

論文の内容の要旨

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

希薄原子気体ルビジウム 87 (^{87}Rb) ボース・アインシュタイン凝縮体（ボース凝縮体）中に位相幾何学的方法によって渦度 4 量子渦を生成し、その崩壊ダイナミクスの研究を行った。渦度 4 量子渦は、エネルギー的に安定な渦度 1 量子渦 4 つに崩壊する。この崩壊には、ボース凝縮体の渦芯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。本研究では、未確認の崩壊モードである $l = 3$ モード崩壊による、4 つの渦度 1 量子渦の三角形配列の観測、および凝縮体の渦芯方向原子密度を光双極子力を用いて $l = 2$ モード（直線配列）密度領域外にコントロールすることによって渦度 4 量子渦の崩壊を抑制した。また、より高密度にすることによって意図的に $l = 2$ モード崩壊を誘起させた。よって、渦芯方向の凝縮体密度を調整することによって渦度 4 量子渦の維持および崩壊をコントロールすることに初めて成功した。

最初にボース凝縮体中への渦度 4 量子渦の生成について述べる。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ボース凝縮体に誘起される典型的な素励起状態である。ボース凝縮体を保持する容器である捕獲ポテンシャルを回転させることによって量子渦を生成するのが一般的であるが、この方法では 2 以上の渦度を持った単一量子渦を生成することは困難である。本研究では、 ^{87}Rb ボース凝縮体（スピン 2）を四重極磁場が形成されたポテンシャル（QUIC 磁気トラップ）中に保持し、原子スピンを断熱的に反転させることによって凝縮体に幾何学的位相を付加し渦度 4 量子渦を形成した。QUIC 磁気トラップを用いた位相幾何学的方法による渦度 4 量子渦の生成は本研究が初めてである。QUIC 磁気トラップは他の磁気トラップと比べ低電流で運用ができるためコイルの熱揺らぎが少なく安定的にボース凝縮体を生成かつ保持できる。よって高い再現性で多重渦量子渦生成が可能となる。一方、渦形成後スピン反転による磁気ポテンシャルの変形のため渦芯方向にボース凝縮体が膨張し、数ミリ秒以上量子渦を観測することが困難であった。この問題を解決するために、膨張した凝縮体の一部を抜き出し観測する断層撮像を行った。この方法により長時間の渦観測および詳細なダイナミクス観測が可能となった。

次に、渦度 4 量子渦の崩壊ダイナミクスの渦芯方向凝縮体原子密度依存性について述べる。多重渦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することが理論的に指摘されている。本研究で議論する渦度 4 量子渦には、さまざま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 $l = 2, 3, 4, 5, 6$ を取り得る）の値によって、崩壊した後に現れる 4 つの渦度 1 量子渦の配列が異なる。たとえば、 $l = 2$ モード崩壊ならば直線的に渦が並ぶ直線配列となり、 $l = 3$ モード崩壊ならば三角形配列、 $l = 4$ モード崩壊ならば四角形配列する。 $l = 2$ モード崩壊による直線配列に関しては複数の実験グループによって研究されているが、他のモード崩壊は未観測である。本研究では、 $l = 3$ モード崩壊による三角形配列を初めて観測した。三角形配列の判定には Hough 変換を用いた。

一方、ボース凝縮体の原子密度を光双極子力によってコントロールし $l = 2$ モード崩壊領域外にすることで渦度 4 量子渦の崩壊を抑制した。渦芯方向密度コントロールをしなかった場合は、捕獲時間 10 ms でほぼ 100%、 $l = 2$ モード崩壊する。しかし、密度をコントロールした場合、捕獲時間 10 ms で $l = 2$ モード崩壊の割合が約 30%しか観測されなかった。これは、ボース凝縮体の内部自由度である原子密度をコントロールすることで多重渦量子渦の崩壊抑制に成功した初めての例であり、多重渦量子渦ダイナミクスの長時間観測や、より高次の量子渦を生成する「渦ポンピング」などの発展研究につながる成果であると考えられる。

また、ボース凝縮体の渦芯方向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研究も行った。 $l = 2$ モード崩壊が生じるボース凝縮体の渦芯方向密度領域は複数存在することが理論研究で予測されており、先行実験研究では低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、高密度 $l = 2$ モード領域での直線配列を初めて確認した。また捕獲時間 10 ms で渦度 4 量子渦は高密度 $l = 2$ モード崩壊によってほぼ 100%、直線配列構造に崩壊した。多重渦度量子渦の特定の崩壊モードを選択的に誘起したのは本研究が初めてである。