

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340117

研究課題名(和文)量子縮退した極性分子気体の実現

研究課題名(英文)Producing quantum degenerate gas of polar molecules

研究代表者

井上 慎(Inouye, Shin)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10401150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：ルビジウム原子とカリウム原子が同時にボース凝縮した系を出発点に、量子縮退したKRb分子気体の作成を試みた。フェッシュバッチ共鳴を用いれば、冷却原子2個から冷却分子を加熱なしに作成することが可能であるが、同時にエフィモフ共鳴という3個の原子間の相互作用も発生し、トラップからのロスの原因になる。我々はフェッシュバッチ共鳴に用いるバイアス磁場の関数として、原子間の非弾性散乱レート、及び原子分子間の非弾性散乱レートを綿密に調べた。その結果、原子分子間のエフィモフ共鳴を観測することに成功した。異なる原子核を含む系のエフィモフ共鳴の観測例は非常に少ないため、このデータを元に理論の構築が進んでいる。

研究成果の概要(英文)：The goal of the project was to produce a quantum degenerate gas of KRb molecules from a dual Bose-Einstein condensate, which is made of rubidium and potassium atoms. By sweeping the magnetic field across a Feshbach resonance, it is possible to produce ultracold molecules from pairs of ultracold atoms. However, the enhancement of interaction between two atoms at Feshbach resonance also causes an enhancement of interaction between three atoms, which results in resonant loss feature called "Efimov resonance". We measured inelastic loss caused by atom-atom scattering and atom-molecule scattering, and succeeded in observing a resonant loss feature in the latter. The data is now used by theory groups for constructing a theory for Efimov resonance for hetero-nuclear systems.

研究分野：量子縮退気体

キーワード：量子エレクトロニクス 原子・分子物理 低温物性

1. 研究開始当初の背景

量子縮退した極性分子気体の実現は量子エレクトロニクス分野の悲願の一つである。バッファガスや電場勾配を用いて分子の運動を冷却する実験が進む一方で、冷却原子を加熱せずにつなげて分子にする方法の可能性も検討されていた。2004年に筆者を含むグループが異なる原子種間のフェッシュバッハ共鳴の観測に成功すると、冷却原子をつなげて極性分子を作る方法が一気に現実味を帯びることとなり、世界の複数の研究室で実験が始まった。2008年、米国コロラド大学(JILA)のグループはルビジウム(Rb)とカリウム(K)のボース・フェルミ混合気体を量子縮退「近く」まで冷却した後に、フェッシュバッハ共鳴と誘導ラマン断熱遷移(STIRAP)を用いて振動回転基底状態に移すことで極低温の極性分子の作成に成功した。この実験は非弾性散乱の断面積における双極子-双極子相互作用の検出など、極低温極性分子の2体の物理の開拓においては大きな成功を収めたが、量子縮退まで冷却できていないため、極性分子の多体の物理の追求には不十分であることが明らかになった。一方、化学的に不安定なKRb分子ではなく、化学的に安定なNaKなどの他の分子種の冷却分子の作成を目指した実験も世界各地で始まった。

2. 研究の目的

量子縮退した極低温極性分子気体を作成することが本研究の最大の目標である。そのためには先行研究で限界が指摘されているボース・フェルミ混合気体ではなく、ボース・ボース混合気体を用いる。極性分子の量子縮退を目指すためには、2原子種のボース凝縮体を高効率でフェッシュバッハ分子に変換しなくてはならない。そのときに問題になるのはフェッシュバッハ共鳴近傍での非弾性散乱である。3体の非弾性散乱の係数を詳細に調べ、可能ならば異核のエフィモフ共鳴との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

東京大学工学部の井上研究室ではカリウム41とルビジウム87の同時ボース凝縮体を作る装置が稼働しており、フェッシュバッハ共鳴を観測するためのバイアス磁場の印加や、波長1 μ mのファイバーレーザーを用いて3次元光格子の作成も可能であった。しかしフェッシュバッハ共鳴を一回横切ったとき(=分子が出来るはず)ともう一度横切った元の磁場に戻ったとき(=分子は原子に戻るはず)の原子数を比べて分子の生成を確認しようとしたが、もともとボース凝縮体中の原子数が大きくゆらいでいたため、確認のとれ

るデータを確立することができず、フェッシュバッハ分子生成の検証は事実上、失敗に終わっていた。フェッシュバッハ分子の生成を確認する方法としては、2原子種ボース凝縮体中の原子数のゆらぎを除去するか、分子を分離してイメージングする方法を開発することが考えられた。また、フェッシュバッハ共鳴近傍での非弾性散乱の測定精度の向上のために非破壊イメージング法を導入することも考えられた。

4. 研究成果

フェッシュバッハ共鳴近傍の非弾性散乱において、次の2つの知見が得られた。これらの成果についてはまとめて投稿論文を作成中である。

・ボソン混合系における、3体ロス係数の精密な測定方法の開発(学会発表、論文執筆中)

ボソン系では複数の3体衝突のチャンネルがあるため、それらを分離するためには通常の3体ロス係数の測定よりもさらに高いS/Nが求められる。本研究ではこの問題を非破壊イメージングの導入によって解決した。同一原子集団の時間発展を直接観測することにより、測定における初期原子数のゆらぎの影響を取り除くことに成功した。その結果、3体ロス係数で判断する限り、41K-87Rb混合系の複数のフェッシュバッハ共鳴間の比較、もしくは40K-87Rb混合系のフェッシュバッハ共鳴との比較において、大きな違いは見られないことが分かった。この結果は理論的予想と一致する。

・原子とフェッシュバッハ分子間の2体の非弾性散乱レートにおけるエフィモフ共鳴の観測(学会発表、論文執筆中)

フェッシュバッハ分子の束縛エネルギーが、エフィモフ状態の3体の束縛エネルギーと一致すると共鳴的なロスが生じると考えられる。ロスを感度よく観測するためには十分な数のフェッシュバッハ分子を用意することが必要になるが、本研究では、3次元光格子中でフェッシュバッハ分子を作成することでこの問題を解決した。測定された原子・フェッシュバッハ分子のロス係数の共鳴を示す散乱長(a_{\cdot})はカリウムの同位体を用いた別の研究室の測定とわずかな差が見られた。この差の起源はフェッシュバッハ共鳴の性質の違いに起因すると考えられるため、異核原子のエフィモフ状態の理解においても、フェッシュバッハ共鳴のパラメーターを取り入れた理論を構築する必要を示していると考えられる。

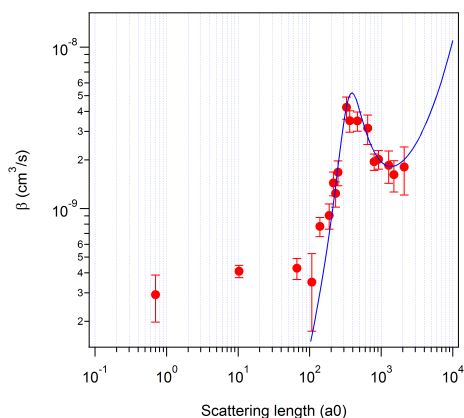


図1：エフィモフ共鳴。41Kと87Rbのフェッシュバツハ共鳴において、フェッシュバツハ分子(41K87Rb)と原子(87Rb)の非弾性散乱の係数を散乱長の関数としてプロットすると、共鳴的な増強が観測された。

本研究の元々の動機であった、極低温極性分子の生成に向けた実験としては、下記のような進展があった。これらの成果については日本物理学会で口頭発表を行った。

・フェッシュバツハ分子数の増強(学会発表)

本研究開始以前は、原子数の減少で分子の作成を確認しようとしたが、そもそもの原子数のゆらぎのために分子の観測は不可能であった。我々はシュテルンゲルラツハ法により、分子を空間的に分離してイメージすることに成功した。しかし原子気体の空間的重なりにより不安があったため、この時に使用できた原子気体は熱分布原子気体であり、観測できた分子数は約1000個、原子から分子の変換効率にして数パーセントにとどまっていた。分子数の生成効率を改善するため、我々は3次元光格子ポテンシャルにボース凝縮体をロードし、高密度の条件でフェッシュバツハ分子を生成することを試みた。ルビジウムとカリウムの重力差からくる位置のずれを補正する特殊波長の光トラップの波長を微調整することでルビジウムとカリウムの空間的重なりを改善や光格子ポテンシャルを作るビームのビーム径を拡大することでポテンシャルの不均一性を除去することに成功し、最終的には分子数を約8000個、分子の生成効率にして約20%と大幅な改善に成功した。この20%という生成効率は米国JILAのグループの実験の分子生成効率を凌ぐものとなっている。

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0件)

[学会発表](計9件)

加藤宏平, 長田有登, 小林淳, 井上慎
「41K-87Rb 混合系の原子・分子散乱におけるエフィモフ共鳴の観測」2015年3月21日～2015年3月24日, 早稲田大学(東京都新宿区)

加藤宏平, 長田有登, 小林淳, 井上慎,
「41K87Rb 混合系における三体衝突現象」
2014年9月7日～2014年9月10日, 中部大学春日井キャンパス(愛知県春日井市)

Shin Inouye, "Two recent results on KRb system in Tokyo", CUA seminar(招待講演), 2014年4月15日～2014年4月15日, ハーバード大学、ケンブリッジ(米国)

Shin Inouye, "Experiments on ultracold KRb molecules", Gordon Research Conference on Atomic Physics(招待講演), 2013年6月23日～2013年6月28日, ニューポート(米国)

Shin Inouye, "Experiments on ultracold KRb molecules" US-Japan seminar(招待講演), 2013年4月11日～2013年4月11日, 奈良県新公会堂(奈良県奈良市)

Shin Inouye, "Experiments on ultracold KRb molecules", The 72nd Okazaki Conference on "Ultimate Control of Coherence"(招待講演), 2013年1月8日～2013年1月10日, 岡崎コンファレンスセンター(愛知県岡崎市)

加藤宏平, 齋藤祐介, 上原城児, 長田有登, 小林淳, 井上慎, 「3次元光格子中で長寿命な41K87Rb Feshbach分子の生成」
日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月11日～2012年9月14日, 京都産業大学(京都府京都市)

加藤宏平, 齋藤祐介, 小林淳, 上田正仁, 井上慎, 「41K87Rb Feshbach分子の生成と観測」,
日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月24日～2012年3月27日, 関西学院大学(兵庫県西宮市)

K. Kato, T. Fukuhara, J. Kobayashi, Y. Saito, T. Kishimoto, M. Ueda and S. Inouye, "RF spectroscopy of 41K87Rb Feshbach molecules", Gordon Research Conference on Atomic Physics, 2011年6月26日～2011年7月1日, ウェストドナー・マウントスノーリゾート(米国)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等：
<http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 慎 (INOUE, Shin)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：10401150

(2) 研究分担者：なし

(3) 連携研究者：なし