

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：32606

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25103007

研究課題名(和文)多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の非平衡ダイナミクス

研究課題名(英文)Non-equilibrium Dynamics in Multi-component Bose-Einstein Condensates

研究代表者

平野 琢也(Hirano, Takuya)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：00251330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 60,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多成分量子凝縮体を非平衡系として捉え、そこに現れる非平衡構造の時間発展とゆらぎ、秩序形成について、理論と実験の密接な協力体制で研究を進めた。また、領域内の他の研究班とも連携し、多成分ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる普遍的な現象の解明を目指した。本研究により実現した連携は非常に有意義であり、磁気双極子相互作用による空間構造形成、混和性が非平衡ダイナミクスに与える影響、混合スピノールBEC系の新奇な振る舞い、マグノン励起、スピン軌道相互作用、超流動体における層流-渦系乱流転移の非平衡臨界現象等多くの成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have studied multicomponent quantum condensate as a non-equilibrium system and studied on time evolution, fluctuations and order formation of a non-equilibrium structure appearing in it, with close collaboration of theory and experiment. We also collaborated with other researchers in the project and aimed to elucidate universal phenomena appearing in multicomponent Bose-Einstein condensate. The collaboration realized by this project is very fruitful, and we were able to get many interesting results such as spatial structure formation by magnetic dipole interaction, influence of miscibility on non-equilibrium dynamics, novel behavior of spinor BEC mixture, magnon excitation, spin-orbit interaction, and universal critical behavior at a phase transition to quantum turbulence.

研究分野：量子光学

キーワード：冷却原子 ボース・アインシュタイン凝縮 非平衡臨界現象 相分離 量子乱流 スピノールBEC 自発磁化 量子渦

1. 研究開始当初の背景

1970年代の超流動ヘリウム 3 に始まった多成分超流動体の研究は、冷却原子気体の多成分ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の実現によって大きな展開を見せており、本研究を開始した時点で、国内外の複数のグループによって精力的に研究が行われる状況であった。しかしながら、本研究以前の従来の研究では、安定な量子相やそれらが形成する安定な構造に重点が置かれ、非平衡状態にある多成分超流動体、特に成分間に形成された界面の非平衡ダイナミクスに着目した研究はほとんど行われてこなかった。そこで、本研究では、多成分量子凝縮体を非平衡系として捉え、その非平衡ゆらぎが生む構造変化を実験的、および、理論的に研究することにより、普遍的な非平衡現象を見出すことを目的として研究を行った。

2. 研究の目的

中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) は、 10^6 個程度というアボガドロ数に比べると圧倒的に少ない数の原子を $10^4 \mu\text{m}^3$ 程度の比較的マクロな体積中に閉じ込め、 100 nK 程度という極低温に冷却したメソスケールの量子系である。この系の特徴は温度や外力を調整して原子間相互作用さえも高精度かつダイナミックに制御できるという点であり、さらにそのダイナミクスを光学的なイメージングにより実時間観測することができる。また、グロス・ピタエフスキー方程式によって予言される理論を、実験と定量的に比較することによって、量子渦のようなトポロジカル欠陥と非平衡構造の関わりについての詳細な知見を得ることが期待される。本研究の目的は、多成分量子凝縮体を非平衡系として捉え、そこに現れる非平衡構造 (密度分布、スピントクスチャー) の時間発展とゆらぎを実時間で観測し、秩序形成についての物理的理解を深めることである。理論と実験の密接な協力体制で研究を進め、領域内の他の研究班とも連携することで普遍的な現象の解明を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、多成分 BEC を舞台とする非平衡ダイナミクスを理論的・実験的に探求することにより、他の物理系にも共通に見られる非平衡現象を実験的に実現し、その詳細な理論的解析を行うことを研究期間内に達成し、これにより、非平衡科学の新しい研究の流れの創出に貢献することを目的として研究を行った。より具体的には、不安定な界面を持つ多成分 BEC を実験的に生成し、その後の非平衡ダイナミクスをイメージングにより観測し、その際、外部磁場勾配や原子間相互作用を制御し、ダイナミクスに与える影響を調べるとともに、非平衡ダイナミクスを制御することを試みた。理論研究では、実験に連携して数値シミュレーションを遂行し、最適条件

の探索と実験結果の解析を行う。それに加えて、多成分 BEC に現れる界面パターンやドメインなどの構造とゆらぎ (量子ゆらぎ、熱ゆらぎ) との関連性を明らかにする。

本研究の実験では、ルビジウム原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を研究対象として用いた。ルビジウム 87 原子は全角運動量 $F = 2$ の状態は5つの、 $F = 1$ は3つの磁気副準位をもつので、合計で8成分の多成分量子凝縮体を実現することができる。本研究では、原子気体 BEC における超流動体の不安定界面、量子渦のダイナミクス、スピン構造などの非平衡ダイナミクスを実験的・理論的に探求した。

4. 研究成果

本新学術領域研究により、理論と実験の密接な共同研究、さらに領域内の連携が可能となり、以下で概略を述べる成果のほか、非平衡ダイナミクスの光トラップ形状依存性等^① 多くの興味深い研究成果を得ることができた。

(1) 磁気双極子相互作用

磁気双極子相互作用に関する研究では、BEC のスピン自由度と高い空間コヒーレンスを巧みに利用し、BEC スピンの空間構造形成を観測することに成功した [9]。スピン自由度を持つ BEC では、スピンの向き、すなわち、磁気双極子の向きは自由な方向を向くことができる。原子気体 BEC のスピンは興味深い研究対象であり、特に、磁気双極子相互作用は、非等方的な長距離力であることから、基礎から応用にわたる幅広い分野における新しい可能性を開く重要な研究課題である。

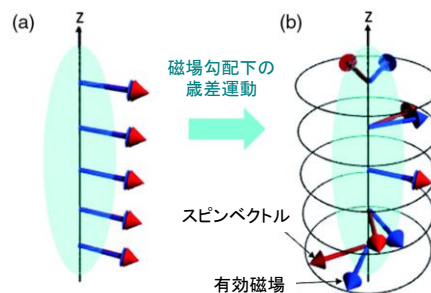


図1 スピンの空間分布と磁気双極子の作る有効磁場

本研究では、磁気双極子の小さい Rb 原子 BEC を用いており、双極子のつくる磁場の大きさは $10 \mu\text{G}$ 程度で、地磁気と比べても3桁以上小さい。しかしながら、BEC スピンの向きを巧みに制御することで、磁気双極子の効果を観測することに成功した。図 1(a) は、スピンの向きが外部バイアス磁場と直交する同じ方向を向いている場合と、(b) はスピンの向きが螺旋状に変えている場合の磁気双極子の作る有効磁場を表している。(a) の場合には、スピンの向きと有効磁場の向きが平行であり、スピンは有効磁場の影響を受けない。一方、(b) の

場合には、場所に応じてスピンの向きが異なる。磁場に対してスピンの成分を持つ場合、スピンは有効磁場を軸とした歳差運動を起こす。図 1(b)では、紙面上側のスピンの外部バイアス磁場方向に傾き、紙面下側では逆方向に傾く。言い換えると、有効磁場により自発的に位置に応じた縦磁化が生じる。実験結果から縦磁化を求めると、磁気双極子相互作用を考慮した数値計算と良く一致する結果が得られた。この空間変調効果は、磁気双極子相互作用の効果を含んだグロス・ピタエフスキー方程式によってのみ再現され、磁気双極子相互作用による有効磁場中でのスピン回転を表すものである。本研究成果は、スピン状態によっては、微弱な磁気双極子相互作用が BEC スピンのダイナミクスに大きな影響を与えることを明らかにした。

(2) 引力相互作用する BEC の崩壊

引力相互作用する原子の BEC は、ある臨界原子数以下の場合には準安定であり、臨界原子数を超えると自らの引力に耐え切れずに崩壊することが知られている。先行研究では、臨界原子数の近傍で量子トンネル効果により準安定なエネルギーバリアを通過して崩壊する可能性が指摘されていたが、半古典的な議論しかなされていなかった。崩壊に関する平均場理論を用いた研究は数多く存在するが、平均場近似では量子トンネル効果による崩壊は記述できない。そこで、本研究では直接量子多体計算を行い、量子トンネル効果による BEC の崩壊を初めて直接的に示すことに成功した[11]。トンネル確率の相互作用依存性および粒子数依存性などが計算された。本研究は崩壊のダイナミクスを量子多体計算によって示した最初の結果であり、その手法は今後、量子揺らぎの研究に応用できる可能性がある。

(3) 量子渦生成におけるヒステリシス

BEC 中を運動する障害物ポテンシャル後方の量子渦生成については、これまで電気通信大学の理論グループで継続的に研究を行ってきたが、本研究により新たな現象を発見した。それは、静的な層流の状態と量子渦が連続的に生成される状態という二つの状態の間のヒステリシスである。障害物ポテンシャルの速度を徐々に上げていくと、ある臨界速度以下では層流の状態であるが、臨界速度 v_1 を超えると量子渦が規則的に生成され始める。一方、量子渦が規則的に出ている状態から速度を徐々に下げていくと、ある臨界速度 v_2 以下で層流に戻る。

今回見出したのは $v_1 > v_2$ という双安定領域の存在である。これまでは、速度を徐々に上げていった時に量子渦が生成する速度と、速度を徐々に下げた時に量子渦生成が止まる速度は一致すると考えられていた。我々はこれら二つの速度が異なることを示し、ヒステリシスが存在することを明らかにした[10]。

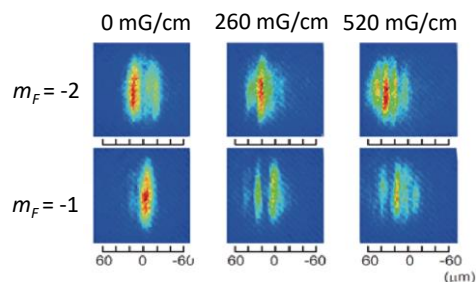


図 2 勾配磁場とドメイン構造

古典流体力学でも双安定な流れの例はいくつか報告されているが、このような単純な系での双安定性は知られていない。

(4) ドメイン構造による流動抵抗

空間的に重なり合った immiscible (非混和) な性質を持つ 2 成分 BEC を均一な捕獲ポテンシャル中に準備した場合、空間的に互いに分離するよう時間発展する。この非混和性により形成される自発的な空間構造形成が 2 成分 BEC の流動性にどのような影響をもたらすのかを実験と理論シミュレーションから明らかにした[7]。実験では、ラジオ波パルスを用いて光トラップ中に異なる磁気副準位の immiscible な 2 成分 BEC を準備する。次に、自発的に構造が形成される前と形成後のそれぞれの場合に、2 成分に対して異なる大きさのポテンシャル勾配を印加し、その後のダイナミクスを観測した。図 2 は、2 成分 BEC を準備した後に 40 msec 保持して自発的にドメイン構造が形成された後に、磁場勾配を 10 msec の間印加し、その後シュテルン・ゲルラッハ法により撮影した画像である。520 mG/cm という大きな磁場勾配を印加してもドメイン構造が保たれていることが分かる。また、2 成分の重心の相対的な距離の保持時間依存性を調べたところ、ドメイン構造が形成された場合には、2 成分の重心の相対的な変化が抑制されていた。2 成分が空間的に重なり合った初期状態から時間発展を始めると、最初は非混和性のためにドメインを形成するような流れが生じるが、一旦ドメイン構造が形成されると、外部から擾乱を与えても、非混和性のために生じた構造が 2 成分 BEC の流れを妨げるような働きを持つことが明らかになった。

(5) 量子渦対の運動

スピン 1 の原子からなる BEC には磁化が向きを揃える強磁性相と磁化をゼロにするポラー相の 2 種類の磁性相があり、それぞれの相の対称性に応じて、トポロジカルな欠陥である量子渦 (スピン渦) の種類も異なる。そこで我々は、空間のある部分では強磁性相、別の部分ではポラー相となるような状況を設定し、量子渦対が磁性相間の界面を通過するようなダイナミクスを研究した。その結果、量子渦対のトポロジカルな性質もダイナミカ

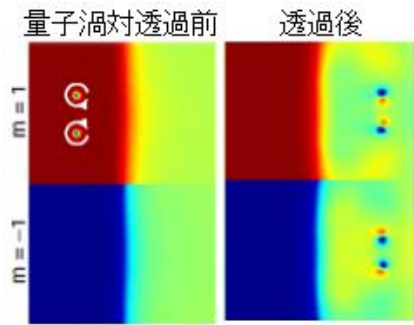


図3 スピノールBEC界面における量子渦対透過の様子

ルに変化し、通過後に様々なスピン渦対が生成されることが明らかになった[8](図3)。

(6) マグノン励起

強磁性相互作用するスピン1のBECには、強磁性体におけるマグノンに類似した素励起が存在する。最近、UCバークレーの実験グループによってスピン1のルビジウム原子のBECにおけるマグノン励起が観測され、分散関係が高精度で測定された。その結果、これまで予想されていた分散関係(自由原子と同じ分散関係)からのずれが見出された。そこで我々は、磁気双極子相互作用の効果を取り入れた平均場方程式を数値的に解くことにより、実験で測定された分散関係のずれが確かにルビジウム原子間の磁気双極子相互作用によるものであることを定量的に確かめた。また、磁場の向きを変えるだけで、ずれの符号が逆転することを理論的に予想した[5]。

(7) 量子渦糸乱流

学習院大学グループの理論面での研究としては、量子渦糸乱流における非平衡臨界現象に着目して研究を行った。非平衡現象の代表として乱流状態があげられる。本研究で注目した量子流体の系では外部揺動の下、渦糸乱流が実現する。これまでの先行研究では強い外部揺動の下での発達乱流の研究が公募班A02の小林氏、A04の坪田氏等によって盛んに行われてきた。また、古典系での2次元液晶においては、渦欠陥を含む乱流転移の普遍

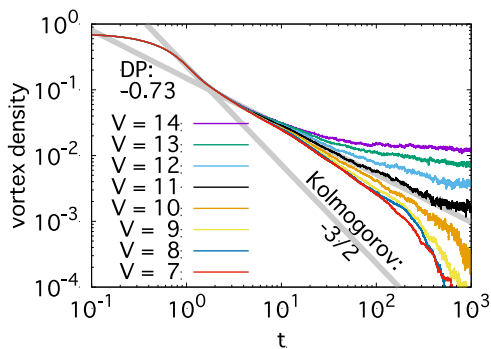


図4 ポテンシャルクエンチによる渦密度の時間変化。初期ではKolmogorov則で現れる $-3/2$ の冪が見え、臨界ポテンシャル V_c では続いて -0.73 のDPの冪が見える(黒線)。

クラスが、実験的にA01班竹内氏らにより確かめられている。一方、層流-乱流転移といった非平衡臨界現象の研究は行われていない。本研究では研究班をまたいで、小林氏、竹内氏と協力しながら、量子流体の層流-乱流転移の普遍クラスを特定することを目指して研究を進めてきた。量子流体の実験結果を定量的にもよく表現するグロス・ピタエフスキー方程式を数値的に解くことによって、すべての独立な臨界指数を測定し、それが、3次元の異方的浸透現象(directed percolation: DP)クラスに一致することを見いだした(図4参照)。

(8) 混和性と非平衡ダイナミクス

多成分BECは、それらを空間的に重ね合わせて生成した場合に、その後混ざり合ったままなのか、もしくは相分離を起こすかという混和性によって特徴づけることができる。我々は系に大きなエネルギーを加えたよりダイナミックな状況において、混和性の違いがどのような影響をもたらすのかを明らかにすることを目的に研究を行った。実験では、Rb原子の豊富な内部自由度を利用して様々な大きさの混和性を持つ多成分BECを生成し、磁場勾配パルスを用いて多成分BECを衝突させ、その後のダイナミクスを観測した。その結果、混ざり合うBEC間の反発やドメイン形成、混和性に敏感な混ざり合わないBEC間の通過など、一見直観に反する多様なダイナミクスの観測に成功した。理論シミュレーションから、観測された非平衡ダイナミクスが系の全エネルギーには直接依らず、局所的な構造が大きく起因する複雑な現象であることが明らかになった[4](図5参照)。

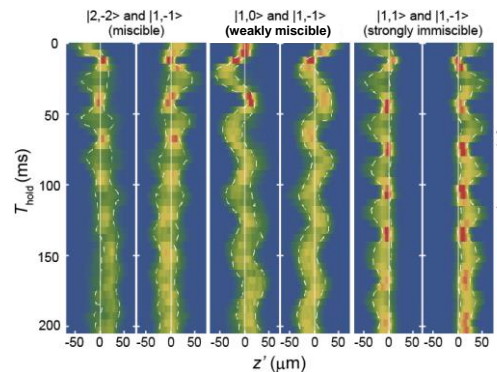


図5 混和性の異なる3種類の2成分BECを衝突させたときの振る舞い

(9) 空間構造制御した非平衡ダイナミクス

パターン形成のような空間的な非平衡ダイナミクスを誘起するためには、空間的に不安定な状態を生成する必要がある。混ざり合わない性質を持つ2成分BEC系では、空間的に重なり合った状態を準備することにより相分離ダイナミクスを誘起することができ、これまで混和性の大きさに敏感な多様な空間構造形成の観測が報告されている。一方、混ざり合う2成分系において不安定な状態を生成するためには、2成分の重なり合いが少ないよ

り複雑な構造を作り出す必要があり、空間構造を十分制御した上での非平衡ダイナミクスの観測はこれまで報告されていない。我々は、相分離ダイナミクスと外場による原子の内部状態遷移を利用することにより、混ざり合う BEC の空間構造を制御することに成功した。更に、本手法を利用し、空間的な非平衡ダイナミクスを誘起し、振動的に変化する多様な空間パターンの観測に成功した。理論シミュレーションとの比較から、振動のダイナミクスが系の全エネルギーと密に関連することを明らかにした[3]。

(10) 超流動体中の自己推進

超流動体は粘性を持たない流体として知られているが、その中を変形する物体が自己推進できるか、すなわち、超流動体中で泳ぐことができるかを、平均場近似の範囲内で数値的に研究した。時間反転非対称な変形の場合には超流動体を乱さずに推進することがわかった。速い変形の場合には量子渦や励起を放出して自己推進が可能であることがわかった。その結果、泳者が量子渦を発生する場合、しない場合ともに自己推進が可能であることが示された[6]。

(11) 混合スピノール BEC

^{87}Rb 原子の基底状態にあるスピン 1 とスピン 2 の 2 つの超微細準位を利用して、スピン 1 とスピン 2 の混合スピノール BEC 系を生成し、2 つのスピンの相対的な角度や方向を制御する方法を提案・実証した。提案した方法では、スピン 1 とスピン 2 の同時ラムゼイ干渉計を用いて、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により、混合スピンの制御を実現した。この方法は、スピン 1 とスピン 2 の同時ラムゼイ干渉計を用いて、混合系のそれぞれのスピン制御を実現するものであり、2 つのスピンの相対的な角度や方向を制御することが可能である。2 つのスピン間の相互作用により誘起されるスピン 1 の磁化の時間変化を観測し、理論との比較により、混合系では基底状態が変化することを明らかにした[2]。

混合スピノール系の基底状態についての理論的な研究を行い、スピン 1 とスピン 2 の間のスピン依存する 2 つの相互作用係数、およびスピン 1 同士、スピン 2 同士の合計 5 つの相互作用係数のパラメータ空間を系統的に調べた。その結果、これまで知られていた状態の他に、非常に豊かな基底状態の相が存在することを見出した。また、スピンベクトルの向きに関して軸対称性が破れた相があることを発見した[1]。

ルビジウム 87 の基底状態については、実験から決めた相互作用パラメータから、1 : 1 の混合系では、スピン 1 の基底状態はポーラー状態、スピン 2 は 2 軸ネマティック状態となり、それぞれ単独のときの基底状態から変化することが分かった[1]。

(12) 磁気双極子相互作用による自己束縛

経路積分モンテカルロ法を用いて、強く磁気双極子相互作用する BEC の量子多体計算を行った。平均場近似では、双極子相互作用の引力部分により系が崩壊してしまうことが予想されているが、ドイツの実験グループにより BEC が崩壊せずに安定であることが観測された。この現象を理解するため、平均場近似を用いず、厳密な量子多体計算を行うことにより、確かに BEC が安定に存在することを確かめた。この結果は、強く磁気双極子相互作用する BEC では、系の定性的性質を変えるほど量子ゆらぎの効果が大きいことを示している[4]。

(13) 損失によるコヒーレンスの形成

スピン 2 BEC を用いた実験では、磁気副準位 $m_F = 0$ のみを占有する状態を準備し、その後のスピノールダイナミクスを観測した。学習院大学で行った以前の研究と比較して、本実験ではシュテルン・ゲルラッハ法によるスピンの測定の前に、磁気副準位間に共鳴するラジオ波パルス照射している。これにより、量子化軸方向（バイアス磁場方向）と平行な方向だけでなく、直交する方向を軸としたスピンの射影測定が可能となる。我々はこの 2 つの異なる軸による測定から、 $m_F = 0$ を初期状態とするスピン 2 の BEC が、100 ms 程度の時間スケールで、強磁性スピンの基底状態へと時間発展することを見出した^③。この現象は、損失が重要な役割を果たすことによってコヒーレンスが形成され、初期状態とは異なる損失に対して頑強な状態が対称性の破れを伴って自発的に形成されるものであり、量子系における損失の役割に普遍的な新しい視点をもたらすものと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 35 件)

- [1] Naoki Irikura, 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* **97**, 023622/1-10 (2018). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevA.97.023622
- [2] Yujiro Eto, Hitoshi Shibayama, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, Spinor dynamics in a mixture of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates, *Physical Review A* **97**, 021602(R)/1-5 (2018). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevA.97.021602
- [3] 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* **17**, 0703029/1-6 (2016). 査読有

- DOI:10.1103/PhysRevA.93.033615
- [4] Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Keita Nabeta, Ryotaro Okada, Masaya Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, Bouncing motion and penetration dynamics in multi-component Bose-Einstein condensates, *Physical Review A* **93**, 033615/1-6 (2016). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.93.033615
- [5] Hiroki Saito and Masaya Kunimi, Energy shift of magnons in a ferromagnetic spinor-dipolar Bose-Einstein condensate, *Physical Review A* **91**, 041603(R)/1-4 (2015). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.93.033611
- [6] Hiroki Saito, Can we swim in superfluids?: Numerical demonstration of self-propulsion in a Bose-Einstein condensate, *Journal of the Physical Society of Japan* **84**, 114001/1-6 (2015). 査読有
DOI:10.7566/JPSJ.84.114001
- [7] 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* **92**, 013611/1-5 (2015). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.92.013611
- [8] Tsuyoshi Kadokura, Jun Yoshida, and Hiroki Saito, Hysteresis in quantized vortex shedding, *Physical Review A* **90**, 013612/1-5 (2014). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.90.013612
- [9] Yujiro Eto, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, Observation of dipole-induced spin texture in an ^{87}Rb spin-2 Bose-Einstein condensate, *Physical Review Letters* **112**, 185301/1-5 (2014). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.112.185301
- [10] Tomoya Kaneda and Hiroki Saito, Dynamics of a vortex dipole across a magnetic phase boundary in a spinor Bose-Einstein condensate, *Physical Review A* **90**, 053632/1-7 (2014). 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.90.053632
- [11] Hiroki Saito, Many-body dynamics of a Bose-Einstein condensate collapsing by quantum tunneling, *Physical Review A* **89**, 023610/1-6 (2014). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.023610

他 24 件

〔学会発表〕 (計 95 件)

- ① 柴山均, 鳥居明季, 柴田康介, 衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 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, 2018 年 3 月 22 日~25 日.

- ② Masahiro Takahashi, Michikazu Kobayashi, Kazumasa and A. Takeuchi, Universality class of transition to a vortex turbulence in quantum fluids, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (Nov. 20-23, 2017), Sendai, Japan.
- ③ Yujiro Eto, Hitoshi Shibayama, Aki Torii, Hiroki Saito, Takuya Hirano, JSAP-OSA Joint Symposia 2017.
- 他 92 件

〔図書〕 (計 1 件)

Yujiro Eto, Mark Sadgrove, and Takuya Hirano, Springer, Cold atom magnetometers, Principles and Methods of Quantum Information Technologies, Yoshihisa Yamamoto and Kouichi Semba (Eds.), p.111-133, ISBN : 978-4-431-55756-2

〔産業財産権〕

無し

〔その他〕

ホームページ等

学習院大学平野研究室ホームページ

<http://qo.phys.gakushuin.ac.jp/>

学習院大学高橋雅裕ホームページ

<http://www-cc.gakushuin.ac.jp/~20110166/>

電気通信大学斎藤研究室ホームページ

<http://hs.pc.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

平野 琢也 (HIRANO, Takuya)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号 : 00251330

(2)研究分担者

斎藤 弘樹 (SAITO, Hiroki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号 : 60334497

(3)連携研究者

高橋 雅裕 (TAKAHASHI, Masahiro)

学習院大学・理学部・助教

研究者番号 : 00613697

衛藤雄二郎 (ETO, Yujiro)

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

柴田 康介 (SHIBATA, Kosuke)

学習院大学・理学部・助教

研究者番号 : 90735440