科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 26 年 5 月 1 6 日現在

機関番号: 13401 研究種目: 基盤研究(B) 研究期間: 2010~2013 課題番号: 22340117

研究課題名(和文)原子波回路の構築と物質波ソリトンへの応用

研究課題名(英文) Formation of an atom wave circuit and its application to matter wave solitons

研究代表者

熊倉 光孝 (Kumakura, Mitsutaka)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号:30324601

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 12,800,000円、(間接経費) 3.840.000円

研究成果の概要(和文):量子力学的なコヒーレント物質波として振る舞うことが知られているBose-Einstein凝縮体では、波動伝搬に非線形性が現れるほか、非回転性に起因した特異な流れが発生する。本研究では、ソリトンなどの非線形波動の観測・操作に適したリング状の凝縮体を実現するため、凝縮体を従来の葉巻型からリング状に変形するため の光学システムを新たに開発したほか、高い自由度で流れを制御することを目的に、ラマン遷移を利用した凝縮体波動 関数の位相操作を実現するため、22 kHz程度の周波数線幅を持つ狭帯域レ ザー光源とレーザー波面の位相制御装置の 開発も行い、それぞれにおいて必要な特性を実現した。

研究成果の概要(英文): In a gaseous Bose-Einstein condensate (BEC) of atoms, nonlinear wave propagation s uch as a soliton and/or an irrotational current like a quantized vortex can be excited. For experimental s tudies for their characteristics, we aim to form a BEC in the shape of a ring, that is to say an atom wave circuit, instead of a conventional BEC in the shape of a cigar. In this research project, we developed a laser system for transforming the latter BEC into the former one with optical dipole force. In addition, for imprinting an artificial phase distribution in a BEC by the stimulated Raman transition, we made the former one with optical laser system. equency-stabilized laser source (the wavelength of 780 nm and the frequency width of 22 kHz) and the phase manipulating system for the wavefront of the laser beam.

研究分野: 数物系科学

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: ボース・アインシュタイン凝縮 レーザー冷却 原子光学 原子波 原子波ソリトン 量子渦 レーザ

ー周波数安定化 レーザー波面位相制御

1. 研究開始当初の背景

希薄原子気体の Bose-Einstein 凝縮は、ほ ぼ全ての原子が同一の量子状態を占有し、そ の原子集団としての量子力学的波動性が世 界的に広く注目されている。この Bose-Einstein 凝縮体は、コヒーレントな巨視的物 質波として振舞い、その波動伝搬には原子間 衝突による非線形性が現れることや、凝縮体 中においては非回転性あるいは超流動性に 起因する特異な流れが発生することが知ら れていた。しかし、凝縮体の示すそのような 現象についての実験的な研究は、原子のトラ ップに3次元調和型ポテンシャルや二重井 戸型ポテンシャルが用いられてきたため、閉 じ込めポテンシャルによる非一様性や凝縮 体の端での反射・擾乱が生じ、大きな制限が 存在していた。また、凝縮体の流れや波動を 人工的に自由に操作できる実験手法がなか ったため、凝縮体中に導入できる波動・流れ も限られた種類のものでしかなかった。

2. 研究の目的

波動伝搬の観測に適した新しい形状をもつ Bose-Einstein 凝縮体と、凝縮体の流れ(速度場)を高い自由度で制御可能な実験手法とを開発し、多様な非線形量子現象の実験研究に道を拓くことが目的であるが、本研究課題における具体的な目標は以下の2点である。

- (1) 円周方向の閉じ込めポテンシャルが一様で、また、端が存在しないために反射などによる擾乱も存在しない、リング状の凝縮体(原子波の回路に相当する)を新たに実現するため、従来の磁気トラップによる3次元調和ポテンシャルに捕捉した葉巻型凝縮体を、光学的に変形する形状操作システムを開発する。
- (2) 位相ステップに相当するソリトンなどの原子波や、循環が量子化された量子渦などの流れを凝縮体に導入するため、誘導ラマン遷移によるトラップ原子への光学的位相焼き付けを利用して、既存の Rb 原子凝縮体の速度場に対する操作システムを構築する。

3. 研究の方法

前節(1)、(2)の 2 つの目的に対して、それ ぞれ以下の研究を行った。

(1) Bose-Einstein 凝縮体の化学ポテンシャルは数百 nK 程度で、非共鳴レーザー光の照射によって発生する光双極子力にもとづく数 μ K程度のポテンシャルによって、容易に変形することができる。そこで本研究では、Rb 原子気体の凝縮体を実験対象に、葉巻型からリング型に変形するためのレーザーシステムの開発を行った。使用したレーザーは、Rb 原子の光学遷移(D2 遷移)の共鳴(波長780 nm)から高周波側に離調した 532 nm のレーザーと、低周波数側に離調した 1064 nm

のレーザーで、Rb 原子に対してそれぞれ正 と負のポテンシャルを印加することができ る。前者を利用して葉巻型凝縮体の中心軸付 近から原子を排除することや、後者を用いて 中心軸に垂直な面内に凝縮体を閉じ込める ことが可能で、これらを用いてリング状に凝 縮体を変形することができる。磁気トラップ 中の凝縮体は直径数μm、長さ数百μm程度 であるため、これらのレーザービームの形状 および照射位置は精密に制御する必要であ る。そこで本研究では音響光学変調器を用い たレーザービームステアリングシステムの 構築やトラップへの導入機構などの開発を 行い、そのビーム特性の評価を行った。また、 従来使用してきた二重磁気光学トラップ型 の凝縮体生成装置についても、実用可能な変 形や位相操作を実現するためには、原子数の さらなる増加と短時間での凝縮体生成が必 要で、本研究では Rb 蒸気圧の最適化、原子 移送用レーザーの特性改善、トラップコイル 冷却系の改良などを行った。また、凝縮体生 成の最終段階である蒸発冷却に利用してい る RF のノイズ対策や蒸発冷却過程の最適化 も試み、生成装置全体の見直しも行った。

(2) 誘導ラマン遷移を利用して、遷移に用い たレーザービーム波面の位相分布を凝縮体 に印加することができる。磁気トラップに捕 捉した凝縮体にこの方法を適用するには、遷 移の始状態と終状態が同じ電子状態でなけ ればならないため、状態の区別には運動状態 の相違を利用することが必要である。凝縮体 に同軸に対向して2本のレーザービームを入 射した場合、トラップ中の凝縮体の運動量は 0 であるため、誘導ラマン遷移によって一光 子反跳運動エネルギーの4倍のエネルギー が凝縮体に与えられる。このエネルギー差に 相当する 15 kHz の周波数差を遷移に用いる レーザーにあたえることで、誘導ラマン遷移 を起こして凝縮体に位相を印加することが できるが、引き続き異なる運動状態間で誘導 ラマン遷移が引き起こされると、印加された 位相が破壊されてしまう。そのため、遷移に 使用するレーザーには30 kHz以下の狭い周 波数線幅を持つ光源を用いる必要がある。本 研究ではこのようなレーザー光を準備する ため、半導体レーザー素子を用いた外部共振 器型周波数安定化レーザー光源を新たに製 作し、その出力光周波数を Pound-Dever-Hall 法によってフィネス~12,000 の狭帯域 共振器の共鳴周波数に周波数安定化するこ とを試みた。また、周波数安定化した出力光 を実際の遷移に利用するため、半導体光増幅 器によるレーザーパワーの増強システムの 製作も行った。

4. 研究成果

前節の(1),(2)の実験研究で得られた成果は、それぞれ以下に述べる。

- (1) 凝縮体変形用レーザーステアリングシステムの構築と、凝縮体生成装置の改良
- ① 凝縮体中心軸付近からの原子排除用レ ーザーシステムを構築した。使用した光源は 波長 532 nm の半導体レーザー励起固体 (DPSS)レーザーである。回折方向が直交する ように最短距離で配置した2個の音響光学変 調器を用いて、レーザー照射位置は2次元的 に微調することができる。レーザーパワーは これらの変調器に入射するRFパワーによ り変化させることができるが、RFパワーを 変化させると回折角も変化してレーザー照 射位置が大きく変化してしまうことが分か った。これを解決するため、レーザーパワー の調整には別の音響光学変調器を用いて、キ ャッツアイ方式と呼ばれる光学系の配置に より、回折角の変動を補償して出力パワーだ けを変化させるシステムを利用した。この方 法により、照射位置の変動を最小限に抑えて、 レーザーパワーと照射位置の両方を制御す るシステムを開発することができた。
- ② 凝縮体を中心軸に垂直な面内に閉じ込 めるために使用するレーザーシステムの開 発を行った。リング状凝縮体の形成には、数 $100 \mu \text{ m四方の領域にわたって、幅数 } 10 \mu \text{ m}$ 程度の閉じ込めポテンシャルを均一に形成 する必要がある。当初、波長 1064 nm の DPSS レーザーを光源として、音響光学変調 器によるレーザー照射位置の空間変調や、シ リンドリカルレンズを用いたビーム整形に よって、シート状のレーザービームを形成す ることを試みた。しかし、これらの実験の結 果、波長 532 nm の 2 本のレーザー光を、シ リンドリカルレンズで集光しながら葉巻型 凝縮体の両端に照射する方が、実験的には均 一な閉じ込めが可能であることが明らかと なった。集光後のビーム断面を短軸方向 50 μ m程度、長軸方向 20 mm 程度にすること により、2本のレーザ照射位置の中間に凝縮 体のトラップが形成できる。なお、この532 nm のレーザー出力パワーの制御にも、(1)と 同様なキャッツアイ方式に配置した音響光 学変調器を利用し、平面内への閉じ込めに必 要なレーザー光を準備することができた。
- ③ 凝縮体生成装置の改良を行い、原子数の 増強と凝縮体生成の短時間化を進めた。特に、 二重磁気光学トラップにおける原子の移送 効率が、レーザーアライメントや原子のトラ ップ位置などの僅かな実験条件の変化にあって大きく変動することや、磁気コイルの 度変化によって冷却効率が大きく低下電流で いること、磁気トラップのマグネット電流に 付随してRFノイズが発生し、これがトラ プ特性に影響を与えていることなどの問題 点が明らかとなった。これらの改善を順次進 めることで実験装置の安定度が向上し、生成 時間の短縮にもつながったが、未だ生成には

1分弱の時間が必要である。

以上のように、凝縮体をリング状に変形するためのレーザーシステムについては、トラップ方式や光学設計の試行錯誤の結果、ほぼ開発を終えることができた。これらは、これまでにない $100\,\mu$ mサイズの直径を持つ大型のリング状凝縮体を実現するために必要な手段の一つであり、今後の実験研究に当たって重要な前進である。今後、現有の凝縮体生成装置の原子数をさらに増強することによって、原子波の回路として機能するような、大型のリング状ボース凝縮体の実現につながるものと期待される。

- (2) 凝縮体位相操作用狭帯域レーザー光源の開発とレーザービーム波面の位相操作
- ① 2光子反跳エネルギー (30 kHz) 以下の約22 kHz の周波数線幅をもつ、波長 780 nmのレーザー光源の開発に成功した(図1)。使用した半導体レーザー素子の光出力は3 mW 程度であるが、周波数安定化後の出力光は0.5 mW 以下で、大きなパワーロスが発生した。そこで、半導体光増幅器による増幅を行い、誘導ラマン遷移の観測に利用できる300 mW 程度のパワーを得ることができた。

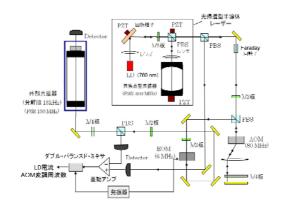


図1. 周波数安定化レーザー光源

② 凝縮体に印加する位相分布をレーザー ビーム波面に持たせるために、液晶空間位 相変調器を利用したレーザー波面位相制御 装置を製作した(図2)。量子渦対に相当す

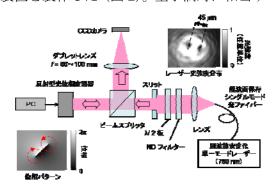


図2. レーザービーム波面の位相操作

る様々な位相分布をレーザービーム波面に 印加し、これを集光した場合の位相分布変 化についても評価を行った。その結果、40 μ m 程度のサイズにまで、印加した位相分布を保持したまま縮小することができることが分かった。一般的な凝縮体のサイブに るの μ mから数 μ mから数 μ mを緩和することも可能な μ mから数 μ mから数 μ mを緩和することも可能でよってサイズを大きくすることも可能な 実際に凝縮体に適用可能な空間スケールで位相操作を実現できることが分かった。

以上のように、Rb 原子の凝縮体において原子波位相の操作を実現するための基本的な実験基盤を準備することができた。今後、実際の極低温原子集団、あるいは凝縮体で誘導ラマン遷移を確認し、原子位相の操作に進むための重要なステップであるほか、極低温原子の量子状態の操作にも利用可能な装置であり、今後の研究展開にとっても大きな成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

① <u>熊倉 光孝</u>、原子気体におけるボース・ アインシュタイン凝縮体の位相操作、応 用物理、査読無、82、2013、773-776 http://www.jsap.or.jp/ap/2013/09/index. xml

〔学会発表〕(計9件)

- ① <u>熊倉</u> 光孝、レーザー冷却・トラップ技 術の微粒子への応用、東北大学電気通信 研究所研究会「新しい光科学の創成とナ ノ情報デバイスへの展開」、2013 年 10 月 15 日、東北大学電気通信研究所(仙台 市)
- ② <u>熊倉</u> 光孝、原子気体の Bose-Einstein 凝縮を利用した量子渦ダイナミクスの観 察、日本分光学会中部支部講演会(招待 講演)、2013 年 1 月 21 日、金沢大学(金 沢市)
- ③ <u>熊倉 光孝</u>、レーザー冷却で拓く原子気体の量子現象、日本物理学会北陸支部特別講演会(招待講演)、2012 年 12 月 13 日、富山大学(富山市)
- ④ 平井 裕也、松岡 幸広、<u>熊倉 光孝</u>、 <u>森田 紀夫</u>、Rb 原子の Bose-Einstein 凝 縮体への位相構造導入用レーザー光源の 開発、2012 年度日本物理学会北陸支部定 例学術講演会、2012 年 12 月 1 日、金沢 大学(金沢市)
- ⑤ <u>熊倉 光孝</u>、液体 He 中の粒子に対する 原子トラップ技術の応用、第2回光マニ ピュレーション研究会、2012 年 12 月 1 日、大阪大学(豊中市)
- ⑥ <u>熊倉 光孝</u>、原子波の光学的位相制御と その応用、分子研研究会(招待講演)、

2012 年 10 月 11 日、分子科学研究所(岡崎市)

- ⑦ 鈴木 伸明、山本 広大、東川 優理奈、 榎本 勝成、松島 房一、<u>熊倉 光孝</u>、 芦田 昌明、森脇 喜紀、超伝導微粒子 の空間捕捉、日本物理学会第67回年次大 会、2012年3月24日、関西学院大学(西 宮市)
- 8 平井 裕也、飯原 弘樹、<u>熊倉 光孝</u>、 森田 紀夫、光帰還法によるレーザー周 波数線幅の狭窄化、2011 年度日本物理学 会北陸支部定例学術講演会、2011 年 11 月 26 日、福井大学(福井市)
- ⑨ <u>熊倉 光孝</u>、原子波回路を用いた物質波 ソリトンの光学的制御、第58回応用物 理学関係連合講演会、2011年3月24日、 神奈川工科大学(厚木市)

[その他]

アウトリーチ活動情報

- ① <u>熊倉 光孝</u>、変化を愉しむ、OSA Student Chapter JP-NetS2013 (招待講演)、2013 年 9 月 22 日、福井大学(福井市)
- 6. 研究組織
- (1)研究代表者

熊倉 光孝(KUMAKURA, Mitsutaka) 福井大学・大学院工学研究科・准教授 研究者番号:30324601

(2)研究分担者

森田 紀夫 (MORITA, Norio) 福井大学・大学院工学研究科・教授 研究者番号:30134654