

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05445

研究課題名(和文) 中間結合理論の多体系への拡張とハドロンおよび冷却原子少数多体系への応用

研究課題名(英文) Many-body extension of the intermediate coupling theory and application to few-body systems of cold atoms and hadrons

研究代表者

仲野 英司 (Nakano, Eiji)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・准教授

研究者番号：70582477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：気体や固体に異種粒子(不純物粒子)を一つ入れると、この粒子の性質、例えば質量や寿命など、は真空のそれと比べて変化する。これは不純物粒子と環境(気体や固体中)を構成する粒子との相互作用によって生じる。このように、同質な多自由度系に異種粒子が僅かに混じっている状況はいろいろな場面で現れる。本研究では、冷却原子系のボーズ・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退系に埋め込まれた不純物原子、および、核物質中のアルファ粒子を題材として、相互作用の強度や異方性などのパラメータと不純物粒子の性質変化との関係を明らかにした。これらの成果は不純物粒子が更に2つ、3つとある場合の少数粒子相関を調べるための基礎となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特殊な環境下や媒質中に混入した異種粒子の性質を解明することは一般の量子混合多体系の理解への貢献であり、更に異種粒子の少数多体系を理解する上での基礎を与える。同様の物理系は多く想定されるので本研究で開発された手法や知見は広く有用である。実際に本研究では主に冷却原子系の不純物問題に重点を置き、環境自由度と不純物原子の相互作用、環境の統計性や非等方性と不純物粒子の性質変化の関係を理論的に評価する手法を示した。これは実験においても再現可能であり、従来にない成果である。

研究成果の概要(英文)：When a probe particle (impurity particle) is immersed in gas or solid, properties of the particle, such as effective mass and decay width, get modified from those values in vacuum. This is attributed to the interaction between the impurity particle and degrees of freedom of identical particles in the gas or solid. Such a situation with impurity particle immersed in many-body environment appears in variety of physical systems. In the present study we have elucidated how property of impurity particle is modified by environmental parameters such as strength or anisotropy of the interaction, employing theoretical models of atomic impurities in Bose-Einstein condensate or in degenerate Fermi gas, and of an alpha particle in nuclear matter. Our results serve as basic knowledges for further application to a few-body impurity problems in medium.

研究分野：量子多体系

キーワード：冷却原子多体系 ボーズ・ポーラロン ダイポール・フェルミ気体 量子枯渇 アルファ粒子 フェルミ・ポーラロン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、低エネルギーハドロン現象を説明するカイラル対称性の自発的破れに関して、重いメソンをプローブとして原子核に投入し、バリオン数密度が比較的高い原子核内部におけるカイラル対称性の部分的回復を探る研究が行われている。これらの研究目的は、ハドロンの存在形態の探求であり、カイラル凝縮やハドロン相互作用のフレーバーやバリオン数密度への依存性を明らかにすることである。これらの研究における要素は、1) カイラル凝縮 = 媒質、2) 構成子として導入されるハドロン、3) メソン交換や励起を含むハドロン間相互作用、である。従来の理論的研究では、いずれも空間一様なカイラル凝縮を仮定し、密度依存性は一様核物質からの外挿をもとにしている。実際には、真空中にハドロンを幾つか導入すれば、カイラル凝縮がその周辺で変化し、同時に素励起としてのメソン励起が必然的に発生する。これらの変化はハドロン間相互作用にも影響する。つまり、上記の3要素は相互依存しているので、これらを力学的自由度として同時に扱う必要がある。

ハドロン複合系と概念的に似た状態として、冷却原子ポーラロンがある。巨視的な数のボーズ原子がボーズ・アインシュタイン凝縮している状態に、異種原子の不純物を導入すると、相互作用によって不純物の周りにボゴリューボフ・フォノンの雲が励起する。フォノンをもった不純物は準粒子(ポーラロン)となり、準粒子同士あるいはフォノンと準粒子が複合状態を形成する。冷却原子ポーロンは、湯川型+4点相互作用で記述され、これはハドロン有効相互作用と同じ構造である。実際に、冷却原子ポーロンの準束縛状態は、崩壊プロセスを除けば、ハドロン系との対応が可能である。

2. 研究の目的

媒質中における準粒子描像は分野を問わず有用な概念である。ハドロン系においては、媒質はカイラル対称性が自発的破れた真空であり、メソンは真空からの素励起、ハドロンは素励起と相互作用する準粒子である。本研究では、一様なカイラル凝縮体に数個のハドロンを導入したとき、ハドロン周辺におけるメソン励起と凝縮体の空間変化を評価し、このハドロン複合系におけるエネルギー固有値問題を解く。また、ハドロン系との対応が可能で、最近実験が可能になった冷却原子ポーロンとその準束縛状態に対しても同様の研究を行う。

3. 研究の方法

カイラル凝縮(ボーズ・アインシュタイン凝縮)、励起メソン(ボゴリューボフ・フォノン)および構成子ハドロン(不純物原子)の相互影響を取り入れた状態を記述するために、Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式と中間結合理論(ポーロンにはLee-Low-Pines理論(LLP理論))を組み合わせた方法を用いる。BdG方程式は、構成子(不純物原子)が外場として在るときに、凝縮体の空間変化とメソン励起スペクトルを記述する。一方、中間結合理論(LLP理論)は、凝縮体が外場として在るときに、構成子(不純物粒子)と励起メソンによって準粒子を記述する。従って、これら2つの方法を連立させる。このようにして得られた準粒子を用いて波動関数を構成し、全系のエネルギー固有値問題を変分法や数値計算を用いて解く。

4. 研究成果

ハドロン周辺における局所的カイラル凝縮に関する研究は、海外の研究グループによって本研究課題の一部をスクープされたので研究計画を練り直した。新たに中間結合理論を相対論的に拡張する定式化を検討し、従来のソリトンモデルなどとの整合を試みた。

冷却原子多体系におけるボーズ・ポーロンの研究は、調和振動子型の磁気トラップ中で行われる。これまでの研究では軸対称トラップ・ポテンシャルに関するものであったが、本研究では球対称な場合を対象とした。この系では全角運動量の大きさとz成分が保存するが、これらを与えたときの系のエネルギー、波動関数および励起ボソンが持つ角運動量分布をLLP理論を応用して算出した。本研究では、トラップされているボソン原子の自己相互作用

を無視しているので、これを考慮した場合は超流動体となるので、有限角運動量では量子渦を取り入れることが今後の課題となる。

中性子星などのコンパクト星で超強磁場を伴うものをマグネタ と呼ばれる。その磁場の起源はまだ解明されていない。本研究では、その可能性として挙げられている「強い相互作用」を起源とした軸性ベクトルとテンソルの平均場を仮定し、自発的スピン偏極相が出現するモデルパラメタの領域を特定した。この研究は、コンパクト星に特有の局所的カイラル凝縮との競合や回転系への応用に有用である。

冷却原子多体系におけるボーズ・ポーラロンの研究は、調和振動子型の磁気トラップ中で行われる。本研究では球対称ポテンシャルの場合を想定し、不純物原子に対するシュレーディンガーおよび局所励起ボゴリューボフ・フォノンに対する BdG 方程式を同時に解くことで、不純物粒子とボーズ・アインシュタイン凝縮体および励起フォノンの分布、波動関数、および相互作用による凝縮体の量子枯渇を定量的に評価した。この成果は、実験においても検証可能である。

アルファ粒子は、中性子2つと陽子2つが非常に強く束縛した状態であり、軽い核子内ではクラスター的に振るまい、核物質中ではそれ自体が有効自由度となる。本研究では、ゼロ温度の中性子物質中におけるアルファ粒子の有効質量、崩壊幅、準粒子留数などの媒質中における準粒子的性質の変化を、低エネルギー有効理論と自己エネルギーに関する梯子型近似を用いて、算出した。この結果は今後アルファ多体系への応用が期待される。

近年、冷却原子多体系におけるポーラロンの研究が盛んであるが、主に一粒子描像に関するものである。本研究では、ポーラロンの2体間有効相互作用がポーラロンの集団的衝突ダイナミクス(流体的レジーム)にどのように影響するかを数値計算によって明らかにし、これによりショックウェーブなど観測からポーラロン多体相関の情報を引き出せることを理論的に提案した。この成果は実験において検証可能である。

冷却原子フェルミ縮退系に不純物原子を導入すると、フェルミ粒子と不純物原子との相互作用により、不純物原子は真空と異なる準粒子描像(フェルミ・ポーラロン)を得る。本研究では、ダイポール型相互作用をするフェルミ気体を媒質とし、相互作用によるフェルミ面近傍の粒子空孔励起を変分波動関数として系の基底状態を求め、フェルミ・ポーラロンの有効質量や不純物周りの励起分布に異方性が生じることを示した。この結果は、更にフェルミ・ポーラロンの少数多体系を研究する上での基礎となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 Takahashi J., Imai R., Nakano E., Iida K.	4. 巻 100-23624
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 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 Yanase K, Yoshinaga N, Nakano E, Watanabe C	4. 巻 83-E01
2. 論文標題 Deformation of neutron stars due to poloidal magnetic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz074	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 Tomoyuki Maruyama, Eiji Nakano, Kota Yanase, and Naotaka Yoshinaga	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_p1-p10
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
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_p1- p16
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 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
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 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 18
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 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 051302 (R)_1
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 Nakano Eiji, Iida Kei, Horiuchi Wataru	4. 巻 102
2. 論文標題 Quasiparticle properties of a single particle in cold neutron matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 055802_1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.055802	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 仲野英司、飯田圭、堀内渉
2. 発表標題 冷たい中性子物質におけるアルファ粒子の準粒子描像
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 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 畑知宏, 仲野英司, 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 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 K.Nishimura, E.Nakano, K.Iida, H.Tajima, T.Miyakawa, and H. Yabu
2. 発表標題 The ground state of a polaron in ultra cold dipolar Fermi gases
3. 学会等名 "Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems" (MEXT-Kakenhi 18H05400) (国際学会)
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75会年会
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75会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 畑知宏、仲野英司、飯田圭
2. 発表標題 スピン自由度のある量子不純物系のダイナミクス
3. 学会等名 2019年四国地区理論物理学セミナー
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 西村和也、仲野英司
2. 発表標題 フォノン間相互作用を考慮したボース・アインシュタイン凝縮体内のポーラロン基底エネルギー
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺花乃、仲野英司
2. 発表標題 トラップ中のボース・アインシュタイン凝縮体に埋め込まれたフェルミオン不純物の基底状態
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺花乃、仲野英司、藪博之
2. 発表標題 クランキング法を用いた球対称トラップ中の冷却原子ボース・ポーラロン
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村和也、仲野英司、飯田圭
2. 発表標題 フォノン間相互作用を考慮した冷却原子ボースポーラロンの基底状態
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018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
連携研究者	藪 博之 (Yabu Hiroyuki) (60202371)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	
連携研究者	森田 健司 (Morita Kenji) (50339719)	京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員 (14301)	

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			
ドイツ	Center for Optical Quantum Technologies	Department of Physics	University of Hamburg	