

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 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ー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 such as a soliton and/or an irrotational current like a quantized vortex can be excited. For experimental studies 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 frequency-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 μ m、長さ数百 μ m 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 \sim 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。

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 μm 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ズは数 μm から数 10 μm 程度であるが、トラップポテンシャルの勾配を緩和することなどによってサイズを大きくすることも可能であり、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 熊倉 光孝、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 熊倉 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 熊倉 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 熊倉 光孝、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、熊倉 光孝、森田 紀夫、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 熊倉 光孝、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 熊倉 光孝、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、熊倉 光孝、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、熊倉 光孝、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 熊倉 光孝、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 熊倉 光孝、変化を楽しむ、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