

## 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17日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540412

研究課題名（和文） ボーズ・フェルミ混合原子気体での集団運動と分子生成のダイナミクスの研究

研究課題名（英文） Collective Motions of Bose-Fermi Mixing Gases and Molecular Creative Dynamics

研究代表者

丸山 智幸 (MARUYAMA TOMOYUKI)

日本大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：50318391

研究成果の概要（和文）：

ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)とフェルミ縮退系の二つが混合したボーズ・フェルミ(BF)混合気体の時間依存ダイナミクスを理論的に計算するための理論シミュレーション法、ゼロ温度でTDGP+Vlasov, 有限温度でTDGP+VUU法の数値計算コードを開発した。そして、それを用いることで、違法性大きなトラップや有限温度といった、実際の実験で行われていながら従来の理論計算では行うことができなかった、様々な条件でのBF混合気体の集団運動の理論的研究を行った。さらに、スケーリング法等の巨視的理論法を用いて双極子分子気体の集団運動ダイナミクスの研究も行った。

研究成果の概要（英文）：

We construct the numerical simulation method to describe the time-dependent dynamics of the bose-fermi (BF) mixing gas which includes the Bose-Einstein condensation (BEC) and the degenerate Fermi gas: the TDHP+Vlasov approach for the zero temperature and the TDGP+VUU approach for the finite temperature. By using these simulations, then, we study various kinds of collective oscillations in BF mixing gases by calculating the time evolution of these systems with largely deformed traps. Furthermore, we also investigate collective motions of electric dipolar molecular gases in a theoretical approach with the macroscopic picture.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：物理学 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, ボーズ・フェルミ混合系, 集団運動, 輸送理論

## 1. 研究開始当初の背景

有限多体系で実際に現れ実験で観測される集団運動の多くは、波長が系のサイズと同程度か長いものが多く、そのような研究は国内では余りなされていなかった。

近年、京都大学の低温実験グループは Yb 原子, Sr 原子等の様々な同位体を持つ元素を用いた実験を開始した。様々な同位体の組み合わせを用いることで、原子間の相互作用を変化させることが可能である。また、ボース・フェルミ混合気体の実現にも成功し、次の段階として集団運動の研究を開始した。

しかしながら、実際の実験で使用されるトラップは異方性も大きく、系の温度もゼロでないなど、従来の線形応答を基本とした理論での記述には限界があり、理論研究を行うためには、系の時間発展を直接解く必要が存在した。

また、近年のレーザー技術の発展により、2 原子対を束縛させた分子気体も実現がされるようになり、分子生成を含む混合気体のダイナミクスに関する関心も高まっていた。

## 2. 研究の目的

(1) 京大低温グループの実験を支援するために、多くの同位体の組みあわせを試し、どのような集団運動が興味深い結果、特に、線形応答では記述できないような振る舞いを示すかを探索するとともに、実際に実験で得られた結果の解析を行う。

(2) 分子の生成、分解過程が集団運動のダイナミクスにどのように影響するかを明らかにする。

(3) 双極子分子気体の集団運動を研究することで、相互作用が異方性、長距離到達性を持つときの多体系の性質を解明し、異方流動を伴う集団運動といった新しい現象の可能性を探る。

## 3. 研究の方法

(1) 凝縮ボソン波動関数の時間発展を時間依存 Gross-Pitaevskii (TDGP) 方程式で記述し、フェルミ気体の位相空間密度の時間発展 Vlasov 方程式で記述し、二つの方程式結合して解くことで、ゼロ度でのボース・フェルミ混合気体の時間発展を計算する。Vlasov 方程式を数値的に実際に解くために、テスト粒子法を用いた。これにより計算でのトラップに対する制限がなくなり、実験に近い条件で理論計算が可能となる。

(2) 有限温度での時間発展を求めるため、凝縮ボソン以外に熱ボソンを導入、その時間発展をフェルミ原子同様 Vlasov 方程式で記述

できるものとした。さらに、原子間の衝突も導入し、フェルミ原子、熱ボソンを記述する方程式を Vlasov-Uhling-Uhlenbeck (VUU) 方程式とした。

(3) 線形応答理論の結果と比較するために、球形トラップでの系に限り、乱雑位相近似 (RPA) を用いた計算を行う。

(4) 異方トラップでの線形応答の結果を予想するため、集団座標を導入し、RPA の結果を巨視的描像で近似するスケーリング法での計算を行った。

また、このスケーリング法を用いることで、時間発展計算がすぐに実行できないような、異方性の非常に大きな準低次元系での集団運動の計算を行った。

## 4. 研究成果

(1) TDGP+Vlasov 法を用いて、極低温原子気体を用いた温度ゼロのボース・フェルミ (BF) 混合系の時間発展を直接計算し、その集団運動についての理論的研究を行った。

その上で、球対称形で四重極振動の計算を実行、従来多く用いられていた線形応答理論に基づく RPA の結果と比較した。その結果、ボソン・フェルミオン間力が弱いとき時間発展を直接説く方法と RPA 法の結果は一致するが、相互作用が強くなると二つの方法に大きな差が生じることを示した。特に、強い引力の場合にフェルミ気体が急激に膨張し、このため初期状態では含まれていない単極振動モードが発生し、これが線形応答では記述できない原因であることを示すことが出来た。

(2) 同様の計算を、実験で設定されている異方性の大きな葉巻型トラップに拡張し、息吹振動の研究を行い球対称形のものと同様の結論を得た。このような異方性の大きな系では RPA を適応させることが難しく、今まではほとんど理論解析が行なわれてこなかった。

この研究において、比較のためにスケーリング法での計算を行い、時間発展計算による結果との比較を行った。に結果として、球対称トラップ以上に、二つの結果は一致することが分かった。

(3) ゼロ温度の BF 混合系での時間発展計算に使用していた理論模型である TDGP+Vlasov 法に、熱ボソンおよび粒子間衝突の効果を導入した TDGP+VUU 法を開発した。これにより京都大学の実験グループで実現した Yb 同位体を用いた BF 混合系の集団運動に対し、有限温度でかつ異方性の大きな葉巻型トラップという非常に実験に近い条件

で理論研究を行うことができた。

今回は計算の比較的楽な低温度に焦点を絞り、BF混合系の集団運動における温度効果を研究した。これまでこの結果、ゼロ温度から有限温度にすると全体に減衰が起こること、強い引力で発生するフェルミ気体の急激な膨張といった現象が抑えられることを示した。

(4) 一様無限系での双極子分子気体の基底状態の計算を行い、分子間の相互作用が強くなると系全体が不安定になることを示した。

(5) 双極子フェルミ分子気体について半古典近似を適用、この系の従うVlasov方程式における平均場の座標依存性、運動量依存性を示した。その上で、トラップを開放したときの気体の膨張基の計算を、摂動論の範囲での解析的な近似計算を行い、平均場の効果により観測で得られる分子の運動量分布が膨張前からどのように変化をするかを議論した。

(6) 準低次元系での集団運動の研究を行い、準1次元系-3次元系-準2次元系とが連続的に変化していく様子を摂動の範囲で示した。従来は準低次元系では粒子が移動できる次元だけで運動が記述できると考えられていたが、凍結されていると考えられる次元の運動も決して無視できないことを示した。

(7) 上記の研究とは別に、本研究での基本となる輸送理論を強磁場を含む原始中性子星内部のニュートリノ伝搬の計算に応用し、超新星爆発直後に形成される中性子星が非常に速い速度で運動するパルサーキック現象を、強磁場によるニュートリノ放出の非対称性で説明できることを示した。

#### 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 14 件)

① C.Y. Ryu, T. Maruyama, T. Kajino, G. Mathew and M.K. Cheoun, “Spin change of a proto-neutron star by the emission of neutrinos”, Phys. Rev. C85, #045803 (2012) 査読有.

② T. Nishimura and T. Maruyama “Breathing Oscillations and Quasi-Low-Dimensional Structures of Weakly-Interacting Degenerate Fermi Gases in Highly-Anisotropic Traps”, JPSJ 81, #044001 (2012) 査読有.

③ C.Y. Ryu, T. Kajino, T. Maruyama and M.K. Cheoun, “Properties of the proto-neutron star with smeared trapped neutrinos”, Phys. Rev. C83, #018802 (2011) 査読有.

④ T. Maruyama, “Off-Mass-Shell Behaviors of Nucleon Self-Energies and the Gamow-Teller Sum Rule in the Relativistic Hartree-Fock Approach”, PTP 125, 1171-1184 (2011) 査読有

⑤ T. Maruyama, N. Yasutake, T. Kajino, M.K. Cheoun and C.Y. Ryu, “Asymmetric neutrino emission from magnetized proto-neutron star matter including hyperons in relativistic mean field theory”, Phys. Rev. D. 83, 081303(R) (2011) 査読有

⑥ T. Maruyama, N. Yasutake, T. Kajino, M.K. Cheoun and C.Y. Ryu “Asymmetric Neutrino Reaction from Magnetized Proto-Neutron Stars in fully Relativistic Framework including Hyperons”, Proceedings of “The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies”, 406-408, (2011) 査読有

⑦ Y. Pehlivan, T. Kajino, T. Yoshida and T. Maruyama “On the Neutrino Self Refraction Problem from a Many-Body Perspective” Proceedings of “The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies” pp189 - 194 (2010) 査読有

⑧ T. Nishimura and T. Maruyama “Free expansion of a weakly-interacting dipolar Fermi gas” JPSJ, .79, #08300-1 (2010) 査読有

⑨ T. Nishimura and T. Maruyama “Quantum Dynamics of a Dipolar Fermi Gas in Free Expansion”, Lazer Physics 20, 1177-1181 (2010) 査読有

⑩ T. Maruyama and H. Yabu, “Breathing Oscillations of Bose-Fermi Mixtures with Yb Atoms in the Prolate Deformed Traps”, Laser Physics, 20, 1169-1176 (2010) 査読有

⑪ 丸山智幸, 梶野敏貴, 安武伸俊,  
M.K. Cheoun, C.Y.Ryu  
「強磁場を持つ原始中性子星におけるニュートリノ散乱」  
素粒子論研究 118 巻, A88-A90 (2010)  
査読無

⑫ 西村拓史, 丸山智幸,  
「フェルミ双極分子の極低温気体の動力学」,  
素粒子論研究 116 巻, F66 - F68 (2009)  
査読無

⑬ T. Maruyama and H. Yabu,  
“Quadrupole oscillations in Bose-Fermi mixtures of ultracold atomic gases made of Yb in the time-dependent Gross-Pitaevskii and Vlasov equations”,  
Phys. Rev. A 80, #043615 (2009) 査読有  
(Virtual Journal of Atomic Quantum Fluids -- November 2009 に選択)

⑭ D.Mancusi, K.Niita, T.Maruyama, and L.Sihver,  
“Stability of nuclei in peripheral collisions in the JAERI quantum molecular dynamics model”,  
Phys. Rev. C79, # 014614 (2009) 査読有

[学会発表] (計 28 件)

① 丸山智幸  
「サブスレッシュホールド軽イオン入射反応での K-Kbar 対生成エネルギーの決定」  
日本物理学会年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日  
(関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

② 松田裕一, 西村拓史, 藪博之,  
「双極フェルミ原子および分子を含む BF 混合気体の分子形成における不安定性」  
日本物理学会年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日  
(関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

③ T. Maruyama  
“Neutrino Emission from Magnetized Proto - Neutron Stars and Pulsar Kicks in Relativistic Mean Field”  
2nd Workshop for Hadron & Astro - Nuclear Physics,  
2012 年 3 月 9 日 (韓国航空大学校)

④ 藪博之, 丸山智幸,  
「極低温ボース・フェルミ混合気体の振動励起状態の時間発展と集団運動」  
Ultracold Gases: Superfluidity and Strong Correlations (USS-2012), JAEA, CREST,  
2012 年 1 月 13 日 (東京理科大学神楽坂キャンパス森戸記念会館)

⑤ T. Maruyama, T. Kajino, N. Yasutake,  
J. Hidaka, M.K. Cheoun, C.Y. Ryu and G.J. Mathew  
“Asymmetric Neutrino Reaction And Pulsar Kick In Magnetized Proto-Neutron Stars In Fully Relativistic Framework”  
The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies  
2011 年 11 月 13-16 日 (理化学研究所)

⑥ 松田裕一, 西村拓史, 藪博之  
「双極分子の形成をとまなう化学平衡過程と相の不安定性」  
日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 21-24 日  
(富山大学五福キャンパス)

⑦ 西村拓史, 丸山智幸, 藪博之  
「極低温原子分子混在気体の動力学」  
日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 21-24 日  
(富山大学五福キャンパス)

⑧ 丸山智幸  
「クオーク物質での偽ベクトル型スピン偏極とテンソル型スピン偏極の比較」  
日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 16-19 日  
(弘前大学文京町キャンパス)

⑨ 丸山智幸, 日高潤, 安武伸俊, 梶野敏貴,  
M.K. Cheoun, C.Y. Ryu, G.J. Mathews  
「トロイダル型強磁場を持つ原始中性子星でのニュートリノ放出によるスピン・アップ, スピン・ダウン」  
日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 16-19 日  
(弘前大学文京町キャンパス)

⑩ T. Maruyama, T. Kajino, N. Yasutake,  
M.K. Cheoun, and C.Y. Ryu  
“Asymmetric Neutrino Reaction And Pulsar Kick In Magnetized Proto-Neutron Stars in Fully Relativistic Framework”  
19th Particles & Nuclei International Conference,  
2011 年 7 月 24-28 日 (MIT, アメリカ)

⑪ 丸山智幸  
「有限温度ボース・フェルミ混合系での集団運動の研究」  
第 8 回 原子・分子・光科学 (AMO) 討論会 (招待講演), 2011 年 6 月 17-18 日  
(東京大学本郷キャンパス)

- ⑫ T.Maruyama, T. Kajino, N. Yasutake, M.K. Cheoun, C.Y. Ryu  
 “Asymmetric Neutrino Reaction in Magnetized Proto-Neutron Stars in Fully Relativistic Approach”  
 Workshop on Hadron Nuclear Physics, 2011年2月23日  
 (POSCO International Center, Pohang, 韓国)
- ⑬ 丸山智幸, 梶野敏貴, 安武伸俊, M.K. Cheoun, C.Y.Ryu  
 「ストレンジネスを含む強磁場原始中性子星内部でのニュートリノ散乱, 吸収および運動量移行」  
 KEK 理論センター研究会『ストレンジネス核物理 2010』, 2010年12月2日  
 (高エネルギー加速器機構)
- ⑭ T.Maruyama, T. Kajino, N. Yasutake, M.K. Cheoun, C.Y. Ryu  
 “Asymmetric Neutrino Reaction from Magnetized Proto-Neutron Stars in fully Relativistic Framework including Hyperons  
 The 11th Asia Pacific Physics Conference, 2010年11月16日  
 (上海光大会展中心, 中華人民共和国)
- ⑮ T.Nishimura and T.Maruyama  
 “Free Expansion of a Polarized Dipolar Fermi Gas”  
 The 11th Asia Pacific Physics Conference 2010年11月17日  
 (上海光大会展中心, 中華人民共和国)
- ⑯ T.Maruyama and H.Yabu,  
 “Collective Oscillations in Bose-Fermi Mixtures at Finite Temperature in Time-Dependent Approach”  
 The 11th Asia Pacific Physics Conference, 2010年11月17日  
 (上海光大会展中心, 中華人民共和国)
- ⑰ 丸山智幸  
 「極低温ボース・フェルミ混合気体での集団運動の研究」  
 基研研究会「大振幅集団運動の微視的理論」  
 2010年10月25-27日  
 (京都大学基礎物理学研究所)
- ⑱ 丸山智幸, 藪博之  
 「TDGP+VUU 方程式による有限温度ボース・フェルミ混合系での集団運動の研究」  
 日本物理学会秋期大会, 2010年9月23-26日  
 (大阪府立大学, 中百舌鳥キャンパス)
- ⑲ 松田裕一, 西村拓史, 藪博之  
 「双極子フェルミ分子を含む化学平衡過程の相構造」  
 日本物理学会秋期大会, 2010年9月23-26日  
 (大阪府立大学, 中百舌鳥キャンパス)
- ⑳ 丸山智幸, 梶野敏貴, 安武伸俊, M.K.Cheoun, C.Y.Ryu.  
 「強磁場を持つ原始中性子星内部でのニュートリノ散乱の研究」  
 日本物理学会秋期大会, 2010年9月11-14日  
 (九州工業大学戸畑キャンパス)
- ㉑ 西村拓史, 丸山智幸,  
 「双極子フェルミ気体の量子崩壊」  
 日本物理学会年次大会 2010年,3月20-23日  
 (岡山大学, 津島キャンパス)
- ㉒ 松田裕一, 西村拓史, 藪博之  
 「双極分子の形成をともなう語句低温 BF 混合気体の化学平衡」  
 日本物理学会春季大会, 2010年3月20-23日  
 (岡山大学, 津島キャンパス)
- ㉓ 丸山智幸, 梶野敏貴, 安武伸俊, M.K.Cheoun, C.Y.Ryu.  
 「強磁場を持つ原始中性子星内部でのニュートリノ散乱の研究」  
 日本物理学会年次大会 2010年,3月20-23日  
 (岡山大学, 津島キャンパス)
- ㉔ 丸山智幸, 藪博之  
 「Yb 同位体を用いたボース・フェルミ混合気体の有限温度での集団運動」  
 日本物理学会秋季大会, 2009年9月25-28  
 (熊本大学)
- ㉕ 西村拓史, 丸山智幸  
 「双極フェルミ気体の集団運動の理論的研究」,  
 日本物理学会秋季大会, 2009年9月25-28  
 (熊本大学)
- ㉖ 丸山智幸  
 「強磁場をもつ原子中性子星におけるニュートリノ散乱の研究」  
 基研研究会「熱場の量子論とその応用」,  
 2009年9月3-5日  
 (京都大学基礎物理学研究所)
- ㉗ T.Maruyama and H.Yabu  
 "Breathing Oscillations of Bose-Fermi Mixtures with Yb Atoms in the Prolate Deformed Traps"  
 18th International Laser Physics Workshop.  
 2009年7月13-17日.  
 (World Trade Center Barcelona, スペイン)

⑧ T. Nishimura, and T. Maruyama  
"Quantum Dynamics of a Dipolar Fermi Gas in  
Free Expansion"  
18th International Laser Physics Workshop.  
2009年7月13-17日.  
(World Trade Center Barcelona, スペイン)

[図書] (計2件)

① T. Maruyama, E. Nakano, T. Tatsumi,  
"Relativistic Spin-Polarization and Ferro-  
magnetism in Quark Matter", (Nova Science)  
Horizons in World Physics. Vol.276  
Chapt. 7 (pp209-264) 担当 (2011)

② H. Yabu and T. Miyakawa  
"Bose-Einstein Condensates: Theory,  
Characteristics, and Current Research", (Nova  
Science), Chap. 10 (pp233-260) 担当 (2010)

[その他]

ホームページ等

[http://hp.brs.nihon-u.ac.jp/~tomo/kenkyuu/tomo.  
htm](http://hp.brs.nihon-u.ac.jp/~tomo/kenkyuu/tomo.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

丸山 智幸 (MARUYAMA TOMOYUKI)  
日本大学・生物資源科学部・教授  
研究者番号：50318391

### (2) 研究分担者

藪 博之 (YABU HIROYUKI)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号：60202371

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

西村 拓史 (首都大学, 研究生)  
お茶大アカデミック・プロダクション・  
特任リサーチフェロー  
研究者番号：30538351