

氏名	かわぐち ゆき 川 口 由 紀
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2857 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	アルカリ原子のボース・アインシュタイン凝縮体における量子数 4 を持 った渦の動力学
論文調査委員	(主 査) 教授 大見 哲 巨      教授 水 崎 隆 雄      教授 田 中 耕 一 郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

アルカリ原子のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) において、原子の持つスピンの自由度を利用すれば、磁気トラップの磁場を反転させるだけで量子数 2 および 4 の渦が生成されることが理論的に予言され、その後実験でも確かめられた。1 以上の量子数を持つ渦はエネルギーの高い状態にあり、量子数 1 の渦へと分裂すると考えられるが、励起がほとんどない十分低温では励起による散逸は無視できるようになり、凝縮体自身でのエネルギーを保存するプロセスによってのみ分裂が起こる。申請者はこのような状況での量子数 4 の渦の分裂を理論的に研究した。

申請者はまず量子数 4 の渦の線形安定性を調べることからこの研究を始めた。Bogoliubov 方程式を用いて渦状態からの一粒子励起のエネルギーを求め、正のエネルギーを持つ励起、負のエネルギーを持つ励起、そして複素固有値を持つ励起があることを確認した。複素固有値を持つモードは励起のエネルギーがゼロの状態であり、そのためエネルギーを保存して成長することが可能である。また、複素固有値モードの出現には、エネルギー負のモードに対して角運動量が反対で、エネルギーも大きさが等しく符号が反対のエネルギー正のモードの存在が必要で、これらが合わさって複素固有値モードが現れることを確認した。

次に申請者は分裂に 3 つのパターンがあることを明らかにした。3 つの分裂パターンとは分裂後、量子数 1 の渦が直線上に並ぶ 2 回対称な渦配置への分裂、1 つの渦を中心に残し周りに 3 つの渦が 3 回対称に配置される分裂、そして 4 つの渦が 4 回対称に配置される分裂の 3 つである。また、これらのパターンに分裂するかどうかは磁気トラップにトラップされている凝縮原子の数によって決まる。あるひとつのパターンについて、そのパターンに分裂するかどうかを凝縮原子の数を変化させて調べると、分裂する領域と分裂しない領域が交互に現れることが分かった。また、3 つのパターンに分裂する領域はお互いに重なり合ったり、重ならなかったりすることも明らかにした。

さらに申請者は分裂後の渦の時間発展を微小な摂動を加えた後の凝縮体の様子を G-P 方程式を数値的に解くことにより調べた。時間変化は線形近似から得られた結果とよく一致し、励起モードが実固有値のみのときには渦状態はほとんど変化しないが、複素固有値モードが存在すれば、それが指数関数的に成長し渦は分裂、さらに他のモードも増幅され複雑な運動をすることが分かった。

現在行われている実験と比較するときには重力の影響が無視できない。量子数 4 の渦の生成に際して磁場を反転させるが、その時磁気トラップのトラップポテンシャルも変化するため重力の影響と相まって凝縮体は大変複雑な運動をする。詳しく検討するため数値シミュレーションを行った。その結果、安定な渦を作るためには磁場の反転時間を適当に調節することが必要で、それよりも速くても遅くても渦生成うまくできないことを明らかにした。この結果は進行中の実験結果とも一致し、評価された反転時間も実験と矛盾しない。

## 論文審査の結果の要旨

アルカリ原子気体の BEC の系はこれまでの超流動および超伝導の系と比較していろいろな意味で制御しやすい系であり、その特徴を生かしてスピン方位を反転させて量子数 2 および 4 の渦の生成に成功している。BEC 以外の超流動および超伝導の系では、渦を生成するのに、超伝導では磁場をかけて、また超流動では系を回転させるという方法が用いられてきた。これらの方法では量子数が 1 より大きい渦を作ることは不可能で、その意味で量子数が大きい渦の分裂という研究は BEC の系で始めて可能になった研究である。

また、この系では分裂の仕方も特異である。通常の系では負のエネルギーを持ったモードが存在するとそのモードを生成することで系はエネルギーの低い状態に移って行く。一方、低温の BEC の系は理想的とっていいほどの孤立系であるため、全系のエネルギーが保存するという制限がある。そのため、負のエネルギーモードが存在するだけでは渦の分裂は起きず、ちょうどそれを打ち消す正のエネルギーを持ったモードの存在が必要になる。

申請論文はこのように新しく作られた量子数 4 の渦系での渦の分裂を理論的に研究した初めての論文で次のような結論を得た。

- 1) 最初に、系の線形安定性を調べた。角運動量とエネルギーの大きさが等しく符号が反対という 2 つの励起が存在し、渦が分裂するときには複素固有値のモードが現れる。
- 2) 分裂の仕方には分裂後の渦の配置が 2 回対称、3 回対称、4 回対称の 3 つのパターンがあり、どのパターンに分裂するか、また、しないかは磁気トラップされている凝縮原子の数により決まる。
- 3) さらに分裂後の時間発展を数値シミュレーションを用いて調べ、複素固有値のモードはその固有値の虚数部分により指数関数的に成長し、その後、他のモードも増幅し、複雑な運動へと変化していくことを示した。

さらに、装置が重力の影響が無視できない構造している現在進行中の実験を考慮し、重力の影響も取り入れて数値シミュレーションを行い、実験を再現しているとも思われる結果も得ている。

以上のような申請論文は学位論文としての価値を有するものと判断した。さらに、論文内容とそれに関連した事項について質問し、十分な学資を有することを確認した。この結果、学位審査は合格と認めた。