

論文審査の結果の要旨

氏名： 柴 山 均

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：気体ボース・アインシュタイン凝縮体中渦度 4 量子渦の崩壊ダイナミクスの密度依存性

審査委員：（主査） 教授 井 上 修一郎

（副査） 教授 早 川 建 准教授 佐 甲 徳 栄

総合科学研究所准教授 桑 本 剛

学習院大学教授 平 野 琢 也

本論文は、希薄ルビジウム 87 (^{87}Rb) 原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体（以下 BEC と略す）中に、位相幾何学的方法を用いて渦度 4 の量子渦を生成し、その崩壊（分裂）ダイナミクスの凝縮体原子密度依存性を系統的に研究したものである。

最初に渦度 4 量子渦の生成に関して述べる。量子渦は角運動量が量子化された渦であり、超流動液体ヘリウムや希薄原子気体の BEC に誘起される典型的な励起状態である。BEC を閉じ込めている容器（磁気トラップ）のポテンシャル形状を変形させた上で系を回転させるという一般的な力学的渦生成方法では、2 以上の渦度を持った単一量子渦の生成は困難である。これは、渦度 2 以上の単一量子渦は不安定であり、安定な複数の渦度 1 量子渦のほうが生成されやすいからである。そこで本論分の提出者は、原子スピンを四重極磁場がある空間内で断熱的に反転させ量子渦を形成する位相幾何学的方法を採用した。位相幾何学的方法では、力学的操作をすることなく、原子のスピンの大きさの 2 倍の渦度の量子渦を生成することができる。本研究では、3 つの電磁コイルで構成される QUIC

（Quadrupole-Ioffe configuration）磁気トラップ中に捕獲した ^{87}Rb BEC（スピン 2）で初めて位相幾何学的方法による渦度 4 量子渦の生成に成功した（J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 075302 (2011)）。QUIC 磁気トラップは他の形式の磁気トラップに比べ低電流で運用できるため、発熱が低く極めて安定的に BEC を生成・保持できる。よって、渦度 4 量子渦のダイナミクスを詳細に研究する環境を準備できたという点で大きな成果である。

次に、渦度 4 量子渦の崩壊ダイナミクスの研究に関して述べる。渦度が 2 以上の量子渦は動的不安定性を有し、エネルギー的に安定な状態へと崩壊（変化）することが理論的に指摘されている。本研究の対象である渦度 4 量子渦は、渦度 1 の 4 つの量子渦に崩壊する。さらに、様々な崩壊モードがあり、各崩壊モードを規定するパラメータ l （角運動量と同じ次元をもち、渦度 4 量子渦の場合は $l = 2, 3, 4, 5, 6$ を取り得る）の値により、渦度 4 量子渦が崩壊した後に現れる 4 つの渦度 1 量子渦が直線配列（ $l = 2$ モード崩壊）や三角形配列（ $l = 3$ モード崩壊）、四角形配列（ $l = 4$ モード崩壊）することが理論の先行研究で示されている。この中で、 $l = 2$ モード崩壊による直線配列は複数の実験グループによって確認されているが、他の配列（および崩壊モード）は未観測である。本研究の第 1 の成果は、BEC の原子密度を制御することにより、崩壊確率が $l = 2$ モード崩壊の次に大きな $l = 3$ モード崩壊によって形成される 4 つの渦度 1 量子渦の三角形配列を初めて観測したことである。

一方、BEC の原子密度を制御することで渦度 4 量子渦の崩壊を抑制できる可能性があることに本論分の提出者は着目し研究を行った。先行研究として、原子集団を捕獲する原子トラップの形状を変形させることで渦度が大きな量子渦（高次量子渦）の崩壊制御を実現したという報告はあるが、BEC の内部自由度である原子密度を制御することで渦崩壊を抑制した報告はない。これが実現した場合、特殊な形状の原子トラップを導入することなく、高次渦度量子渦のダイナミクスの詳細観測や、より高次の量子渦を生成できる可能性（Phys. Rev. A **78**, 043606 (2008), Phys. Rev. A **81**, 033627 (2010)）があり非常に意義深い。本論分の提出者は、1 本のレーザービームのみで形成できる光双極子力ポテンシャルを用いて BEC の原子密度を渦崩壊が生じにくい密度領域にコントロールし、渦度 4 量子渦の崩壊を大幅に抑制した。BEC 原子密度を制御しない場合、10 ミリ秒以内に渦度 4 量子渦は崩壊してしまうが、密度制御を行うことで、10 ミリ秒後の崩壊確率を 30%程度に抑制することに成功した。これが本研究の第 2 の成果であり、前述したように、将来の発展研究の基礎となりうる重要な結果である。

本研究の第3の成果は、BECの原子密度が非常に高い場合における渦度4量子渦の崩壊ダイナミクスに関するものである。 $l=2$ モード崩壊が生じるBEC原子密度領域は複数あることが先行理論研究で予言されており、先行実験研究では低原子密度領域における渦崩壊のみが確認されている。本研究では、理論的に予言されている高原子密度 $l=2$ モード崩壊領域でも低原子密度領域と同様な渦度4量子渦の崩壊ダイナミクスが生じるのかを明らかにした。高原子密度領域では、密度依存の非線形効果により、複数の崩壊モードが相互作用して混合するといった未観測の現象が起こる可能性があり、高原子密度領域における渦崩壊ダイナミクスを調べることは重要である。結果として、低原子密度領域と同様の渦度4量子渦の崩壊ダイナミクスが観測されたのみであった。しかし本実験によって、渦度4量子渦の崩壊における原子密度依存の非線形効果現象は、本実験の時間スケールの範囲内ではより高原子密度でなければ生じないということが明らかにされた。

最後に実験装置の構築・管理・高度化に関して述べる。本研究で用いた実験システムは1人で行う実験としては比較的規模が大きく、光学系、真空系、電子・電気回路系、コンピュータ制御系などを慎重に構築・管理し安定的に運用できることが極めて重要である。また、より扱いやすい実験系に高度化していくことが常に求められる。本論文の提出者は、実験システム全体を詳細に把握し、装置の構築・管理・高度化をしっかりと行ったことが確認できる。

以上のことから、本論文の提出者は自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示していると考ええる。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成28年2月18日