

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02938

研究課題名(和文) 散乱長の時空間制御で開拓する量子縮退気体の新奇な非平衡ダイナミクス

研究課題名(英文) Novel nonequilibrium dynamics of quantum degenerate gas exploited by spatiotemporal control of scattering length

研究代表者

井上 慎 (Inouye, Shin)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10401150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：実験面では、2次元箱型ポテンシャルを作成し、実際にルビジウムのボース凝縮体を閉じ込めることに成功した。2成分BECの相分離過程をその場観察で明らかにするプラットフォームを確立することができた。

理論面では、相分離する2成分BECの秩序化過程と浸透理論(パーコレーション)の関連を明らかにした。具体的には、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が、その際に大きいドメインは浸透理論に従う普遍的な振舞いを示す一方、小さいドメインは量子系特有の振る舞いを示す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

水と油の相分離は日常に目にする興味深い現象の一つである。目に見えない分子のミクロの性質が、液体全体のマクロの振る舞いを決定している。では、液体が超流動を示したらどうなるだろう？分子の間の相互作用を自在に変えられたら相分離の様子は全く異なるものになるのだろうか？このような疑問に答えようとしたのが本研究である。実際に、原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を使った実験装置を立ち上げた。さらに生じる液滴の大きさの分布について理論的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：On the experimental side, we created a two-dimensional box potential and succeeded in confining the rubidium Bose-Einstein condensate. This system, together with our in-situ imaging, should serve as an ideal platform to clarify the phase separation process of binary BEC. On the theoretical side, we clarified the relationship between percolation theory and the ordering process of two-component BECs that phase separate. More specifically, when an immiscible two-component BEC undergoes phase separation, many domains appear. We found that the small domains show the behavior peculiar to quantum systems, while the large domains show the universal behavior according to the penetration theory.

研究分野：冷却原子

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究の端緒となった背景は主に2つある。一つは2015年の井上の大阪市大への着任に伴い、大阪市大の理論グループと井上らの冷却原子実験グループの緊密な連携が可能になったことである。大阪市大の竹内らは混合ボースアインシュタイン凝縮体(BEC)の非平衡の物理に関して世界最先端の知見を持つ。その知見を実際に井上らが冷却原子の実験で実現する体制が整いつつあった。本研究が開始した2017年4月の時点ではまだ大阪市大に移設した冷却原子生成装置は稼働しておらず、再立ち上げの最中であったが、2原子種(ルビジウム87とカリウム41)のボース・アインシュタイン凝縮体を同時に作成できる装置は世界でも数台しかなく、その特長を活かした実験を実現することが期待された。

背景のもう一つは、冷却原子に関する実験技術の急激な進展である。それまで冷却原子の閉じ込めには主に調和ポテンシャルが使われてきた。しかし物理量の統計的処理を行うためには箱型ポテンシャルが望ましい。デジタルミラーデバイス(DMD)や空間位相変調器などを用いて、箱型ポテンシャルを実現する技術が整いつつあった。さらに光を用いて散乱長を局所的に制御する技術も実現された。井上らが強みを持つ「2原子種のボース・アインシュタイン凝縮体」「フェッシュバハ共鳴による相互作用制御」「位相コントラストイメージングによるボース凝縮体のその場観察」にこれらの新技術を組み合わせれば、冷却原子を用いた非平衡物理の探究において、大きなインパクトを与える研究が可能であると判断し、本研究を開始した。

2. 研究の目的

気体の一部で相互作用を急変(クエンチ)した後の秩序化過程の非平衡ダイナミクスを実験・理論両面から明らかにすることを目的とした。相互作用をクエンチした混合気体の秩序化過程に関しては、1次元での実験は先行研究があるが、2次元・3次元での実験は知られていない。一方、ルビジウムとカリウムの混合気体に関しては、3次元箱型ポテンシャルを作成しようとしても、質量の違いにより重力方向には均一なポテンシャルを作るのは難しい。よって重力方向には閉じ込めをきつとした、2次元箱型ポテンシャルを作成することにした。ルビジウム87とカリウム41の間には78.8 Gaussにフェッシュバハ共鳴があり、比較的容易に相互作用を制御できるのでクエンチの実験に有望である。

3. 研究の方法

2次元箱型ポテンシャルの生成

まず、ルビジウム87とカリウム41を閉じ込める2次元箱型ポテンシャルの生成に取り組んだ。重力によるルビジウムとカリウムの位置のズレが問題にならないようにするためには、重力方向のトラップ周波数は1kHz程度以上にする必要がある。重力方向の閉じ込めをきつにするには光格子が最も扱いやすいが、普通的光格子ではポテンシャル極小の間隔が半波長しかないため、気体を単一のシートに閉じ込めることが難しい。そこで浅い角度(約1度)で2つのレーザー光を交差させることで、隣接する極小の間隔を広げ、そのうちの1枚にボース凝縮を導入できるようにした(図1)。

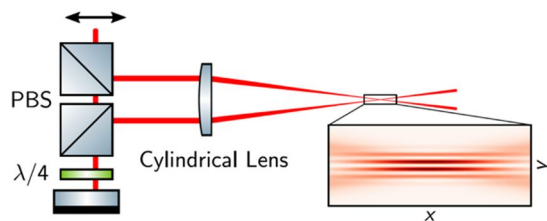


図1:重力方向に BEC を閉じ込めるためのシート状のトラップの作成方法

用いるレーザー光の周波数の選択は重要である。原子の共鳴波長が近赤外(ルビジウムは780nmと795nm、カリウムは767nmと770nm)なので、負に離調した(長波長の)レーザーを用いる方がハイパワーのレーザーの選択肢が多く、便利である。しかし負の離調だと、レーザー光の強度の極大値のところに原子をトラップすることになる。レーザー光のパワーは有限なので、必ずシートの中でも強度の不均一が発生し、面内にトラップ周波数が発生してしまう。他方、もし正の離調のレーザー光を用いると、原子は干渉によって光強度がゼロの面にトラップされる。レーザーパワーが有限でもレーザー強度がゼロの面は無限に広がっているため、水平方向に箱型ポテンシャルを作成する支障にならない。よって、正に離調したレーザー光を用いることにした。ボース凝縮を生成するガラスセルの無反射コーティングがカバーする波長域と、入手可能な半導体レーザー(テーパーアンプ)の波長域を検討した結果、755nmのレーザー光を使用することに決定した。

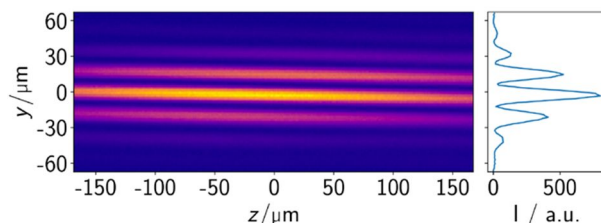


図2:シート状トラップの光強度分布。シートの間隔は18.7um、ビーム径は $w_y \sim 30\text{um}$, $w_z \sim 600\text{um}$

実際に作成したシート状のトラップを図2に示す。ボース凝縮体をシートの1枚に閉じ込めることは非常に重要であり、そのためにいくつかの工夫をした。まず、シリンドリカルレンズを用いて、シートに垂直な方向(y方向)にビームを絞り、中央の最も深いポテンシャル以外は壁が低くなるようにした。図の例ではシートの間隔が18.7umである

のに対し、ビーム径を 30 μm 程度にまで絞っている。シートの位置の調整も重要である。干渉する 2 本のレーザー光の光路差の調整によって、中央のシートの位置をボース凝縮に重ねることは可能であるが、揺らぎやドリフトの影響がある。光路長の短縮と、台の温度安定化 ($\sim 10\text{mK}$) により、光路差の揺らぎの抑制には成功したが、レーザー光の周波数のドリフトによるシートの位置のドリフトが問題として残った。幸いなことにレーザー周波数のドリフトの時定数がゆっくり ($\sim 10\text{min}$) であったため、カメラを使ったデジタル処理でドリフトを取り除くことに成功した。具体的には USB カメラで干渉縞を撮影し、Raspberry Pi 上でフィッティングして中央の縞の位置を割り出したのち、DAC から光源の外部共振器型半導体レーザーのピエゾ入力と電流入力にフィードバックを行った。

水平方向の閉じ込めには当初、デジタル・ミラー・デバイス (DMD) を用いる予定であった。しかし DMD を直接イメージすると反射していない部分の光は全て「捨てて」しまうことになる。DMD をホログラムのようにフーリエ面で用いれば、光を「壁」の部分に集めることが可能であるが、それでも特定の次数の回折光しか用いることができず、残りの次数の回折光は全て捨てることになる。結局 1 割ほどの光しか使えないことが分かったので、パワーをもっと有効に使えるアプローチを考えることにした。そのような光学系として、Axicon レンズを用いた光学系を設計した (図 3)。この Axicon レンズの光学系は現存のイメージング系と干渉しない、という条件の元に試行錯誤の末たどり着いたものである。ガウシアンビームを Axicon レンズペアでリング状のビームにできるが、リングの径は大きいし、外側が鋭くなっているが内側には光強度が残ってしまう。ところがレンズでこの円環を集光すると、焦点の片側でだけ、径が小さく、かつその内側が真っ暗で壁もシャープに立ち上がる理想的な円環が得られることが分かった。よって焦点の位置を微調整するために 1:1 の Telescope を間に入れたのが図 3 の光学系である。上記のシートポテンシャル及びリング状のポテンシャルの設計はボン大学から来日した大学院生の Janek Fleper 君が中心となって行った。

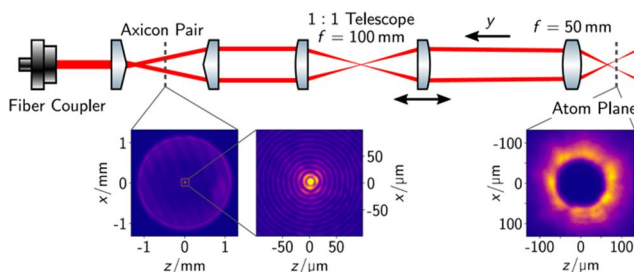


図 3: 水平方向の閉じ込めを可能にする Axicon レンズを用いたトラップ

4. 研究成果

実際にルビジウムのボース凝縮体を 2 次元箱型トラップに閉じ込めることに成功した。トラップした原子の吸収イメージング像を水平方向から撮影した結果を図 4 に示す。実験では、通常の光トラップでボース凝縮体を生成した後、光トラップに用いるレーザー光の強度を下げ、代わりにシートポテンシャルに用いるレーザー光の強度を増やすことで、ボース凝縮体を 1 枚のシートに閉じ込めることに成功した。干渉の位相を選択することで、BEC を閉じ込めるシートの数を 2 つにすることも可能である。

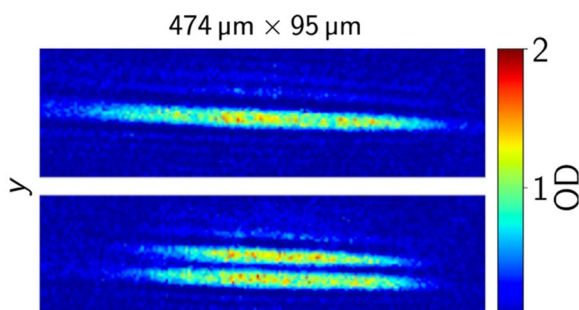


図 4: 水平方向から撮影された BEC の吸収イメージング画像。

重力方向から撮影した吸収イメージング像を図 5 に示す。実験を行う前に我々の持っていた懸念は、円環の内部でいかに光強度が全くない状態にしたとしても、レーザー光自体が重力に対して僅かでも傾いていれば、BEC が全て縁に押し付けられてしまうのではないかと、という疑問

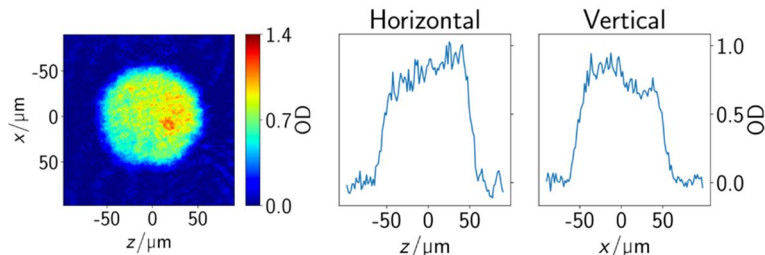


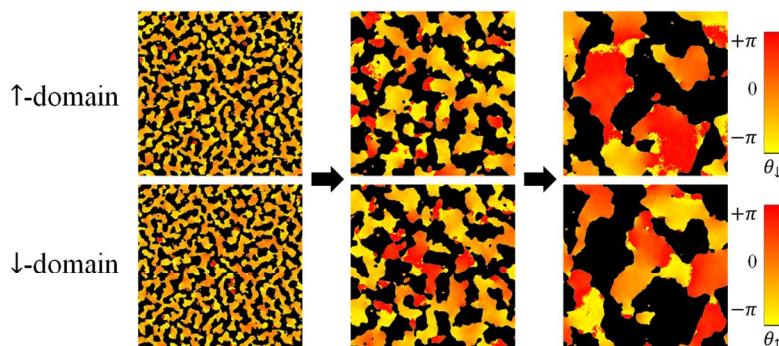
図 5: 重力方向から撮影された BEC の吸収イメージング画像

であった。もし同じ条件で撮った画像に大きな差が見られる場合、傾きが揺らいでいることが懸念され、実験に大きな支障が出る可能性が心配された。実験の結果、原子の吸収像にショットごとのばらつきは見られず、心配は杞憂であったと結論した。原子の密度分布の傾きは光強度の分布と相関しており、光強度のプロファイルを改善することで、より均一な BEC の作成が期待できる。実験の前に心配されたもう一つの懸念はレーザーの波長が共鳴に近いために光散乱により BEC の寿命が短くなることである。実験の結果、箱型ポテンシャル中でもルビジウムの BEC の寿命は 1 秒以上あり、問題ないことが確認された。これらの成果は Fleper、加藤、井上の 3 氏によって日本物理学会で口頭発表された。

離散的 (Z_2) 対称性の破れの相転移ダイナミクスに関する動的統計則と2成分 BEC における量子的異常性の発見

理論面の研究成果について、最も重要な成果である相分離する2成分 BEC の秩序化過程と浸透理論 (パーコレーション) についてのみ述べる。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 (右図)。

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リング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特徴的なサイズよりも大きいドメインは浸透理論に従う普遍的な振舞いを示す一方、小さいドメインは量子系特有の振る舞いを示すことを明らかにした。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。



相分離する2成分BEC中のドメイン形成の時間発展の様子。上列と下例は2種類のドメイン (↑-domainと↓-domain) の空間分布を表しており、黒い領域がそれぞれのドメインが存在する領域である。グラデーションは他方のドメインが占有する領域における超流動を特徴づける秩序変数の位相 ($\theta_{\uparrow, \downarrow}$) を表している。

相分離する2成分BEC中のドメイン形成の時間発展の様子。上列と下例は2種類のドメイン (↑-domainと↓-domain) の空間分布を表しており、黒い領域がそれぞれのドメインが存在する領域である。グラデーションは他方のドメインが占有する領域における超流動を特徴づける秩序変数の位相 ($\theta_{\uparrow, \downarrow}$) を表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1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) https://doi.org/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 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 23628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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23件(うち招待講演 6件/うち国際学会 18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, 11. 5-6 (2018) (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 ^3He 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, 12. 22-23 (2018) (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, July, 25-31 (2018) (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, Tokyo, July, 25-31 (2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kato, Yujun Wang, J. Kobayashi, Paul S. Julienne and S. Inouye
2. 発表標題 Isotopic shift of atom-dimer Efimov resonances in K-Rb mixtures
3. 学会等名 ICAP 2018: The 26th International Conference on Atomic Physics Barcelona, Spain, July 22-27, 2018. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上慎
2. 発表標題 冷却原子における共鳴散乱：フェッシュバツハ共鳴とエフィモフ共鳴
3. 学会等名 原子衝突学会 第43回年会(2018年10月14日)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin Inouye
2. 発表標題 Efimov resonances in an ultracold mixture
3. 学会等名 QFS2018: Internatinal Conference on Quantum Fluids and Solids, Tokyo, July, 25-31 (2018) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin Inouye
2. 発表標題 What can we do with a quantum degenerate mixture?
3. 学会等名 International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, Dec. 13, 2018 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷秀秋, 加藤宏平, 井上慎
2. 発表標題 ガスセルを用いたラビ周波数の空間イメージング
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 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 FINES2018-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 Janek Fleper, Kohei Kato, Shin Inouye
2. 発表標題 Dual species BEC in a 2D-box potential
3. 学会等名 日本物理学会
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, Natal, Brazil, 6.24-7.5 (招待講演) (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, Gyeongju, South Korea, 7. 8-12 (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, Gyeongju, South Korea, 7. 8-12 (国際学会)
4. 発表年 2019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, Buenos Aires, Argentina, July, 8-12 (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, Buenos Aires, Argentina, July, 8-12 (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 Superfluids at Zero Temperature
3. 学会等名 Turbulence of all kinds, Osaka City University (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〕

-

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
研究 分 担 者	竹内 宏光 (Takeuchi Hiromitsu) (10587760)	大阪市立大学・大学院理学研究科・講師 (24402)	