

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14387

研究課題名（和文）強い閉じ込めポテンシャル中の普遍的な少数分子状態の観測と安定化法の探索

研究課題名（英文）Research on universal few body states under strong confinement and search for their stabilization method

研究代表者

加藤 宏平（Kato, Kohei）

大阪市立大学・南部陽一郎物理学研究所・特任助教

研究者番号：60793586

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、原子状態と分子状態の共鳴散乱現象であるフェッシュバツハ共鳴近傍に存在する少数分子状態に関する研究である。特に強い閉じ込めポテンシャル中では、新規な分子状態が安定化すると考えられ、その観測と安定化を試みた。実験的には、期間内に閉じ込めポテンシャル形成の為に高強度固体レーザーの開発に道筋をつけた。また、分子状態を形成する為に十分な原子数を得る為の実験系を構築した。理論的には、凝縮体に対する測定の影響の反作用の効果についてシミュレーションし、観測に最適なプローブ光の条件を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却原子の系の特徴はその制御性の高さにある。対象を原子から分子へと拡張することができれば、分子が持つ豊富な自由度や遠距離相互作用の活用が期待できる。フェッシュバツハ共鳴近傍に普遍的に存在する少数分子状態はその足掛かりとして重要であるが、寿命が短く利用しにくいという問題がある。本研究は強い閉じ込めポテンシャルを使って、安定化を試みるというものだが、技術的には散乱を低次元化するほどの閉じ込めポテンシャルの強度を確保するのが難しい。本研究では高強度固体レーザーの開発を進め、また分子生成に必要な装置の構築に成功した。

研究成果の概要（英文）：This research project is a study on few body molecular states existing in the vicinity of Feshbach resonance, which are resonance scattering phenomena between atomic and molecular states. It is thought that new molecular states are stabilized in a particularly strong confinement potential, and we tried to observe and stabilize it. Experimentally, we paved the way for the development of a high-intensity solid-state laser for confinement potential formation within the period. We also constructed an experimental system to obtain a sufficient number of atoms to form a molecular state. Theoretically, the effect of the back action of the measurement on the condensates was simulated, and the optimum probe light conditions for observation were investigated.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：冷却原子気体 フェッシュバツハ共鳴 少数多体系 分子会合 箱型トラップ

1. 研究開始当初の背景

原子状態と分子状態が一致する時に現れる共鳴散乱現象の事をフェッシュバツハ共鳴と呼ぶ。共鳴付近では原子間の2体の相互作用を示すパラメータである散乱長を外場を用いて自由に制御することができ、冷却原子系では原子種によらない普遍的な物理を探求するツールとして広く利用されてきた。また、共鳴を通じて緩く束縛された分子(フェッシュバツハ分子)を断熱的に生成することができる為、極低温分子の研究にも使われている。極低温分子は精密測定への応用や新奇的な物性の発現が期待されており、冷却原子系からより広範な冷却分子系への研究の発展が期待されている。共鳴付近に普遍的に存在するエフィモフ状態(図1)等の、少数分子状態は、より多様な分子状態の活用への足掛かりとして興味深い。しかしこれらの少数分子状態は、その豊富な自由度の為、振動緩和等が起きやすく寿命が短い。実験的には常に生成元である原子と生成された分子の数の素早い減少が問題となる。そこで、閉じ込めポテンシャルによって、運動の自由度を制限することによって、少数分子状態を安定化することはできないかという事を考えた。実際に散乱を低次元化することによって、新たな分子状態が安定化する事が理論的に予想されている。しかし、技術的には散乱を低次元化するには、非常に強いポテンシャルを使う必要があり、これらの光源開発等が課題となる。我々は、41カリウムと87ルビジウムの冷却原子混合系を持っている。カリウムとルビジウム間には比較的低磁場にフェッシュバツハ共鳴が存在し、異核原子の系の少数分子状態の研究に適している。実際我々は異核エフィモフ状態における原子・分子散乱共鳴の同位体シフトの検証(K. Kato et al., PRL (2017))を行っている。また、41カリウム単体にもフェッシュバツハ共鳴が存在し、同種原子・異核原子の系両方について少数分子状態の研究を行う事が可能である。本研究のさらなる応用として、異核の原子種をそれぞれ異なる次元に閉じ込める「混合次元」の系の実現も興味深い。これらの実験環境も本研究の着想に至った背景である。

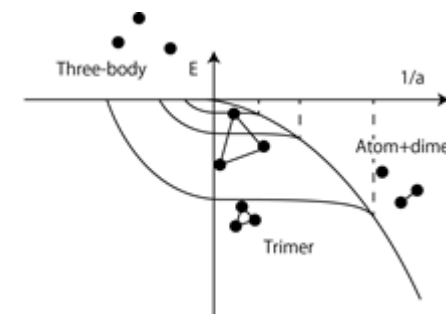


図1 フェッシュバツハ共鳴近傍のエフィモフ状態のエネルギー構造

2. 研究の目的

背景で述べた様に、本研究の目的は強い閉じ込め少数分子状態のエネルギー構造はどの様に変わり得るかを実験的に観測し、少数分子状態の普遍的な安定化方法を探求する事である。これまでの研究によって、3体束縛状態であるエフィモフ状態については3次元空間中での特性については理論・実験両面から理解が進んできている。しかし、低次元下でエフィモフ状態がどの様に変わるかについては、実験の報告は未だない。従って、実際に強い閉じ込めポテンシャルを用意し、その中で分子状態を生成・観測する事が目標となる。分子の生成効率は元になる原子の密度に依存し、観測には原子・分子数密度に依存する非弾性散乱係数を精密に測定する必要がある。従って、閉じ込めポテンシャルの形状は通常の調和型ではなく、密度が一様な箱型を用いるのが良い。特に重力による影響を無視できるように、重力方向を強い閉じ込めとした、二次元箱型ポテンシャルを作成することにした(図2)。本研究ではまず41カリウム原子単体において、研究を始めるが異核原子の系への発展も考え、87ルビジウムとの混合系にも適用できる実験系の構築を進めることにする。

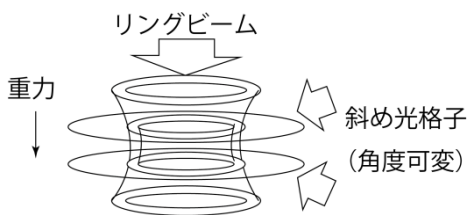


図2 二次元箱型トラップの形成

3. 研究の方法

研究目的を達成する為に、(1)41カリウムと87ルビジウムの冷却原子混合系の改良(2)閉じ込めポテンシャル形成用高強度固体レーザーの開発(3)連続撮像法を利用した高精度な原子数変化の測定を行った。以下に各方法の詳細について述べる。

(1) 41カリウムと87ルビジウムの冷却原子混合系の改良

三体分子状態である、エフィモフ状態の観測には、原子間の三体非弾性散乱係数の測定や原子・二体分子間の非弾性散乱係数の測定に現れる共鳴を検出する方法がある。どちらの場合においても、初期原子数が多い程測定精度が良くなる事が期待できる。特に原子・二体分子間の散乱を測定する場合は、十分な数の二体分子を前もって生成する事が必要となる為、生成元の原子の数が多い程有利になる。これまでの実験において、特に冷却カリウム原子の個数が少

なく、条件も安定しないという問題があった。特に本研究では、カリウム単体の実験を最初に行う為改良が必要である。従って、冷却原子源を改良する事によって原子数を従来の 10 倍程度に増大させることを目指した。また、二体分子の生成やエフィモフ状態の直接観測には、RF 会合を用いる事が有効であると考えられる。その為高強度の RF が照射できるようにトラップ周りの光学配置を変更する。

(2) 閉じ込めポテンシャル形成用高強度固体レーザーの開発

目的で述べた様に、二次元箱型ポテンシャル中に原子を導入して実験を行う。形状としては、図 2 で示すように、上下方向からのリング形状のビーム（リングビーム）と水平方向からの斜め光格子（シートビーム）を組み合わせて形成する。斥力ポテンシャルを用いる事で、原子を光の無い領域に閉じ込め、一様な密度分布を達成する事ができる。強い閉じ込めを実現するには、シートビームに高強度のレーザーを使用する必要がある。使用する波長はカリウム原子とルビジウム原子の両方から正に離調をとった 755 nm 程度に決定した。比較的共鳴に近い波長を選択することにより、強い閉じ込めを実現できるようにしている。一方でこの波長帯は半導体レーザーの発振波長の端に位置する為、高出力を実現しにくいという問題がある。そこで、755 nm でシングルモード発振が可能で、高出力を期待できるアレクサンドライト結晶を用いた半導体励起固体レーザーの開発を行うことにした。

(3) 連続撮像法における測定の反作用 エフィモフ状態を観測するには、(1) の項でも述べた様に非弾性散乱係数を正確に測定する必要がある。その際、初期原子数の揺らぎが実験上は問題となる。原子の場合は、非共鳴光をプローブ光に用いた連続撮像法を用いる事で初期原子数の揺らぎに依存しない測定が可能になる。基本的には、これらの測定は熱的原子集団に対して行うが、より低温の測定を行う為に凝縮体を用いて実験を行う場合もある。その場合、熱的原子集団に対しては、ほぼ非破壊測定と見なせるが、凝縮体に対してはプローブ光の反作用により、密度変調が起きる可能性が報告されている。従って、実際の実験条件に対してシミュレーション実験を行いプローブ光の反作用が問題にならないプローブ光の条件について調査する。

4. 研究成果

研究方法で述べた各項目についての研究成果について述べる。

(1) 41カリウムと87ルビジウムの冷却原子混合系の改良

まず冷却された原子の数を改善する為に、原子源の改良に取り組んだ。特にカリウムに対しては、実験上必要な数を確保する為には装置を頻りに調整する必要があった為、継続的な実験を困難にしていた。我々が用いる 41カリウムは自然存在比が 6.7% と低いという問題があった為、同位体存在比を高めたサンプルに変更する事でまず原子数の向上を図った。また第一段階のレーザー冷却



図 3 ルビジウム原子の二次元磁気光学トラップ。中心部の細長い蛍光がトラップされたルビジウム原子

を三次元磁気光学トラップから二次元磁気光学トラップに変更する事で、効率良く原子を超高真空領域に送りこめる様に装置を改良した。これらの改良には真空槽の再構築が必要となるが、無事に 10^{-11} torr 程度の超高真空を達成し、また二次元磁気光学のトラップに成功した (図 3)。これにより原子数の向上が見込まれる。

また、蒸発冷却用の磁気トラップについて改良を行った。レーザー冷却と蒸発冷却を磁気輸送により別の場所で行う事により、RF アンテナを原子・分子集団の近くに置くように改良を行った。これにより、高強度の RF を照射できるようになり RF 会合を高速に行えるようになった。

(2) 閉じ込めポテンシャル形成用高強度固体レーザーの開発

アレクサンドライト結晶を用いた固体レーザーの開発を進めた。同様の発振波長帯のシングルモードレーザーとしては Ti-Sapphire 結晶を用いたレーザーが有名であるが、励起波長が半導体レーザーの発振波長から外れている。アレクサンドライト結晶は励起波長が 635 nm であり、半導体レーザーで励起する事ができる。従ってアレクサンドライト結晶を用いた半導体励起固体レーザー (DPSS: Diode Pumped Solis State Laser) の開発に取り組んだ。DPSS は Nd:YVO4 結晶や Nd:YAG 結晶を用いた発振波長 1064 nm のレーザーが有名で情報は豊富にあるが、アレクサンドライト結晶については、報告例が少ない。従って、まずレーザー設計に必要な基本的な結晶特性の測定を行った。図 4 (a) に 755nm におけるアレクサンドライト結晶 (Cr^{3+} ドープ率 0.2%) の小信号利得の励起光パワー依存性を示した。小信号利得の目標は 2% 程度を考えていたが、励起光出力 5W で結晶温度を 90 度程度に上昇させることで十分な利得を得ら

れることを確認した。
 また、レーザー共振器の設計には、共振器内の空間モードの制御が重要となるが、その為には励起光による熱レンズ効果がどの程度かを確認しておく必要がある。実際の測定を図4(b)に示す。測定により熱レンズ効果は比較的小さいという事が分かった。これらの測定により、適切な共振器の設計により、数 W 程度の出力が可能である事が分かった。これは、目標とする強い閉じ込めポテンシャルの形成に十分な出力である。実験は、筆者の指導の下、修士学生の京谷隆正が主導して行い、研究成果を修士論文にまとめた。

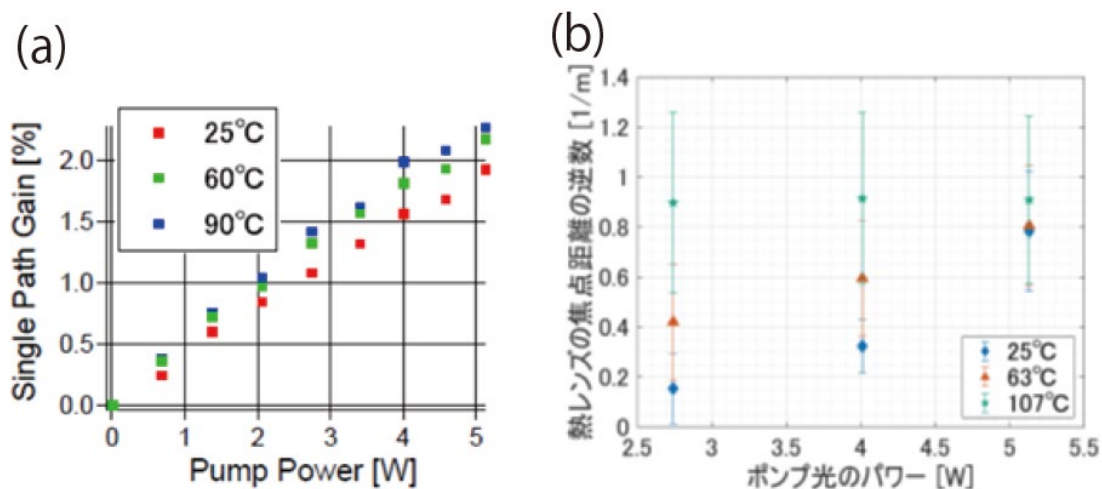
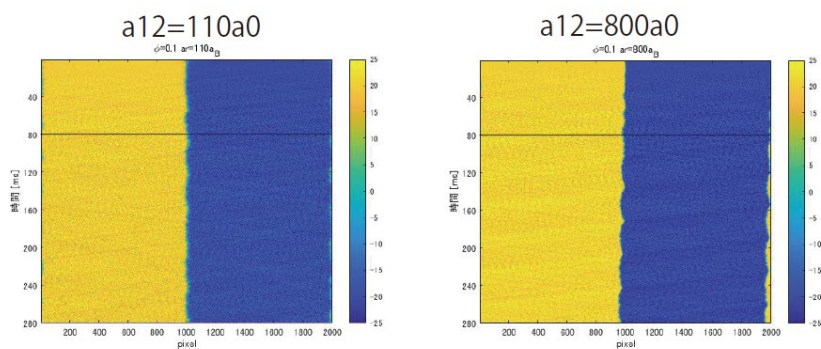


図 4 (a) 755nm におけるアレクサンドライト結晶 (Cr^{3+} ドープ率 0.2%) の小信号利得の励起光パワー依存性 (b) 熱レンズ効果の励起光パワー依存性

(3) 連続撮像法における測定の反作用

連続撮像法におけるプローブ光による反作用を調べる為に、シミュレーション実験を行った。弱測定の理論を用い凝縮体がどの様に密度変調を受けるかを、一様トラップ中での混合凝縮体の界面の動きを解析することで調査した。この様な条件において、最も密度変調が顕著に観測できると考えられる。特に凝縮体間の相互作用の大きさによって密度変調の大きさが変化すると考えられる。リング型の擬 1 次元箱型トラップ中に粒子数はそれぞれの原子が 2000 個ずつを考え 87Rb の内部状態の混合系を考える。密度変調は光強度に依存する。1 回の測定で光散乱確率は 0.0013 となるような光強度で 4 ms 毎に 20 回測定を行う事を想定した。図 5 に密度分布の時間変化の様子を示した。相互作用が大きい領域でわずかに密度分布のドリフトを見る事ができる。しかし影響はわずかであり、適切にプローブ光強度を設定すれば、イメージングの S/N を保ったまま、密度変調を小さくできる事が分かった。これらの成果は船波寛史, 井上慎, 堀越宗一, 加藤宏平の 4 氏によって日本物理学会で口頭発表された。

図 5 連続撮像による擬 1 次元混合凝縮体の密度分布の時間変化のシミュレーション。縦軸は時間を示し、横軸は空間スケールを示す。カラースケールは原子数の比率を示す。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 船波寛史, 井上慎, 堀越宗一, 加藤宏平
2. 発表標題 スピン自由度のあるBECの位相コントラストイメージングにおける測定の反作用の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------