

S1-7

原子気体ボース凝縮体への位相幾何学的量子渦生成

Topological phase imprinting of quantum vortex in gaseous Bose-Einstein condensates

○桑本剛¹, 柴山均²Takeshi Kuwamoto¹, Hitoshi Shibayama²

Abstract: We generated multiply charged quantum vortex in gaseous Bose-Einstein condensate of ^{87}Rb atom by a topological phase imprinting method. The phase imprinting was simply realized by reversing the spins of condensed atoms confined in a magnetic trap with an external magnetic field. We will study the dynamics of multi-quantized vortex under various conditions of the density and the shape of BEC

1. はじめに

量子渦は、(1 粒子あたりの) 角運動量が量子化された渦であり、超流動体や超伝導体などの量子多体系・凝縮系に現れる典型的な励起状態である。量子渦は、それら物質の相転移や構造、物理特性などに深く関わっており、例えば、第二種超伝導体や 2 次元凝縮系における相転移では量子渦のダイナミクスが現象の鍵を握っている。そのため、量子渦は様々な量子凝縮系に現れる多様な物理を探るプローブとして重要かつ有用であり長年盛んに研究されてきた。一方、量子渦は量子多体系に現れる代表的な位相欠陥でもある。位相欠陥に係わる研究対象は物性物理学から素粒子・宇宙論にわたるまで多方面に広がっており、量子渦研究の応用範囲は非常に幅広い。

従来の量子渦研究の主舞台は超流動液体ヘリウムや固体の超伝導体であったが、それら物質では強い粒子間相互作用、不純物の影響、観測方法の難しさなどから、純粋に量子渦のダイナミクスのみを追及することに困難があった。一方、1995 年に実現された希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) は、粒子間相互作用が弱い極めて純度の高い超流動体であり、静磁場や電磁波による内部・外部自由度の多様な操作性および高い観測性を有するため、量子渦のダイナミクスを観測する理想的な舞台を提供する。

我々は、原子気体 BEC の特徴を生かした量子渦の研究として、特に多重渦量子渦に着目して研究を進めている。多重渦量子渦とは、(1 原子あたりの) 角運動量がプランク定数 \hbar の 2 以上の整数倍 ($2\hbar$, $3\hbar$, $4\hbar$, ...) となっている渦であり、超流動液体ヘリウムで行われている容器を回転させるといった力学的方法では生成が困難である。なぜなら、多重渦量子渦のエネルギーはその多重度と同じ個数の単一渦量子渦 (1 原子あたりの角運動量 = \hbar) の総エネルギーより大きいため、全体の角運動量 (個々の原子の角運動量の和) が同じなら多数個

の単一渦量子数が生成されたほうがエネルギー的に有利だからである。

多重渦量子渦を生成する方法として、軌道角運動量を持たせた光をつくり、それを BEC に照射して光の軌道角運動量を BEC に転写する方法[1]や、四重極磁場中にある BEC のスピンを反転させて幾何学的位相 (ベリー位相) を BEC に転写する方法[2]がある。我々は後者の方法により、スピン 2 をもつ ^{87}Rb 原子 BEC に渦度 4 の量子渦を生成することに成功している[3]。以下に、 ^{87}Rb 原子 BEC の生成および BEC への幾何学的位相転写について述べる。

2. ^{87}Rb 原子 BEC の生成および幾何学的位相の転写

^{87}Rb 原子の BEC は、磁気光学トラップ (原子を冷却しつつ捕獲するレーザー冷却法のひとつ) により集められた 10^9 個程度の ^{87}Rb 原子集団を磁気トラップ (レーザー

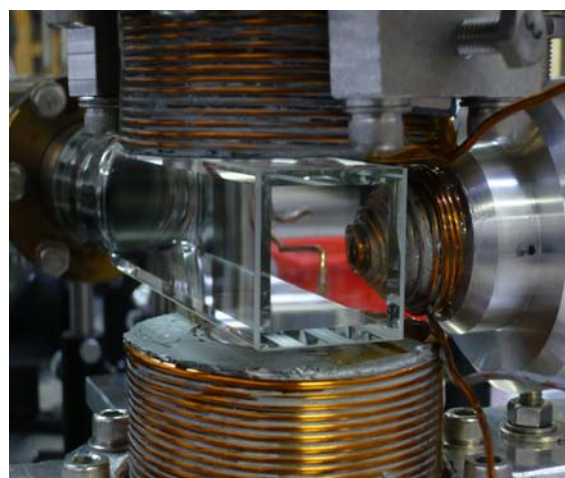


Figure 1. Picture of magnetic trap, which consists of an anti-Helmholtz coil pair (upper and lower coils) and an Ioffe coil (right side one). BEC is generated in central rectangle glass cell.

1: 日大・教員・量科研, 2: 日大・院 (後)

を用いない磁場による原子捕獲容器, Fig. 1) に移したあと, 蒸発冷却 (ラジオ波を印加しその周波数を掃引することで熱い原子をトラップから追出す冷却方法) により生成する. 典型的には原子集団中の 60~70% の原子が BE 凝縮し, 凝縮原子数は 5×10^5 個程度である. この後, 幾何学的位相を BEC の秩序変数 (波動関数) に転写し渦度 4 の量子渦を生成する.

幾何学的位相は BEC 中原子のスピンを反転することで転写する. 磁気トラップに捕獲された BEC は, その磁気ポテンシャル形状に従い葉巻型をしており (Fig. 2), 長軸方向を軸方向 (Fig. 2 の Y 軸), 短軸方向を動径方向とすると, 軸方向にはほぼ均一なバイアス磁場が, 動径方向には四重極磁場がかかっている. BEC は動径方向四重極磁場のゼロ磁場線上に位置しており, 最初そのスピンはほぼ軸方向 (Y 方向) を向いている. 次に, バイアス磁場を徐々に下げ, さらに逆方向に立ち上げることで, スピンを反転させる (Fig. 2(a) \rightarrow (b) \rightarrow (c)). 中間状態において原子スピンは, 時間的に変化する局所的に異なるバイアス磁場と四重極磁場の合算磁場の方向に従いつつその向きを変えていく. この過程を通して幾何学的位相が BEC 秩序変数に刷り込まれ量子渦が生成される (Fig. 2(c)).

3. 実験結果

Fig. 3 に, 渦度 4 量子渦を生成後, 捕獲ポテンシャルを切り BEC を 15 ms 間自由落下させたあと共鳴プローブ光を照射し撮像した吸収イメージ画像を示す. 中央に原子が存在しない部分 (渦芯) が確認できる. 量子渦の渦芯には BEC の波動関数が侵入できないため, 原子が存在しない「穴」は維持され続ける. スピン反転時間の最適値は 7 ms であり, このときの渦生成率はほぼ 100% であった. 渦観測可能時間は 8 ms 程度と短かく, これはバイアス磁場反転に伴う軸方向捕獲力の消失による BEC の膨張が原因である. 今後, レーザー光による光ポテンシャルを利用してこの膨張を抑制し観測可能時間を改善する. また, BEC の一部のみを撮像する断層撮像を行い, 渦のねじれ等による渦の視認性劣化を改善する.

4. まとめと展望

幾何学的位相 (ベリー位相) 転写による BEC 中への渦度 4 多重渦量子渦生成について報告した. 現在, BEC の形状や原子密度が渦度 4 量子渦のダイナミクスにどのような影響を与えるかを明らかにすべく研究を進めている. 非調和ポテンシャル中では渦度 4 量子渦の寿命が延

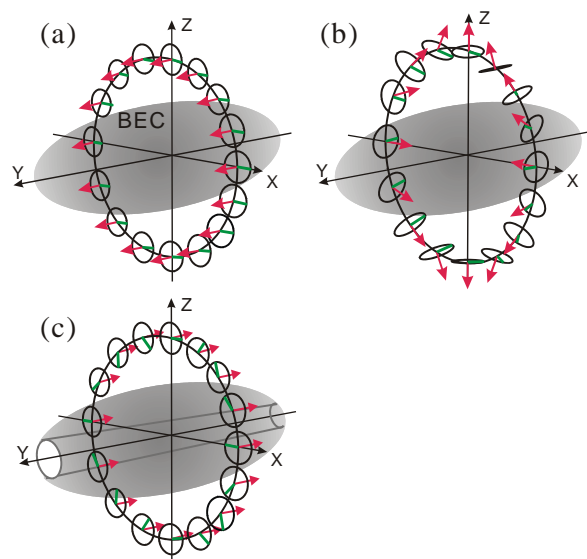


Figure 2. Procedure of quantum vortex generation by topological phase imprinting for spin-1 BEC. (a) Initially, spins (arrows) are oriented in same direction by Y-direction bias magnetic field. Lines on small discs are phase of BEC order parameter. (b) At zero bias field, spins point along the local field direction. (c) Spins are reversed by the backward bias field. The phase difference of 4π is shown around the BEC.

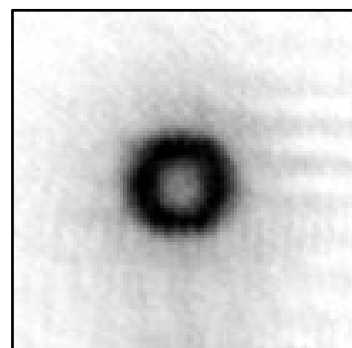


Figure 3. Absorption image of BEC with a charge-4 quantum vortex, taken after 15-ms ballistic expansion. Diameter of BEC is about 200 μm .

びるうえ, 多様な崩壊を起こすことが理論的に指摘されており興味深い. また, 光ポテンシャルを利用した渦ダイナミクスの操作も試みていく.

参考文献

- [1] M. F. Andersen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 170406 (2006).
- [2] A. E. Leanhardt *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 190403 (2002).
- [3] H. Shibayama *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 075302 (2011).