

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05549

研究課題名(和文)多成分超流体における秩序化過程のパーコレーションと動的統計則

研究課題名(英文)Phase ordering percolation and dynamic statistical law in multi-component superfluids

研究代表者

竹内 宏光 (Takeuchi, Hiromitsu)

大阪市立大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：10587760

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)：温度を急冷したり外場を急に变化させることで引き起こされる、自発的対称性の破れ(SSB)を伴う相転移は、様々な長さスケールで起こる普遍的な物理現象として認識されている。その時間発展の研究分野は40年以上の長い歴史を持つが、単純な場合を除きその詳細は明らかになっていない。本研究では、実現する物質の中で最も多彩なSSBが起こる超流体に着目し、理論的な考察とコンピュータを利用した数値的な計算に基づいてSSBの非平衡時間発展の物理の解明に貢献した。初年度から積極的に推し進めた研究の国際化が良好な形で影響し、計画当初に想定していたよりも高い研究成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自発的対称性の破れ(SSB)は、リニアモーターカーなどの最先端技術に應用されている超伝導体や、宇宙初期に起こったとされる相転移の理解に至るまで、物理学の各分野で議論される長さスケールの全く異なる物理現象を結びつける普遍的な物理概念である。そのため、SSBに関する物理現象を新たに解明することは、科学技術の基礎をなす物理学分野全体の発展に結びつく。本研究ではSSBの時間発展について新たな事実を科学的に示すことで、このような発展に貢献している。

研究成果の概要(英文)：It is expected that non-equilibrium dynamics due to spontaneous symmetry breaking (SSB) induced by rapid quench can be understood as a universal physical phenomena independent on length scales. This research field has long history longer than 40 years but the details has not been revealed except for simple cases. This research project is based on theoretical consideration and numerical computation and has contributed to new understanding on non-equilibrium dynamics on SSB in superfluid systems, which is said to be the matter that realize the most complicated SSB. The project progress toward a higher plane than the original plan with the aid of international collaborations.

研究分野：数物系科学

キーワード：物理学 物性物理学 低温物理学 超流動 自発的対称性の破れ パーコレーション 超低温・量子凝縮系

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

クエンチまたは急冷によって引き起こされる自発的対称性の破れを伴う相転移の緩和ダイナミクスは、秩序化過程の動力学[1]によって記述される。この過程の初期段階において不安定あるいは Kibble-Zurek(KZ)機構によって生じた多数の位相欠陥は、統計的に相似な空間構造を保ったまま時間と共にその密度が減少する。言い換えると、異なる時間の秩序変数の空間構造を特徴的長さ(隣合う位相欠陥の平均間隔)でスケールすれば、それらの統計的振舞いは等しい。この非自明な仮説は様々な系で実際に確認されている普遍的経験則であり、動的スケーリング則(仮説)と呼ばれる。この法則は、ある時点での秩序変数の空間構造を把握していれば、その後の**非平衡時間発展を統計的に予言できる**、という重大な可能性を示唆している。秩序化過程の動力学が予言する統計則として、位相欠陥の密度の減衰則や中規模領域の構造因子などが挙げられるが、それらに匹敵するような理解を新たに得るような飛躍的進展はこの分野で近年まで得られていなかった。

申請者は以前の研究で、2成分ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)において、自発的対称性の破れを伴う相分離過程で現れるドメイン構造の時間発展が、時間に依存せず浸透理論の臨界現象によって統計的に記述されることを理論・数値的に見出した。この系では、成分間に強い斥力が働く2成分超流体が完全に混ざり合った不安定な状態を初期状態とし、Bogoliubov 励起の動的不安定性によって特徴づけられるドメイン構造が複雑な時間発展をしながら緩和する。右図に示すように、初期のドメイン構造は初期状態の成分比(p)によって変化するが、この成分比が半々($p=0.5$)に達したところで、**系を縦断するドメイン**が現れ、これが浸透理論(パーコレーション)の臨界点(p_c)に相当する。この研究の当初の目的は、浸透理論を用いて系を**縦断するドメイン壁**の存在とその統計的振舞いを検証することであった。ところが、申請者の最近の研究により、ドメインサイズ分布などの秩序変数の空間構造に関するさらに詳しい統計的性質を予言できることが明らかになってきた。比較的大きなドメインのサイズ分布の構造については、近年報告された、2次元イジング系の秩序化過程[2]の振る舞いと矛盾しない結果が得られており、浸透理論が系の詳細に依らず秩序化過程に普遍的に適用できることを示唆している。

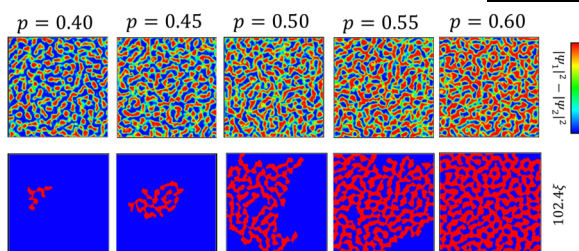


図:(上)2成分BECにおける相分離過程初期のドメインパターン。(下)成分1の最大ドメインのみを(上)の画像から抽出したもの。初期状態の成分比(p)が半々($p=0.5$)になる付近で、突如系を縦断するドメインが出現し、パーコレーション転移が起こる。

最近、箱型ポテンシャルに閉じ込められた冷却原子気体BECの構造因子を直接観測することによって、一様と見なせる系での KZ 機構が検証される[3]など、**秩序化過程のダイナミクスに対する理論・実験的関心が世界的に高まっている**。申請者は超流体系に動的スケーリング則を初めて本格的に適用するなど、先駆的な研究を遂行して世界をリードしてきた。後発の理論研究[4,5]では超流体の秩序化過程に関して秩序化動力学の従来の理解を踏襲することに重きを置いているが、**申請者の以前の研究は浸透理論という新しい視点を持ち込むという点でこれらの研究とは一線を画す先進的な取り組み**であった。

2. 研究の目的

本研究の申請時における当初の目的は、原子気体 BEC や ^3He 超流体で起こる秩序化過程におけるドメイン構造の非平衡時間発展に浸透理論を適用し、その**普遍的な統計法則と量子系特有の振る舞いを理論的に明らかにすること**である。以下の(1)~(5)はこの目的を達成するために設定した小課題である。(1)は本研究の基礎を成す課題、(2)~(4)は発案当時継続中の科研費「若手研究(B)」の課題と深く関連する課題、(5)は研究全体の進捗状況に応じて遂行する予備的な課題である。

(1) **2成分超流体の相分離過程におけるマイクロ領域のドメインサイズ分布の動的統計則**:2成分BECの相分離過程は、超流体系の秩序化過程におけるドメイン構造の非平衡時間発展を理解する上で最も基礎的な系である。この系において、古典系でも現れる普遍的な統計則と超流動性に起因した量子系固有の統計則を明らかにすることで、(2)以降の課題の見通しを良くする。申請者の以前の研究によると、平均ドメイン壁間距離よりも大きなスケール(マクロ)領域のドメインサイズ分布は、浸透理論によって普遍的に記述されるが、**ドメインが比較的小さい(マイクロ)領域では2次元イジング系とは全く異なる振る舞いを示す**ことが予備的に示された。本課題の目的はこのマイクロ領域の統計的振る舞いと量子効果との関係を、大規模な数値実験を実行することで理論的に明らかにすることである。

(2) **実スカラー場の秩序化過程におけるドメイン構造の浸透理論による再評価**

進行中の研究課題「若手研究(B)」の主要課題である超流体における射影された対称性の破れ

(PSB: Projected Symmetry Breaking)における秩序化過程を理解する上で、実スカラー場の Ginzburg-Landau (GL) 模型で記述される秩序化過程の理解は不可欠である。ところが、これまで 実スカラー場の秩序化過程に対する浸透理論の適用性の理論的検証は、秩序変数場を離散化した Ising 系に関してしか行われていない。そのため、本課題では超流体中の PSB を理解する前段階として、実スカラー場の GL 方程式によって記述される秩序化過程を大規模数値実験によって再評価する。

(3) Z_2 対称性の破れの秩序化過程で現れる残留壁の動的スケーリング則の解明

申請者の以前の研究によると、2成分BECの相分離過程では、2成分の占める面積比が半々になる $p=0.5$ 付近がパーコレーション転移点となっていることに起因して、系を縦断するドメイン壁(残留壁)がフラクタル性を保ったまま存在し続ける。類似の現象は実スカラー場の秩序化過程でも期待される。本課題では、このような残留壁に対する動的スケーリング則に関して、両者の系を比較し、普遍的な性質と相違性を明らかにする。

(4) 超流体中の射影された対称性の破れに対する浸透理論の適用と残留渦の可能性

(1)~(3)で得られた知見を活用して、超流体中のPSBで起こる、射影2次元空間における有効的な Z_2 対称性の破れによる秩序化過程に対する浸透理論の適用性を検証し、射影2次元空間の残留壁、すなわち、3次元空間における残留渦の動的スケーリング則を3次元大規模数値実験により明らかにする。

(5) 他の超流体系におけるドメイン形成の秩序化過程への応用

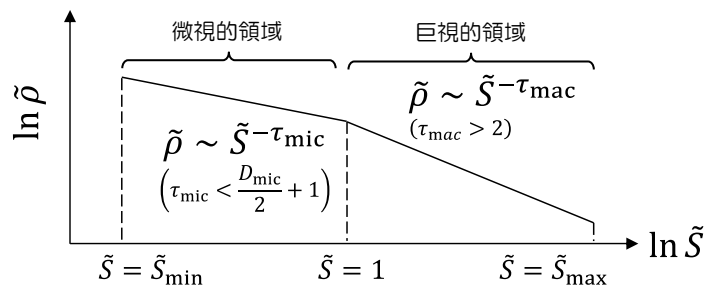
超流動性に起因した量子系固有の動的統計則は、ドメイン構造が起こる他の多成分超流体系でも実現することが期待される。本課題では(1)の知見を他の量子系に適用することである。その中で最も興味深い系は、京都大学の実験グループによって可視化が最近実現した擬2次元系の $^3\text{He-A}$ のドメイン構造[6]における秩序化過程である。この系の解釈は申請者の直近の研究によって明らかになっている(1)の課題に対する理論的解釈と結びついている。その詳細については後述する。

【参考文献】 [1] A. J. Bray, Adv. Phys. **43**, 357 (1994). [2] J. J. Arenzon, et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 145701 (2007). [3] N. Navon, et al., Science **347**, 167 (2015). [4] J. Hofmann, et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 095702 (2014). [5] L. A. Williamson and P. B. Blakie, Phys. Rev. Lett. **116**, 025301 (2016). [6] Y. Sasaki, 招待講演 ‘Visualizing textural domain walls in superfluid ^3He by Magnetic Resonance Imaging’, 国際会議 QFS2016, Prague, Czech Republic, August 10-16 (2016).

3. 研究の方法

当初想定していなかった重要な課題が新たに加わったことが影響し、当初の計画を大幅に変更して研究を遂行した。その影響で、(3)と(4)は研究を中断している。以下では、(1) (2) (5)の研究方法を記述した後に、計画変更によって加わった課題(6) (7)の研究方法を記載する。

(1) 相分離する2成分BECにおける秩序化過程のドメインサイズ分布のマイクロ領域の統計的振る舞いを明確にするために、申請者の以前の研究で使った計算コードをより大きな系に適用して数値実験を実施した。さらに、秩序化動力学と浸透理論の観点から理論的考察を深めるために、一般の離散的(Z_2)対称性の破れの相分離ダイナミクスにおけるドメインサイズ分布に関する動的統計則(右図)を理論的に提案することで、踏み込んだ数値解析を行った。加えて、量子流体力学から導かれる渦度分布に関する新たな統計則を予言することで、相分離する2成分 BEC における、右図の微視的領域の異常な振る舞いを物理的に説明することを試みた。



(1)の研究で理論的に提案した離散的対称性の破れの相転移ダイナミクスにおけるドメインの面積分布関数の動的統計則。横軸と縦軸は時間と共に増大する平均的なドメインサイズで規格化されたドメインの面積(\tilde{S})とその数分布($\tilde{\rho}$)である。数値実験で観測された超流体系で起こる微視的領域の特異な振る舞いは、量子流体力学によって理論的に説明されることが、本研究により明らかになった。

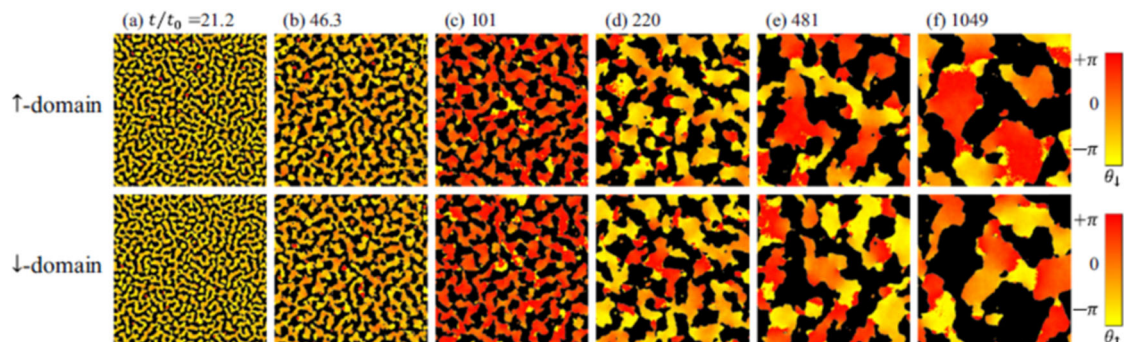
(1)の研究で理論的に提案した離散的対称性の破れの相転移ダイナミクスにおけるドメインの面積分布関数の動的統計則。横軸と縦軸は時間と共に増大する平均的なドメインサイズで規格化されたドメインの面積(\tilde{S})とその数分布($\tilde{\rho}$)である。数値実験で観測された超流体系で起こる微視的領域の特異な振る舞いは、量子流体力学によって理論的に説明されることが、本研究により明らかになった。

- (2) 実スカラー場の緩和過程を記述する GL 方程式を数値的に解くことにより、この系のドメインサイズ分布の統計的性質を明らかにする。このマイクロ領域の統計的性質と浸透理論によって記述されるマクロ領域の普遍的振舞いを、秩序化過程の早期と後期の時間発展について、大規模数値実験を実行することにより調べる。先行研究[2]の著者の一人でもあり、統計力学の世界的権威でもある L. F. Cugliandolo (フランス) と、その共同研究者で浸透理論や相転移ダイナミクスに明るい M. Picco (フランス) と連携して研究を進めた。秩序化過程の早期の振る舞いを調べるために、この二人とその共同研究者が提案した、秩序化過程におけるパーコレーション転移に達する時間について数値的に調べた。また、課題(1)の副産物として、この系のドメインサイズ分布にも適用できる、微視的領域のドメインの内部構造に関する理論的解析を行った。
- (5) この課題の当初の計画では、超流動ヘリウム3の系を主に取り扱う予定であったが、その計画を大幅に変更し、冷却原子気体スピン1BEC における秩序化過程の研究を、Y. Shin (韓国) が主導する冷却原子系の実験グループと共同で実施した。この研究は、Y. Shin から彼らが実験で観測した ^{23}Na 原子のスピン1BEC における奇妙な現象の説明を申請者が依頼されたことがきっかけになっている。申請者は超流動ヘリウム3における複合欠陥を記述する理論を参考にして、この現象の理論的説明を試みた。
- (6) この追加課題では、研究業績の[図書]「量子流体力学」の執筆に際し、量子流体力学にとって基礎的でありながら長年未解決の問題が存在することに気づき、その問題に急遽着手することになった。それは一様超流体中で巻き数2以上の渦が動的に安定かどうかという問題である。この問題は絶対零度近傍のエネルギー散逸が無視できる超流体系の非平衡ダイナミクスにおいて重要である。最も基本的な問題として巻き数2の渦の安定性を調べた。Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値的に解くことで有限サイズ効果を明らかにするとともに、不安定性の物理的機構を、量子力学の摂動論と半古典近似をこの系の準粒子(ボソン)に適用できる理論に拡張することで明らかにした。
- (7) この追加課題は、課題(5)で当初計画していた P 波クーパー対で構成される超流動ヘリウム 3 の非平衡ダイナミクスを記述する理論的手法よりも汎用性の高い手法の開発が可能であることに気づいたことがきっかけになっている。その足掛かりとして、S 波クーパー対で構成されるフェルミ超流体の非平衡ダイナミクスの研究に取り組んだ。とりわけ、秩序化過程で重要となる位相欠陥の動的振る舞いについて、J. Tempere (ベルギー) が主導する理論グループと共同で、フェルミ超流体の動的性質を記述する理論的手法の開発に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 量子性によって引き起こされる新たな動的スケール側の見解

完全に混ざり合った2成分 BEC を用意すると、水と油のように2成分が相分離を起こし、それぞれの成分が占拠したドメインが多数出現する(下図)。ドメインのサイズは時間の増加と共にその数を減少させる。その過程は古典系でも知られており、秩序化動力学の動的スケール則に従うことが経験的に知られている。本研究では、このドメインのサイズ分布が巨視的領域で浸透理論に従う普遍的な振舞いと、微視的領域で量子系特有の振る舞いを同時に示すことを初めて明らかにした。得られた成果は学術論文[業績欄の *Domain-area distribution anomaly in segregating multi-component superfluids*]、および、国内会議の招待講演で発表した。



(2) 離散的対称性の破れの相転移ダイナミクスの統計的振る舞い

実スカラー場の秩序化過程においてパーコレーション臨界点に達する時間があるスケール則に従うことを数値的に明らかにした。また、ドメインサイズ分布の微視的領域の円状ドメインの内部構造は統計的に無視できることを明らかにした。得られた成果は、学術論文[業績欄の *On the Internal Structure of Smaller Domains in Domain Coarsening Dynamics of Spontaneous Z2-*

Symmetry Breaking in Two Dimensions], および, 統計力学に関する国際会議で発表した.

(5) スピノール BEC における複合欠陥の実現

冷却原子気体スピノール・ボース・アインシュタイン凝縮体において, ドメイン壁と半整数量子渦からなる複合体(複合欠陥)の直接観測に初めて成功した. この研究はソウル国立大学の実験グループとの共同研究であり, 申請者が理論解析を担った. この複合欠陥は量子クエンチによって BEC を反強磁性相からポーラー相へと相転移させることで生成される. 複合欠陥の構造(右図)と安定性は 2 次ゼーマン効果によって特徴づけられる長さスケールで決まり, 2 次ゼーマン効果が小さいときに複合欠陥は比較的安定であることを明らかにした. 得られた成果は学術論文[業績欄の *Observation of wall-vortex composite defects in a spinor Bose-Einstein condensate*], および, 国際会議における招待講演で発表した.

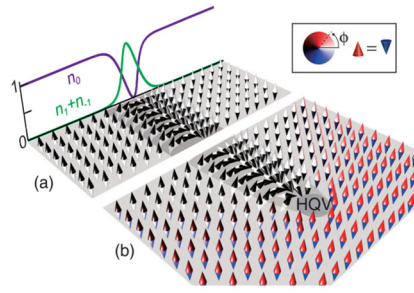


図:理論的に解明された複合欠陥の構造. $m_z = 0$ 成分のドメイン壁の内部は, $m_z = \pm 1$ 成分によって満たされており, ドメイン壁の端点には半整数量子渦(HQV)が存在する.

(6) 一様超流体中の巻き数2の量子渦に関する動的安定性の初解明

一様な超流体における巻き数2の量子渦の動的安定性を大規模数値計算により理論的に検証した. これまでの量子流体力学の研究では, 一様超流体中では量子数1の量子渦のみが安定であることが前提に, 莫大な数の研究が実施されてきた. もし, 巻き数2以上の渦の存在が許されれば, それらの研究が土台から崩れ去ることになる. しかし, 絶対零度において巻き数が2以上の渦が不安定であることを示した研究はこれまで存在せず, 理論・数値的困難から長年の未解決問題であった. 本研究では, 絶対零度の一様な BEC において, 巻き数2の量子渦が動的に不安定であることを初めて示した. また, この不安定化の過程において, 準固有振動に類似した音波放射を引き起こすことを予言した(右図). 得られた成果は学術論文[業績欄の *Is a Doubly Quantized Vortex Dynamically Unstable in Uniform Superfluids?*], および, 国際会議の招待講演で発表した.

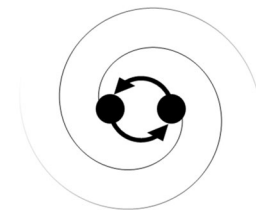


図:1本の量子数2の渦が2本の量子数1の渦に分裂した直後の音波放射の様子

(7) 冷却フェルミ原子超流体の BEC・BCS クロスオーバーにおけるダークソリトンの不安定性

冷却フェルミ原子超流体におけるダークソリトンの不安定性が, 粒子間相互作用を変調させることによってどのように様変わりするのかを理論・数値的に明らかにした. 冷却ボース原子超流体におけるダークソリトンの不安定性は, 「スネーク不安定性」と呼ばれており, ソリトンが不安定化して蛇のように曲がりくねった後に量子渦が生成される現象として知られている. 我々が明らかにした現象は, フェルミ超流体において, 相互作用が有効的に斥力となる BEC 領域ではスネーク不安定性と同様な挙動が確認できるが, 引力となる BCS 側では蛇のようなパターンは消失し, 超伝導で知られるジョセフソン結合が非一様に起こることで直接的に量子渦が生成される. 我々はこれをジョセフソン不安定性と名付けた. 得られた成果は学術論文[業績欄の *Crossover between snake instability and Josephson instability of dark solitons in superfluid Fermi gases*], および, 国際会議で発表した.

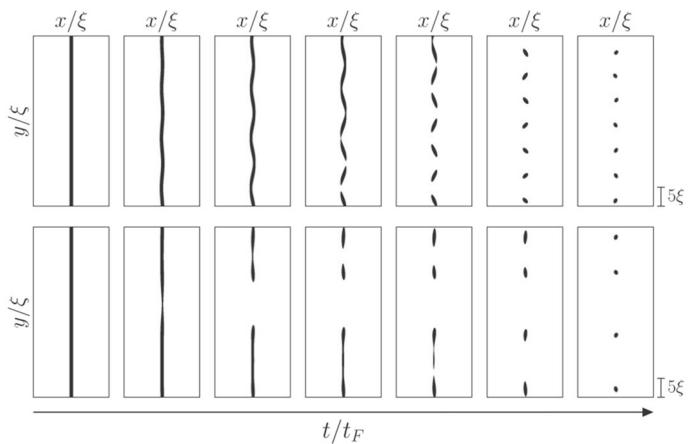


図. 冷却フェルミ原子超流体におけるダークソリトンの不安定化のダイナミクスの数値計算結果. 上行に相互作用が有効的に斥力となる BEC 領域でのスネーク不安定性の様子を, 下行には相互作用が引力となる BCS 領域でのジョセフソン不安定性の様子を示す. 黒い領域は秩序変数の振幅が小さい場所を表している.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeuchi Hiromitsu	4. 巻 -
2. 論文標題 On the Internal Structure of Smaller Domains in Domain Coarsening Dynamics of Spontaneous Z2-Symmetry Breaking in Two Dimensions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-018-02129-8	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 Kang Seji, Seo Sang Won, Takeuchi Hiromitsu, Shin Y.	4. 巻 122
2. 論文標題 Observation of Wall-Vortex Composite Defects in a Spinor Bose-Einstein Condensate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 095301-1, -6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.095301	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 Hiromitsu Takeuchi	4. 巻 97
2. 論文標題 Domain-area distribution anomaly in segregating multicomponent superfluids	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013617-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.013617	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 Hiromitsu Takeuchi, Michikazu Kobayashi, and Kenichi Kasamatsu	4. 巻 87
2. 論文標題 Is a Doubly Quantized Vortex Dynamically Unstable in Uniform Superfluids?	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 023601-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.023601	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 Van Alphen W., Takeuchi H., Tempere J.	4. 巻 100
2. 論文標題 Crossover between snake instability and Josephson instability of dark solitons in superfluid Fermi gases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 023628-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.023628	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

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Hiromitsu Takeuchi, Michikazu Kobayashi, Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Is a doubly quantized vortex unstable in uniform Bose-Einstein condensates at zero temperature?
3. 学会等名 Quantum Science Symposium Europe-2018 Meeting, Peterhouse, University of Cambridge, UK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内宏光
2. 発表標題 相分離する2成分超流体の秩序化過程
3. 学会等名 研究会「超流動 ³ HeおよびスピノールBECにおけるトポロジカル相・励起」, 近畿大学, 東大阪キャンパス (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takeuchi, M. Kobayashi, and K. Kasamatsu
2. 発表標題 Instability of a Doubly Quantized Vortex in Uniform Superfluids at Zero Temperature
3. 学会等名 QFS2018: Internatinal Conference on Quantum Fluids and Solids, Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takeuchi
2. 発表標題 Anomalous hierarchy in domain coarsening dynamics of two-component Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 QFS2018: Internatinal Conference on Quantum Fluids and Solids (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiromitsu Takeuchi, Michikazu Kobayashi, Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Splitting instability of a doubly quantized vortex in homogeneous superfluids
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiromitsu Takeuchi
2. 発表標題 Application of percolation theory to coarsening dynamics of domains in segregating binary superfluids
3. 学会等名 FINESS2018-Finite Temperature Non-equilibrium Superfluid Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内宏光, 小林未知数, 笠松健一
2. 発表標題 巻き数2の量子渦は動的に安定か?
3. 学会等名 日本物理学会, 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takeuchi, M. Kobayashi, and K. Kasamatsu
2. 発表標題 Splitting instability of a doubly quantized vortex in uniform Bose-Einstein condensates at zero temperature
3. 学会等名 FINES2018-Finite Temperature Non-equilibrium Superfluid Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takeuchi
2. 発表標題 Domain-area distribution anomaly in segregating multi-component superfluids
3. 学会等名 ULT2017: Frontiers of Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takeuchi, M. Kobayashi, and K. Kasamatsu
2. 発表標題 Splitting instability of a doubly quantized vortex in homogeneous superfluids
3. 学会等名 ULT2017: Frontiers of Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takeuchi
2. 発表標題 Dynamic scaling law and phase ordering percolation in multicomponent superfluids
3. 学会等名 LT28: 28th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Takeuchi, L. F. Cugliandolo, and M. Picco
2 . 発表標題 Critical percolation in early-stage quench dynamics with spontaneous discrete symmetry breaking in a two-dimensional Continuum
3 . 学会等名 StatPhys27: Internatinal Conference Statistical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Takeuchi
2 . 発表標題 Domain-area distribution in phase-separating two-component Bose-Einstein condensates
3 . 学会等名 StatPhys27: Internatinal Conference Statistical Physics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 I.-K. Liu, S.-G. Gou, and H. Takeuchi
2 . 発表標題 Phase Diagram of Solitons in a Spin-1 Polar Bose-Einstein Condensate
3 . 学会等名 28th International Laser Physics Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 W. Van Alphen, H. Takeuchi, S. N. Klimin, and J. Tempere
2 . 発表標題 Decay of Giant Vortices and Solitons in a Superfluid Fermi Gas
3 . 学会等名 28th International Laser Physics Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromitsu Takeuchi
2. 発表標題 Length scale hierarchy in phase transition dynamics of spontaneous symmetry breaking in multi-component Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 VORTEX DYNAMICS, TURBULENCE AND RELATED PHENOMENA IN QUANTUM FLUIDS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromitsu Takeuchi, Michikazu Kobayashi, and Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Instability of a Doubly Quantized Vortex in Uniform Super- fluids at Zero Temperature
3. 学会等名 Turbulence of all kinds (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 坪田 誠、笠松 健一、小林 未知数、竹内 宏光	4. 発行年 2018年
2. 出版社 丸善	5. 総ページ数 338
3. 書名 量子流体力学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Hiromitsu Takeuchi 竹内 宏光 (1) http://hiromitsu-takeuchi.appspot.com 研究者詳細 - 竹内 宏光 (2) https://research-soran17.osaka-cu.ac.jp/html/100000504_ja.html Hiromitsu Takeuchi 竹内 宏光 http://hiromitsu-takeuchi.appspot.com 研究者詳細 - 竹内 宏光 https://research-soran17.osaka-cu.ac.jp/html/100000504_ja.html</p>

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
--	---------------------------	-----------------------	----