

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400420

研究課題名(和文) 気体ボース凝縮体中への高次渦量子渦の形成およびダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Investigation of dynamics of multi-charged vortex in gaseous Bose-Einstein condensates

研究代表者

桑本 剛 (KUWAMOTO, Takeshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10337909

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ルビジウム87ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)中に渦度4量子渦を生成し、その崩壊ダイナミクスのBEC原子密度依存性を調べた。渦度4量子渦は位相幾何学的方法で生成した。BEC原子密度は光ポテンシャルを用いて制御した。渦度4量子渦が崩壊して発生する4つの渦度1量子渦の直線配列および三角形配列を観測した。三角形配列は直線配列した数の3%程度の発生確率であったが、今回初めて観測に成功した。また、BEC原子密度制御によって渦度4量子渦の寿命延長に成功した。さらに、今まで観測されていない高原子密度領域での渦度4量子渦崩壊ダイナミクスを系統的に調査し、理論予想と一致する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We studied the density dependence of the decay dynamics of a charge-4 vortex created in 87Rb Bose-Einstein condensates. Vortices were created by topological phase imprinting. The density of the condensates was controlled by an optical potential. Linear and triangular arrangements of four single-charged vortices that emerged through the charge-4 vortex decay were observed. The triangular arrangements were confirmed for the first time, and those observation frequency was about 3% of that of linear arrangements. The decay of charge-4 vortices was suppressed by controlling the condensate density. In addition, we studied vortex dynamics in a high density region for which investigations have not been previously performed, and we obtained the results consistent with theoretical predictions.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮体 量子渦 幾何学的位相 多重渦度量子渦

1. 研究開始当初の背景

多重渦をもつ量子渦は、系の複素固有振動数に起因する動的不安定を有し、非線形物理現象の基礎研究や超流動体を持つ多様な物性を探求するための有用な研究対象である。超流動液体ヘリウムや超伝導体でその存在が確認されているが、これらの系では観測方法が限定され、また粒子間相互作用が非常に強いという特性から、渦の動的ふるまいの系統的追跡は困難である。これに対して、希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体（以降、BEC と略す）は、原子間相互作用が弱く純度の高い超流動体であるうえ、光・電場・磁場による極めて高い操作性および多様な観測手段を有するため、量子渦のふるまいを系統的かつ詳細に観測できる。

これら BEC の特徴を活かした多重渦量子渦に関する実験研究は、いくつかの研究グループから報告されており、渦度 2 および 4 の量子渦が位相幾何学的渦生成方法によって生成されている。この中で、特に渦度 4 量子渦に関し、理論的に予言されている複数の崩壊過程（崩壊モード）のうち、渦度 4 量子渦が崩壊して出現する 4 つの渦度 1 量子渦が直線的に並ぶ崩壊モード ($l=2$ モード) しか実験では確認されていない。理論研究では、BEC の原子密度に依存して、4 つの渦度 1 量子渦が三角形 ($l=3$ モード) や四角形 ($l=4$ モード) に配列する崩壊モードが存在することが予言されている。これらの未確認の崩壊モードを確認し、その発生頻度や時間発展の BEC 原子密度依存性を詳細に調査することで、多重渦量子渦の動的不安定性に関する知見が得られると期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多重渦量子渦の動的ふるまいを系統的に調査することである。特に、スピン 2 を持った ^{87}Rb BEC に位相幾何学的渦生成方法を適用して渦度 4 量子渦を生成し、その崩壊過程の BEC 原子密度依存性を明らかにする。より具体的には、BEC 原子密度を制御して、理論的に予言されているが未だ観測されていない崩壊モードを観測する。また、渦度 4 量子渦の崩壊寿命の制御の可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 位相幾何学的渦生成方法の最適化

BEC を捕獲している磁気トラップの軸方向（葉巻型形状をしている BEC の長軸方向）の磁場を反転させる位相幾何学的渦生成方法を用いて渦度 4 量子渦を生成する。磁場反転時間が短すぎると原子スピンのフリップによって BEC が壊れてしまう。また、遅すぎると BEC の膨張（理由は後述）によって渦の観測が困難となってしまう。これらを考慮し、磁場反転時間を最適化することで、ほぼ 100% の渦生成を達成した。

(2) BEC の断層撮像法の開発

位相幾何学的渦生成方法では磁気トラップの軸方向の捕獲力がなくなり、BEC が膨張してしまう。このような状況では渦の湾曲や傾きによって渦の観測が困難となる。そこで、BEC の一部（中心付近）のみを観測する断層撮像法を開発した。厚み $50\ \mu\text{m}$ 程度のシート状レーザービームを用いこれを実現した。

(3) 光ポテンシャルを用いた BEC 原子密度の操作

BEC 原子密度を操作（制御）するために、波長 $1064\ \text{nm}$ のレーザーで形成した光ポテンシャルを用いた。レーザー照射によって生じる BEC の集団振動や原子数減少が最小となるようレーザー照射タイミングや強度を最適化した。この光ポテンシャルを用いた BEC 原子密度の制御により、先行実験研究では行われていない BEC 原子密度領域での量子渦ダイナミクスの観測が可能となった。

4. 研究成果

(1) 4 つの渦度 1 量子渦の三角形配列の観測

渦度 4 量子渦は動的不安定性によって 4 つの渦度 1 に崩壊（分裂）する。この崩壊には、BEC 原子密度に依存した複数のモードが存在する。最も生じやすい崩壊モードは $l=2$ 崩壊モード (l は角運動量の次元を持った崩壊モード次数) であり、他の高次のモードは理論的に予言されているが未観測である。本研究では $l=2$ モード崩壊の次に起きやすい $l=3$ モード崩壊の観測に成功した。 $l=3$ モード崩壊が生じた場合、渦度 4 量子渦の崩壊によって発生した 4 つの渦度 1 量子渦は三角形に配列することが理論的に示されている。図 1 に観測された三角形配列の様子を示す。本

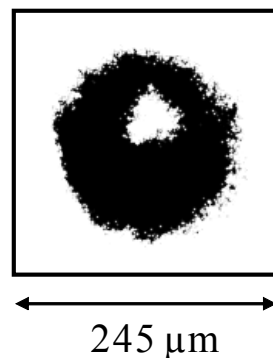


図 1 渦度 4 量子渦の $l=3$ モード崩壊（4 つの渦度 1 量子渦が三角形に配列する）

画像は、渦度 4 量子渦を生成後、BEC を $1\ \text{ms}$ の間トラップ中に捕獲したのちにトラップから開放し $20\ \text{ms}$ 間自由落下させ共鳴レーザー照射により撮像したものである。図の黒色部分は原子が存在する部分であり、中心付近の三角形様白色部分が、4 つの渦度 1 量子渦が三角形配列したことにより生じた原子

密度欠損である。

対象とする図形が三角形的か円形的かを評価する一般的な方法はないが、我々は Hough 変換を用いて観測された渦構造が三角形かどうかを判別した。Hough 変換とは、画像から直線を導出する数学的手法である。対象データの Hough 変換により直線が 3 本導出され、それらが BEC 内で交差し三角形を形成した場合、4 つの渦度 1 量子渦が三角形配列したと判断した。直線配列が観測された数の 3% 程度であったが、今回、渦度 4 量子渦の崩壊によって発生した 4 つの渦度 1 量子渦が形成した三角形配列の観測に始めて成功した。これにより、理論研究によって予言されていた $l=3$ 崩壊モードの存在を実証できたこととなる。

(2) 渦度 4 量子渦の崩壊の抑制

先行理論研究によって、渦度 4 量子渦の崩壊が非常に起きにくい BEC 原子密度領域があることが示されている。我々は光ポテンシャルを用いてこの領域に BEC 原子密度を制御することで、渦度 4 量子渦の崩壊抑制を試みた。図 2 に、BEC 原子密度を制御した場合としない場合の渦度 4 量子渦の崩壊割合 (4 つの渦度 1 量子渦の直線配列と三角形配列が観測された割合) のトラップ捕獲時間依存性を示す。各捕獲時間に関して左側が密度

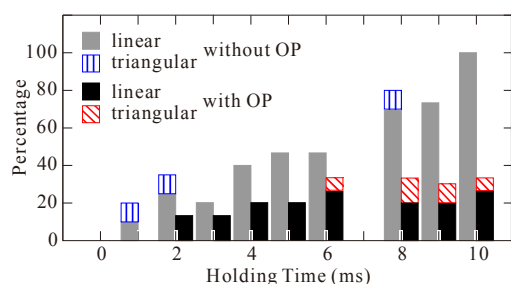


図 2 BEC 原子密度を制御した場合としない場合の渦度 4 量子渦の崩壊の発生割合の捕獲時間依存性。

制御しなかった場合で、右側が制御した場合である。捕獲時間 10 ms 後における渦度 4 量子渦の残存率は、原子密度制御しなかった場合は 0% であったが、制御した場合は約 70% であった。よって、BEC 原子密度制御によって渦度 4 量子渦の崩壊の制御に成功した。本結果は、位相幾何学的方法を複数回行って渦度 4 を越えるより高次の多重渦度量子渦を生成する「量子渦ポンピング」の実現に繋がる成果である。

(3) 高密度 $l=2$ モード崩壊領域での渦度 4 量子渦崩壊の観測

ある特定の崩壊モードが生じる BEC 原子密度領域は複数あることが理論研究により示されている。先行実験研究で観測されている $l=2$ モード起因の崩壊は、低原子密度 $l=2$ モード領域で生じたもののみであった。我々

は今回、高原子密度 $l=2$ モード領域で生じる渦崩壊の観測を試みた。実験においては、捕獲時間の経過とともに徐々に光ポテンシャル強度を上昇させることで BEC 原子密度を高い値に保った。図 3 に $l=2$ モード崩壊によって生じた 4 つの渦度 1 量子渦の直線配列の観測頻度の捕獲時間依存性を示す。高原子密

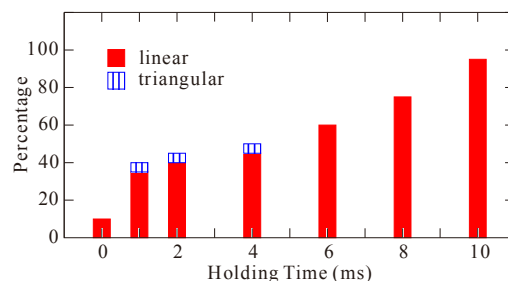


図 3 高い BEC 原子密度を保持した場合の、4 つの渦度 1 量子渦の直線配列の観測頻度の捕獲時間依存性。

度 $l=2$ モードにおいても低原子密度 $l=2$ モードと同様の渦崩壊ダイナミクスが観測された。なお、わずかながら $l=3$ モード崩壊が観測された。これは高原子密度 $l=2$ モード崩壊領域の中に $l=3$ モード崩壊領域が存在するからである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

柴山均, 塚田明誉, 吉原孝久, 桑本剛, Density Dependence of Charge-4 Vortex Splitting in Bose-Einstein Condensates, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 85, 2016, 054401-1 - 054401-2 DOI: 10.7566/JPSJ.85.05441

[学会発表](計 4 件)

柴山均, 吉原孝久, 桑本剛, 渦度 4 量子渦の崩壊モードの凝縮体原子密度依存性 II, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市泉区)

柴山均, 吉原孝久, 桑本剛, 渦度 4 量子渦の崩壊モードの凝縮体原子密度依存性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 18 日, 関西大学 (大阪府吹田市)

柴山均, 吉原孝久, 桑本剛, 幾何学的方法による QUIC トラップに捕獲されたボース凝縮体中への渦生成 II, 日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学 (東京都新宿区)

柴山均, 桑本剛, スピノール BEC 中への giant vortex の生成, 日本物理学会 2013

年秋季大会，2013 年 9 月 26 日，徳島大学（徳島県徳島市）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/~kuwamoto/index.htm>

6．研究組織

(1)研究代表者

桑本 剛 (KUWAMOTO, Takeshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10337909