中間結合の方法を用いて明らかにした。また、双極子原子中でのポーロンの理論定式化、性質の解明を行った。

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、これまで弱相関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混合原子気体および原子気体ポーロンの系に対して、新しい相構造が現れることを示し、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）：In the present research, the intermediate correlation phenomena have been studied of the mixtures of two different ultracold atoms, the mixture of dipole atoms and atom-gas polarons. We constructed the theoretical methods based on many-body quantum theory, and studied the phase structures and the properties of these phenomena. For the mixture of dipole fermi atoms, the existence of the ALS structure phase and the hysteresis of the phase transition has been clarified. For the atom-gas polarons, we calculated the angular-momentum distribution of the trapped polaron. We also constructed the theory of the polaron in the aton gas with the dipole interactions, and show the properties of the dipole polaron.

研究分野：理論物理学（多粒子系量子力学）

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

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

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、ボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退の成功以来、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、ボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退という量子凝縮状態が発現する。これら二種類の統計性をもつ原子を混合したボース・フェルミ混合系では、粒子間相互作用により、集団励起状態、相分離、系の引力崩壊、分子生成など豊富な現象を示すことが代表者らの研究などで理論的に研究され明らかにされてきた。

これらの理論研究の多くは、グロス・ピタエフスキ方程式やトーマス・フェルミ近似、ヴラソフ方程式や準化学平衡法など、平均場近似で取り込まれる粒子間相互作用は大きい、それ以外の粒子相関としては弱相関である場合の方法が多く用いられている。

近年、冷却原子気体においてより強い粒子相関をもつ系の実験が行われ研究が進められてきた：

- (1) 双極子相互作用する原子気体の相構造：Dy, Er 原子など双極子相互作用するフェルミ原子の原子気体が実験的理論的に研究されてきた。双極子相互作用は異方性をもつ相互作用であるためフェルミ原子系は強い粒子相関をもち、引力方向に双極子が配向することで生じる強い引力による崩壊などが分担者らによって研究された。この系は弱相関近似では扱うことができず、その拡張が行われている。今後、双極子相互作用するフェルミ原子気体を含むボース・フェルミ混合気体の実験の進展も予想される。代表者は分担者と共に、双極子相互作用をするトラップされた冷却二成分フェルミ原子系の相構造を、粒子相関の強い場合に拡張した理論を用いて研究し、二成分相分離領域、不安定領域が起こる条件を求めている。
- (2) BF 混合気体における冷却原子ポーラロン：ボース・フェルミ混合系においても、粒子相関がきいてくる系として、冷却原子ポーラロンが実験的につくられている。これはボース原子の凝縮状態に不純物原子を導入すると、相互作用によってボース原子の凝縮帯が分極を起こしてフォノンが励起し、フォノンの雲は準粒子（ポーラロン）となり、混合系はポーラロンの多体系となる。また、フェルミ縮退を起こしているフェルミ原子気体中の不純物に対してもフェルミ縮退からのフォノン励起によりポーラロンが生じる。代表者と分担者は、電子ポーラロンに対する中間結合理論を拡張し、相互作用するポーラロン多体系を記述する一般的な理論を構築、一様系の場合に励起フォノン分布やポーラロン間相互作用を計算した。また、有限トラップ系の場合に、角運動量に対して中間結合理論理論を適用し、調和振動子にトラップされた冷却原子ポーラロンの結合エネルギー等の性質を求めた。

以上の研究上の進展の上で、本研究においては、

- (1) これまでの平均場近似など弱相関の理論による冷却ボース・フェルミ混合気体の相構造を、より強い相関をもつ場合の量子多体理論を用いて拡張した場合に、どのような新しい相構造と性質が現れるのかという疑問がこれまでの研究の発展として生じた。
- (2) 代表者と分担者は、ボース・フェルミ混合気体の研究を共同で行ってきた。また、(a)分担者は双極子フェルミ気体の研究で先駆的な業績をあげていること、(b)代表者と分担者は、双極子フェルミ気体に対する取り扱いを用いて、フェルミ原子の相構造の理論計算を進めており、双極子フェルミ原子の部分の理論はできつつあること、(c)冷却原子ポーラロンに関しては、代表者と分担者によって、リー・ロー・パインズ理論の拡張と有限系の拡張に対する理論が整いつつあること、など本研究の準備状況が整っていた。

ということが研究開始当初の背景であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、冷却ボース・フェルミ混合気体においてより強い相関が存在する場合に理論的研究を行ない、どのような相構造が現れるかを明らかにして、実験結果を解明するとともに新しい相構造について実験に対する提言を行うことである。具体的には、次の通りである：

(1) 双極子相互作用するフェルミ気体あるいはボース気体の不安定性は分担者により研究が進められており、また安定相における相分離等も代表者と分担者の研究で調べられてきた。そこにボース気体が加わった双極子相互作用するボース・フェルミ混合気体においては、ボース・フェルミ粒子間の相互作用による相分離および分子生成過程による崩壊の効果が存在し、双極子相互作用の効果とあいまって豊富な相構造をもつと予想される。本研究の目的は双極子相互作用するフェルミ粒子系の相分離をより詳細に明らかにするとともに、ボース・フェルミ粒子系の不安定性を解明することである。双極子相互作用するフェルミ粒子を含む混合気体の相構造の研究はあまり進んでおらず、独自性がある。

(2) 申請者と分担者は中間結合理論であるリー・ロー・パインズ理論を拡張して一様系でポーラロン気体を扱う理論、同理論を角運動量に対して用いることにより調和振動子トラップ中のポーラロンを扱う理論を構築した。冷却原子ポーラロンは、近年になって研究が進みつつある。

本研究の目的は、この理論を用いてポーラロンの寿命(スペクトルの幅)などのダイナミカルな物理量を計算して実験と比較するとともに、散乱長を変えて弱結合から強結合(ユニタリ極限近傍)領域に変化する時、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。また、(1)の研究と合わせて双極子相互作用するフェルミ原子気体中における冷却子ポーラロンの研究も行う。冷却原子ポーラロンにおけるこのような研究はあまりみられず独自性がある。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、本研究は、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ふ創造性がある。また、核物質における中間子凝縮など他の領域の研究にも重要な貢献をなすものである。

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) 双極子相互作用する原子気体の相構造: 双極子相互作用するフェルミ粒子を含むフェルミ粒子およびボース・フェルミ混合気体の計算において、フェルミ粒子における強い相関をどのように取り込むかが問題となる。本研究では弱相関に有効であったトーマス・フェルミ近似を拡張したトーマス・フェルミ・ヴァイツゼッカー近似を用いる。これはトーマス・フェルミ近似のエネルギー密度に、粒子密度の微分項を加えるもので、双極子フェルミ気体に対して有効であることが確かめられている。双極子相互作用は、フェルミ気体のエネルギーには、直接エネルギー項: および交換エネルギー項として導入される。ボース粒子の記述は平均場近似であるグロス・ピタエフスキ方程式を用いる。これより、混合気体のエネルギー汎関数が確定し、その極値を与える方程式を解いて混合気体の基底状態が求められる。実際には数値計算を行って解を求めるが、形式的に虚時間を導入して定常状態に緩和させるという方法を用いて数値計算を行う。結合定数の変化によって基底状態がどのようになるかを調べ、相図や相分離の様子を求める。特に次の点に着目して結果を解析する:

双極子相互作用する二成分フェルミ混合気体の相分離状態を明らかにし、相図を確定するとともに各相での性質を調べる。また、分離相と混合相の間の相転移についても調べる。

ボース・フェルミ混合気体における不安定性について調べ、ボース・フェルミ相互作用と双極子相互作用による不安定性の競合を明らかにする。

- (2) ボース・フェルミ混合気体における冷却原子ポーラロン: ポーラロンの中間結合理論であるリー・ロー・パインズ理論は、運動量をもつポーラロンに対して変分パラメータを含むユニタリ変換により相互作用の効果を取り込む理論であって、フォノン運動量によりポーラロンの運動量の一部がフォノンによりひきずられている効果(フォノドラッグ)を取り入れている。リー・ロー・パインズ理論はポーラロン少数系には有効であったが多体系の計算は困難があった。代表者と分担者はリー・ロー・パインズ理論を拡張してポーラロン気体に適用しうる方法(拡張リー・ロー・パインズ理論)を構築した。この方法に基づき、特に次の点に着目して結果を解析する:

拡張リー・ロー・パインズ理論を用いてポーラロンの寿命(スペクトルの幅)などのダイナミカルな物理量を計算して実験と比較するとともに、散乱長を変えて弱結合から強結合(ユニタリ極限近傍)領域に変化する時、ポーラロンによる凝縮体の空間分布や束縛エネルギーの変化を計算し、その変化を明らかにする。

拡張リー・ロー・パインズ理論を有限トラップ系に拡張し、調和振動子トラップおよびトラス型トラップの場合の冷却原子ポーラロンの性質を計算する。

双極子相互作用するフェルミ原子気体中でのポーラロンの性質を理論的に計算し明らかにする。その計算のために双極子相互作用を取り入れた強相関でのポーラロンの理論を構築し、それに基づいた数値計算を行い、双極子原子気体中でのポーラロンの性質を明らかにする。

- (3) 上記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とともに、派生的な研究を行う。

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) 双極子相互作用するフェルミ原子を含む有限フェルミ系の新しい相構造: 双極子相互作用する原子気体は相互作用の非等方性からこれまでにない相構造の発言が予想されている。代表者および分担者は、有限ポテンシャルにトラップされた双極子相互作用する2成分フェルミ原子気体が示す相構造をトーマス・フェルミ・フォン・ヴァイツゼッカー近似を用いて理論的に研究し、相分離した2成分が交互に現れるALS構造が層構造として現れる領域を明らかにした。また、相変化のヒステリシス構造を明らかにするとともに、実験が達成されている双極子相互作用系であるEr-Dy系に対して計算を行い、実験に対する提言を行った。結果は、米国および日本物理学会で発表(Takahiko Miyakawa, Shin Nakamura, Hiroyuki Yabu, "Two-component dipolar Fermi gases in a spherically symmetric harmonic trap", 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, 2019/4/2)するとともに、

Physical Review 誌において論文として発表した。(Takahiko Miyakawa, Shin Nakamura, Hiroyuki Yabu, "Phase separation in trapped dipolar Fermi gases", Phys. Rev. A101 (2020) 033613-1-6)

- (2) 双極子相互作用するボース原子を含む有限ボース系の新しい相構造と超固体層：双極子相互作用する原子気体は相互作用の非等方性から新しい相構造の発言が予想されているが、代表者と分担者が本科研費に基づく研究で開発した双極子相互作用するフェルミ原子気体の ALS 構造の計算法をボース原子気体に対して拡張する研究を行った。この方法を双極子相互作用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リー・ファン・ヤン項を取り入れ拡張したグロス・ピタエフスキー方程式に用いて、双極子相互作用による引力により崩壊するが量子ゆらぎに支えられた高密度状態が局所的に現れる超固体相を求めることに成功した。これによる双極子相互作用する原子を含むボース・フェルミ混合気体の相構造および安定性の解明は今後の研究に継続され、成果発表を行う予定である。
- (3) 有限ポテンシャル中の希薄ボース気体にトラップされた1個の原子不純物が形成するポーラロン状態とその角運動量特性：希薄ボース気体中の不純物原子は、その周りにボース粒子を励起しポーラロン状態を形成する。この状態は一様な系においてはリー・ロー・パインズ理論を拡張した中間結合理論を用いてよく記述されることが知られており、その極低音原子気体への応用は代表者と分担者の先行研究によってなされたものである。代表者と分担者は本研究において拡張した中間結合理論を有限ポテンシャル中の有限系に拡張する理論形式を構築した。我々はこの理論を用いて原子ポーラロンの角運動量を評価し、原子ポーラロンの角運動量特性を明らかにした。結果を論文としてまとめ Physical Review 誌に掲載した。(Kano Watanabe, Eiji Nakano, and Hiroyuki Yabu, "Bose polaron in spherically symmetric trap potentials: Ground states with zero and lower angular momenta", Phys. Rev. A99 (2019) 033624-1-16)
- (4) 双極子相互作用する原子気体ポーラロンの構造：代表者と分担者は、双極子相互作用するフェルミ原子気体中の原子ポーラロンの状態を数値的にあつかう強相関ポーラロンの計算法を開発した。これは強相関ポーラロンの計算で用いられるシェヴィーの方法を双極子相互作用する系に拡張した理論である。この方法を用いて数値計算した双極子ポーラロンの性質、準粒子の空間分布や不純物周囲のフェルミ面の双極子相互作用からくる非等方性などを明らかにし、日本物理学会および国際ワークショップで発表 (K. Nishimura, E. Nakano, K. Iida, H. Tajima, T. Miyakawa, H. Yabu, "The ground state of a polaron in ultracold dipolar Fermi gases International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems", CLUSHIQ2020)を行い、また論文を執筆して Physical Review 誌に掲載された。(Nishimura Kazuya, Nakano Eiji, Iida Kei, Tajima Hiroyuki, Miyakawa Takahiko, Yabu Hiroyuki, "Ground state of the polaron in an ultracold dipolar Fermi gas", Phys. Rev. A103 (2021) 033324-1-10)
- (5) 原子ポーラロンの応用的研究：原子気体のポーラロン緩和過程の理論の予備的計算を行い、原子スピンの緩和の理論的計算の結果を物理学会で発表した。
- (6) 上記の結果を用いて、双極子相互作用する原子ポーラロンの理論定式化を行い、計算を行った。理論および定式化の部分は日本物理学会で講演を行い発表した。また、本研究の原子気体の成果を他の領域に応用する研究をおこない、分担者が論文を執筆し Physical Review 誌に掲載された。(Tajima Hiroyuki, Takahashi Junichi, Nakano Eiji, Iida Kei, "Collisional dynamics of polaronic clouds immersed in a Fermi sea", Phys. Rev. A102 (2020) 051302-1-6)
- (7) また、最近では双極子相互作用で崩壊した原子気体が粒子相関の高次効果からくる相互作用により密度の高い状態で安定する超固体状態が実現し、研究が進展しつつある。代表者と分担者は、本研究で用いた計算法を用いて理論計算を行い、超固体状態が得られることを確認した。この結果は、本研究を継続する次の研究計画によってその性質を明らかにする予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

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 033324-1-11
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 Hiroyuki Tajima, Junichi Takahashi, Eiji Nakano, Kei Iida	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 051302-1--6
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 Takahiko Miyakawa, Shin Nakamura, Hiroyuki Yabu	4. 巻 A101
2. 論文標題 Phase separation in trapped dipolar Fermi gases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 033613(6pages)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.101.033613	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 Kano Watanabe, Eiji Nakano, and Hiroyuki Yabu	4. 巻 99
2. 論文標題 Bose polaron in spherically symmetric trap potentials: Ground states with zero and lower angular momenta	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033624-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.99.033624	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 Maruyama Tomoyuki, Nakano Eiji, Yanase Kota, Yoshinaga Naotaka	4. 巻 97
2. 論文標題 Spin polarized phases in strongly interacting matter: Interplay between axial-vector and tensor mean fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114014-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.114014	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9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 畑知宏, 仲野英司, 田島裕之, 高橋淳一, 飯田圭
2. 発表標題 スピン軌道相互作用を伴う量子不純物系の角運動量散逸
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 高橋淳一, 田島裕之A, 仲野英司, 飯田圭
2. 発表標題 量子ダイナミクスからポーラ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 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Nishimura, E.Nakano, K.Iida, H.Tajima, T.Miyakawa, H.Yabu
2. 発表標題 The ground state of a polaron in ultracold dipolar Fermi gases International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems
3. 学会等名 International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020) (国際学会)
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2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 畑知宏, 仲野英司, 飯田圭, 藪博之
2. 発表標題 スピン自由度をもつ量子不純物系のダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村和也, 仲野英司, 飯田圭, 田島裕之, 宮川貴彦, 藪博之
2. 発表標題 双極子相互作用する冷却フェルミガス中のポーラロン基底状態
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiko Miyakawa, Shin Nakamura, Hiroyuki Yabu
2. 発表標題 Two-component dipolar Fermi gases in a spherically symmetric harmonic trap
3. 学会等名 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村和也、仲野英司、飯田圭、宮川貴彦、藪博之
2. 発表標題 双極子間相互作用する冷却フェルミガス中のポーラロン基底状態
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 宮川貴彦, 中村伸, 藪博之
2. 発表標題 トラップされた双極フェルミ混合気体の相分離
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
研究 分担者	宮川 貴彦 (Miyakawa Takahiko) (70439925)	愛知教育大学・教育学部・准教授 (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・准教授 (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
---------	---------