O-23

渦度 4 量子渦の崩壊モードの凝縮体原子密度依存性

Atomic–density–dependent splitting of quadruple–quantized vortices in Bose–Einstein condensates

○柴山　均[1]，吉原　孝久[1]，桑本　剛[2]

* Hitoshi Shibayama[1], Yuduru Yasaku[1], Takeshi Kuwamoto[2]

Abstract :　We studied axial atom-density dependence of charge-4 vortex decay in ^{87}Rb Bose-Einstein condensates. Charge-4 vortex was generated by topological phase imprinting. The triangular and linear arrangements of four single charged vortices, which emerged due to charge-4 vortex collapse, were observed.

1，はじめに

1995 年，希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮はルビジウム（Rb），ナトリウム（Na），リチウム（Li）において初めて実現した．現在では，多数の研究機関で応用研究が行われており，その内容は多岐にわたっている．このボース・アインシュタイン凝縮体は，極めて高純度の超流動体であり，高い操作性および観測性を有している． ボース・アインシュタイン凝縮体における注目すべき現象として量子渦が上げられる．量子渦は角運動量が量子化された渦であり，超伝導体や超流動体などの量子多体系・凝縮系に現れる励起状態である．

本研究の目的は，希薄原子気体のボース凝縮体中へ多重渦度量子渦（1 粒子あたりの角運動量がプランク定数 $\hbar$ の 2 以上の整数倍の渦）を生成し，量子渦の崩壊ダイナミクスを明らかにすることである．たとえば角運動量 $4\hbar$（渦度 4）を持った渦を生成した場合，時間が経過すると角運動量 $\hbar$ の 4 つの渦に分裂する．これは，渦度 4 量子渦が単体で存在するより分裂した方がエネルギー的に安定だからである．

我々は ^{87}Rb 原子気体のボース凝縮体生成に成功し，安定的な生成装置を構築している．今回，QUIC 磁気トラップ（Fig. 1）に捕獲されたボース凝縮体に位相幾何学的方法により渦度 4 の量子渦を生成し，その崩壊を調査した．渦度 4 量子渦の崩壊には，ボース凝縮体の軸方向（Fig. 1 の Y 方向）原子密度に依存する複数の崩壊モードが存在することが理論的に指摘されている [1, 2]．本講演では，渦度 4 量子渦が 4 つの単一渦度量子渦に分裂した後，軸方向凝縮体原子密度に依存して形成した直列配列及び三角形配列構造を観測したので報告する．

2，位相幾何学的方法による量子渦生成

量子渦を生成する方法としては複数の方法が報告されているが，位相幾何学的な渦の生成は，多重渦度をもった量子渦を生成できる非常にユニークな方法である．外部磁場によって，ボース凝縮体が 3 次元的に捕獲されている容器である Ioffe-Pritchard 型磁気トラップの磁場分布を巧みに操作することによって，ボース凝縮体の波動関数（秩序変数）に空間的な位相差を付けることにより，多重渦度を持った量子渦を生成することができる．

実験では, QUIC 磁気トラップ中で生成したボース凝縮体を捕獲し，Fig. 1 で示した Y 軸方向の磁場を反転させることによって量子渦を生成した．渦芯は Y 軸方向に形成される．

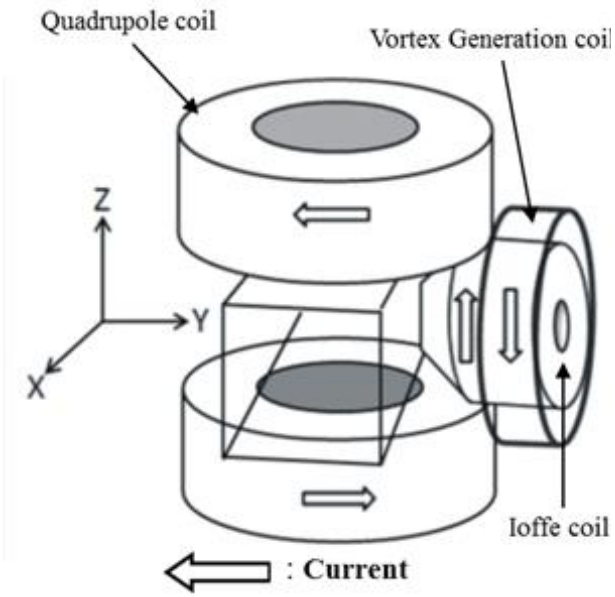

Fig. 1. Experimental setup of QUIC magnetic trap and vortex generation coil.

1：日大理工・院・量子　　2：日大・量科研

3, 量子渦生成および観測

1. QUIC 磁気トラップ中にてボース凝縮体を生成する. 典型的な凝縮体中原子数は 1×10^6 個である.
2. Fig. 1 の Vortex Generation Coil を用いバイアス磁場を印加し，Y 軸方向の磁場を反転させた.
3. QUIC 磁気トラップと Vortex Generation Coil の電流を切り自由落下させる.
4. ある一定時間自由落下させた後，断層撮像法[3]を用いて凝縮体の所望の部分のみを抜き出し X または Y 方向からプローブ光（共鳴光）を照射することにより, 原子集団の影を CCD カメラにより撮影する．X 方向からの撮像によって軸方向凝縮体原子密度を評価し，Y 軸方向からの撮像によって量子渦を観測する（Fig.2）.

4, 結果と議論

量子渦生成における Y 方向磁場反転は 8 ms かけて行った．量子渦のダイナミクスの観測のため，渦生成後凝縮体を磁気トラップに捕獲し続けた．磁場反転途中 5 ms の時点で明確な量子渦が確認できたため，この時点を捕獲開始時間とした．Fig.3 に軸方向凝縮体原子密度（n_Y）の捕獲時間依存性を示す．縦軸は，n_Y に s 波散乱長 a（5.05×10^{-9} m）をかけて無次元化した値である. 捕獲時間と共に n_Y が減少していることがわかる. これは，磁場反転によって磁気トラップの Y 方向磁場分布が変形し, 凝縮体が Y 方向に膨張するためである.

捕獲時間 1 ms から直列配列構造（Fig.4 (a)）及び三角形配列構造（Fig.4 (b)）が観測された．渦度 4 量子渦の崩壊により出現した 4 つの単一渦度量子渦が直列配列するか，三角配列するかは n_Y に依存する[1, 2]．直列配列構造に崩壊する an_Y の領域は 47~69（高密度領域）および 0~16（低密度領域）に存在する．よって捕獲時間 1 ms の直列配列構造は高密度の領域に起因して引き起こされたと考えられる．また捕獲時間と共に直列配列構造が増加し, 捕獲時間 10 ms でほぼ 100%となった. これは, n_Y が低密度領域に存在したためである. また, an_Y : 28~32 および 11.5~15 の領域で形成される三角形配列構造は，捕獲時間 1，2 ms および 8 ms で観測された. 1 および 2 ms で観測された三角形配列構造は an_Y = 28~32 領域での崩壊に起因していると考えられ，8 ms の場合は an_Y = 28~32 および 11.5~15 の領域のいずれかの領域での崩壊に起因していると考えられる．各捕獲時間において約 10%程度三角形配列構造が観測された. 崩壊モード領域が狭く，崩壊頻度も低いため観測される割合が低いと考察できる.

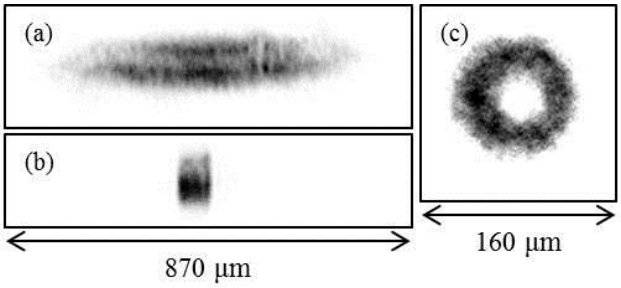

Fig.2 The central slice of the condensate by tomography and absorption image. (a) X direction image of condensate without tomography. (b) X direction image of condensate with tomography. (c) Y direction image of condensate with tomography. These images were taken after free fall of 20 ms.

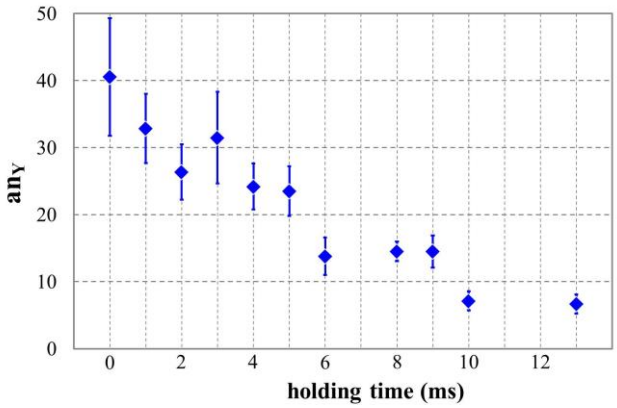

Fig.3 Holding-time dependence of atomic density in the axial direction after the vortex formation of condensate.

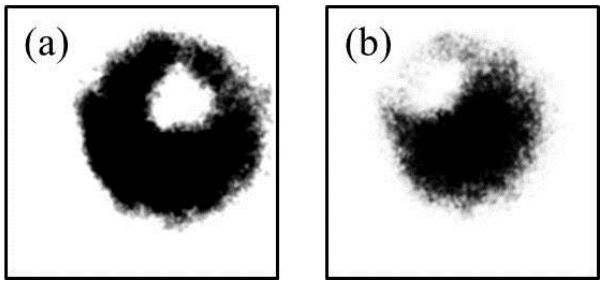

Fig.4 Y direction absorption image of condensate. (a) Triangular array structure. (b) Linear array structure.

参考文献

[1] Yuki Kawaguchi and Tetsuo Ohmi PRA **70**, 043610 (2004)

[2] T. Isoshima, *et al.*, PRL **99,** 200403 (2007)

[3] M. Okano *et al.*, J. Low Temp. Phys. **148**, 447 (2007).