

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654128

研究課題名(和文) ラジオ波を用いた冷却原子気体の相互作用制御

研究課題名(英文) Tuning interaction between ultracold atoms using microwave radiation

研究代表者

井上 慎 (INOUE, 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) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：フェッシュバッチ共鳴を起こすためには分子状態のエネルギーが必要なため、光会合信号の観測を行った。ルビジウム87のボース凝縮体を用い、ルビジウムのD1線から240~300GHz負に離調した周波数領域に幅10MHz程度の共鳴を3本観測した。文献値との比較から、これらは0g-の $v=188\sim 190$ の振動準位に対応する事が分かった。高速の散乱長制御の観測方法として、カリウムとルビジウムのボース凝縮体が相互散乱長 $80.8a_0$ で相分離する際に生じる変調不安定性を位相コントラスト法により観測した。得られた空間周波数スペクトルは $22(4)\mu\text{m}$ にピークを持ち、平均場からの予想とエラーの範囲内で一致した。

研究成果の概要(英文)：We performed a photo-association (PA) spectroscopy in order to know precise value of the binding energy of the molecular state. By irradiating a Bose-Einstein condensate of Rubidium 87 with a laser beam whose frequency is red detuned by 240~300GHz from D1 line of Rubidium, we observed three PA resonances whose width were on the order of 10 MHz. By comparing obtained data with literature, we found those resonances correspond to  $v=188\sim 190$  of 0g-. The spatial profile of dual-BEC is sensitive to the mutual scattering length ( $a_{12}$ ). In order to detect the fast switching of scattering lengths, we developed a method to observe spatial profile of dual-BEC in situ. By setting  $a_{12}=80.8a_0$ , we observed the two BECs phase separate by exciting modulation instabilities. Observed wavelength of excitation ( $22(4)\mu\text{m}$ ) matches quite well with predictions based on mean-field theory.

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：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

1998年のナトリウム原子を用いた実験成功以来、バイアス磁場によるフェッシュバツハ共鳴は冷却原子間の相互作用を制御する手法として稀に見る成功を納めてきた。中でも冷却フェルミ気体に対してフェッシュバツハ共鳴を適用し、BCS-BEC クロスオーバーを実現した実験は冷却原子を用いた強相関原子気体の研究を可能にしたという意味で量子エレクトロニクス分野だけでなく、物性物理全体に大きなインパクトを与えた。他にも1次元におけるソリトンの実現やエフィモフ状態の実現など、様々な成果が得られている。

しかしバイアス磁場を用いたフェッシュバツハ共鳴には問題点もいくつか存在する。バイアス磁場の値はひとつなので、一度に複数の共鳴にはアクセスできない。また、違う共鳴にアクセスしようとしても磁場を発生するコイルのインダクタンスのために高速で切り替えができない。実際、散乱長を切替える速さはBCS-BECクロスオーバーの実験において原子対を分子に投影(プロジェクション)する際に大きな問題となっている。マイクロ波によるフェッシュバツハ共鳴が可能になれば複数の共鳴に同時に高速にアクセスすることが可能になり、可能な実験が飛躍的に増えることが予想された。

### 2. 研究の目的

高速かつ柔軟な相互作用制御法、特にマイクロ波を用いたフェッシュバツハ共鳴の可能性を探る。さらに相互作用の変化に敏感な物理量を観測し、散乱長の高速制御を確認する

### 3. 研究の方法

フェッシュバツハ共鳴を起こすには分子状態のエネルギーが正確に分かっている必要がある。束縛準位のエネルギーは第一原理計算からある程度は予測できるが、分光データからポテンシャルを補正してフィードバックする作業が必ず必要である。

ルビジウム87やカリウム41は基底状態に $F=1$ と $F=2$ の2つの超微細構造準位をもつが、今回、必要なのは上の準位( $F=2$ )の束縛状態のエネルギーである。しかしM1遷移で直接遷移を探るのは難しいため、E1遷移の2光子で分光する必要がある。具体的にはまず1光子光会合で励起状態の束縛準位を探す。そして強い1光子遷移を観測した後に、周波数差をつけた2本目のレーザーを入射し、1光子光会合信号の減少という形で2光子共鳴を観測する。2本のレーザー光の周波数差が分子状態の束縛エネルギーに対応する。

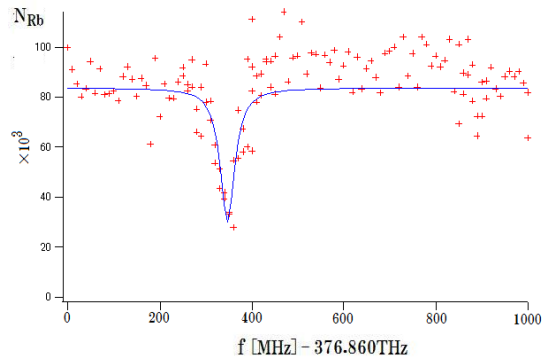
マイクロ波によって高速の散乱長制御が達成されたとして、その観測方法を開発することも非常に重要である。ボース凝縮体のサイズや運動量分布といった静的性質、音波の

速度といった動的性質、さらに熱的分布する原子気体でも非等方な温度分布を作り出しその緩和定数から観測する弾性散乱レートなど、多くの物理量が気体を構成する原子の散乱長に依存している。各種の実験を比較して最も散乱長に敏感な物理量を選択する。

### 4. 研究成果

#### ・1光子光会合の観測

ルビジウム87のボース凝縮体を用い、1光子の光会合信号を検出した。ルビジウムのD1線(795nm)から240~300GHz負に離調した周波数領域に幅10MHz程度の共鳴を3本観測した。文献値との比較から、これらは0g-の $v=188\sim 190$ の振動準位に対応する事が分かった。この値を元にポテンシャルの再計算を行い、 $v=186$ の共鳴エネルギーを計算し、その周波数のレーザー光をボース凝縮体に入射したところ、光会合による共鳴を確認することができた。カリウムで同様の実験を試みたが、原子数が少なく安定度も悪かったため、1光子光会合信号を検出することができなかった。また、2光子光会合信号も検出する



ことができなかった。

図1:  $^{87}\text{Rb}_2$ の0g-に属する $v=190$ の光会合信号。(上原城児 修士論文「アルカリ原子の光会合の研究(2013)」p.28)

#### ・2原子種ボース凝縮体の相分離による散乱長の精密測定

井上研ではカリウム41とルビジウム87の混合ボース凝縮体を生成することが可能である。2種のボース凝縮体は相互散乱長 $a_{12}$ がそれぞれの原子種の散乱長( $a_{11}$ ,  $a_{22}$ )の幾何平均よりも大きいと相分離し、小さいと混ざり合う。相互散乱長を相分離の閾値よりわずかに小さい値に設定しておき、閾値を横切ると2種のボース凝縮体は相分離を始める。具体的にはボース凝縮体は密度変調に対して不安定になり(Modulation Instability)ドメインを作りながら相分離するであろう。この現象は散乱長の変化に敏感な物理量として有力である。

散乱長の高速変調の効果を直接観測する

には、2種のボース凝縮体の密度分布を実時間で観測できる事が望ましい。そこで我々は2種のボース凝縮体両方に対してほぼ同時に位相コントラストイメージングを取得するシステムを作り上げた。具体的にはルビジウムとカリウムのD2線からそれぞれ200MHz程度負に離調した光を用意し、プローブ光として用いた。原子気体に照射したプローブ光はレンズ系によってカメラ上に結像されるが、途中プローブ光の位相を90度だけ回転する光学系を組むと、原子気体による位相遅れが光の強度分布に変換され、カメラで直接観測する事が可能になる。このときルビジウムとカリウムのD2線の波長が近い(780nmと767nm)ため、同じ位相板を用いて両方のプローブ光とも同時にほぼ90度の位相回転が得られることを用いている。

我々は1次元に長い光トラップ(3方向のトラップ周波数がそれぞれ40,7,100Hz)を用意し、その中でカリウム41とルビジウム87の混合ボース凝縮体を生成した。質量の差から来る重力方向のずれは特殊な波長(809nm)の光トラップを使うことで解消した。この波長はルビジウムの共鳴線に近いので、重いルビジウム原子により強い閉じ込めが可能であり、その結果重力方向の位置のずれを解消できる。

このような擬1次元系において、2種のボース凝縮体が相分離する閾値は直交する方向の閉じ込めからくる変更を受ける。実験では、最初に2種のボース凝縮体を混合の領域に準備し、突然相互散乱長を相分離側に磁場で変更して変調不安定性(Modulation Instability)が励起される様子を観測した。特に、生成されるドメインの空間的サイズは励起されるModulation Instabilityの波長に対応すると期待され、Gross-Pitaevskiiの平均場の議論から予測可能である。

位相コントラスト法で得られたイメージはルビジウム87とカリウム41で差分をとった後、フーリエ解析にかけて空間的周波数を抽出した。相互散乱長 $80.8a_0$ で得られた空間周波数スペクトルはわずかであるが $1/22(4)\mu\text{m}$  辺りにピークを持ち、平均場からの予想とエラーの範囲内で一致する結果が得られた。

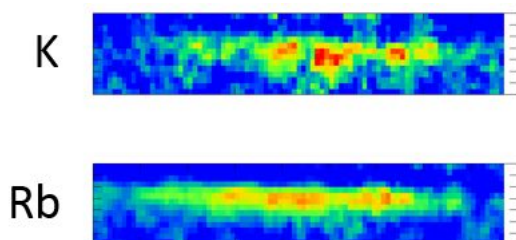


図2:  $^{41}\text{K}$  と  $^{87}\text{Rb}$  の混合ボース凝縮体の相互散乱長  $a_{\text{KRb}}=80.8a_0$  での相分離を位相コントラストイメージングで捉えた画像。画像の大き

さは  $227\mu\text{m} \times 36\mu\text{m}$ . (長田有登 修士論文 "Experimental study on the dynamics of a dual-species Bose-Einstein condensate with tunable interactions(2014)" p.109)

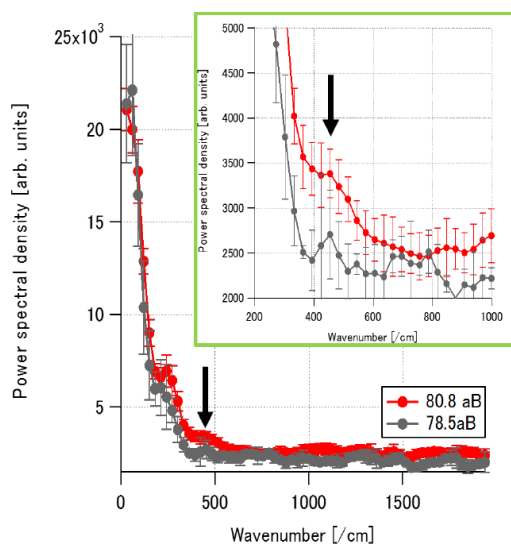


図3:  $^{41}\text{K}$  と  $^{87}\text{Rb}$  の混合ボース凝縮体の相互散乱長  $a_{\text{KRb}}=80.8a_0$  での相分離過程で生じた密度ゆらぎの空間フーリエ変換。平均場近似からは  $434\text{cm}^{-1}$  の変調不安定性 (Modulation Instability) を生ずると予想される。比較のため相分離を起こさない  $a_{\text{KRb}}=78.5a_0$  のデータを解析したのもも示している。インセットは拡大図。(長田有登 修士論文 "Experimental study on the dynamics of a dual-species Bose-Einstein condensate with tunable interactions(2014)" p.113)

### 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2件)

長田有登, 加藤宏平, 早川悠介, 小林淳, 井上慎, 「相互作用可変な二原子種超流動体の動的振舞いの非破壊観測」日本物理学会第69回年次大会、2014年3月28日、東海大学湘南キャンパス

Shin Inouye, "Experiments on ultracold KRb molecules", Gordon Research Conference on Atomic Physics(招待講演), 2013年6月23日-28日、米国ロードアイランド州ニューポート

[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：  
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