

O-20

## 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のための装置開発

Development for 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 giant vortex in Bose-Einstein condensates by topological phase imprinting. In this study, we constructed a racetrack coil system for generating a radial quadrupole magnetic field for imprinting the geometric phase in the order parameter of condensate. We report the experiment for superposing the quadrupole field center onto the condensate trapped in the optical trap.

## 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混む現象である。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。しかし、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。我々は、内部(スピン)自由度のある凝縮体に関する実験を行うために、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、位相幾何学的方法[1]により量子渦を生成することを計画している。そして、内部自由度を持つ超流動体における特異な量子渦状態の探索および量子渦崩壊過程等のダイナミクスを明らかにすることを目指す。

本研究では、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により量子渦を生成するための装置を開発したので報告する。

## 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。

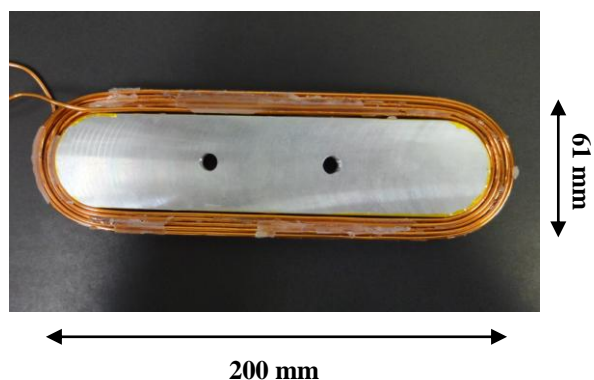


Figure 1. Picture of racetrack coil. Enamel wire of 1.4 mm diameter was wound by 25 turns.

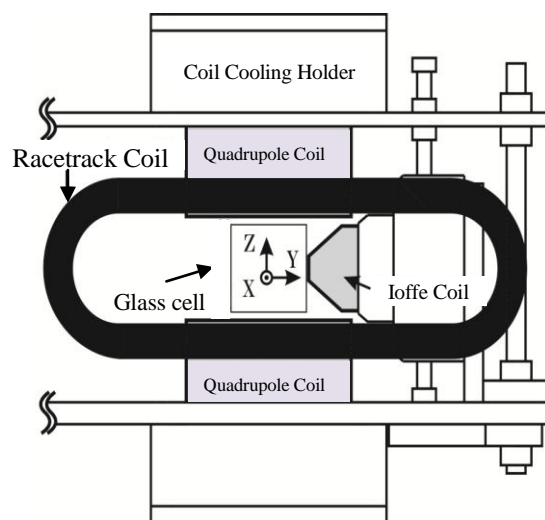


Figure 2. Schematic view of setup of a racetrack coil system and a QUIC magnetic trap.

### 3. racetrack 四重極磁場での BEC の捕獲

光トラップ中 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るため、racetrack コイル磁場のみで BEC を捕獲し、捕獲位置と光トラップ中 BEC とのずれを評価する実験を行った。racetrack コイルペアに 40.00 A を流し、racetrack 四重極磁場中 BEC の位置の時間変化を観測し、racetrack 四重極磁場による BEC の捕獲位置を決定した。水平方向および重力方向のずれは、それぞれ 601 μm, 430 μm であった (Fig. 3 参照)。このずれを補正するために、外部から各軸方向に沿った均一磁場を印加した。Fig. 4 に補正磁場印加前後の racetrack コイル中 BEC の重力方向位置の時間変化を示す。補正磁場印加前は両者のトラップ中心のずれにより racetrack 磁場中で BEC が振動している。しかし印加後は、振動が抑制され両者がほぼ一致したことが分かる。

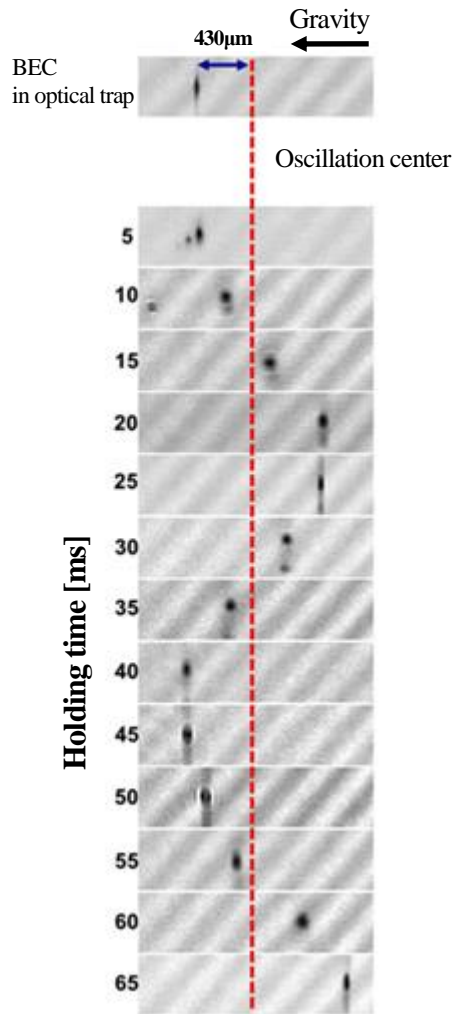


Figure 3. Gravity-direction oscillation of BEC in the racetrack quadrupole magnetic field.

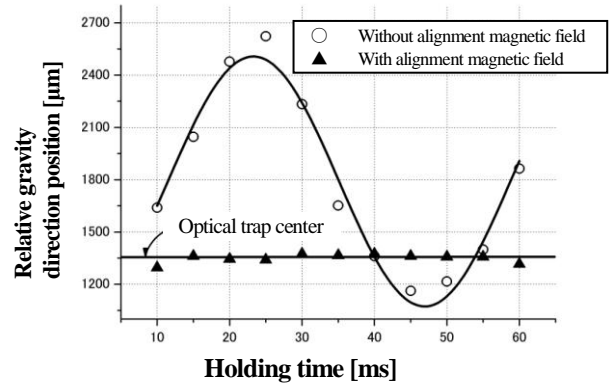


Figure 4. Holding-time dependence of the relative gravity direction position of BEC trapped in the racetrack quadrupole magnetic field.

### 4. 重力による racetrack 四重極磁場中心のシフト

補正磁場によって、光トラップ中心と racetrack 四重極磁場に捕獲された BEC の位置を一致させたが、重力による影響で racetrack 四重極磁場中 BEC は四重極磁場中心(磁場ゼロ)から重力方向へシフトしている。この重力方向へのシフトは、

$$d = \frac{g}{\omega_g^2} \dots (1)$$

と表わされる。ここで、 $d$  は重力による racetrack 四重極磁場中 BEC のシフト(以下、重力シフトと略す)、 $g$  は重力加速度、 $\omega_g$  は重力方向の racetrack 四重極磁場のトラップ周波数である。重力による影響も考慮に入れて、光トラップ中心と racetrack 四重極磁場中心を一致させるために、Fig. 4 で振動を抑制した状態での重力方向のトラップ周波数を測定した。その値は 30.47 Hz であり、(1)式より、重力シフトは約 267 μm と見積もられた。この重力シフトの値を考慮し、光トラップ中心と racetrack 四重極磁場中心をほぼ一致させることができた。

### 5. まとめと今後の課題

光トラップされた BEC 中に位相幾何学的方法で量子渦を生成するための装置開発を行った。また、光トラップされた BEC 中心と、開発した racetrack で発生させた動径方向四重極磁場中心をほぼ一致させることができた。今後は、原子スピンを反転させることによって量子渦を生成する。

### 6. 参考文献

[1] M. Kumakura *et al.*, Phys. Rev. A **73**, 063605 (2006)