

## 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 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340116

研究課題名（和文） KRb 原子間相互作用の制御を用いた極低温量子ダイナミクスの研究

研究課題名（英文） Study of ultracold quantum dynamics using the controlled KRb inter-atomic interaction

研究代表者

渡辺 信一（WATANABE SHINICHI）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：60210902

研究成果の概要（和文）：

ドーナツ型トラップ中の 2 成分希薄混合ガスについて、現象の理論的予測を行った。希薄混合ガスの 2 成分に任意の角運動量を初期値として与えて相互作用を変化させると、2 成分間での角運動量のやり取りによって、非自明な運動が起こることを見出した。同時にドーナツ型トラップの作成を進展させた。また、FFR 極低温分子を対象に SPSS 法と ChET 法の双方を用いて、分子生成率の温度依存性を計算した。原子の BEC 化が分子生成に大きな影響を与えることを確認し、 $T_c$  以下での実験の重要性を指摘した。

研究成果の概要（英文）：

We studied the two-component dilute gas in a toroidal trap theoretically, thus predicting what phenomena would occur. Fixing the initial values of the angular momentum of each component of the dilute gas and varying the interaction strength, we found the occurrence of a nontrivial motion of the components caused by the exchange of angular momentum. At the same time, we advanced the construction of the toroidal trap. As for molecular formation rate, we applied SPSS and ChET methods to evaluate its temperature dependence. The molecular formation rate is strongly affected by the growth of the atomic BEC, pointing out the importance of experiments at temperatures below  $T_c$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：原子・分子・光科学

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：極低温分子、BEC、量子統計、ドーナツ型トラップ

## 1. 研究開始当初の背景

光結合（光会合）による KRb 極低温極性分子基底状態生成の最近の報告[1]により、極低温原子・分子と光に関する分野で新展開が幕を開けようとしている。原子間相互作用は

Fano-Feshbach 共鳴(FFR)を用いて制御できるので、例えば  $^{41}\text{K}$  と  $^{87}\text{Rb}$  の双方をボース凝縮させれば、成分間の相互作用が制御された 2 成分 BEC が実現する。異種核成分間の相互作用を制御した混合 BEC は最近、

Firenze のグループ [2]が実現したが、その性質やダイナミクスを研究するには至っていない。また制御された低温原子系における低温分子生成には、原子の量子統計性が重要な意味を持つことが明らかだが、FFR 共鳴分子の研究は BEC 相転移温度  $T_c$  以下では充分に行われていない。量子統計性に依拠する分子生成率の核種依存性を吟味する必要がある。

また、これまでの量子気体の研究は、主に 3 次元調和振動子トラップ中で行われてきたが、トラップの形状をドーナツ型にすることで、周期的に閉じた系が実現され、新しい物理のプラットフォームを与える。なお、いままでにドーナツ型トラップ中での BEC を実現した例はあるが[3]、トラップの周期性を積極的に利用した研究はまだない。ドーナツ型トラップを構築すること自体極めて重要である。

## 2. 研究の目的

混合極低温希薄原子系のドーナツ型トラップ中でのダイナミクスおよび分子生成に関する総合的な研究を行う。そこで以下の具体的な項目について研究を実施すると同時に、海外研究者との相互乗り入れにより、国際協力に根差したグローバルな研究ネットワークも形成する。

### (1) BEC の回転位相整合性のブロッキングとダイナミクス :

相互作用の制御された 2 成分 BEC を用いて、次の興味深い思考実験が考えられる。ドーナツ型トラップ中で Rb の BEC が回転している場合、Onsager-Feynman の循環量子化によって、BEC の流れる速度は量子化されなければならない。ここで、図 1 のように K の BEC が円周上の一部を占有しているとする。K-Rb 間の斥力相互作用が強い場合、Rb は K の領域に侵入することができないので、循環の量子化は適用されない。この状況下で仮に K-Rb 間の斥力相互作用を弱くすると、Rb は K の領域に侵入するため、循環の量

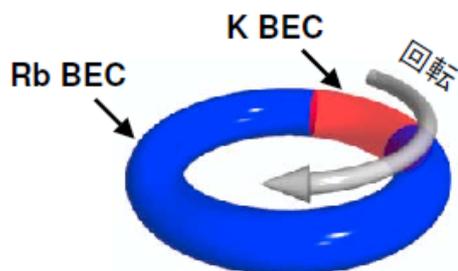


図 1 : BEC の回転位相整合性ブロッキング

子化条件が再び課されるが、全角運動量は保存されなければならない。すなわち、循環の量子化と角運動量保存が競合し、非自明な現象が期待される。このように、K-Rb 間の相互作用を制御するだけで、循環量子化条件を制御することができ、超流動体の回転に関する深い洞察を得る。

### (2) ① 低温分子生成のダイナミクスと量子統計 :

極低温基底分子生成の成功[1]により、研究対象が一気に拡大した。その背景には磁場掃引と磁場変調 RF 会合法を用いた FFR 分子の生成がある。高密度の基底分子生成にはまず十分な FFR 分子が必要なため、磁場の時間変化と  $^{40}\text{K}^{87}\text{Rb}$  の FFR 分子生成メカニズムの関係を理論的に深く理解しなければならない。量子統計を踏まえた研究を通して、極低温分子生成のみならず、極低温における反応ダイナミクスに関わる新発見も得る。

### ② 多体 Landau-Zener 問題 :

極低温分子の生成に関わる基本的なメカニズムは異なる断熱電子状態間の Landau-Zener(LZ)型非断熱遷移[4]による。一方、用いられる原子集団の密度は希薄ながら十分に高く、単純に孤立 2 原子が分子状態へ遷移するという描像は修正を要する。適切な多体ハミルトニアンを用いて、多体効果が 2 原子間 LZ 遷移に及ぼす影響を調べる。

[参考文献] :

- [1] K.-K. Ni *et al.*, *Science* **322**, 231-235 (2008)
- [2] G. Thalhammer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 210402 (2008)
- [3] C. Ryu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 260401 (2007)
- [4] E. Hodby *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 120402 (2005)

## 3. 研究の方法

以下の要領で課題に取り組んだ。

### (1) ドーナツ型トラップ中の回転位相整合性のブロッキング

2 成分 BEC の「回転位相整合性のブロッキング」に関する理論研究を行い、実験に先行して最適な条件やパラメータを明らかにしておく。研究手段は 2 成分 BEC のダイナミクスを記述する非線形シュレディンガー方程式 (グロス・ピタエフスキー方程式) の数値シミュレーションである。一般的な 2 成分グロス・ピタエフスキー方程式を数値的に解くプログラムは既に開発済みなので、これをドーナツ型のトラップポテンシャルがある場合に拡張する。1 次元、2 次元系に簡単化

した予備的シミュレーションは既存の計算機で実行可能であるが、実験との連携には精密な3次元空間のシミュレーションが必要である。

原子間相互作用をさまざまに変化させ、系のダイナミクスを調べる。初期の回転角速度や相互作用の変化率などのパラメータを変えて系統的にシミュレーションを行い、興味深い現象が起こる条件を明らかにする。また実験においてどのような観測を行えば良いかを明らかにする。これらのパラメータを指針に、ドーナツ型トラップの技術開発を行う。

## (2) ① 理論：極低温分子の生成と量子統計

位相空間における古典描像から、モンテカルロ法によって、分子対の数の温度依存性を求める Stochastic Phase Space Sampling (SPSS) 法が、実験家の間で利用されている。位相空間に様々な幾何学的制約を課すことによってこの半経験的な見積りの物理的な意味を解釈してゆく。同時に渡部らが開発した平衡状態を仮定した Chemical Equilibrium Theory (ChET) 法による見積りの比較を通して、分子生成において量子統計性の果たす役割を吟味する。

## ② 理論：多体 Landau-Zener 問題

FFR 分子生成における“原子+原子 $\leftrightarrow$ 二原子分子”という過程はトラップされた多数の極低温分子間で起こることから、多粒子効果の吟味が必要である。“原子+原子”と“二原子分子”という2状態間のランダウ・ツェナー問題として捉え、多粒子系の非線形力学によって断熱極限がどのように修正されるかを擬スピンによる表示を用いて考察する。この表示によって量子系の動力学を古典力学系に射影して近似解を得て、その意味を解釈して行く。

## 4. 研究成果

### (1) ドーナツ型トラップ中の回転位相整合性のブロック

本課題の眼目である、ドーナツ型トラップ中の希薄混合ガスの2成分間の相互作用を様々な変化させた場合の、系のダイナミクスを理論と実験の両面から総合的に研究した。そこで、まず2成分BECのダイナミクスを記述する非線形シュレディンガー方程式の1次元及び3次元空間での数値シミュレーションを行い、この系のダイナミクスの理論的予測を行った。その結果、系に任意の角運動量を与えた後に相互作用を変化させると、トラップ系の周期性に起因して、系全体に与えた全角運動量

が保存されるため、成分間で角運動量がやり取りされることが初めて見出された。

理論的考察では実験との対応を視野に入れて、ドーナツ型トラップのドーナツ環の直径と太さの比は大きく取り、周期的に閉じた擬1次元系を仮定している。そのため、実験では市販の高分解能レンズや2次元操作型の音響光学偏向素子 (2D-AOD) を用いてこの系を実現する方針とした。実験装置の大きさの制約から長作動距離でかつ高開口数の非球面レンズを用いる必要があり、分解能評価を行いながら高分解能で収差の少ないレンズを選定する必要があった。実際の系に組み込んで観測した結果、 $\lambda/4$  波長板 ( $t=1$ ) + ワイヤグリッドミラー ( $t=1\text{mm}$ ) + 真空ガラスセル ( $t=5\text{mm}$ ) 越しでも分解能  $2\mu\text{m}$  を得た  $\text{NA}=0.554$ , 焦点距離  $f=40\text{mm}$  の市販レンズを選定することとした。また、擬一次元系を実現するには非常に滑らかなドーナツ型トラップが要求されるため、2D-AOD の1次回折光によって環を描画する際の回折光強度安定化技術の構築も行った。後の実験では、このポテンシャル内に BEC をトラップし、さらに任意の角運動量を与える必要があるため、2D-AOD に Direct Digital Synthesizer (DDS) からの信号を入力する。これによって、入射レーザー光の回折光でリングを描く方法を取り入れた。その際、DDS を制御する Field Programmable Logic Device (FPGA) に連続的な周波数更新可能なプログラムを作製することで、周波数変調波を生成することのできるシステムの開発と評価を行った。このとき回折光の位置は時間的に変化しているが、FPGA の動作が高速であり、原子のトラップ周波数に比べ十分速くリングを描くことができるため、原子はリング光を時間平均ポテンシャルとしてリング型に感じるができる。本システムでは変調における信号波の形は FPGA 上の RAM から読みだしているため、RAM を書きかえることで様々な被変調波 (= 回折光の形、例: 途中が切れたドーナツ環) を得ることを可能にし、これによってドーナツ型トラップ中の BEC に任意の角運動量を与えられる。

量子気体としては、磁気光学トラップされたルビジウム原子集団を光双極子トラップへ捕獲し、蒸発冷却過程の最適化を行い、位相空間密度は 0.1 程度の段階にある。今後 BEC 生成後にリング型双極子トラップへ移行し、同種原子種による異なるスピン状態を用意することで、2成分系を実現し、擬一次元系内での2成分量子気体のダイナミクスを実験的に観測し、理論的予測と比較していく。

また、2成分 BEC における回転対称な系での界面での不安定性や非線形なダイナミクスについての理論的研究を行った。

## (2) ①理論：極低温分子の生成と量子統計

JILA における実験結果を対象として、位相空間における古典描像に基づいた

Stochastic Phase Space Sampling (SPSS) 法と、Chemical Equilibrium Theory (ChET) 法の二つの統計モデルを用いて KRb 極低温分子生成率の理論的研究を実施した。特に SPSS 法については体系的な解析が存在しなかったことから、ChET との差異について今回具体的な検討を行い、有意義な結果を得た。また、重心の一致する系である 3 つの統計的な組み合わせ、 $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{K}$  (fermion-fermion)、 $^{39}\text{K}$ - $^{39}\text{K}$  (boson-boson)、 $^{39}\text{K}$ - $^{40}\text{K}$  (boson-fermion) について量子統計性の果たす役割を検討した。

SPSS 法と ChET 法の結果を比較すると、ともに位相空間密度の上昇につれて分子生成率が上昇するという物理的に妥当な傾向が見られる。しかし、両手法については差異の現れる個所がある。特にボゾンが含まれる系では、BEC 臨界温度  $T_c$  以下で特異な振る舞いが現れ、bose-fermi 系においては、SPSS 法と ChET 法で分子生成率の傾向が異なる。

また、SPSS 法では、原子の持つ統計的性質への依存性を解明するため、位相空間上で原子対分布を調べた。絶対零度近傍における分布では統計的性質が顕著に反映される。ボゾンを含む系では原子のボゾン成分が BEC 化すると分子生成は大きな影響を受ける。このような解析からも bose-fermi 系は特異な傾向を示すことを確認した。

これらの結果から原子の位相空間分布がどのように分子生成率に寄与するかがわかった。また、2 つの断熱条件に対して原子の統計性がどのように反映されるかも判明した。以上の研究結果は FFR 分子のダイナミカルな計算の際、原子の位相空間分布の時間発展や時間スケールについての洞察を与えると期待される。

なお、この研究は予定通りに JILA の C. H. Greene 教授との共同研究として実施し、論文(1)として発表した。

## ② 理論：多体 Landau-Zener 問題

共同研究者の Itin はこの問題に対する半古典論を展開して、Painlevé の第二方程式に帰着することを導き、さらに、非断熱遷移がセパトリックス近傍で顕著に起こることから、セパトリックスの前と後の状態の数理的關係を漸近解の接続公式を活用して計算した。これまでの取り扱いを大きく前進させて、数理物理的に豊かな視点を与えたことから、一般の読者を対象とした解説論文が有効であると考え論文(2)として発表した。

また、状態間遷移に関連する量子ダイナミクスとして、静電場中の分子のトンネルイオン化の理論的研究を行った。

## 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 11 件) [すべて査読有り]

(1) Tomotake Yamakoshi, Shinichi Watanabe, Chen Zhang, and Chris H. Greene

“Stochastic and equilibrium pictures of the ultracold Fano-Feshbach-resonance molecular conversion rate”

10.1103/PhysRevA.87.053604

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.87.053604>

(2) Tsuyoshi Kadokura, Tomohiko Aioi, Kazuki Sasaki, Tetsuo Kishimoto, and Hiroki Saito, “Rayleigh-Taylor instability in a two-component Bose-Einstein condensate with rotational symmetry”

Phys. Rev. A 85, 013602 (2012)[4 pages]

10.1103/PhysRevA.85.013602

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.85.013602>

(3) Tomohiko Aioi, Tsuyoshi Kadokura, and Hiroki Saito, “Penetration of a vortex dipole across an interface of Bose-Einstein condensates”

Phys. Rev. A 85, 023618 (2012)[7 pages]

10.1103/PhysRevA.85.023618

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.85.023618>

(4) L. Hamonou, T. Morishita, and O. I. Tolstikhin, “Molecular Siegert states in an electric field”,

Phys. Rev. A 86, 013412 (2012) [13 pages]

10.1103/PhysRevA.86.013412

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.86.013412>

(5) 渡辺信一, Alexander P. Itin

“冷却分子の生成と解離における多体ランダウ・ツェーナー問題”, 日本物理学会誌 Vol. 66, No. 1, pp. 42-45 (2011)

(6) Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, “Dynamics of bubbles in a two-component Bose-Einstein condensate”

Phys. Rev. A 83, 033602 (2011)[6 pages]

10.1103/PhysRevA.83.033602

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.83.033602>

(7) Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, “Capillary instability in a two-component Bose-Einstein condensate”

Phys. Rev. A 83, 053606 (2011)[6 pages]

10.1103/PhysRevA.83.053606

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.83.053606>

(8) O. I. Tolstikhin, T. Morishita, and L. B. Madsen, "Theory of tunneling ionization of molecules: Weak-field asymptotics including dipole effects",

Phys. Rev. A 84, 053423 (2011) [17 pages]

10.1103/PhysRevA.84.053423

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.84.053423>

(9) Takayuki Shimodaira, Tetsuo Kishimoto, and Hiroki Saito, "Connection between rotation and miscibility in a two-component Bose-Einstein condensate"

Phys. Rev. A 82, 013647 (2010)[6 pages]

10.1103/PhysRevA.82.013647

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.82.013647>

(10) Naoya Suzuki, Hiromitsu Takeuchi, Kenichi Kasamatsu, Makoto Tsubota, and Hiroki Saito, "Crossover between Kelvin-Helmholtz and counter-superflow instabilities in two-component Bose-Einstein condensates"

Phys. Rev. A 82, 063604 (2010)[9 pages]

10.1103/PhysRevA.82.063604

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.82.063604>

(11) P. A. Batishchev, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, "Atomic Siegert states in an electric field: Transverse momentum distribution of the ionized electrons",

Phys. Rev. A 82, 023416 (2010) [14 pages]

10.1103/PhysRevA.82.023416

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.82.023416>

[学会発表] (計 9 件)

(1) T. Yamakoshi, C. Zhang, C. H. Greene, and S. Watanabe, "Statistical evaluation of ultracold molecular fraction rate"

The 23rd International Conference on Atomic Physics, Ecole polytechnique, France, Jul. 2012 (Poster, Mo-174)

(2) T. Yamakoshi, C. Zhang, C. H. Greene, and S. Watanabe, "Statistical evaluation of ultracold molecular fraction rate", 10<sup>th</sup> Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei, Taiwan, Oct. 2012 (Poster, P21)

(3) 山越智健, Chen Zhang, Chris Greene, 渡辺信一, "Fano-Feshbach 分子生成率の温度依存性: SPSS モデルと平衡理論"

日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月

(4) 相生智彦, 門倉強, 齋藤弘樹, "2 成分 BEC 界面における量子渦対の透過" 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月

(5) 佐々木一樹, 鈴木直也, 齋藤弘樹, "2

成分 BEC におけるプラトリー・レイリー不安定性" 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月

(6) 門倉強, 相生智彦, 佐々木一樹, 岸本哲夫, 齋藤弘樹, "2 成分 BEC における回転対称性を破るレイリー・テイラー不安定性" 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月

(7) 岸本哲夫, 稲田博之, 三浦拓朗, 下平崇之, 齋藤弘樹, "2 成分 BEC による回転位相整合性のブロッキングとダイナミクス観測に向けて" レーザー学会第 32 回年次大会, TKP 仙台カンファレンスセンター, 2012 年 1 月

(8) 佐々木一樹, 鈴木直也, 齋藤弘樹, "2 成分 BEC における泡の運動" 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月

(9) 下平崇之, 岸本哲夫, 齋藤弘樹, "リング型トラップにおける二成分 BEC の混合性と回転" 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 信一 (WATANABE SHINICHI)

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・教授

研究者番号: 60210902

### (2) 研究分担者

齋藤 弘樹 (SAITO HIROKI)

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 60334497

岸本 哲夫 (KISHIMOTO TETSUO)

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 70420239

森下 亨 (MORISHITA TORU)

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・助教

研究者番号: 20313405