

## 研究課題別評価書

### 1. 研究課題名

原子波回路を用いた物質波ソリトンの光学的制御

### 2. 氏名

熊倉 光孝

### 3. 研究のねらい

レーザー冷却によって実現される希薄原子気体の Bose-Einstein 凝縮体(BEC)では、ほぼ全ての原子が最低エネルギー準位に落ち込み、原子の量子力学的な波動性が巨視的スケールにまで拡大し、原子集団全体がコヒーレントな一つの波動として振舞う。BEC の示すこのような巨視的波動性に着目し、現在、原子レーザーや原子干渉計などへの応用が活発に研究されているが、一方、この BEC が持つもう一つの大きな特徴として、原子間相互作用に起因する原子波伝搬の非線形性が挙げられる。この非線形性は、原子数スクイズド状態の生成や量子トンネル効果における自己トラッピング現象など、これまでも新しい量子現象を可能とすることが知られており、巨視的波動性と相俟って、原子集団のコヒーレントな運動操作やその応用に重要な役割を果たすと考えられる。そこで本研究では、(1)長時間に亘って擾乱の少ない状態で原子波伝搬を観測・応用するため、“原子波の回路”を新たに実現して、(2)この回路上で非線形量子現象の一つである物質波ソリトンを光学的に生成・観測し、その運動特性や衝突相互作用などを明らかにすることによって新たな非線形量子現象の開拓や原子波を利用した新規デバイスの可能性を探ることを目指している。BEC 中のソリトンは、原子波の位相ステップとして特徴付けられ、原子間相互作用が斥力であるため原子密度の窪みとして安定に伝搬する。したがって、回路上の原子数密度分布を光学的に観測することにより、原子波の位相変化を直接検出することができると期待され、ソリトンを原子波位相のインジケータとして利用する新しい精密計測技術への展開が期待される。

### 4. 研究成果

原子波回路を実現するために必要な Bose 凝縮体は、その生成に極低温と高い原子数密度が要求されるため、トラップ中心で高密度となって凝縮体生成に有利な葉巻型として生成した。これまでに Bose 凝縮が実現された原子としては、アルカリ金属原子など様々な原子が挙げられるが、原子間相互作用や凝縮体の特性についてよく知られている基底超微細構造準位  $5s^2S_{1/2}$  ( $F=2$ ,  $m_F=2$ ) 状態の  $^{87}\text{Rb}$  原子を実験の対象とした。この原子での凝縮体生成には、これまでに光トラップや磁気トラップが用いられているが、直径数百  $\mu\text{m}$  という大きなサイズのリング状凝縮体に変形を行うため、また、得られる凝縮体原子数が大きいことなどから、ここでは磁気トラップでの凝縮体生成法を採用した。

磁気トラップを用いる場合、一般にトラップの初期原子数密度が低いいため、凝縮体生成の最終段階で利用する蒸発冷却に1~2分程度の長い時間を要する。したがって、常温の残留ガスによる加熱を防ぐため、磁気トラップは  $10^{-11}$  Torr 台の超高真空中で行う必要がある。そこで本研究では、二重磁気光学トラップ法によって、このような超高真空域に外部から Rb 原子の導入を行った。この二重磁気光学トラップには、出力1W程度の単一モード半導体レーザー光源と、自作した外部共振器型半導体レーザー装置を使用した。後者の自作レーザーは、回折格子による光帰還により単一モード動作するもので、20 mW程度の出力を得ることができた。出力光の周波数は、両者とも飽和吸収分光とFM分光を組み合わせて観測した Rb 原子の共鳴吸収線にそれぞれロックし、1 MHz程度の周波数線幅に安定化した。

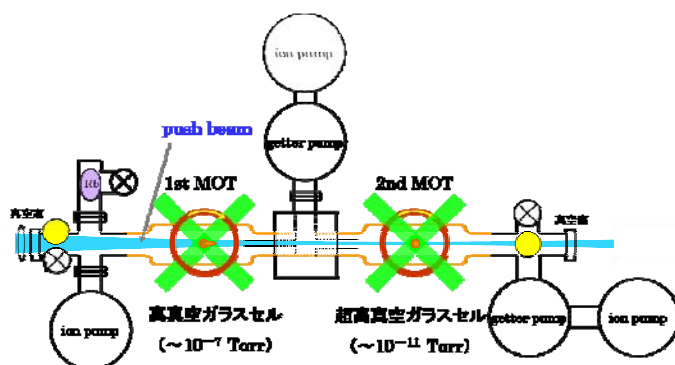


図 1. BEC 生成に用いた真空装置



図 2. 磁気光学トラップ

上が低真空域、下が超高真空域

実験で製作・使用した真空装置は、常温のRb蒸気が充満する  $10^{-6}$  Torr程度の低真空領域が、約  $10^{-11}$  Torrの超高真空領域に差動排気部を介して接続された構造で(図 1)、始めに低真空領域において磁気光学トラップ(1st MOT)を行った。常温のRb原子をレーザー冷却により 1mK程度にまで冷却し、 $5 \times 10^8$  個程度の原子を捕獲することができた(図 2 上段)。次に、この低温原子集団をトラップから解放し、レーザー光で加速して超高真空領域に導入した。超高真空領域では別の磁気光学トラップ(2nd MOT)によって再度、冷却・捕獲し、この原子導入を 100 回ほど繰り返すことで、超高真空中に  $4 \times 10^8$  個程度の原子を 2 mK程度の温度でトラップできた(図 2 下段)。

この二重磁気光学トラップ法で捕獲した低温原子集団に、さらに偏向勾配冷却法によるレーザー冷却を行って約 110  $\mu$  Kにまで冷却した後、光ポンピングで原子スピンを偏極してから磁気トラップに導入した。製作・使用した磁気トラップはIoffe-Pritchard型の磁気トラップで、4本のIoffe barによる動径方向の四重極磁場(約 171 G/cm)と、curvature coilと呼ばれるHelmholtzコイルペアが発生する軸方向の調和型磁場によって原子をトラップする(図 3)。原子導入時のトラップ磁場の大きさは、最低磁場が 225 G程度、調和型磁場の曲率が約 148 G/cm<sup>2</sup>で、軸方向に  $2\pi \times 11$  Hz、動径方向に  $2\pi \times 10$  Hzのトラップ周波数を持ったほぼ等方的な磁気ポテンシャルによって低温原子をキャッチした。この磁気トラップへの導入後の原子数は約  $3 \times 10^8$  個、温度は 270  $\mu$  K程度であった。

この磁気トラップ中で蒸発冷却を行ってBose凝縮体を生成するのであるが、蒸発冷却には原子集団の熱平衡化が本質的に重要で、蒸発冷却を効率的に行うためには原子数密度を増大し、衝突レートを大きくすることが必要である。そこで、原子導入後の磁気トラップにanti-bias coilによるほぼ均一な磁場を徐々に印加し、約 1 s で最低磁場を 1.9 Gにまで減少させることにより、磁気トラップした原子集団の断熱圧縮を行った。圧縮後の調和型磁場の曲率は約 205 G/cm<sup>2</sup>で、最終的に軸方向  $2\pi \times 18$  Hz、動径方向に  $2\pi \times 157$  Hzのトラップ周波数を持つ異方的な磁気トラップに、約  $2 \times 10^8$  個の原子を温度 660  $\mu$  Kで閉じ込めた。

Bose 凝縮体の生成は、この磁気トラップ中の原子集団に対して RF 蒸発冷却を適用することで行った。原子にある周波数のラジオ波(RF)を照射することによって、原子スピンの磁気遷移を利用し、特定のエネルギーを持つ原子のみを選択的にトラップから蒸発させることができる。そこで、印加する RF 周波数を高周波側から低周波側に掃引することにより、高温の原子から順にトラップから飛散させ、連続的に蒸発冷却を

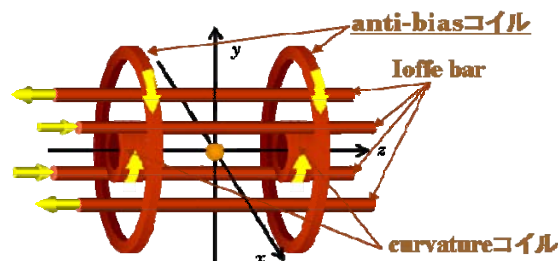


図 3. Ioffe-Pritchard 型磁気トラップ

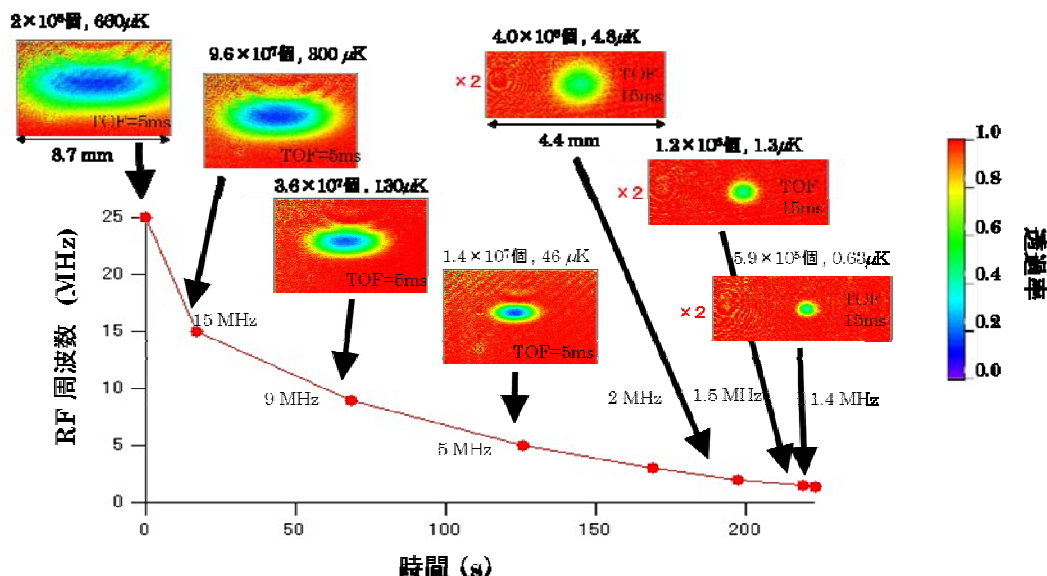


図 4. RF 蒸発冷却

印加 RF 周波数の時間変化と、各最終 RF 周波数で観測された原子集団の空間密度分布. 密度分布は磁気トラップから原子を解放して、各飛行時間 (TOF) 後に吸収イメージングによって測定された結果で、プローブ光の吸収率を画像にしたものである. 印加 RF 周波数を下げるにしたがって、観測される原子分布が狭くなり、冷却が進んでいることが分かる.

行うことができる. RF 周波数はトラップ原子温度の約2倍の相当する 25 MHz 程度から掃引を開始し、原子集団が冷却される過程を観測した結果が図 4 である. 1.4 MHz で  $0.63 \mu\text{K}$  程度の温度にまで冷却され、更に下がった 1.355 MHz で Bose 凝縮体への相転移が確認された (図 5).

RF 最終周波数 1.380 MHz では、観測された空間密度分布は大きく広がり、ガウス関数でよくフィットできる古典的な分布を示している (約  $0.7 \mu\text{K}$ ). 一方、RF 最終周波数をここから下げると、原子が分布の中央に集中し始め、古典的に期待されるガウス分布から大きく外れ始める. 分布の中心は速度 0 の最低エネルギー状態に対応し、このことから原子気体が Bose 凝縮を起こしていることが分かる. 理論的考察からは、原子気体の位相空間密度が 2.6 を超えることが

Bose 凝縮の条件とされており、これを確認するため各実験結果について古典原子気体を仮定して位相空間密度を求めた. その結果、Bose 凝縮が起こり始めたと考えられる最終 RF 周波数

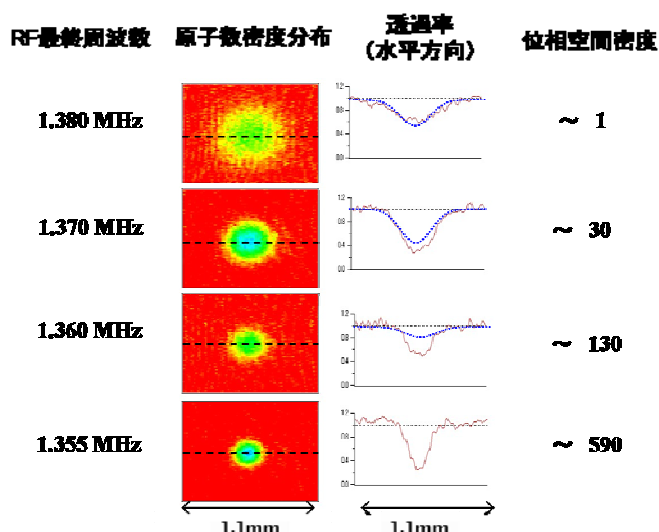


図 5. Bose 凝縮体への相転移

密度分布は 20 ms の TOF で測定された吸収イメージ (透過率分布) で、黒い点線に沿った分布を右側のグラフに赤線で示した. 青い線は分布の周辺でフィットしたガウス関数である. 位相空間密度は古典原子気体の場合に計算されるピーク値を示したものである.

1.370 MHzで始めて大きく 2.6 を超え、理論的な条件と一致していることも確認できた。1.355 MHzの最終RF周波数では、熱的な成分がほとんど消え、ほぼ純粋な凝縮体を生成することができた。この凝縮体の原子数は  $1.8 \times 10^5$  個、化学ポテンシャルは 76 nKであった。

## 5. 自己評価

この研究期間で原子波回路の構築に必要な Bose 凝縮体を準備することができた。回路の構築に必要な光学系の検討や準備にも既に着手しており、具体的な計画の実現に向けて実験を進めることができた。当初は既に利用可能であった凝縮体生成装置を使用する計画であったが、異動により研究室の立ち上げから開始することとなり、レーザー冷却用のレーザー装置や超高真空装置、磁気トラップシステムなど、全てを新たに製作・準備した。国内では7ヶ所目の凝縮体生成装置で、今後、量子凝縮相を利用した実験研究を広く展開する新しい研究室として、凝縮体の基礎物理や応用研究に大きく貢献できる研究基盤を整えることができた。

## 6. 研究総括の見解

長時間に亘って擾乱の少ない状態で原子波伝搬を観測し、その応用を探るため、“原子波の回路”を実現して、新たな非線形量子現象の開拓や原子波を利用した新規デバイスの可能性を探ることに取り組んだ。主たる成果は次の3点である。

- ① 国内では7ヶ所目の Bose 凝縮体生成装置を開発。
- ② 開発装置を用い、Bose 凝縮が起こり始めたと考えられる最終 RF 周波数 1.370 MHz で、原子気体の位相空間密度が始めて大きく 2.6 を超え、理論的な条件と一致していることを確認。
- ③ 1.355 MHz の最終 RF 周波数では、熱的な成分がほとんど消え、ほぼ純粋な凝縮体生成を確認。

Base 凝縮体生成装置を開発し、今後、量子凝縮相を利用した実験研究を広く展開する新しい研究室として、凝縮体の基礎物理や応用研究に大きく貢献できる研究基盤を整えることができたことは大きな成果である。

研究成果は、10 編の原著論文に纏められている。

今後、さきがけ研究期間で準備できた Bose 凝縮体を利用して早急に原子波回路を構築し、静止ソリトンの発生、ソリトンの運動変化の観察、などを通じて原子波位相を利用した新たな計測デバイスとしての機能を実証してもらいたい。BEC 中のソリトンは、原子波の位相ステップとして特徴付けられ、ソリトンを原子波位相のインジケータとして利用する新しい精密計測技術への展開が期待される。

## 7. 主な論文等

### (A) さきがけの個人研究者が主導で得られた成果

#### (1) 論文(原著論文)発表

##### 論文(国際)

- M. Kumakura, T. Hirokani, M. Okano, Y. Takahashi, and T. Yabuzaki, “Topological formation of a multiply charged vortex in the Rb Bose-Einstein condensate: Effectiveness of the gravity compensation”, *Physical Review A*, 73 (6), 063605 (2006).
- M. Kumakura, T. Hirokani, M. Okano, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, “Topological creation of a multiply charged quantized vortex in the Rb Bose-Einstein condensate”, *Laser Physics*, 16 (2), 371 (2006).
- M. Okano, H. Yasuda, K. Kasa, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Splitting of a

quadruply quantized vortex in the Rb Bose-Einstein condensate”, Journal of Low Temperature Physics, 148 (3-4), 447 (2007).

- T. Isoshima, M. Okano, H. Yasuda, K. Kasa, J. A. M. Huhtamaki, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Spontaneous splitting of a quadruply charged vortex”, Physical Review Letters, 99 (20), 200403 (2007).

(2) 表彰

- 2006 年度、2007 年度、2008 年度の3年間、「福井大学重点研究・競争的配分経費」に採択
- 2006 年度-2007 年度に「さきがけ」の協力研究者として登録した大学院生が、2007 年度「福井大学大学院 工学研究科博士前期課程・物理工学専攻優秀学生」に選定される。  
(研究テーマは「さきがけ」のテーマ)

(3) 学会発表 (口頭発表)

- 岡野真之, 安田英紀, 笠健太郎, 熊倉光孝, 高橋義朗, “ $^{87}\text{Rb}$ ボース凝縮体における高次量子渦の分裂”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 24aRB-5 (2006 年)
- M. Okano, H. Yasuda, K. Kasa, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Splitting of a quadruply quantized vortex in the Rb Bose-Einstein condensate”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids QFS2006, PC27 (2006).
- 矢萩智彦, 小菅洋介, 熊倉光孝, 森田紀夫, “Rb 原子の磁気トラップと蒸発冷却”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 20aZA-3 (2008 年).
- 小菅洋介, 矢萩智彦, 熊倉光孝, 森田紀夫, “ $^{87}\text{Rb}$ 原子のボース・アインシュタイン凝縮”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 30pSD-2 (2009 年 3 月 30 日)

(B) その他の主な成果

(1) 論文 (原著論文) 発表

論文 (国際)

- T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Degenerate fermi gases of ytterbium”, Physical Review Letters, 98 (3), 030401 (2007).

(2) 学会発表 (口頭発表)

- 福原武, 高須洋介, A. Wasan, 熊倉光孝, 高橋義朗, “Yb 原子のフェルミ縮退に向けた冷却 II”, 日本物理学会第 61 回年次大会, 29pTA-4 (2006 年).