

O-3

## 位相幾何学的方法による光トラップされた BEC 中への渦生成

## Vortex nucleation in optically trapped BEC by topological phase imprinting

○塚田明誉<sup>1</sup>, 柴山均<sup>1</sup>, 桑本剛<sup>2</sup>Akinori Tsukada<sup>1</sup>, Hitoshi Shibayama<sup>1</sup>, Takeshi Kuwamoto<sup>2</sup>

Abstract: We plan to nucleate a giant vortex (higher-order multi-charged vortex) in an optically trapped Bose-Einstein condensate by topological phase imprinting. As a first step, we have now performed the creation of quadruply charged vortex. The atomic-density defects, which would be a signal of vortex formation, were observed in the condensates.

## 1. はじめに

ボース・アインシュタイン凝縮とは、最低エネルギー状態に巨視的な数のボース粒子が落ち込む現象である。全ての粒子は同じ量子状態になるために波束が重なり合い、巨大な一つの波動関数が形成される。

我々の研究室では、2008年に QUIC(Quadrupole-Ioffe-Configuration)型の磁気トラップ中で  $^{87}\text{Rb}$  原子のボース・アインシュタイン凝縮体 (Bose-Einstein Condensates : 以下, BEC と略す)の生成に成功し、2009年に磁気トラップ中での量子渦の生成に成功している。

磁気トラップには限られたスピン状態の原子しか捕獲できないという制限がある。内部(スピン)自由度のある量子渦に関する実験を行うためには、スピンに依らない捕獲力を持つ光トラップに BEC を移行し量子渦を生成する必要がある。

我々は、内部自由度のある BEC 中での多重渦量子渦の分裂や崩壊過程等のダイナミクス観測および光トラップされた BEC 中への量子渦ポンピング法[1]による高次の多重渦量子渦の生成を目指している。

今回、光トラップに捕獲された  $^{87}\text{Rb}$  BEC 中に位相幾何学的方法[2]により量子渦を生成するための装置を開発し、量子渦の可能性のあるダイナミクスを観測する事が出来たので報告する。

## 2. 装置開発と量子渦生成方法

光トラップ中 BEC に四重極磁場を印加することによって幾何学的位相を焼き付けるため、Fig. 1 に示した racetrack コイルを作成した。そして、この racetrack コイルペアを Fig. 2 のように配置した。

磁気トラップ中で  $^{87}\text{Rb}$  BEC(原子数: 約  $5 \times 10^5$  個)を生成し、波長 1064 nm の YVO<sub>4</sub> レーザーで形成した交差型光トラップ中に移行させたのち、原子のスピンを軸方向(Fig. 2 の-Y 軸方向)に揃える。その後、racetrack コイルペアで動径方向(Y 軸に垂直な方向、Fig. 2 参



Figure 1. Picture of racetrack coil. Enamel wire of 1.8mm diameter was wound by 25 turns.

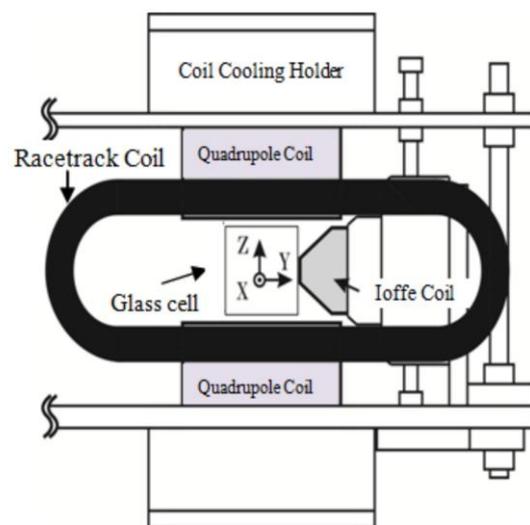


Figure 2. Schematic view of setup of a racetrack coil system and a QUIC magnetic trap.

照)に四重極磁場を印加し、原子スピンを反転させることによって BEC に幾何学的位相を焼き付け、量子渦を生成する。このとき、動径方向半径が  $5 \mu\text{m}$  程度である BEC の中心に racetrack コイルペアで発生させた四重極磁場の(磁場ゼロ)中心を一致させる必要があるため、外部から各方向に沿う補正均一磁場を印加し、両者をほぼ一致させた。また、軸方向にそろった原子スピンを断熱的に反転させるために、スピン反転磁場を 10 ms 間かけて線形的に立ち上げた。Fig. 3 に光トラップ中 BEC への位相幾何学的方法による量子渦生成実験のタイムチャートを示す。

### 3. 実験結果

原子スピン反転後、光トラップ、racetrack 磁場および各補正磁場を瞬時に切り BEC を 12 ms 間自由落下させ軸方向(渦芯方向)の吸収イメージを行った(Fig. 4)。BEC 中心からやや左下に密度欠陥が確認できる。この密度欠陥は、BEC 中心と racetrack コイルペアで発生させた四重極磁場中心を一致させていないときには観測されなかったため、量子渦と考えられる。

次に、原子スピン反転後、様々な捕獲時間における光トラップ中での BEC を X 方向からイメージした画像および、磁気トラップで量子渦を生成後、様々な捕獲時間における磁気トラップ中での BEC を X 方向からイメージした画像を Fig. 5 に示す。磁気トラップ中では Y 方向(Fig. 5 の横方向)に BEC が膨張していることが分かる。この現象は外部磁場を印加することによって磁気トラップの軸方向形状が変形してしまうことに起因している。しかし、光トラップでは BEC が Y 方向へ膨張しておらず、長時間安定的に捕獲できているため、量子渦の分裂や崩壊過程等のダイナミクスを観測することが可能であると考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

位相幾何学的方法による光トラップ中 BEC への量子渦生成を行った。その結果、量子渦と思われる密度欠陥を観測することができた。今後は、量子渦生成の再現性の向上と量子渦であることを証明するために四重極振動を励起した角運動量の測定を行う。

### 5. 参考文献

- [1] Z.F.Xu *et al.*, Phys.Rev.A78, 043606 (2008)
- [2] M. Kumakura *et al.*, Phys. Rev. A73, 063605 (2006)

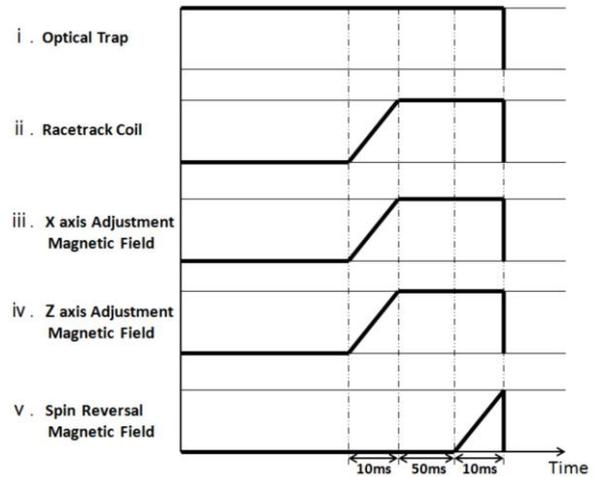


Figure 3. Time chart of vortex nucleation in optically trapped BEC by topological phase imprinting.

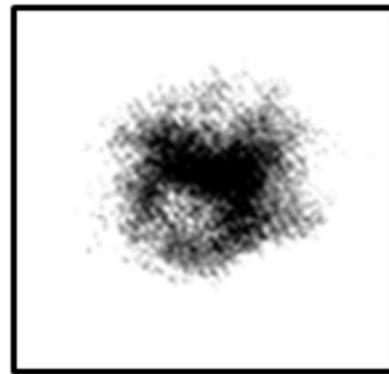


Figure 4. Image of observed condensate with a quadruply charged vortex formed by topological phase imprinting. Free fall time is 12 ms.

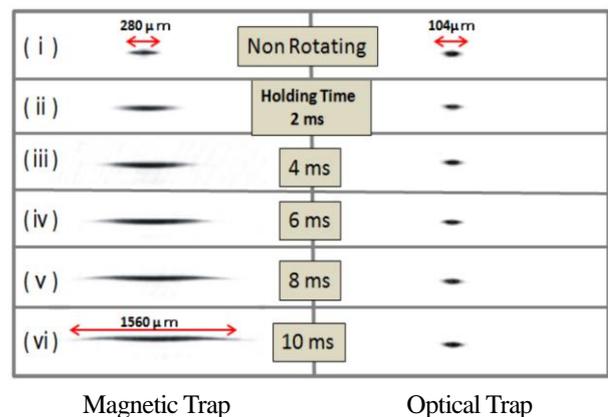


Figure 5. (ii)-(vi) Images of condensates in the magnetic and the optical trap. These were taken after vortex creation and various holding times. (i) For comparison, the images of trapped condensates in both traps without vortex creation are shown.