

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05233

研究課題名(和文) ドレスト原子を利用したボース・アインシュタイン凝縮体の相互作用制御

研究課題名(英文) Control of interaction in Bose-Einstein condensates by a dressing field

研究代表者

衛藤 雄二郎 (Eto, Yujiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：50600003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、マイクロ波やラジオ波を用いてスピン自由度を持った原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を制御し、非平衡量子ダイナミクスを観測することである。ドレスト場を利用した相互作用制御の研究では、 ^{87}Rb 原子のスピン1の2つのゼーマン準位を用いて、空間的な非平衡ダイナミクスを観測した。ドレスト場の照射により、ペア原子で生じる相分離構造が抑えられることを実験的に明らかにした。更に、スピン1とスピン2のスピンオールBEC混合系における非平衡ダイナミクスの観測に成功した。混合系の生成によって、磁気的な基底状態が変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to control atomic Bose-Einstein condensates (BEC) with internal degrees of freedom using microwave and radio frequency wave and to observe non-equilibrium quantum dynamics. In the experiment of interaction control using the dressing field, spatial nonequilibrium dynamics was observed using two Zeeman levels in spin-1 atoms of ^{87}Rb . It is shown that the phase separation structure occurring at the bare atoms is suppressed by application of the dressing field. In addition, we succeeded in observing nonequilibrium dynamics in the mixture of spin-1 and spin-2 atoms. It is revealed that the magnetic ground state changes by generation of the spinor mixture.

研究分野：量子光学

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮体 混和性 ドレスト場 スピン混合系 非平衡ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

光双極子力によって捕獲された冷却原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) は、豊富な内部自由度と高度な制御性を併せ持った量子気体系である。豊富な内部自由度は、2成分系 (擬似スピン 1/2) やスピン 1 以上の量子スピン系の生成を可能にし、高度な制御性によって、内部自由度を持った量子気体の様々な磁性や流体的な特性、さらには関連する非平衡ダイナミクスの研究がなされている。

2成分 BEC 系では、異なる成分が混ざり合うか相分離を起こすかといった混和性の度合いが系を特徴づける重要な指標の 1 つとなっている。相分離によって生じる空間パターンは、キップル・ズレック機構とも関連することが指摘されている重要な研究対象である。実験的に混和性の制御は、フェッシュバハ共鳴やドレスト原子の手法によって実現することができる。ドレスト原子の手法は、近年ハイデルベルグ大学のグループによってはじめて実験的に立証された。フェッシュバハ共鳴に比べて、混和性の度合いのダイナミックレンジは制限されてしまうが、外場によって結合可能なすべての 2 準位に適應でき、結合の有無によってクエンチが可能などのいくつかの利点を持つ。

全角運動量の大きさが 1 や 2 のスピノール BEC の磁気的な性質は、原子種やスピンの状態に応じて異なる。これまで、スピン 1 やスピン 2 やスピン 3 を利用して、強磁性や反強磁性などの磁性に由来する様々な非平衡ダイナミクスが観測され、広く調べられている。個々のスピン系の性質が調べられている一方で、2 つの異なる大きさのスピンを混ぜ合わせたスピン混合系の性質はほとんど明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、原子の内部状態に共鳴するラジオ波 (rf) やマイクロ波を用いて BEC の内部状態を制御し、非平衡ダイナミクスを観測することを目的としている。

2成分 BEC 系の研究では、2体の非弾性衝突の生じない BEC を用いて非平衡ダイナミクスの研究を行う。2体の非弾性衝突の影響がない場合には、比較的多数の原子数を用いて長時間ダイナミクスを観測可能である。スピノール BEC の研究では、同種原子の異なる超微細スピンを利用することによってスピン混合系を実現し、混合系における磁化の非平衡ダイナミクスの観測を目指す。

3. 研究の方法

実験では、87Rb 原子の BEC を用いる。まず、磁気トラップ中で生成した BEC を交差型の光トラップに移行する。87Rb 原子の基底状態は、全角運動量 F が 1 と 2 の 2 つの超微細スピンから成る。それらは、有限磁場中で、 $3 + 5 = 8$ つの磁気副準位 m_F に分裂する。

光トラップ移行直後の原子の状態は、全角運動量 F の大きさが 2、磁気副準位 m_F が -2 である。

2成分 BEC の研究では、2体の非弾性衝突が生じないように、 $F = 1$ の磁気副準位を利用する。2体の弾性衝突による m_F の変化を抑圧するために、バイアス磁場の大きさは、11 G 程度に設定する。内部状態のポピュレーションは、状態間に共鳴するラジオ波やマイクロ波を用いて制御する。

スピノール BEC の研究では、2次ゼーマン効果を抑えるために、バイアス磁場の大きさを 200 mG 程度にする。スピン混合系は、強磁性的な性質を持つスピン 1 と非強磁性的な性質を持つスピン 2 の 2 つの超微細スピンを混ぜ合わせることによって生成する。

各 m_F の原子数を測定する際には、BEC を光トラップから解放する。原子は、シュテルンゲルラッハ法により m_F 毎に空間分離される。2成分系の実験では、15 ms の落下の後、 $F = 2 - F' = 3$ の共鳴光を用いた吸収イメージングによって原子を撮影する。スピン混合系の実験では、13 ms 落下させ、 $F = 2$ の各 m_F 状態を測定した 2ms 後に、リポンプ光と共鳴光を用いて $F = 1$ の状態を測定する。イメージングから得られた OD の空間分布を用いて、各 m_F の原子数を算出する。

4. 研究成果

(1) ラビ結合を利用した相互作用制御

本研究では、2体の非弾性衝突が生じない $F = 1$ の $m_F = -1$ と $m_F = 0$ の 2 準位を利用して実験を行った。 $F = 2$, $m_F = -2$ の BEC にマイクロ波とラジオ波を照射し、空間的に重なり合った $F = 1$, $m_F = -1$ と $m_F = 0$ の 2 成分 BEC を生成する。

まず、ドレスト状態を形成していないベア状態の空間構造のダイナミクスを観測した。300 ms 経過後、空間的に分離した相分離構造が観測された (図 1)。その後、600 ms 程度で再び重なり合った構造へと変化した。この周期的な変化は、 s 波散乱長の大きさから計算される混和性の度合いが混和と非混和の境界上であるために生じているものだと考えられる。

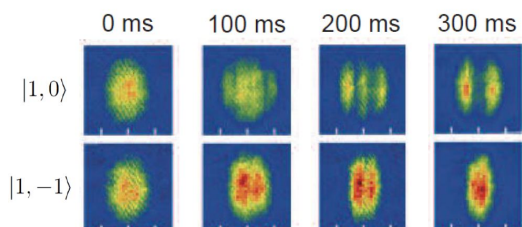


図 1 : $F = 1$ の $m_F = -1$ と $m_F = 0$ の 2 成分 BEC における空間構造形成

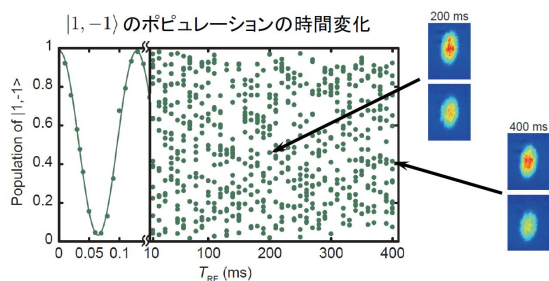


図 2 : 2 準位に共鳴する rf を照射し続けた場合の $m_F = -1$ のポピュレーションの変化と 200 ms と 400 ms の空間構造。

次に、2 成分間に共鳴する rf を照射し続け、ドレスト状態を形成した場合の空間構造のダイナミクスを観測した(図 2)。この場合、ベア原子のような分離構造は観測されなかった。観測された空間構造の変化は、ドレスト状態の形成によって混和性の大きさや s 波散乱長が実効的に変化したためであると解釈することができる。

上述のドレスト原子による研究以外にも、相分離ダイナミクスと内部状態の遷移を利用した 2 成分 BEC の空間構造制御法の実証にも成功した。本手法では、まず相分離する 2 成分系を準備し、相分離構造が形成されるまで時間発展させる。相分離構造が形成されたタイミングで、ラジオ波やマイクロ波を用いて混ざり合う性質を持つ 2 成分に切り替える。この手法を用いることによって、混ざり合う性質を持つ 2 成分系において、空間構造の周期的な変化を観測することに成功した。本研究は、New Journal of Physics, vol. 18, 073029/1-6 (2016) に掲載された。

(2) スピン混合系の磁性

87Rb 原子の 2 つの超微細スピン (スピン 1 とスピン 2) を用いて BEC スピン混合系を生成し、スピノールダイナミクスを観測した。スピン 1 やスピン 2 の片方のみを使用した多くの実験では、スピンを回転させるために磁気副準位間に共鳴する、もしくは周波数掃引した rf やマイクロ波が用いられて、いるしかしながら、この方法を同種原子から成るスピン混合系に適用した場合、2 つのスピンのゼーマンシフトの大きさがほぼ等しいため、スピンの同時回転してしまい独立に制御することができない。この問題を解決するために、図 3 に示すようなスピン 1 とスピン 2 の同時ラムゼイ干渉計を用いた方法を考案した。同時ラムゼイ干渉計は、2 つのスピンのラーモア歳差運動周期の僅かな違いを抽出することが可能であり、パルス間の時間や位相の調整により、スピンの相対的な角度や向きを制御することができる。

実験では、同時ラムゼイ干渉計を使い、横方向に偏極したスピン 1 と縦方向に偏極したスピン 2 BEC の混合系を生成し、時間発展を観測した。混合系では、スピン 1 BEC の磁化の時間的な変調が観測された。一方、スピ

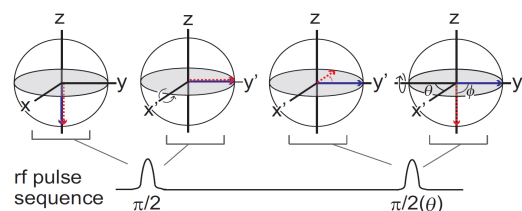


図 3 : スピン 1 とスピン 2 の同時ラムゼイ干渉計。青い矢印がスピン 1、赤い矢印がスピン 2 に対応する。回転座標 $x'-y'$ は、2 つのスピンの逆方向に回転する。回転周期はスピン 1 ラーモア歳差運動の周期に等しい。

ン 1 単体の系では、スピン 1 原子の強磁性的な性質によって、ほぼ完全に偏極した状態を保つ。これらの結果から、混合系におけるスピン 1 の磁化の時間変調は、スピン 2 との相互作用により引き起こされている効果であるといえる。また、混合系の生成によってスピン 1 の磁性が強磁性から変化したことを反映している。本研究成果は、Physical Review A vol. 97, 021602(R)/1-5 (2018) 及び Physical Review A, vol. 97, 0223622/1-10 (2018) に掲載された。

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)

[雑誌論文](計 7 件)

Naoki Iikura, Yujiro Eto, Takuya Hirano, and Hiroki Saito, “Ground-state phases of a mixture of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates”, Physical Review A, 査読有, 97, 2018, 023622/1-10, DOI: 10.1103/PhysRevA.97.02362

Yujiro Eto, Hitoshi Shibayama, Hiroki saito, Takuya Hirano, “Spinor dynamics in a mixture of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates”, Physical Review A, 査読有, 97, 2018, 021602(R)/1-5, DOI: 10.1103/PhysRevA.97.021602

Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Masaya Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Corrigendum: Nonequilibrium dynamics induced by miscible-immiscible transition in binary Bose-Einstein condensates”, New Journal of Physics, 査読有, 20, 2018, 019501/1-2, DOI: 10.1088/1367-2630/aaa165

Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Keita Nabeta, Ryotaro Okada, Masaya

Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Erratum: Bouncing motion and penetration dynamics in multicomponent Bose-Einstein condensates", Physical Review A, 査読有, 96, 069904(E)/1, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.069904

Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Masaya Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Nonequilibrium dynamics induced by miscible-immiscible transition in binary Bose-Einstein condensates", New Journal of Physics, 査読有, 18, 2016, 073029/1-6, DOI: 10.1088/1367-2630/18/7/073029

Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Keita Nabeta, Ryotaro Okada, Masaya Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Bouncing motion and penetration dynamics in multicomponent Bose-Einstein condensates", Physical Review A, 査読有, 93, 033615/1-6, DOI: 10.1103/PhysRevA.93.033615

Yujiro Eto, Masaya Kunimi, Hidekatsu Tokita, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Suppression of relative flow by multiple domains in two-component Bose-Einstein condensates", Physical Review A, 査読有, 92, 2015, 013611/1-5 DOI: 10.1103/PhysRevA.92.013611

[学会発表](計 18 件)

衛藤雄二郎, 「冷却原子のスピン制御による量子計測・量子物性の研究」日本物理学会 第 73 回年次大会(東京理科大学野田キャンパス), 2018 年 3 月 23 日

柴山均, 鳥居明季, 柴田康介, 高橋雅裕, 衛藤雄二郎, 齋藤弘樹, 平野琢也, 「ボース・アインシュタイン凝縮体の相分離ダイナミクス光トラップ形状依存性 III」日本物理学会 第 73 回年次大会(東京理科大学野田キャンパス), 24pK101-6, 2018 年 3 月 24 日

柴田康介, 柴山均, 鳥居明季, 鈴木涼太, 戸田寛之, 高橋雅裕, 衛藤雄二郎, 齋藤弘樹, 平野琢也, 「ラビ結合した 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の相分離ダイナミクス」日本物理学会 第 73 回年次大会(東京理科大学野田キャンパス), 24pK101-7, 2018 年 3 月 24 日

柴山均, 鳥居明季, 柴田康介, 衛藤雄二郎, 齋藤弘樹, 平野琢也, 「ボース・アイン

シュタイン凝縮体の相分離ダイナミクス光トラップ形状依存性 II」日本物理学会 2017 年秋季大会(岩手大学上田キャンパス), 22pA10-1, 2017 年 9 月 22 日

Kosuke Shibata, Hitoshi Shibayama, Aki Torii, Ryota Suzuki, Hiroyuki Toda, Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Hiroki Saito, Takuya Hirano "Phase separation of Rabi-coupled spin states in an 87Rb $F = 1$ BEC" JSAP-OSA Joint Symposia 2017, E 7p-A410-9, Fukuoka Convention Center, Fukuoka, Japan; 7 September. 2017

Hitoshi Shibayama, Aki Torii, Kosuke Shibata, Yujiro Eto, Hiroki Saito, Takuya Hirano "Phase separation dynamics of two-component Bose-Einstein condensates in various optical trap shapes", JSAP-OSA Joint Symposia 2017, E 7p-A410-8, Fukuoka Convention Center, Fukuoka, Japan; 7 September. 2017

Yujiro Eto, Hitoshi Shibayama, Aki Torii, Hiroki Saito, Takuya Hirano, "Observation of self-organized coherence in dissipative spinor Bose-Einstein condensates", JSAP-OSA Joint Symposia 2017, E 7p-A410-7, Fukuoka Convention Center, Fukuoka, Japan; 7 September. 2017

鳥居明季, 鍋田慧太, 高橋雅裕, 柴山均, 衛藤雄二郎, 齋藤弘樹, 平野琢也, 「RF スピン制御された 87Rb ボース・アインシュタイン凝縮体におけるスピン交換衝突」日本物理学会 第 72 回年次大会(大阪大学豊中キャンパス), 19pB22-7, 2017 年 3 月 19 日.

柴山均, 岡田涼太郎, 衛藤雄二郎, 齋藤弘樹, 平野琢也, 「ボース・アインシュタイン凝縮体の相分離ダイナミクス光トラップ形状依存性」日本物理学会 第 72 回年次大会(大阪大学豊中キャンパス), 19pB22-6, 2017 年 3 月 19 日

衛藤雄二郎, 柴山均, 齋藤弘樹, 平野琢也 「スピン 1・スピン 2 混合ボース凝縮体における rephasing の観測」日本物理学会 第 72 回年次大会(大阪大学豊中キャンパス), 19pB22-3, 2017 年 3 月 19 日

衛藤雄二郎, 「スピノール ボース・アインシュタイン凝縮体における位相ダイ

