

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18752

研究課題名(和文)3次元光格子によるp波分子の生成効率の向上

研究課題名(英文)Efficient creation of p-wave molecules in a three-dimensional optical lattice

研究代表者

向山 敬(Mukaiyama, Takashi)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：70376490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では極低温フェルミ原子気体系においてp波超流動の実現を妨げている最も大きな要因であるp波フェッシュバツハ近傍での原子ロスについての定量的な評価を系統的に行った。様々なp波相互作用強度の領域において、3次元系と2次元系において詳細に調べ、ロスを説明する理論的表現についても考察を行った。それにより最もp波超流動の実現可能性が高いと期待される原子間相互作用最大の極限の領域での原子ロスの詳細な理解が得られた。今後原子ロスに打ち勝ってp波超流動を実現しようという本研究においては重要なステップであると言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却原子系でp波超流動が実現できれば、原子間相互作用がBCS領域からBEC領域まで自在に変化させることができ、p波超流動の未踏のパラメータ領域の物性が開拓できる可能性がある。しかしフェッシュバツハ共鳴を用いて原子のp波弾性衝突を増強させると、同時に非弾性衝突による原子ロスのレートも増大してしまい、その実現は未だなされていない。本研究ではこれまであまり詳細に議論されていないp波衝突による非弾性衝突特性を3次元系から低次元系に至るまで系統的に理解することで、p波フェルミ原子対をより高い位相空間密度で生成し超流動を実現するための手法を開発することを目的としている。

研究成果の概要(英文)：Quantum gases with controllable p-wave interactions provides us with a wonderful playground to study phase transitions between superfluid phases with different symmetries. However, ultracold Fermi gases with strong p-wave interactions suffer from three-body relaxation losses. We started with the trial to understand the loss properties and experimentally identified the scaling behavior of the three-body loss in the weak interaction limit, and also the unitarity-limited behavior in the strong interaction limit. We further investigate the theoretical framework to reproduce the loss properties of the Fermi gas with strong p-wave interactions. We extend our study of the three-body loss coefficients from three-dimensional atomic gas to two-dimensional atomic gas, and investigate the possibility to improve the elastic to inelastic collision rate ratio. The result we obtained in this study paves the way toward realization of p-wave superfluid in an ultracold Fermi gas.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：極低温原子気体 レーザー冷却 超流動 原子衝突 量子縮退 光格子

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

超伝導や超流動といったマクロな量子現象は、秩序パラメータの対称性がその物性の発現に決定的な役割を果たしている。特に高温超伝導は d 波の対称性を持つことは確立されている一方で、 p 波の超伝導は UPt_3 などの重い電子系やルテニウム酸化物超伝導体はその代表例とされているが、超伝導の対称性に関する詳細な議論も引き続き行われている。一方で冷却原子系は、 p 波散乱のフェッシュバッハ共鳴（散乱共鳴現象）を用いて超流動を観測することができればペアが p 波の対称性を持つことは疑う余地がなく、さらに冷却原子系の持つ原子間相互作用可変の性質を利用することで異なる対称性を持つ p 波超流動相の間の相転移を観測することも可能となる系である。

我々はこれまで、 s 波フェッシュバッハ共鳴を用いて相互作用を引力から斥力へと連続的に制御することにより BEC 領域から BCS 領域へのクロスオーバー領域における s 波超流動の相転移温度の測定に成功し、さらに BCS-BEC クロスオーバー領域で s 波散乱長が無限大になる点において熱力学的性質が構成粒子の性質にまったく依存しない普遍的な性質を示すことを世界で初めて実証した。そのような研究を通して強く s 波相互作用するフェルミ粒子系の超流動の観測と熱力学的性質に関する理解が深まるにつれ、 p 波相互作用系について同様に p 波超流動の実現や熱力学量の決定ができれば、物性研究に与えるインパクトは s 波のそれと同等かそれ以上に大きいと考えるようになった。そこで我々はフェッシュバッハ共鳴を用いた p 波分子の生成に挑戦し、世界で最も寿命の長い p 波分子の生成に成功した。しかしながら p 波分子同士の衝突によって分子がロスしてしまう時間スケールが短く、この寿命により分子生成効率が 15% 程度にとどまることが明らかになった。 p 波超流動の実現のためには p 波分子を高い位相空間密度で生成することが必須であり、そのためには分子の生成効率をいかに高くできるかが重要であるが、この問題を克服できたグループはない。

2. 研究の目的

冷却原子系で p 波超流動が実現できれば、 p 波超流動として知られているヘリウム 3 と異なり、原子間相互作用が BCS 領域から BEC 領域まで自在に変化させることができ、 p 波超流動の未踏のパラメータ領域の物性が開拓できるであろう。冷却原子系は p 波相互作用のみが寄与する状況を実現することができ、純粋に p 波相互作用の寄与による現象の解明や定量的理解をするのに有用である。理論的には p 波フェッシュバッハ共鳴をまたぐ両側（BEC 側と BCS 側）においては、同じ対称性を持ちながら波数空間におけるギャップの形状が異なるトポロジカルな超流動相間の相転移が起こると予言されている。これは s 波において連続的に系が推移する BCS-BEC クロスオーバーと本質的に異なる振る舞いであり、このようなトポロジカルな相転移現象が実験的に実証されればそのインパクトは極めて大きい。このように冷却原子系で p 波超流動を実現する意義は極めて大きいものがあるが、前述のようにフェッシュバッハ共鳴を用いて原子の p 波弾性衝突を増強させると、同時に非弾性衝突による原子ロスのレートも増大してしまい、強く p 波相互作用するフェルミ粒子系を安定して生成することが難しいという状況がある。そこで本研究ではフェルミ粒子系を低次元のトラップに捕獲することにより、弾性衝突と非弾性衝突の比率の改善を目指す。低次元系でそのような改善が見られることは理論的に知られているが実験で実証された例はなく、この事実を実証することは本研究の重要な目標の一つである。また、そのためには 3 次元系から低次元系にかけての原子の非弾性衝突特性の評価が極めて重要である。冷却フェルミ原子系では s 波衝突の特性は詳細に調べられており、また衝突を記述するパラメータが s 波散乱長のみであるために、理論的な解析も行いやすい。一方で p 波衝突の場合は有効長（effective range）の項が無視できるパラメータ領域が狭く、 s 波衝突と比べて衝突断面積表現が複雑になり、解析も比較的難しくなるという面がある。本研究ではこれまであまり詳細に議論されていない p 波非弾性衝突特性を 3 次元系から低次元系に至るまで、また比較的理論的扱いが容易な弱相互作用領域から p 波超流動実現に重要な強相互作用領域までを系統的に理解することを目指すものである。そして最終的には出来るだけ多くの p 波分子を生成することでより高い位相空間密度を達成し、超流動実現を目指すものである。

3. 研究の方法

そこで本研究では光格子を用いて原子集団のトラップを低次元系にすることにより、原子ロスの課題を打破することを目指す。原子ロスを抑えることは p 波分子を衝突に対して安定化することである。本研究では p 波分子の安定化を助ける機構として量子ゼノ効果による分子安定化の機構に注目している。分子が占有しているサイトに他の分子がトンネリングにより飛び移ってくると、同じサイト内に 2 分子が存在することにより即座に振動緩和を伴った衝突を起こして 2 つの分子ともロスすることになる。しかしこのロスの過程が非常に高いレートで生じるといったことは 2 分子が同じサイトに存在する状態と分子がロスしてなくなった状態を強く結合することを意味し、この強い結合位より 2 分子が同サイトに存在する状態が実現しにくくなるという機構が働くもので、ボース原子で構成された分子を用いてこの機構が機能することは実証されている。しかしながらこの機構を用いてフェルミ原子系の p 波を安定化した例はなく、この機構が機能することを実証し、より多くの p 波分子を安定的に生成することを最終的な目

標としている。

4. 研究成果

本研究は極低温フェルミ原子気体を用いて p 波超流動を実現することを目指した研究であり、そのためには p 波フェッシュバハ共鳴近傍での原子のロスを抑えることが必須である。そのためには p 波フェッシュバハ共鳴近傍での原子ロスのメカニズムについての詳細な理解が必要である。さらにはロスを抑える方法として原子集団を低次元にトラップするというアイデアがあるが、その有効性は実験的に示されておらず、有効性を検証することも本研究の重要な目的の一つである。本研究では p 波超流動実現の最も大きな障壁となっている原子の 3 体衝突について、3 体衝突係数が原子間相互作用が大きくなるにつれてどのように増大するかという点を詳細に調べた。さらに、その 3 体衝突によるロスが低次元系においてどのように振る舞うかを定量的に評価した。

まず p 波相互作用する原子のロスが理論的にどのように記述できるかという点を理解するために、p 波非弾性衝突が 2 体衝突となる双極子ロスが起こる状況を詳細に調べた。原子を 2 つの異なるスピン状態に用意すると、一方のスピン状態はエネルギー的に高い状態にあり、2 体衝突によるスピントリップでロスが生じるという双極子ロスが起こる。3 体衝突と異なり 2 体衝突においては散乱振幅が原子間衝突を詳細に記述するのに有効であり、原子の双極子ロスの温度や磁場に対する依存性を議論する際に、原子の p 波散乱振幅表現が有効ではないかと考えた。実際に散乱振幅表現の中に現れる散乱体積というパラメータに虚部を導入することで 2 体衝突に起因したロスがよく説明ができることを実験的に見出した。散乱体積というパラメータは原子衝突における衝突位相に対応するものであり、虚部が原子数の減少に対応することは直感的には理解されるものであるが、実際にそのような単純な現象論的取り扱いで原子のロスが記述できるかどうかは自明でなかった。実験では、原子を 2 つのスピン状態に用意し、2 体衝突と 3 体衝突がどちらも起こる状況において、密度を変化させることによりロスレートが原子密度に比例する密度領域が存在することを確認した。ロスが主に 2 体衝突による場合はロスレートが原子密度に比例した値になるはずであり、このことを確かめることで原子ロスが 2 体衝突によるものであることを保証している。図 1 に 2 体の双極子ロス係数の磁場依存性の測定結果を示す。● は原子温度が 4.2 μK、▲ は原子温度が 2.2 μK の時の実験結果であり、点線で示すのは p 波散乱振幅表現の中に現れる散乱体積というパラメータに虚部を導入し、虚部をフリーパラメータとしてフィッティングした結果である。我々の成果により、散乱体積の虚部という単一のパラメータを導入するだけで原子の双極子ロスの温度と磁場に対する依存性が精度よく再現できており、さらに散乱振幅表現が大きく変更を受けるような 2 次元系に全く同じ取り扱いをした場合にも同様に双極子ロスが表現できることを実験的に見出した。さらにこの研究の結果、2 次元系で 3 次元系よりも原子の双極子ロスが小さいことが定量的に示された。このことは原子を低次元でトラップすることで原子ロスが抑制できる可能性があるという理論研究による予言とも一致しており、p 波超流動の実現への重要なステップである。この成果は 2017 年に Physical Review A 誌に掲載された。

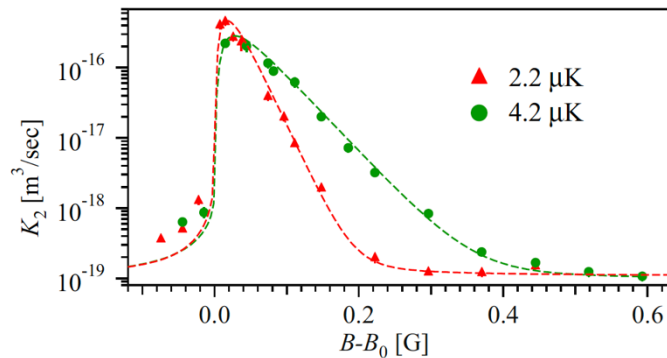


図 1 2 体衝突係数の磁場依存性

次に 3 体衝突によるロスをより詳細に理解するために、まずは理論的取り扱いの比較的行いやすい p 波相互作用が弱い極限での 3 体衝突について調べた。相互作用が弱い極限では三体ロス係数が散乱エネルギーに関して 2 乗の関係性を持つこと（ウィグナーの閾値則）が知られていた。そしてその性質を仮定して原子ロスを記述するレート方程式を次元解析的に考察すると、原子のロス係数は散乱パラメータである散乱体積に対して 8/3 乗に比例する関係を持つこと（べき乗則）が導かれることが理論的に示されていた。しかしながらこの依存性を実際に実験的に確認できた例はなかった。この実験の難しさは、3 体ロスが比較的遅いパラメータ領域を調べる必要があるために、原子のロスの時間ス

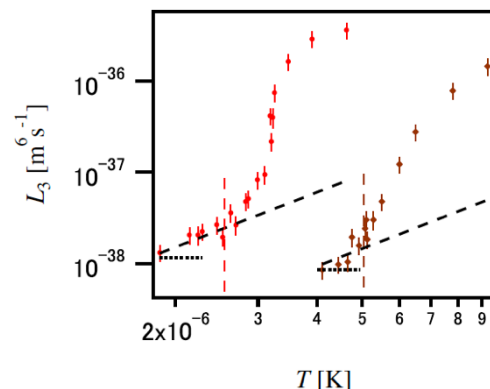


図 2 3 体ロス係数の温度依存性

ケールが極めて長い領域での測定を行う必要があるというところにある。原子はトラップしているだけでも背景ガスとの衝突で寿命が決まっており、その寿命より長い3体衝突は観測することができない。我々は背景ガスとの衝突による寿命が出来るだけ長くなるように真空度の改善などを行い、原子寿命が80秒という状況を実現することに成功した。その結果極めて遅い3体衝突についても3体衝突係数を計測することができるようになり、三体ロス係数が散乱エネルギーに関して2乗の関係性を持つことを世界で初めて実験的に示すことに成功した。図2に磁場の離調が0.22G (図中の左側のデータ点)と0.45G (図中の右側のデータ点)の場合の温度依存性を示す。低温側の極限において温度の2乗に比例する領域が存在することが初めて示された。また同様の測定を磁場依存性について行うことにより、3体ロス係数が散乱体積に関して8/3乗の関係性を持つことを実験的に示すことにも成功した。図3は3体ロス係数を散乱体積の8/3乗で割ったものをプロットしており、縦軸に示すCの値が一定になる(実線で示す)ときに「散乱体積の8/3乗則」が成立していることを意味する。このデータは異なる温度、異なる磁場においてこれまで測定された全てのデータ点がプロットされており、実験結果が実験条件によらずに普遍的に8/3乗則成り立っていることを明確に示している。しかしながらこの図からもわかるように、べき乗則がp波三体再結合過程における限られたパラメータ領域でしか成り立たない(図3では横軸の値が0.1程度までの領域)ことも同時に判明した。この横軸の値は有効長の河の寄与が散乱体積の項の寄与に比べてどの程度であるかを表すパラメータになっており、べき乗則が破綻する原因が有効長の寄与に依るものであるということがこの実験結果は示唆していることがわかった。有効長とは散乱パラメータのひとつであり、一般にs波散乱では散乱に与える寄与は非常に小さく無視されるが、p波散乱においては顕に関係してくるパラメータである。様々な実験パラメータで行われた測定結果を詳細に解析することにより、二つの依存性(ウィグナーの閾値則及びべき乗則)が成り立つ領域は有効長が無視できる領域か否かによって決定されることを実験的に見出した。このことにより、三体再結合においても、この有効長の存在がs波散乱における三体再結合との決定的な違いを表していることが判明した。この成果は2018年にPhysical Review Letters誌に掲載された。

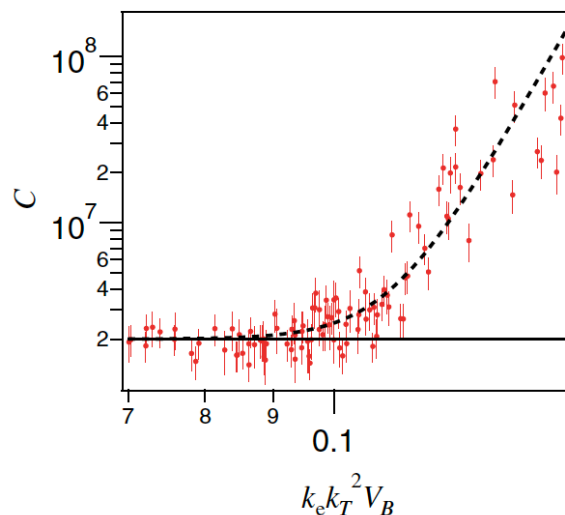


図3 3体衝突係数のべき乗則

次に、よりp波超流動実現の本命である相互作用が強い領域での3体衝突特性の評価を行った。図4に3体ロス係数の磁場依存性を2つの異なる温度のフェルミ原子気体について測定した結果を示す。広い磁場領域に渡って測定しており、横軸の0はフェッシュバハ共鳴の磁場を表している。相互作用が弱い領域では前述のようにべき乗則が成立する領域が存在し、図4では実線で示されている。共鳴に近づいてくると3体ロス係数の測定値が徐々に大きくなり、共鳴近傍においては3体ロス係数が一定値に到達する振る舞いが見られる。これは相互作用が強い極限に見られるユニタリー極限と呼ばれる現象として知られている。この極限は散乱体積が無限大の極限であり、散乱体積が原子間相互作用の表現から消えることになるため、3体ロス係数がもはや磁場に依存せず、散乱ロス係数が原子の温度のみに依存するようになる。この現象自体は次元解析的から明らかであったが、実際にp波相互作用するフェルミ粒子系において実験的に確認されたことはなかった。図5に3体ロス係数の温度依存性を示す。●、◆、■はそれぞれ磁場がフェッシュバハ共鳴から15mG、30mG、44mGほど離調がついた状態での温度依存性の測定結果である。最も近共鳴の●の測定結果では測定された1μKから8μKの温度領域全域においてユニタリー極限に到達しており、温度の2乗に反比例する性質が見られている。磁場が共鳴からずれるほどこのユニタリー極限の性質から離れる温度領域が高くなる様子が見られており、この性質も含めて理論的に再現することに成功している。この成果は2018年にPhysical Review A誌に掲載された。

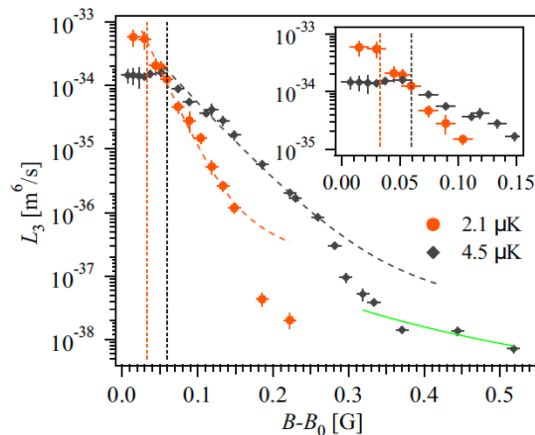


図4 3次元系における3体ロス係数の磁場依存性

また、これまで得られた3体衝突の性質が低次元系でどのように理解できるかを検証するた

めに、2次元系における3体衝突の性質についても詳細に検討を行った。これまで3次元系においてべき乗則やユニタリ極限での振る舞いを突き止め、次元解析から得られる理論的な予測に合う実験結果が得られていることがわかったが、同様の性質が2次元系において成立するかどうかは未だ検証されていなかった。図6に2次元系において観測された3体ロス係数の磁場依存性を示す。異なる温度の原子集団について3体ロス係数の磁場依存性を測定した結果であるが、どちらもある磁場の点において3体ロス係数の振る舞いが急激に変化する点があることがわかる。この磁場よりも大きい(共鳴から遠い)領域では2次元系におけるべき乗則が成立していることが解析の結果からわかっており、弱相互作用極限におけるべき乗則が2次元系でも成立していることがわかった。また同様に強い相互作用の極限ではユニタリ極限に到達し、磁場に依存しないロス係数を示すことも同様の実験により確認されている。さらにべき乗則の成り立つ領域よりも近共鳴の領域(図6の点線でプロットしている領域)では、3体ロス過程を「まず2原子が分子を組み、その後3つ目の原子と衝突してロスする」という2段階過程としてレート方程式を記述することでロスの振る舞いが定量的によく説明できることを突き止めた。この成果は2019年にPhysical Review A誌に掲載されている。

本研究では極低温フェルミ原子気体系においてp波超流動の実現を妨げている最も大きな要因であるp波フェッシュバハ近傍での原子ロスについて、様々な相互作用強度の領域において、かつ3次元系と2次元系において詳細に調べた。特に最もp波超流動の実現可能性が高いと期待される原子間相互作用最大の極限の領域での原子ロスの詳細な理解は、今後原子ロスに打ち勝ってp波超流動を実現しようという本研究においては重要なステップであると言える。

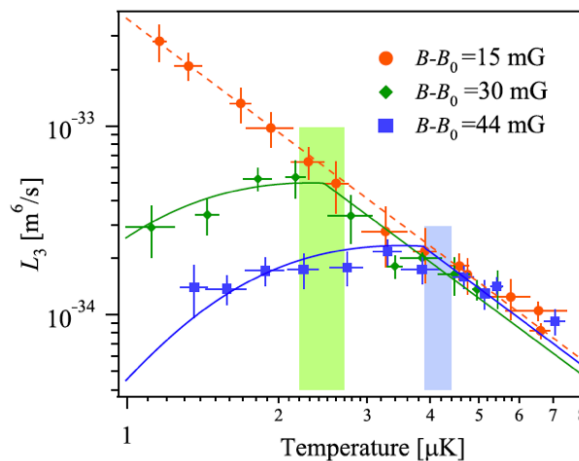


図5 3体衝突におけるユニタリ極限

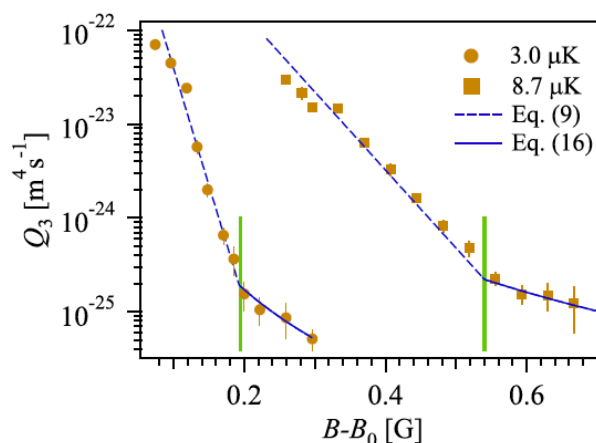


図6 2次元系における3体ロス係数の磁場依存性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Muhammad Waseem, Jun Yoshida, Taketo Saito, and Takashi Mukaiyama, “Quantitative analysis of p-wave three-body losses via a cascade process”, Physical Review A **99**, 052704 (2019). 査読有り
- (2) Muhammad Waseem, Taketo Saito, Jun Yoshida, and Takashi Mukaiyama, “Unitarity-limited behavior of three-body collisions in a p-wave interacting Fermi gas”, Physical Review A **98**, 020702(R) (2018). 査読有り
- (3) Jun Yoshida, Taketo Saito, Muhammad Waseem, Keita Hattori, and Takashi Mukaiyama, “Scaling Law for Three-Body Collisions of Identical Fermions with p-wave Interactions”, Physical Review Letters **120**, 133401 (2018). 査読有り
- (4) Muhammad Waseem, Taketo Saito, Jun Yoshida, and Takashi Mukaiyama, “Two-body relaxation in a Fermi gas at a p-wave Feshbach resonance”, Physical Review A **96**, 062704 (2017). 査読有り

[学会発表] (計 8 件)

- (1) Takashi Mukaiyama, “Collisional properties of Fermi gases with p-wave interactions”, 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, 2018年9月25日, 金沢(招待講演)
- (2) 向山敬, “レーザー冷却原子・イオン混合系で探究する極低温物理”, 独創的研究課題「物

- 質階層の原理を探究する統合的実験研究」研究会，2018年5月11日，熱海（招待講演）
- (3) Muhammad Waseem, Taketo Saito, Jun Yoshida, and Takashi Mukaiyama, “Resonant p-wave Fermi gas in three and two dimensions”, Workshop on coherent control of complex quantum systems 2018年4月17日 沖縄
 - (4) 向山敬, ” レーザー冷却原子・イオン混合系で探究する極低温原子イオン衝突過程”, 理化学研究所分野横断ワークショップ, 2018年1月23日, 浜松（招待講演）
 - (5) Muhammad Waseem, Taketo Saito, Jun Yoshida, and Takashi Mukaiyama, “Two-body relaxation of Fermions near a p-wave Feshbach resonance”, 日本物理学会 2017年9月21日 岩手
 - (6) Takashi Mukaiyama, “Collisional properties of ultracold atoms and ions” International conference on photonic, electronic and atomic collisions, 2017年7月27日 Cairns, (招待講演)
 - (7) Takashi Mukaiyama, “Collisional properties of ultracold atoms and ions” Symposium on small and medium sized cold atom systems, 2017年7月18日, Okinawa (招待講演)
 - (8) Muhammad Waseem, Jun Yoshida, Rintaro Tanaka, Keita Hattori, Taketo Saito, and Takashi Mukaiyama, “Three-body loss in a strongly attractive p-wave Fermi gas of 6Li atoms in three and two dimensions”, Conference on Many-body localization, ICTP Trieste, 2017年7月10日

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※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。