

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287102

研究課題名(和文) ナトリウムボース・アインシュタイン凝縮体の超精密光操作に関する研究

研究課題名(英文) Study on precise optical manipulation of sodium Bose-Einstein condensates

研究代表者

盛永 篤郎 (Morinaga, Atsuo)

東京理科大学・理工学部・名誉教授

研究者番号：90246687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：多原子数ナトリウムボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を安定に発生できる装置を整備し、かつ、ボース凝縮体を非破壊測定できる位相コントラストイメージング光学系を開発した。発生させたボース凝縮体に2方向から離調周波数を制御した誘導ラマン光を照射することで、30ms間高指向性原子波レーザーを発生できた。また、2つの超放射パルス照射することで2個の運動量ゼロのボース凝縮体が発生でき、その特性を調べた。BECに非対称磁場を印加し超流動性を示すシザーモードが励起でき、このモードと四重極モードとのカップリング条件を明らかにした。BECの重心運動を利用し、 $m=0$ 状態のBECに渦度1の渦を発生できた。

研究成果の概要(英文)：We developed a stable system which produces Bose-Einstein condensations (BECs) with a large number of sodium atoms and a system of the phase contrast imaging for non-distractive measurement of BECs. Spatially separated fragments of BECs in different Zeeman states were extracted from BECs irradiated by a two-photon Zeeman Raman laser pulse and the mechanisms were investigated. By selecting the detuning frequency between the incident two photons for Zeeman Raman output coupling, a collimated atom laser was extracted from sodium BECs for a period of 30 ms. Two fragments of BECs with zero velocity were generated by an irradiation of two short non resonant laser pulses along the long axis of BECs. Using an additional off-axis Helmholtz coil, we could generate a scissors mode and observe an alternate oscillation between the scissors mode and the high-lying quadrupole mode. Finally, using a central motion of BECs, we could generate a vortex with a vorticity of 1 in the $m=0$ state.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：ボース凝縮 原子レーザー 超放射BEC 量子渦 原子干渉計

1. 研究開始当初の背景

1995年に米国で希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実験が成功して以来、20年近くが経つ。この間、世界の多くの研究所で BEC が実現し、しかもボース凝縮が達成された原子種は10以上に及び。その結果、ボース凝縮体を用いた超低温物性、コヒーレント量子操作の画期的研究が幅広く行われた。しかし、これまでの研究では 10^6 個程度の小さな原子数のボース凝縮体を用いた基礎研究が多く、レーザー光のように実应用的な応用に用いられるにはまだ至っていない。2011年に研究代表者のグループではナトリウム原子を用いて大きな個数のボース凝縮体の作成に成功した[1]。そこで、ボース凝縮体の応用の可能性に資するため、大きなボース凝縮体を光で精密に光学操作する原子光学の研究を行うこととした。

2. 研究の目的

本研究は、ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) を光で精密に操作する原子光学の研究を行い、ボース凝縮体の応用の可能性に資することを目的とする。そのため、再現性良く繰り返し発生させた多原子数ナトリウム BECに、申請者らがこれまで研究してきた3つの光操作

- (1) 2光子誘導ラマン光の照射による原子波レーザーの発生
- (2) 赤方離調した短パルス光を照射して Kapitza-Dirac 超放射ボース凝縮体の発生
- (3) 磁場反転や、非対称光双極子場を用いて操作し、BECに集団運動の励起や量子渦の発生を行うことで、BECに生じるコヒーレンス特性や超流動性を研究する。

3. 研究の方法

本研究は、最初に、代表者らがこれまで開発してきた多原子数ナトリウム BEC 発生装置を安定に再現性良く動作できるように改良する。また、測定を効率的に信頼性を高めて行うことが可能な、非破壊測定法の位相コントラストイメージング法を開発する。

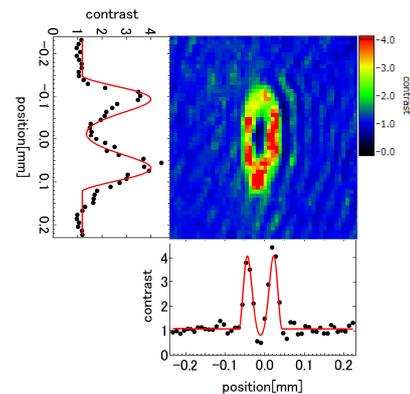
次に、再現性良く繰り返し発生させた BEC を用いて、申請者らがこれまで研究してきた以下の3つの光操作を精密に行う。

- (1) 2光子誘導ラマン光を照射して非束縛準位に遷移させ、ハイゼンベルグ限界に近い高指向性原子レーザーを、持続時間10秒を目標に連続発振させる。
- (2) 赤方離調した短パルス光を照射して Kapitza-Dirac 超放射ボース凝縮体を発生させ原子干渉の研究を行う。
- (3) BEC を磁場反転や、非対称光双極子場を用いて操作し、BEC に集団運動や量子渦を励起して超流動性を調べる。

4. 研究成果

ナトリウム原子ビーム装置を整備し、磁気トラップに多数の原子数の捕捉を行い、再現性良く BEC を発生させるために、以下の改良を行った。まず、ゼーマン減速用磁場コイルを水冷方式にして、温度的に安定な原子ビームの減速を可能とした。次に、クローバリーフコイル中のカーベチャーコイルの水冷法を改善し、磁場の温度ドリフトの大きさをこれまでの70秒間 $6\mu\text{T}$ から $1\mu\text{T}$ に小さくできた。更に補正コイルの可動範囲を2.3倍に広くできた。

一方、非破壊測定のため、ユトレヒト大で開発された位相コントラストイメージング法を行った[2]。作成



した位相コントラストイメージング法は石英製、直径 $59\mu\text{m}$ 深さ 240nm で位相シフト量 $5/3\pi$ の平行平板、これに1:1の光学系を用いることで、図のような位相コントラストイメージを得ることが出来た。離調周波数は 300MHz で、この場合30枚程の連続測定が可能であることが確認できた。

(1) 原子レーザーの研究

BEC から高指向性原子レーザーを発振させるために、最初にゼーマン準位間の2光子誘導ラマン遷移による原子レーザー発振の最適条件を調べた。ラマン光のボース凝縮体への入射角度、共鳴周波数、ラビ周波数を決定し、8ms間の連続発振に成功した。また、ビーム広がり幅の測定を行った。この結果を

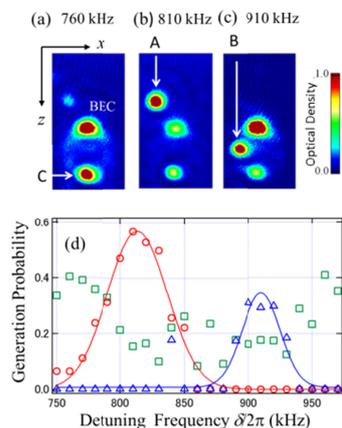


図2 誘導ラマンと超放射誘導ラマン

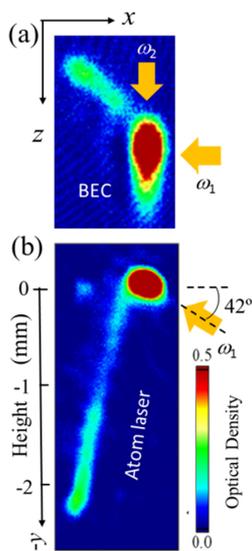


図3 原子レーザーを連続的に発振すること成功した。20ms間の例を図3に示す。

2方向、2周波ラマン光の照射により放出されるBECの状態や条件を明確にし、その放出メカニズムを解明した。これは、原子レーザーの超時間発振に役立つと期待される。(現在論文投稿中)

(2) 超放射原子干渉計の研究

赤方離調した短パルス光をボース凝縮体の軸方向から照射して生じる超放射の発生位置について調べた。これを利用して、2回短パルス光を照射することで2つの速度ゼロの超放射原子集団を発生できた(図4)。そこで、短パルス光の時間間隔を変えることで2つのボース凝縮体を重ね合わせたが、干渉パターンの観測には至らなかった。

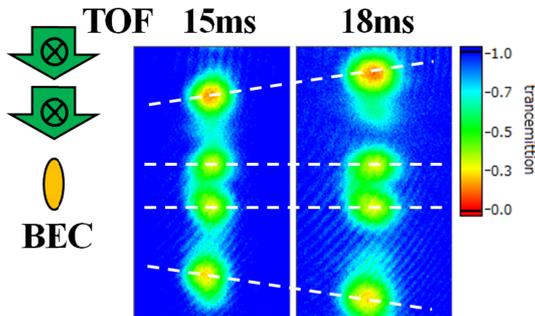


図4 2短パルス照射による超放射

(3) 超流動性の研究

BECに非対称磁場を印加して最少磁場の大きさをms程度で短時間操作することで、多様な集団運動を励起できた。特に、超流動性を示すシザースモードが観測でき、その特性について詳細に調べた。集団運動のシザースモードと四重極モードの周波数は2倍の関

もに、1.7 GHz高効率音響光学変調器を用超微細構造間のラマン遷移での照射条件、共鳴周波数について調べ、パルス発振させることに成功した。

しかし、2光子ゼーマンラマン遷移では、ゼーマン状態間に、誘導ラマン、超放射ラマン、超放射が生じる。図2のように選択的に誘導ラマンの

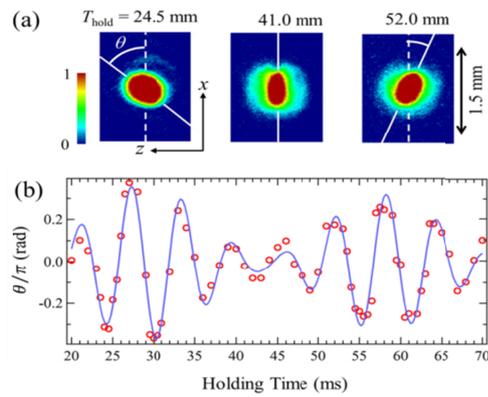


図5 シザースモードとカップリング

係に近くカップリングを起こす。そこで、モードカップリング条件について実験的に求め、交互発振のメカニズムを明らかにすることができた(図5)。

一方、超流動性の渦の発生を起こすため、最初、ゼロ点磁場を反転させるベリー位相法について調べた。しかしこの方法で $m=-1$ 状態に渦度の渦の発生は出来なかった。そこで、この方法を発展させ、マヨラナ遷移を用いた結果、 $m=0$ の準位に量子渦の発生を見ることが出来た(図6)。

$m=0$ 状態にできる渦度の渦の報告はこれまでになく、その、発生メカニズムについてシミュレーションする方法を検討した。これにより、BECの超流動性についての重要な情報を得られると期待できる。(論文作成中)

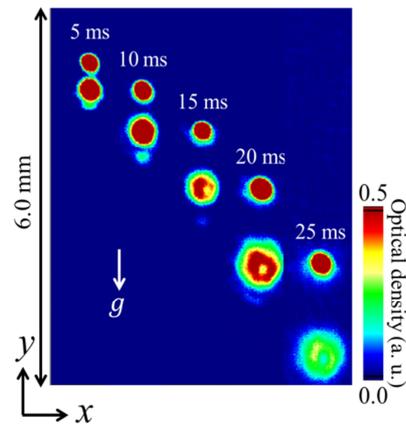


図6 $m=0$ 状態に発生した渦度1の渦

<引用文献>

[1] T. Shobu, H. Yamaoka, H. Imai, A. Morinaga, M. Yamashita "Optimized evaporative cooling for sodium Bose-Einstein condensation against three-body loss" Phys. Rev. A 84, 033626 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.84.033626.
 [2] R. Meppelink, R. A. Rozendaal, S. B. Koller, J. M. Vogels, and P. van der Straten, Phys. Rev. A 81, 053632 (2010).

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 3 件)

A. Morinaga and Y. Hasegawa "Frequency shift between coherent superposition states induced by the Berry phase evolving linearly in time"

Phys. Rev. A 92, 013403(2015). DOI: 10.1103/PhysRevA.92.013403.

M. Yamazaki, K. Wakayama, M. Harada, A. Morinaga, "Alternate Oscillation between Scissors and Quadrupole Modes in Sodium Bose-Einstein Condensates" J. Phys. Soc. Jpn. 84, 044001-1-5 (2015).

DOI: 10.7566/JPSJ.84.044001.

I. Inano, K. Nakamura, A. Morinaga

"Linearly aligned superradiant Bose-Einstein condensates diffracted by a single short laser pulse" Phys. Rev. A 87, 043627-1-6 (2013).

DOI:10.1103/PhysRevA.87.043627

[学会発表](計 13 件)

A. Morinaga "Frequency shift between coherent superposition states induced by Berry phase" 8th Frequency symposium and Metrology (Potsdam, Germany) Oct. 12 (2015).

原田美穂, 山崎将大, 村上紀之, 盛永篤郎 「多重短パルス照射による超放射 BEC」日本物理学会(早稲田大学) 2015 年 3 月 22 日(日)

山崎将大, 若山和貴, 盛永篤郎 「非対称磁場を用いたナトリウムボース凝縮体の集団励起のカップリングと量子渦の観測」日本物理学会(早稲田大学) 2015 年 3 月 22 日(日)

村上紀之, 原田美穂, 盛永篤郎 「誘導ラマン光を用いたナトリウムボース凝縮体からの放射」日本物理学会(早稲田大学) 2015 年 3 月 22 日(日)

原田美穂, 山崎将大, 奥岡真也, 盛永篤郎 「多重短パルス照射による超放射 BEC」日本物理学会(中部大学) 2014 年 9 月 8 日

M. Murakami, S. Okuoka, A. Morinaga "A continuous atom laser extracted from sodium condensates using two-photon Raman transition" 24th International conference of Atomic Physics 2014 (Washington DC, USA) Aug. 6 (2014).

M. Yamazaki, M. Harada, A. Morinaga "Scissors mode and quantized vortices generated in sodium Bose-Einstein condensates by a rapid modulation of the magnetic field" 24th International

conference of Atomic Physics 2014 (Washington DC, USA) Aug. 7 (2014).

奥岡真也, 村上紀之, 盛永篤郎 「2 光子誘導ラマン遷移を用いたナトリウム原子波レーザーの生成と評価」日本物理学会

(東海大学湘南校舎) 2014 年 3 月 28 日
山崎将大, 原田美穂, 盛永篤郎 「ナトリウムボース凝縮体からのマヨラナ遷移を用いた量子渦放出と観測」日本物理学会(東海大学湘南校舎) 2014 年 3 月 28 日
S. Okuoka, M. Murakami, A. Morinaga. "Sodium atom laser using stimulated Raman transition" Fundamental Physics Using Atoms 2014 (Odaiba, Tokyo) March 15, 2014.

奥岡真也, 村上紀之, 盛永篤郎 「ナトリウムボース凝縮体からの 2 光子誘導ラマン遷移を用いた原子波レーザーの抽出」日本物理学会(徳島大学) 2013 年 9 月 27 日

原田美穂, 奥岡真也, 山崎将大, 盛永篤郎 「位相コントラストイメージング法によるボース凝縮原子集団の非破壊測定」日本物理学会(徳島大学) 2013 年 9 月 27 日

山崎将大, 原田美穂, 盛永篤郎 「2 軸磁場操作によるナトリウムボース凝縮体の集団運動の観測」日本物理学会(徳島大学) 2013 年 9 月 27 日

[図書](計 1 件)

盛永篤郎 「レーザー冷却と科学技術」応用物理巻頭言 応用物理 82, 741-742 (2013)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

盛永 篤郎 (MORINAGA, Atsuo)

東京理科大学・理工学部・嘱託教授 研究者番号: 9 0 2 4 6 6 8 7

(3)連携研究者

青木 貴稔 (AOKI, Takatoshi)

東京大学・総合文化研究科・助教 研究者番号: 3 0 3 2 8 5 6 2

(4)研究協力者

奥岡 真也 (OKUOKA, Shinya)

原田 美穂 (HARADA, Miho)

村上 紀之 (MURAKAMI, Motoyuki)

山崎 将大 (YAMAZAKI, Masaharu)