

令和 2 年 5 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05595

研究課題名(和文) 磁性超流体における自己束縛した量子小滴

研究課題名(英文) Self-bound quantum droplets in magnetic superfluids

研究代表者

齋藤 弘樹 (Saito, Hiroki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：60334497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：磁性の強い粒子が多数集まると興味深い空間構造を形成する場合がある。例えば、磁石に引きつけられ磁化された砂鉄はとげ状の構造を作って凝集する。本研究では、超低温で粘性のない超流動体においても、磁性によって同様な空間構造が形成されることを理論的に明らかにした。逆向きに磁化した2種類の超流動体を互いに接して準備すると、その界面が不安定になって変形し、水の中に油の小滴ができるように、やがて一方の超流動体が他方の中で多数の小滴を形成し安定化することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体力学は我々の身の回りの気体や液体の運動を支配しており、工学的応用という観点からも重要な研究分野である。一方、超流動体の運動を支配する量子流体力学は応用との関連は薄い、粘性ゼロ、渦の量子化という理想的な流体の性質を持っており、その研究は流体の本質を知る上で重要である。本研究で得られた、二成分超流動体における界面不安定性や小滴形成といった現象も、量子流体力学的観点から新しい知見を与える結果である。また、磁性を持つ流体に関する研究は古典流体においてもそれほど多くはなく、磁性流体力学という観点からも意義のある研究である。

研究成果の概要(英文)：Collection of magnetic particles can form interesting spatial structures, such as spike structures of iron sand on a magnet. In the present study, it was found that magnetic superfluids form similar structures, in which viscosity is absent. We consider two component superfluids with opposite directions of magnetization. When these superfluids are prepared in a trap potential, their interface becomes unstable and deforms. The system then forms a droplet structure, just like oil droplets in water.

研究分野：量子物理学

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮 超流動 磁性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水滴が自己束縛し安定な形状を保っているのは、水分子間の引力と斥力の間の釣り合いによる。これに対して気体では、自己束縛した集合体は安定に存在できない。なぜなら、分子間の引力が弱い場合には気体は拡散してしまうし、逆に強いと液体や固体に凝集してしまうからである。原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) についても同じことが言える。BEC は通常、外部ポテンシャルによって閉じ込められているが、ポテンシャルを外すと、BEC は拡散してしまう。また、拡散を防ごうとして原子間相互作用を引力にすると崩壊が起こってしまう。従って、自己束縛した BEC 小滴は安定に存在できないと考えられていた。

ところが 2016 年、ドイツ・シュトゥットガルトの実験グループが  $^{164}\text{Dy}$  原子の BEC を生成し、自己束縛した BEC 小滴が安定に存在することを発見した[1-3]。 $^{164}\text{Dy}$  原子の特徴は、アルカリ原子等に比べて、はるかに大きい磁気双極子モーメントを持つことである。そのため、磁化した砂鉄が凝集するかのごとく、BEC が個々の小滴に凝集する現象が観測された。この BEC 小滴は当時の理論的予想に反して非常に安定であることが確かめられた。

すぐさま、理論研究者らはこの実験結果を説明しようと試みた。最初に実験結果を説明する理論モデルを提案したのは、我々のグループである[4]。従来の理論では、磁気双極子相互作用と短距離二体斥力だけでは BEC 小滴を安定化できないことがわかっていた。そこで我々は、原子間の三体斥力を取り入れることを提案した。 $^{164}\text{Dy}$  原子において三体斥力が存在することは確認されていないものの、適当な三体斥力の強さを仮定すると、実験結果を良く再現できることを明らかにした。

その後、もう一つ別の理論モデルがドイツ・ハノーバーの理論グループによって提案された[5]。それは量子多体効果が BEC 小滴を安定化するという提案である。従来、原子気体 BEC の振る舞いのほとんどは平均場近似で非常に良く説明されてきたため、量子多体効果が系の定性的性質を変えるとこの提案が事実であれば画期的である。彼らの理論モデルは Lee-Huang-Yang 補正を平均場方程式に直接付け加えるという、いささか荒削りなものであるが、実験結果を再現できることが明らかにされた。一方我々は、量子多体効果をより正確に調べるために経路積分モンテカルロ法を用いて、BEC 小滴が確かに安定化することを示すことに成功した[6]。

### 2. 研究の目的

研究開始当初は、上述の背景にもあるように、BEC 小滴が安定に自己束縛する物理的機構は確定的ではなかったため、それを明らかにすることが目的であった。量子多体効果がその有力候補ではあったが、三体斥力が寄与している可能性も排除できなかった。あるいは  $^{164}\text{Dy}$  原子特有の性質が関与していることも考えられた。しかしながら、その後の実験の進展によって、磁気双極子相互作用の強い一成分系だけでなく、通常二成分系でも BEC 小滴が安定化することが実験的に確かめられ、量子多体効果による理論的予想と一致したため、BEC 小滴の安定化機構は量子多体効果であることが決定的となった。

そこで、BEC 小滴を含めた、磁気双極子相互作用の強い系で出現する物理現象全般に研究対象を広げ、当初の目的にもあった、多成分系に焦点を絞り、研究を行うこととした。すなわち、磁気双極子相互作用により多成分 BEC に出現する新規な現象を開拓することを本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

有限温度の効果や量子ゆらぎの効果を無視し、平均場近似を行う。BEC の巨視的波動関数が従う方程式としてグロス・ピタエフスキー方程式と呼ばれる非線形シュレディンガー方程式を採用した。この方程式を 3 次元空間と時間に関して差分化し、擬スペクトル法という高速フーリエ変換を駆使する方法で解いた。また、虚時間方向に系を時間発展させることで、基底状態や定常状態を求めた。磁気双極子相互作用は長距離に及ぶが、畳込み積分の形を持つため、擬スペクトル法で効率よく解くことができる。

数値計算は、本研究費で購入した GPU 計算機を用いた。これは、本来画像処理用に開発されたグラフィックボードを並列計算のために用いるもので、通常の CPU 計算機に比べて圧倒的に高速な計算が可能である。本研究では GPU 計算用の高速フーリエ変換ライブラリを用いることでグロス・ピタエフスキー方程式を高速に解くことができた。GPU のメモリは通常約 10 ギガバイトと限られているが、空間的に閉じ込められた BEC (トラップ系) を考えることで、使用するメモリのサイズを抑制することができた。

### 4. 研究成果

#### (1) 磁気双極子相互作用する二成分 BEC における界面不安定性とパターン形成[7]

二成分 BEC において、各成分が強い磁気モーメントを持ち ( $^{52}\text{Cr}$  と同程度) その向きが互いに逆向きに偏向している系を考える。初期状態として、成分 1 が内側、成分 2 が外側に同心円状に分離している状態を準備する。磁気モーメントを持たない場合はこの状態が安定である。しかしながら、磁気双極子相互作用の影響で円形の二成分界面に不安定性が生じ、界面が変形することが見いだされた。図 1 は時間発展の様子である。界面が変形しキノコ状のパターンが現れてい

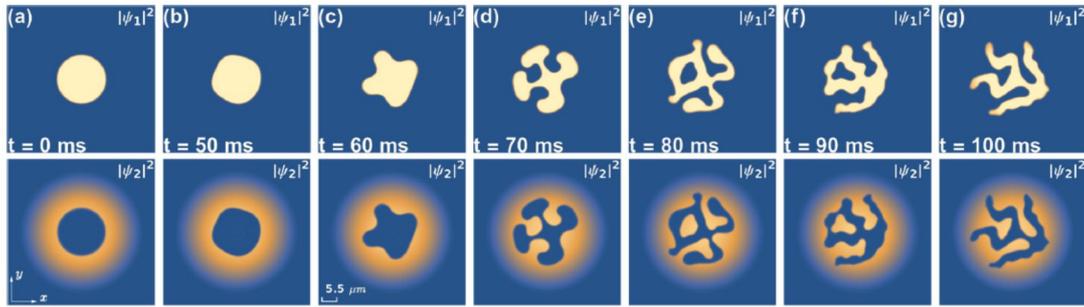


図 1：互いに逆向きに磁化を持つ二成分 BEC の時間発展。上が成分 1，下が成分 2 の密度分布を示す。[7]より転載。

ることがわかる。これは、磁気双極子相互作用によって二成分界面に生じたレイリー・テイラー不安定性に起因する。やがてキノコ状の形がさらに変形していき、ユニークな形状に変化していることがわかる。図 1 の数値計算は平たい形状の三次元空間で行われたが、これを二次元近似し、ポゴロウボフ解析（線形安定性解析）を行った。その結果、図 1 で得られた不安定性と同程度の波長の固有周波数に虚部が現れることがわかった。さらにこの解析を変分波動関数を用いて行い、この不安定性が確かに磁気双極子相互作用に起因していることが確かめられた。

図 2 は二成分の原子数比を変えつつ、それぞれの場合の基底状態を求めた結果である。成分比が 1 : 1 のときは (図 2 (a))、迷路状に入り組んだパターンが現れていることがわかる。成分比を変えていくと、少ない方の成分が小滴状になり、多い方の成分に囲まれて分布した状態が安定になっていることがわかる。この状態は自己束縛ではないが、二成分界面張力による BEC 小滴ということができる。それぞれの小滴は磁気双極子相互作用によって互いに反発することで、凝集することを免れ、安定に分布することができる。

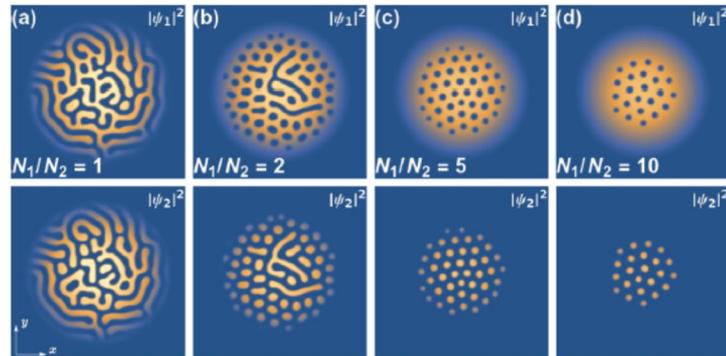


図 2：基底状態の成分比依存性。上が成分 1，下が成分 2 を表す。[7]より転載。

その他、磁気双極子相互作用の強さや磁気モーメントの向きなどを変化させて計算を行い、様々なパターンが形成されることを見出した。

## (2) スピン 1・スピン 2 混合 BEC に関する実験的および理論的研究[8,9]

この研究は磁気双極子相互作用が直接関与する研究ではないが、多成分系の新規な研究である。スピン 1 の BEC のみ、あるいはスピン 2 の BEC のみからなる系に関する研究はこれまで多くなされてきたが、スピン 1 とスピン 2 の混合 BEC の関する研究は数少ない。本研究代表者は学習院大学の実験グループと共同で、スピン 1・スピン 2 混合 BEC に関する実験的[7]および理論的[8]研究を行った。

実験では、<sup>87</sup>Rb の超微細スピン 1 と 2 の状態を用いた。磁気副準位はスピン 1 が 3 状態、スピン 2 が 5 状態なので総計 8 つの内部状態を持つ多成分系である。これらが混合された BEC を準備し、スピン 1 の状態の時間変化をシュテルン・ゲルラッハ法を用いて測定した。その結果、スピン 1 のラーモア歳差運動がスピン 2 との相互作用によって影響を受け、周波数が変化することがわかった。本研究代表者は理論的計算を担当し、実験結果が理論的予測とよく一致することを確かめた。測定値と理論計算の比較の結果、スピン 1 とスピン 2 間の相互作用係数を決定することができた。

さらに、このスピン 1・スピン 2 混合 BEC の実験の成功に触発され、この系の基底状態の計算を行い相図を完成させた。相互作用係数はスピン 1 同士で 2 種類、スピン 2 同士で 3 種類、スピン 1・2 間で 3 種類の合計 8 種類存在する。これら相互作用係数を様々に変えることで相図を描

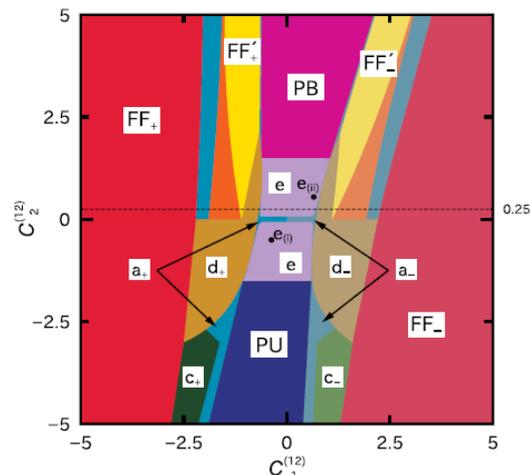


図 3：スピン 1・2 混合 BEC における相図の例。[9]より転載。

いた。図3は相図の一例である。非常に多彩な磁性相が複雑に入り組んでいることがわかる。これらの相の中には、これまで知られていた強磁性相やポラー相の他に、今回初めて発見された対称性の破れた相も含まれる。この相は、スピン1とスピン2の磁化が互いに傾いた方向を向いており、混合系特有の興味深い磁性相である。

(3) 二成分 BEC におけるラビ振動によるパターン形成に関する実験的および理論的研究 [10, 11]

この研究も磁気双極子相互作用が直接関与したものではないが、多成分系の興味深い性質を明らかにした研究である。二成分 BEC に対して、成分間のエネルギー差に相当する電磁波を照射すると二成分間でラビ振動が起こる。二成分 BEC におけるラビ振動はこれまでも観測されているが、本研究では実験条件を工夫することにより、安定に長時間ラビ振動を持続することに成功した[10]。その結果、長時間のラビ振動により、BEC に空間的なパターンが形成される現象を観測した。これはラビ振動によって実効的に原子間相互作用が振動することに起因している。

この実験的研究に触発され、我々はさらに、ラビ振動によるパターン形成に関する理論的研究を行った[11]。図4は一様系から出発した時間発展の様子を示す。時間が経つにつれて、密度分布にパターンが形成されている。そのフーリエ変換を調べることにより、そのパターンは三つの波数を持つことがわかった。これらはそれぞれ、密度波同士、スピン波同士、密度波とスピン波の和がラビ振動とパラメトリック共鳴することによって生じていることを理論解析により明らかにした。すなわち、これらの励起は多成分系特有のパラメトリック共鳴であると言える。

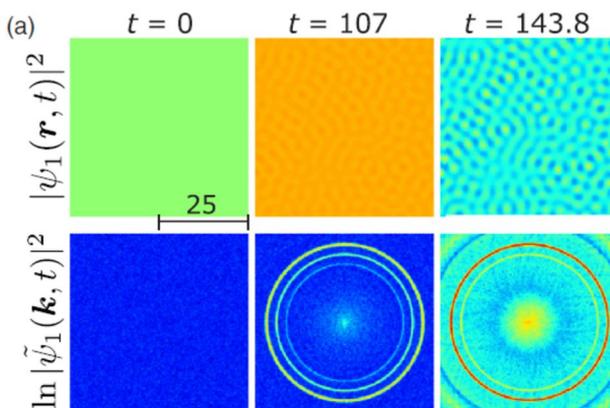


図4：ラビ振動によるパターン形成の時間発展。上は成分1の密度分布、下はそのフーリエ変換を表す。[11]より転載。

- [1] H. Kadau, M. Schmitt, M. Wenzel, C. Wink, T. Maier, I. Ferrier-Barbut, and T. Pfau, *Nature* **530**, 194 (2016).
- [2] I. Ferrier-Barbut, H. Kadau, M. Schmitt, M. Wenzel, and T. Pfau, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 215301 (2016).
- [3] M. Schmitt, M. Wenzel, F. Bottcher, I. Ferrier-Barbut, and T. Pfau, *Nature* **539**, 259 (2016).
- [4] K.-T. Xi and H. Saito, *Phys. Rev. A* **93**, 011604(R) (2016).
- [5] F. Wachtler and L. Santos, *Phys. Rev. A* **93**, 061603(R) (2016).
- [6] H. Saito, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85** 053001 (2016).
- [7] K.-T. Xi, T. Byrnes, H. Saito, *Phys. Rev. A* **97**, 023625 (2018).
- [8] Y. Eto, H. Shibayama, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. A* **97**, 021602(R) (2018).
- [9] N. Irikura, Y. Eto, T. Hirano, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **97**, 023622 (2018).
- [10] K. Shibata, A. Torii, H. Shibayama, Y. Eto, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. A* **99**, 013622 (2019).
- [11] T. Chen, K. Shibata, Y. Eto, T. Hirano, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **100**, 063610 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Eto Yujiro, Shibayama Hitoshi, Shibata Kosuke, Torii Aki, Nabeta Keita, Saito Hiroki, Hirano Takuya	4. 巻 122
2. 論文標題 Dissipation-Assisted Coherence Formation in a Spinor Quantum Gas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 245301/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.245301">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.245301</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shibata Kosuke, Torii Aki, Shibayama Hitoshi, Eto Yujiro, Saito Hiroki, Hirano Takuya	4. 巻 99
2. 論文標題 Interaction modulation in a long-lived Bose-Einstein condensate by rf coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013622/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013622">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013622</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ikuta Mayumi, Sugano Yumi, Saito Hiroki	4. 巻 99
2. 論文標題 Symmetry-breaking instability of leapfrogging vortex rings in a Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043610/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.043610">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.043610</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chen Terun, Shibata Kosuke, Eto Yujiro, Hirano Takuya, Saito Hiroki	4. 巻 100
2. 論文標題 Faraday patterns generated by Rabi oscillation in a binary Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063610/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.063610">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.063610</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wen Lin, Guo Hui, Wang Ya-Jun, Hu Ai-Yuan, Saito Hiroki, Dai Chao-Qing, Zhang Xiao-Fei	4. 巻 101
2. 論文標題 Effects of atom numbers on the miscibility-immiscibility transition of a binary Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033610/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.033610">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.033610</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Irikura Naoki, Saito Hiroki	4. 巻 2
2. 論文標題 Neural-network quantum states at finite temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013284/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013284">https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013284</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 L.-X. Wang, C.-Q. Dai, L. Wen, T. Liu, H. Jiang, H. Saito, S.-G. Zhang, and X.-F. Zhang	4. 巻 97
2. 論文標題 Dynamics of vortices followed by the collapse of ring dark solitons in a two-component Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063607/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.063607">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.063607</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroki Saito	4. 巻 87
2. 論文標題 Method to solve quantum few-body problems with artificial neural networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074002/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.074002">https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.074002</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Kadokura and Hiroki Saito	4. 巻 3
2. 論文標題 Orthogonal and antiparallel vortex tubes and energy cascades in quantum turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 104606/1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.104606">https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.104606</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Shibata, A. Torii, H. Shibayama, Y. Eto, H. Saito, and T. Hirano	4. 巻 99
2. 論文標題 Interaction modulation in a long-lived Bose-Einstein condensate by rf coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013622/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013622">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013622</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mayumi Ikua, Yumi Sugano, and Hiroki Saito	4. 巻 99
2. 論文標題 Symmetry-breaking instability of leapfrogging vortex rings in a Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043610/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.043610">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.043610</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Kato, Xiao-Fei Zhang, and Hiroki Saito	4. 巻 95
2. 論文標題 Vortex pairs in a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043605/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.043605">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.043605</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kui-Tian Xi, Tim Byrnes, and Hiroki Saito	4. 巻 97
2. 論文標題 Fingering instabilities and pattern formation in a two-component dipolar Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 023625/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.023625">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.023625</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroki Saito	4. 巻 86
2. 論文標題 Solving the Bose-Hubbard model with machine learning	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 093001/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.093001">https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.093001</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yujiro Eto, Hitoshi Shibayama, Hiroki Saito, and Takuya Hirano	4. 巻 97
2. 論文標題 Spinor dynamics in a mixture of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 021602/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.021602">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.021602</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Kato, Xiao-Fei Zhang, and Hiroki Saito	4. 巻 96
2. 論文標題 Moving obstacle potential in a spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033613/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.033613">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.033613</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroki Saito and Masaya Kato	4. 巻 87
2. 論文標題 Machine learning technique to find quantum many-body ground states of bosons on a lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014001/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.014001">https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.014001</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Irikura, Yujiro Eto, Takuya Hirano, and Hiroki Saito	4. 巻 97
2. 論文標題 Ground-state phases of a mixture of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 023622/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.023622">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.023622</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計21件(うち招待講演 2件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 入倉直輝, 齋藤弘樹
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた有限温度系の量子多体状態の計算
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳特潤, 柴田康介, 衛藤雄二郎, 平野琢也, 齋藤弘樹
2. 発表標題 ラビ結合した2成分BECにおけるパターン形成
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本礼久, 入倉直輝, 斎藤弘樹
2. 発表標題 機械学習を用いたBose-Hubbard模型の相の分類
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Kadokura and Hiroki Saito
2. 発表標題 Orthogonal and antiparallel vortex tubes and energy cascades in quantum turbulence
3. 学会等名 Turbulence of All Kinds (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入倉直輝, 衛藤雄二郎, 平野琢也, 斎藤弘樹
2. 発表標題 スピン1・スピン2 BECの混合系における基底状態の相図
3. 学会等名 第16回原子・分子・光科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門倉強, 斎藤弘樹
2. 発表標題 量子乱流における渦度分布の階層構造
3. 学会等名 第16回原子・分子・光科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅野優美、幾田麻友美、斎藤弘樹
2. 発表標題 複数量子渦輪の不安定性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門倉強, 斎藤弘樹
2. 発表標題 量子乱流における渦度分布の階層構造
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kui-Tian Xi, Tim Byrnes, 斎藤弘樹
2. 発表標題 磁気双極子相互作用するBECにおけるレイリー・テイラー不安定性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 入倉直輝, 衛藤雄二郎, 平野琢也, 斎藤弘樹
2. 発表標題 スピン1・スピン2BECの混合系における基底状態の相図
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田康介, 柴山均, 鳥居明季, 戸田寛之, 鈴木涼太, 高橋雅裕, 衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 平野琢也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴山均, 鳥居明季, 柴田康介, 高橋雅裕, 衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 平野琢也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斎藤弘樹, 加藤雅也
2. 発表標題 機械学習を用いたBose-Hubbard模型の基底状態の計算法
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴山均, 鳥居明季, 柴田康介, 衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 平野琢也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤雅也, Xiao-Fei Zhang, 齋藤弘樹
2. 発表標題 スピン軌道相互作用するBECにおける量子渦対
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xiao-Fei Zhang, 加藤雅也, 齋藤弘樹
2. 発表標題 ドーナツ型トラップ中におけるスピン軌道相互作用するBEC
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Torii, R. Suzuki, H. Toda, H. Shibayama, K. Shibata, M. Takahashi, Y. Eto, H. Saito, T. Hirano
2. 発表標題 Phase separation of Rabi-coupled spin states in an 87Rb F=1 BEC
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure Out of Equilibrium 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Shibayama, A. Torii, K. Shibata, M. Takahashi, Y. Eto, H. Saito, T. Hirano
2. 発表標題 Phase separation and pattern formation of binary Bose-Einstein condensates in various optical trap shapes
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure Out of Equilibrium 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroki Saito
2. 発表標題 Symmetry breaking magnetization in spinor Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure Out of Equilibrium 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Eto, H. Shibayama, A. Torii, H. Saio, T. Hirano
2. 発表標題 Spin sculpting in dissipative spinor Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure Out of Equilibrium 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroki Saito
2. 発表標題 Matter-wave droplets in a dipolar Bose-Einstein condensate
3. 学会等名 ADVANCES IN MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL SIMULATION OF SUPERFLUIDS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 橋本 幸士、大槻 東巳、真野 智裕、斎藤 弘樹、藤田 浩之、安藤 康伸、永井 佑紀、青木 健一、藤田 達大、小林 玉青、大関 真之、久良 尚任、福嶋 健二、村瀬 功一、船井 正太郎、柏 浩司、富谷 昭夫	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 212
3. 書名 物理学者，機械学習を使う	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----