

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740308

研究課題名（和文） 2成分ボーズ凝縮体の対向超流動による界面不安定性発生

研究課題名（英文） Interference instability by counter-superflow of two-component Bose-Einstein condensates

研究代表者

東條 賢 (TOJO SATOSHI)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：30433709

研究成果の概要（和文）：2成分ボーズ凝縮の対向実験では両者の原子数差がダイナミクスに与える影響が大きい。内部スピン状態の異なる2成分ボーズ凝縮状態を安定的に実現するために磁場の安定化を行い成分間の原子数差を10%程度まで抑え実験を行った。定常状態で混ざり合う2成分を選択し対向させ、対向時の相対速度によって異なる界面不安定性の発生を実現した。また、磁場によって2成分間の相互作用を変化させ、不安定性を変化させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：For generation of interface instability in two component Bose-Einstein condensates, it is necessary to reduce differences of number-of-atoms between two spin states. We improved environment magnetic field fluctuation so that the difference can be reduced in the range of 10%, and experimented counter-superflow using miscible two-component Bose-Einstein condensates. We succeeded in observation of interference instabilities and studied a dependence on relative velocities. Furthermore, we observed change in instability pattern using control of interference interaction by magnetic field changing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子，低温物性，物性実験

1. 研究開始当初の背景

多成分流体には1成分では決して現れない相互作用による物理現象が存在し、界面不安定性は特徴的な現象のひとつである。一般に2成分流体の界面では乱流に起因する不安定性について古典流体を使って広く研究されているが、多くは複雑化した現象を近似的に示すに留まっている。特に表面現象や相互作用の変化に伴う現象では未解明の領域

が多い。例えば、宇宙物理やレーザー核融合の分野で見られる密度の異なる2流体界面で生じるレイリー・テイラー不安定性(RT不安定性)や界面に衝撃波が伝播するリヒトマイヤー・メシュコフ不安定性(RM不安定性)は、反応阻害の大きな一因となっている。近年、超流動体である量子流体を用いた研究が注目されており、超流動体を用いた対向超流動によって波頭状に起こるケルビン・ヘルムホルツ不安定性(KH不安定性)や前述の

RT および RM 不安定性が起こりうるということが理論的に示された。

これまでに超流動ヘリウム ^4He と ^3He の 2 成分量子流体を使った混合の研究がなされているが、これらの系では 3 体以上の多体相互作用が大きいためダイナミクスが複雑であり定量的な解明が困難であった。希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (以下、BEC) では原子間相互作用 (散乱長) が二体問題に帰結でき、理論と実験が非常に高い精度で一致する。また、原子 BEC では超流動ヘリウムでは困難な流れの可視化が可能なほか、光および磁場を用いて運動量や原子間相互作用を広い範囲で制御可能である。他の量子系では実現困難な実験でも自由にパラメータを変えて実証できるため、理論を検証するための量子シミュレータとしても理想的な系である。一方、実験では安定的に多成分 BEC を生成することが困難で、2 成分間で起こる基本的な現象である相分離の実験研究がようやく盛んになり始めたところで、これらの不安定性の実証は未だなされていない。

我々はこれまで ^{87}Rb 原子の多成分 BEC の実験的研究を行ってきた。 ^{87}Rb では超微細構造 $F=1, 2$ 内の磁気副準位 8 成分を利用できるが、上準位 $F=2$ BEC は非弾性衝突レートが大きく平衡状態の観測など長時間の実験は困難だった。我々は、実験および理論評価によりこれまでわからなかった $F=2$ BEC のスピンに依存した非弾性衝突レートを定量的に求めた。また異成分間で相分離か混合するかは散乱長によって決定される。先行研究ではスピン自由度を生かせない磁気トラップで使って $F=1, 2$ 混合 BEC の相分離実験が行われてきたが、スピン自由度を生かせる光トラップを用いて 2 成分の相分離の実験を行い、 $F=2$ 内の数種の組合せで相分離する結果を得た。同時期に、特定領域研究で我々と共同研究を行ってきた電気通信大学のグループおよび大阪市立大学の理論グループによって BEC の界面不安定性が初めて示されており、そのときの意見交換時に着想のきっかけを得た。しかし、理論の提案では原子数が通常の 10 倍程度と多少厳しい条件で提案されており実証が困難だった。最近、申請者は光トラップ中の 2 成分 BEC を用いて異成分間の散乱長を直接操作した相分離の制御を初めて実現し、この結果により原子数を増やす代わりに散乱長を直接変化させることで前述の原子数の問題を解決できる可能性を示唆した。特に 2 成分 BEC の対向実験により RT 不安定性を誘引し、外場操作を加えることで KH 不安定性など別の不安定性の発生や量子乱流発生の着想を得た。

2. 研究の目的

2 成分古典流体界面で知られる不安定性は量子流体でも同様に生じることが予想されている。古典流体の不安定性は未解明な部分が多く乱流を現象論的に論じられている場合が多いが、量子流体では量子渦や相分離等の位相欠陥により定量的な観測が可能である。原子気体 BEC を用いればこれらを可視化できる。量子乱流の解明は古典流体系で困難とされている乱流の抑制や予測に応用できる。本研究では 2 成分原子気体のボース凝縮体の対向流を用いて乱流に起因する不安定性の観測を実現し量子流体界面不安定性ダイナミクスを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

2 成分 BEC として磁気モーメントの異なる ^{87}Rb $|F=2, m_F=-2\rangle$ および $|F=1, m_F=0\rangle$ の組合せを用いて勾配磁場を作用させる。この 2 成分では非弾性衝突レートが無視できることを実験的に確かめており、長時間の測定が可能である。この 2 成分は磁場に対する応答が異なるため、磁場勾配を印加して分離することができる。その後、勾配磁場を変化させて対向超流動を実現する。さらに対向時に界面不安定性を増大させるために、フェッシュバッハ共鳴現象を利用した異成分間の散乱長を変化させる。これらを長期安定化した光トラップ内で行う。この手法により誘起された界面不安定性に起因する密度分布は数 μm 程度と可視化できるほど大きいため CCD カメラ上で十分観測できる。密度分布および運動量分布の両方を観測するために、光トラップから解放した後に共鳴光を照射し、CCD によって撮影する。また実際の密度分布の測定には、高速 CCD カメラを用いて非破壊的に測定を行う。加えて、共鳴磁場の変調による散乱長変調や占有度操作による密度変調によって理論で予測されていない不安定性の観測も目指す。これら不安定性の結果を量子渦および量子乱流による解釈を試みる。

4. 研究成果

2 成分 BEC のダイナミクスは、原子数密度やトラップ中の初期運動に大きく影響する。つまり 2 成分の原子数や光トラップ導入時の重心ずれ等の実験状況がその後の測定結果を変えてしまう可能性がある。このため、まず 2 成分原子数の安定化 (10%以内) および初期運動を伴わないトラップ中心への導

入が必須である。

初年度はまず安定化の実現に注力した。前年度に所属研究室が移動したため、実験装置の再セットアップおよび改良を引き続き行う必要があった。環境温度の安定化や光トラップの微調整を行うことでこれらの不安定原因を排除することができ、今後の2成分凝縮体実験の精度向上が期待できる。2成分を安定的に生成した後、磁場勾配による分離実験を行った。磁場勾配はコイル電流を変化することで容易に変化できるため、分離時の相対速度変化の微小制御も可能である。

これらの安定化の実現後、初期状態で混合している2成分を分離するときに相対速度を変化させて、2成分ボーズ凝縮体の観測を行った。分離速度がある相対速度以上になったとき、2成分界面不安定性由来と見なされる特徴的な密度分布を観測し、量子渦と見られる密度分布を初めて観測した。KT不安定およびRT不安定性では量子渦生成が伴う可能性が予想されていた。また、小さな相対速度時では密度分布に変化が見られない領域を見出した。これらの分離ダイナミクスの詳細を評価することで、断熱的な2成分分離ができることもわかり、再混合実験のための重要な実験条件を特定することができた。また、成分間相互作用が変化するフェッシュバハ共鳴実験を行い、2成分間の混合ダイナミクスが変化する様子も初めて確認した。一方で、現装置では空間分解能が低く3 μm 以下の空間パターンは測定ができない。光トラップ中において非共鳴光を照射する非破壊測定も導入したが、空間分解能が十分でない。トラップ中およびトラップ解放後のいずれの方法においても、現状装置では波数の時間発展の定量的評価が困難であることがわかった。

2年目は2012年度より現大学へ異動したため、実験データの解析と装置の再開発を主として研究立上げを行った。前年に行った2成分実験データの解析を行った。フェッシュバハ共鳴磁場付近のデータ解析を行い、環境磁場による影響を評価した。結果、理論的な共鳴幅である数mGに比べ実験データは十数mG程度と広くその差が環境磁場による変動であることで説明できた。また2成分ボーズ凝縮体ダイナミクスの擬似3次元の数値計算を行った。不安定波数が外部から印加したポテンシャル勾配の依存性を示しており、2成分間の運動量交換を定性的に示すことができた。

これまで使用してきた装置は研究室所蔵のものを改良してきたため移管することはできない。また空間分解能の向上には旧装置では達成できないため再製作することが必要であること。特に空間分解能を飛躍的に向上させるため、光源、真空装置、観測装置お

よび磁場制御の改良を行った。光源については自作半導体レーザー装置を改良し温度の高安定化を実現できた。安定化回路作製のために基板作製機を導入し、レーザー周波数を100 kHz程度まで制御装置を制作できた。冷却光と観測光の周波数および強度安定化を実現できた。真空装置については磁場の影響を考慮しガラスセルを主とした開発を行った。真空度は 10^{-7} Paを達成しておりボーズ凝縮実験に十分な環境を整えている。環境磁場を抑えるための非磁性防振台および周辺機器の導入を行っている。また凝縮体の原子数の不安定化を生じさせていた環境磁場制御装置の開発も行った。微小磁気センサを用いた自作磁気プローブを製作し性能評価を行い1mG以下まで計測できることを確認できた。また2成分間の相互作用領域は1 μm 以下であることから近接場の観点から解析および数値計算を行った。2成分の内部状態間の遷移には磁気双極子遷移を用いており光学禁制遷移の理解が必要であった。そのため近接場中の光学禁制遷移による遷移レートを理論的に導出し波数依存のレート増幅を導き、高次の光学禁制遷移の効果を定量的に評価した。結果、局所的な相互作用制御の可能性を初めて示した。

これまで国内外のBECの密度分布観測では、空間分解能の限界が大きな問題となっており測定および解析手法の開発が必須の状況であった。本研究により安定的BEC生成の手法と観測および解析手法により、これまでは定性的にのみ示されていた混合ダイナミクスについて界面不安定性に起因する現象であることを実証した。さらに、散乱長制御による混合度の制御および実験手法の開発によって、これまで困難だった定量的実験が可能であることを示した。

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)

[学会発表] (計12件)

① 東條賢

「希薄原子気体ボースアインシュタイン凝縮体における超流動ダイナミクス」プラズマの素過程研究と分光診断の展望
2013年1月25日、核融合科学研究所

② 東條賢

“Quantum Vortex Generation in Spin-2 Bose-Einstein Condensate Using Optical Spoon Stirring”, International conference on topological quantum phenomena (TQP2012)

2012年5月19日、名古屋大学

③ 東條賢, 増山雄太, 関根佐和子, Mark Sadgrove, 平野琢也

「2成分 BEC の対向超流動実験」

物性研究所短期研究会「量子凝縮系における defects と topology」

2012年1月6日、東京大学物性研究所

[その他]

ホームページ

<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/j/tojo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東條 賢 (TOJO SATOSHI)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：30433709