

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究 C

研究期間：2009～2011

課題番号：21540411

研究課題名（和文） 双極子相互作用を持つ極低温量子気体の理論的研究

研究課題名（英文） Theory of Ultracold Quantum Gases with Dipole-Dipole Interactions

研究代表者

二国 徹郎 (NIKUNI TETSURO)

東京理科大学・理学部・准教授

研究者番号：50360160

研究成果の概要（和文）：強い双極子-双極子相互作用を持つ極低温原子・分子気体の性質を理論的に研究した。有限温度における極性フェルミ分子気体の性質を半古典近似で調べ、熱力学的性質や集団運動に対する双極子相互作用の効果を解明した。また、周期ポテンシャル（光学格子）中に閉じ込められた極性ボーズ気体の新奇な量子相の探索を行った。さらに、超流動の流れが不安定になる超流動臨界速度を解析した。

研究成果の概要（英文）：We studied properties of ultracold quantum gases with strong dipole-dipole interactions. We clarified the effect of dipolar interaction to equilibrium and dynamical properties of dipolar Fermi gases by working with the semiclassical phase-space distribution function. We also studied the quantum phases and superfluid critical current of dipolar Bose gases in periodic potentials (so called optical lattices).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計			

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：極低温原子気体、極性分子気体、双極子-双極子相互作用

1. 研究開始当初の背景

(1) **極低温原子気体の研究の発展**：1995 年にアルカリ原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現されて以来、レーザー冷却された極低温原子気体の研究は実験及び理論共に世界各国で活発に行われている。特に近年、レーザーの定在波を利用して作る周期ポテンシャル（光学格子）による強相関量子気体の実現、フェッシュバハ共鳴を用いた二原子分子の生成及びフェルミ原子気体による超流動の実現など、この分野での研究

は急速な発展を遂げている。原子気体では不純物や欠陥も無く、粒子密度、外部ポテンシャル、相互作用、粒子の統計性（ボーズ、フェルミ）を自由に変えることができるので、従来の物性物理学では実現し得なかった理想的な状況での量子多体系の研究が可能になっている。

(2) **双極性量子気体の研究の発展**：本研究では、急速に発展しつつある極低温量子気体の研究の中でも特に、強い双極子-双極子相互

作用を持つ原子・分子気体における諸現象を理論的に研究する。2005年に量子縮退した ^{52}Cr 原子気体をトラップすることが実験的に可能になって以来、強い双極子-双極子相互作用を持つBEC（双極子BEC）に注目が集まっている。 ^{52}Cr はアルカリ原子の6倍の磁気モーメントを持つために磁気的な双極子-双極子相互作用が非常に強い。この相互作用は異方的かつ長距離的に働くので、ボーズ凝縮体の形状を変形させるだけでなく、その安定性に影響を及ぼすことがわかっている。また、双極子BECを光学格子中に閉じ込めることによって超流動性と結晶性をあわせ持った“超固体相”などの全く新しい量子相が現れることも数多くの理論研究者が予想しており、実験的な実現も期待されている。これに加えて、内部自由度を持つBECにおいては、スピンの空間秩序によって特徴づけられる相が現れることが知られている。この原子がさらに強い双極子-双極子相互作用を持つ場合には、超固体相だけではなく、それに類似したSDW秩序と超流動秩序が共存した相など、内部自由度と長距離相互作用の融合の結果として現れる未知なる相の出現が期待できる。さらに、近年では電気双極子を持つ異種二原子分子（極性分子）の量子縮退の実現に向けた研究が勢力的に行われている。電気的な双極子-双極子相互作用の強さは磁気的なものに比べて桁違いに大きいので、双極子-双極子相互作用が支配的な量子多体系を実現する有力な候補として注目されている。双極子フェルミ気体では、異方的な相互作用がフェルミ系特有Fock交換相互作用を通じて運動量分布の異方性を引き起こすことが理論的に予想されている。この系では異方的な相互作用が平衡状態だけでなく動的な性質にも影響を及ぼすことが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強い双極子-双極子相互作用を持つ極低温量子気体における新奇な量子相および動的な性質を理論的に解明することである。以下に研究を構成する主要なテーマについて具体的な目的を述べる。

(1) 極性フェルミ気体の熱力学的性質および動的性質：双極子-双極子相互作用の持つ異方性は、特にフェルミ気体ではFock交換相互作用を通じて運動量分に大きな影響を与えることが理論的にも示唆されている。絶対零度においては双極子相互作用のFock交換項の効果によって運動量分布が非等方的になるという理論的予言がなされている。一方、実験的には極性分子気体の生成には成功しているものの、量子縮退する低温領域までは冷却できていない。そこで、有限温度において双極子相

相互作用の効果がどの程度表れてくるか定量的に評価することは重要である。本研究では双極子-双極子相互作用が極性フェルミ気体の熱力学的性質及び動的性質に与える効果について理論的に研究を行う。熱力学的性質については、平衡状態における位相空間分布に双極子相互作用の効果や量子縮退の効果がどのように現れるかを調べる。動的性質については、集団振動に双極子-双極子相互作用の異方性がどのように反映されるかを調べる。また、衝突による熱平衡緩和過程にも、運動量分布の異方性の効果は現れることが期待できるので、双極子相互作用が熱平衡化過程にどのような影響を及ぼすかについて調べる。

(2) 光学格子中の極性ボーズ気体の安定性と新奇な量子相の出現：レーザーの干渉を利用した周期ポテンシャル（光学格子）中にボーズ原子気体を閉じ込めると、格子ポテンシャルを強くしていくことにより超流動状態から局在状態（モット絶縁体）への相転移が観測される。光学格子中の双極子BECでは双極子-双極子相互作用の長距離的な性質のために、Mott絶縁体相、超流動相の他に、例えば密度の空間秩序(CDW)と超流動秩序が共存した超固体相などの新奇な相が現れると予測されている。本研究ではこの系における安定性と新奇な量子相の出現について包括的な理解を目指す。また、原子がスピン自由度を持つ多成分BECでは、CDW相の他にスピンの空間秩序によって特徴づけられるSDW相という、内部自由度を持つBEC特有の相が現れることが解明されている。以上の先行研究より、光学格子中の多成分双極性BECでは超流動相だけではなく、スピン密度波(SDW)秩序と超流動秩序が共存する相など、全く新しい量子相が現れると十分期待できる。このような新奇な量子相の探索を行う。

3. 研究の方法

(1) 極性フェルミ気体の熱力学的性質および動的性質：有限温度フェルミ気体の熱平衡状態およびダイナミクスを半分古典位相空間分布関数によって記述する。平衡状態については、有限温度における半古典一粒子分布関数対して半古典近似に対して運動量分布の異方性を取り入れた変分計算を用いることにより、平衡状態における熱力学性質を議論する。分布関数のダイナミクスを記述する運動論方程式を、双極子-双極子相互作用を考慮した形に拡張する。まず、平衡状態の運動量分布の温度変化を詳細に調べる。また、ダイナミクスについては運動論方程式を用いた解析を行う。

特に、モーメント法を用いることにより、集団励起や熱平衡化過程における双極子-双極子相互作用の効果を調べる。

(2) 光学格子中の極性ボーズ気体の安定性と新奇な量子相の出現：光学格子中の BEC を記述するのによく用いられるボーズ・ハバード模型を、双極子-双極子相互作用を考慮した形に拡張して用いる。また、計算手法としては、Gutzwiller 法と呼ばれる変分波動関数を用いた方法とそのダイナミクスへの拡張である時間依存 Gutzwiller 法を用いる。超流動不安定性の兆候は素励起スペクトルに現れることが期待される。そこで、BEC 気体の励起スペクトルの計算を行い、超流動が不安定になる条件を調べる。また、調和型ポテンシャル中の時間発展をシミュレーションで追いかけることによって具体的に超流動の流れがどのように不安定化するかを調べる。

4. 研究成果

(1) 極性フェルミ原子気体の有限温度における熱力学的性質および動的性質

- ① 半古典分布関数に対する変分計算を用いて、相互作用の大きさ、トラップポテンシャルの異方性、温度をそれぞれ変化させた際に実空間・運動量空間でそれぞれ分布の異方性がどのように変化するか詳細に調べた。また、実験において双極子相互作用の効果が観測する可能性について、定量的に議論した。
- ② 双極性原子気体の有限温度における熱力学的性質量子統計性の違いがもたらす効果に着目し研究を行った。ボーズ系、フェルミ系両方の場合について半古典分布関数に対する変分計算を用いて平衡状態における熱力学性質を議論した。相互作用、ポテンシャル、温度等、系のパラメータの変化に対して位相空間分布の異方性がどのように変化するか詳細に調べ、量子統計性の違いに対する効果も明らかにした。特に、トラップ中の位相空間分布をフェルミ系とボーズ系の両方について変分計算を行い比較した結果、双極子相互作用による運動量分布の歪み方が量子統計性によって異なることを見出した。
- ③ 自由膨張や集団振動などのダイナミクスを議論するために、フェルミ気体のボルツマン方程式に対するモーメント法を開発し、双極子相互作用が無い場合について音波の伝播を議論した。また、この手法を用いて正常相における動的構造因子の計算を行った。
- ④ 集団運動の解明を行った。半古典運動論にモーメント法を適用し、四重極モードの振動数と減衰率を解析した。その結果、衝突緩和過程にも運動量分布の異方性の効果が現れること、典型的な極性フェルミ分子の集団振動は高温では流体力学的領域にあることを明らかにした。

⑤ 二流体力学にもとづき、超流動気体における第二音波の観測可能性について研究を行った。

(2) 光学格子中の極性ボーズ気体の安定性と新奇な量子相の出現：

- ① ボーズ-ハバード模型に対して時間依存 Gutzwiller 近似を用いて解析した結果、パラメータの変化によって超流動、CDW、超固体等の相が出現することや、それぞれの相におけるダイナミクスが特徴的な振舞いを示すことを見出した。
- ② 一次元光学格子と調和振動子トラップ中に閉じ込められたボーズ原子気体における超流動臨界速度に関する研究を行った。ボーズ-ハバード模型に対して時間依存 Gutzwiller 近似を用いて双極子振動を解析した結果、超流動流の不安定性が一様系の超流動臨界速度によって理解できることを示した。また、双極子振動によって動的に超固体状態が引き起こされることを見出した。
- ③ 光学格子と調和振動子トラップに閉じ込められたボーズ-ボーズ混合気体の基底状態について解析を行い、特に相分離が起こる条件について詳細に調べた。
- ④ 光学格子中に閉じ込められたボーズ・ボーズ混合気体において現れる様々な量子相において、励起スペクトルと動的構造因子の解析を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 件)

- ① Yuki Endo and Tetsuro Nikuni, Statistical Difference in the Normal Phase of the Dipolar Ultracold Gases at Finite Temperatures, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 80, 2011, 044006
- ② Emiko Arahata and Tetsuro Nikuni, Single-particle spectral density of a Bose gas in the two-fluid hydrodynamic regime, Physical Review A, 査読有, Vol. 84, 2011, 053612
- ③ Takeshi Ozaki and Tetsuro Nikuni, Phase Separation of Bose-Bose Mixtures in an Optical Lattice. Journal of Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 81, 2012, 024001
- ④ Yuki Endo, Takahiko Miyakawa, Tetsuro Nikuni, Equilibrium properties of trapped dipolar Fermi gases at finite temperatures Physical Review A, 査読有, Vol. 81, 2010, 063624
- ⑤ Atsushi Motohashi, Tetsuro Nikuni,

Particle-localized ground state of atom-molecule Bose-Einstein condensates in a double-well potential Physical Review A, 査読有, Vol.82, 2010, 03361

- ⑥ Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni, Dynamic structure factor of the normal Fermi gas from the collisionless to the hydrodynamic regime Physical Review A, 査読有, Vol. 82, 2010, 033622
- ⑦ Yuki Endo, Tetsuro Nikuni, Kinetic Theory of a Spin-1 Bose-Condensed Gas at Finite Temperatures Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol.163, 2011, pp.92-121
- ⑧ Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni, Zero and First Sound in Normal Fermi Systems Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 158, 2009, pp.773-805
- ⑨ Emiko Arahata, Tetsuro Nikuni, Propagation of Second Sound in a Superfluid Fermi Gas in the Unitary Limit, Physical Review A, 査読有, Vol. 80, 2009, 043613

[学会発表] (計 件)

- ① 齋藤拓也、尾崎剛、段下一平、二国徹郎、光格子におけるボース粒子のダイポール振動による超流動臨界運動量、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- ② 遠藤有希、二国徹郎、Quadrupole Oscillation for Trapped Dipolar Fermi Gases at Finite Temperatures in the Collisional Regime Ultracold Gases: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2012)、2012年1月11日、東京理科大学神楽坂キャンパス
- ③ 齋藤拓也、尾崎剛、段下一平、二国徹郎、光格子におけるボース粒子のダイポール振動による超流動臨界運動量、Ultracold Gases: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2012)、2012年1月11日、東京理科大学神楽坂キャンパス
- ④ 尾崎剛、段下一平、二国徹郎、光格子中の二成分Bose気体の動的構造因子 Ultracold Gases: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2012)、2012年1月11日、東京理科大学神楽坂キャンパス
- ⑤ Yuki Endo, Tetsuro Nikuni, Quadrupole mode for the dipolar Fermi gases at finite temperatures, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2011/8/10, Beijing (China)
- ⑥ Tetsuro Nikuni, Propagation of second sound in a superfluid Fermi gas in the

unitary limit Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2010), 2010年5月13日-15日、日本原子力開発機構 システム計算科学センター(上野)

- ⑦ Yuki Endo, Takahiko Miyakawa, Tetsuro Nikuni, Equilibrium Properties of Trapped Dipolar Gases at Finite Temperatures, Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2010), 2010年5月13日-15日、日本原子力開発機構 システム計算科学センター(上野)
- ⑧ Atsushi Motohashi, Tetsuro Nikuni, Reentrant transition of Atom-molecule BECs in a Double-Well Potential, Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2010), 2010年5月13日-15日、日本原子力開発機構 システム計算科学センター(上野)
- ⑨ Yuki Endo, Takahiko Miyakawa, Tetsuro Nikuni, Equilibrium Properties of Trapped Dipolar Gases at Finite Temperatures, 22nd International Conference on Atomic Physics (ICAP2010), 2010年7月25日-30日, Cairns, Australia
- ⑩ Takeshi Ozaki, Ippei Danshita, Tetsuro Nikuni, Excitation Spectrum of a Bose-Bose Mixture in an Optical Lattice, 22nd International Conference on Atomic Physics (ICAP2010), 2010年7月25日-30日, Cairns, Australia
- ⑪ 荒畑 恵美子、二国徹郎、Allan Griffin、Bose凝縮気体における第二音波の解析、日本物理学会2010年秋期大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
- ⑫ 齋藤拓也、段下一平、尾崎剛、二国徹郎、2次元光学格子中における dipolar boson のダイナミクス、日本物理学会2010年秋期大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
- ⑬ 本橋篤、二国徹郎、二重井戸ポテンシャル中における原子分子ボース混合気体の量子ダイナミクスに見られる熱平衡化過程、日本物理学会2010年秋期大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
- ⑭ 荒畑 恵美子、二国 徹郎、BCS-BEC クロスオーバーにおけるフェルミ超流動気体からの原子対放出の解析、日本物理学会2010年秋期大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
- ⑮ Emiko Arahata, Tetsuro Nikuni, Allan Griffin, Single-Particle Spectral Density of a Bose-Condensed Gas in the Two-Fluid Hydrodynamic Regime, American

Physical Society March Meeting, 2011
年3月21日-25日, Texas, USA

⑩ 遠藤有希、二国徹郎有限温度における双極
性 Fermi 気体の静的性質日本物理学会
2009年9月25日熊本大学

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
()

研究者番号:

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: