

令和 4 年 4 月 22 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03472

研究課題名（和文）光格子中の長距離相互作用を有する冷却原子系における非平衡量子ダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Nonequilibrium dynamics of cold atoms with long-range interaction in optical lattices

研究代表者

笠松 健一（Kasamatsu, Kenichi）

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：70413763

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）：冷却原子気体で実現する非平衡ダイナミクスを主たるターゲットとして、量子ゆらぎを無視する平均場近似から量子ゆらぎを正確に取り入れた解析までを実施し、適応した量子相関の程度を調節することで様々な問題に取り組んだ。量子ゆらぎが強い場合の研究では、光格子中の長距離相互作用をもつ原子集団が示す擬多体局在と呼ばれる現象を明らかにした。また、弱い量子ゆらぎを想定し、光格子中のボース凝縮体におけるダークソリトンの運動をしらべ、古典量子クロスオーバーがあることを示した。光格子中の2成分ボース気体では強い量子揺らぎにより生じる量子液滴状態が実現することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超低温下にある冷却原子系では、物理を調べる理想的な環境が準備され、系のほぼ全てのパラメーターの制御も可能であるため、様々な物性や量子ダイナミクスを基本的立場から検証することが可能である。本研究で得られた知見は新しい実験研究の更なる動機となり、量子論や物性論の発展に大いに貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：Targeting the non-equilibrium dynamics in cold atomic gases, we have tackled various problems of many-body quantum dynamics by adjusting the degree of quantum fluctuation, from the mean-field approximations to the analyses that accurately incorporate quantum fluctuations. In the case of strong quantum fluctuations, we clarified a phenomenon called quasi many-body localization exhibited by polar gases with long-range interactions in an optical lattice. In the case of weak quantum fluctuations, we studied the motion of dark solitons in Bose-Einstein condensates in an optical lattice, showing that there is the classical-quantum crossover. In the two-component Bose gas in an optical lattice, we showed that the quantum droplet can be induced by strong quantum fluctuations.

研究分野：物性理論

キーワード：冷却原子 ボースアインシュタイン凝縮 光格子 長距離相互作用

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

冷却原子気体の研究は、1995年のボースアインシュタイン凝縮(BEC)の実現を皮切りに急速な勢いで発展し、光格子中の原子気体における超流動・Mott 絶縁体転移の観測や、フェルミ気体における BCS-BEC クロスオーバーの観測など、量子多体系の物理の発展に多大な貢献をもたらしている。光格子中の冷却原子系は、高い制御性の下で、量子多体効果を調べることができる絶好の系である。冷却原子系では外部環境からほとんど孤立した状況が実現し、特に、孤立量子系における非平衡現象の研究が活発になされており、現在もその流れが続いている。

2015年に光格子中の冷却原子系を用いた、多体局在 (Many-body localization) と呼ばれる現象がドイツのマックス・プランク研究所の実験グループによって観測され、上記の非平衡系の物理の研究をさらに加速させた。孤立量子系の平衡化または熱化は統計力学における基本的かつ重要な問題として古くから存在したが、多体局在は熱化現象の対極の概念である。これらの現象の解明は非平衡量子統計力学の基礎を構築する上で極めて重要な位置づけをもち、その理解は理論物理における大きな挑戦となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、冷却原子系を想定し、多体局在を含む量子多体系のダイナミクスを包括的に理論研究し、非平衡統計力学の発展につなげることを目的とする。多体局在に関して、本研究課題では原子間にはたらく長距離相互作用の影響について詳しく調べた。冷却原子系では大きな磁気モーメントをもつ原子や極性分子などを用いることで、双極子双極子相互作用をもつ量子多体系を準備することができ、実験研究の動機付けを提供することを目的とした。

また、申請者が従来から進めている冷却原子系における BEC の超流動現象と非線形ダイナミクスの研究に関して、上記の手法や解析で得られた知見をフィードバックし、超流動の物理の研究をさらに発展させることも目的の一つである。

## 3. 研究の方法

本研究は多体系の量子ダイナミクスを扱う理論研究であり、計算機を用いた数値シミュレーション解析が主たる方法である。多体局在を考察する際の量子ダイナミクスの研究には、少数量子多体系の時間依存シュレディンガー方程式を直接的に解く計算スキームを開発し、それを用いた。粒子数が多い系に拡張するためには、第ゼロ近似としては平均場近似を用いる必要があるが、平均場近似からの量子補正を取り込む一つの方法として、切断 Wigner 近似と呼ばれる方法を用いて、光格子中のソリトンと呼ばれる非線形励起のダイナミクスに適応した。

これらのシミュレーションの動作実行は本研究費で購入した計算機サーバーを用いた。

## 4. 研究成果

本研究期間で得られた主な成果を以下にまとめる。各項目の番号に対応する出版論文は最後に示した。

(1) レーザーによって誘起されたスピン軌道相互作用をもつ2成分 BEC において、一様に原子が分布した状態からの変調不安定性による相分離のパターン形成の非線形ダイナミクスを Gross-Pitaevskii 方程式を用いて解析した。通常の2成分 BEC では密度が混ざった状態が安定であるパラメータ領域でも、スピン軌道相互作用の効果によって混合状態が不安定化することが先行研究により明らかになっていたが、非線形ダイナミクスでは空間的な相分離に加えて、運動量空間においても波動関数が明確な分離を起こすことを明らかにした。

(2) 光格子上にランダムに分布した長距離相互作用をもつハードコアボソンが、どのように一様粒子分布をもつ平衡状態へ緩和するか非平衡過程を、厳密な量子ダイナミクスを数値的に解くことで調べた。長距離相互作用が増加するにつれて、緩和の振る舞いは初期状態に強く依存し、その時間スケールが指数関数的に長くなることを見出した。これは動的に生成するサイト間束縛ペアの遅い運動の影響で、一種の局在状態が実現していることを明らかにした。

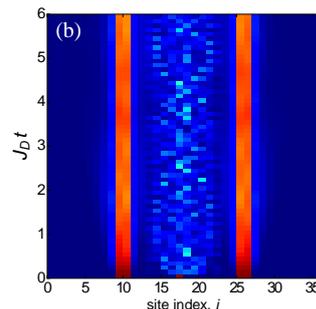


図1: 原子が2つの束縛ペアの間に局在している様子

(3) 異なるスピン状態を光でコヒーレントにラビ結合した2成分原子のBECでは、2成分の波動関数の相対位相が  $2\pi$  変化する特徴を持つ sine-Gordon ソリトンと呼ばれるドメイン壁が位相欠陥として存在する。このドメイン壁は、原子間相互作用やラビ結合の強さによって、壁が長くなればなるほど動的に不安定となり、複数の断片に崩壊することが先行研究により見出されていた。本研究では、ドメイン壁の不安定性に関して、Gross-Pitaevskii 方程式と Bogoliubov-de-Gennes 方程式の数値計算を用いてこの問題を解析し、壁の位置の周期変調があるパラメータ領域で動的に不安定となり、断片に分裂することの物理的解釈を与えた。

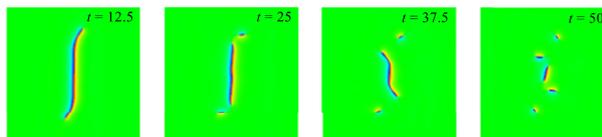


図2: ドメイン壁が断片に崩壊する様子

(4) 最近、2成分冷却原子気体の相互作用を制御することによって、平均場による相互作用エネルギーと Lee-Huang-Yang 量子補正のエネルギーの競合によって実現する液滴状態が観測され、新しい物質相の発見として注目されている。本研究では1次元空間において、2成分の同成分間相互作用が非対称な場合の量子液滴の構造と安定性、および一様な2成分原子気体がもつ変調不安定性により、液滴が生じる動的過程の理論的解析を行った。

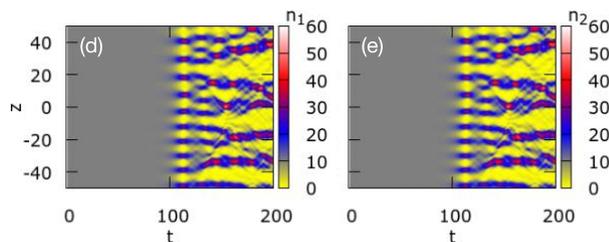


図3: 変調不安定性により液滴構造ができる様子

(5) 光格子中の1次元ボース気体におけるダークソリトンのダイナミクスを、切断ウィグナー近似を用いて調べた。先行研究では、量子揺らぎがない場合、ダークソリトンの動的安定性はその位相キックが格子サイトにあるか、隣接する2つのサイトのリンク上にあるかに依存することが明らかになっていた。また、強い量子揺らぎがある場合、位相キックの位置にかかわらず、ダークソリトンが動的に不安定になることも明らかになっていた。本研究では、解明されていない弱い量子揺らぎの領域でのダークソリトンの動的安定性を調べた。その結果、動的安定性の位置依存性は、量子揺らぎの強さが増すにつれてクロスオーバー的に小さくなり、最終的には消滅することが明らかになった。

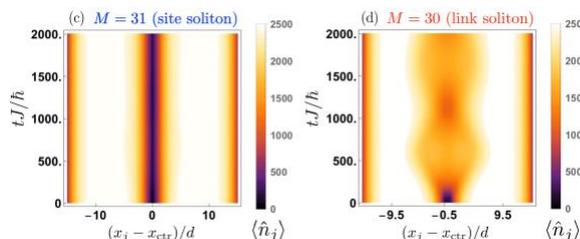


図4: サイト上にあるソリトン (左) とリンク上にあるダークソリトンの運動の様子

(6) 光格子中の冷却原子気体の振る舞いを記述できる Bose-Hubbard 模型を用いて、Mott 絶縁相から超流動相への急激な相変化の非平衡ダイナミクスの理論的解析を行った。実際の実験を想定し、系に調和振動子ドラップポテンシャルを導入することで、非一様系における Kibble-Zurek 機構を考察し、超流動-Mott 絶縁体転移を与える相図の Mott-lobe 構造により、一様系と非一様系での相転移の起こり方に違いがあることを指摘した。

(7) 古典流体におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性の理論を拡張し、相分離した2成分BECのせん断流不安定性が引き起こす非線形ダイナミクスを理論的に研究した。Gross-Pitaevskii 方程式の系統的な数値シミュレーションにより、様々なパターン形成のダイナミクスを明らかにした。また、超流体に拡張して定義されたウェーバー数によって挙動が特徴づけられることを示し、量子流体系に特有の微視的な側面を明らかにすることができた。本研究成果はアメリカ物理学会刊行のオンラインマガジン “Physics Magazine” に、ニュースとして取り上げられた。

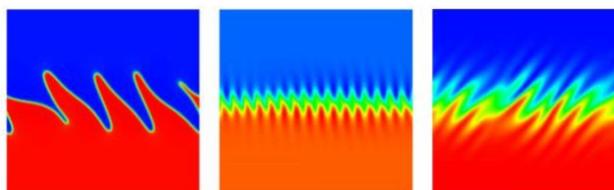


図5: 剪断流をもつ2種類の超流動体の界面が形成する様々な模様

(8) Gross-Pitaevskii 方程式の数値シミュレーションにより、調和振動子ポテンシャルまたは壁ポテンシャル内の2成分BECにおいて、ガウス型の攪拌ポテンシャルによって生成された2次元量子乱流を研究した。凝縮体の成分内相互作用やトラップの周波数が非対称であるとき、乱流は減衰ダイナミクスを起し、同一循環をもつ半整数量子渦が格子構造を形成する準定常的な

状態に緩和することがわかった。また、この状態に対応する非圧縮性運動エネルギーのスペクトルには、(i) スピン回復長で決まる波数の範囲(渦コアの大きさ)では  $k^{-3}$  乗則が見られる。(ii) 密度回復長で決まる波数の範囲では平坦な領域が見られる。ということが明らかになった。

(9) 外部トラップポテンシャルがある2成分 Bose-Hubbard 系における量子液滴の動的形成について理論的に研究した。具体的には、二重充填のモット絶縁体に囲まれた中心領域の超流動体は二相間の量子相転移の不連続性により自己束縛され、量子液滴を形成する。我々は、2次元系における時間依存グッツヴィラー方程式のシミュレーションを用いて、トラップポテンシャルの制御により液滴の特徴的な振る舞いを誘発する方法を示した。また、この液滴の静的・動的特性は、6次の非線形性まで考慮した有効ギンズブルグ・ランダウ理論によって定性的に記述できることを示した。

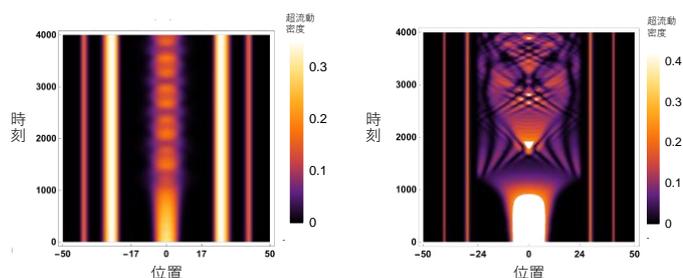


図 6 : 中心付近の超流動体が液滴になっている場合 (左) と、液滴になっていない場合 (右) の原子気体密度の時間変化の様子

- 1) T. Mithun and K. Kasamatsu : Modulation instability associated nonlinear dynamics of spin-orbit coupled Bose-Einstein condensates, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **52**, 045301 [9 pages] (2019).
- 2) W. Li, A. Dhar, X. Deng, K. Kasamatsu, L. Barbiero, and L. Santos : Disorderless Quasi-localization of Polar Gases in One-Dimensional Lattices, Phys. Rev. Lett. **124**, 010404 [6 pages] (2019).
- 3) K. Ihara and K. Kasamatsu : Transverse instability and disintegration of a domain wall of a relative phase in coherently coupled two-component Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A **100**, 013630 [8 pages] (2019).
- 4) T. Mithun, A. Maluckov, K. Kasamatsu, B. A. Malomed, and A. Khare : Modulational Instability, Inter-Component Asymmetry, and Formation of Quantum Droplets in One-Dimensional Binary Bose Gases, Symmetry **12**, 174 [23 pages] (2020).
- 5) Y. Ozaki, K. Nagao, I. Danshita, and K. Kasamatsu : Semiclassical dynamics of a dark soliton in a one-dimensional bosonic superfluid in an optical lattice, Phys. Rev. Research **2**, 033272 [12 Pages] (2020).
- 6) Y. Machida and K. Kasamatsu : Application of the inhomogeneous Kibble-Zurek mechanism to quench dynamics in the transition from a Mott insulator to a superfluid in a finite system, Phys. Rev. A **103**, 013310 [10 Pages] (2021).
- 7) H. Kokubo, K. Kasamatsu, and H. Takeuchi : Pattern formation of quantum Kelvin-Helmholtz instability in binary superfluids, Phys. Rev. A **104**, 023312 [16 Pages] (2021).
- 8) T. Mithun, K. Kasamatsu, B. Dey, and P. G. Kevrekidis : Decay of two-dimensional quantum turbulence in binary Bose-Einstein condensates, Physical Review A **103**, 023301 [17 Pages] (2021).
- 9) Y. Machida, I. Danshita, D. Yamamoto, and K. Kasamatsu : Quantum droplet of a two-component Bose gas in an optical lattice near the Mott insulator transition, Phys. Rev. A **105**, L031301 [6 Pages] (2022).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ozaki Yusuke, Nagao Kazuma, Danshita Ippei, Kasamatsu Kenichi	4. 巻 2
2. 論文標題 Semiclassical dynamics of a dark soliton in a one-dimensional bosonic superfluid in an optical lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33272
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033272	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 Machida Yoshihiro, Kasamatsu Kenichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Application of the inhomogeneous Kibble-Zurek mechanism to quench dynamics in the transition from a Mott insulator to a superfluid in a finite system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 13310
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.013310	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 Mithun Thudiyangal, Kasamatsu Kenichi, Dey Bishwajyoti, Kevrekidis Panayotis G.	4. 巻 103
2. 論文標題 Decay of two-dimensional quantum turbulence in binary Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.023301	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 Kousuke Ihara and Kenichi Kasamatsu	4. 巻 100
2. 論文標題 Transverse instability and disintegration of a domain wall of a relative phase in coherently coupled two-component Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 13630
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.100.013630	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 W. Li, A. Dhar, X. Deng, K. Kasamatsu, L. Barbiero, and L. Santos	4. 巻 124
2. 論文標題 Disorderless Quasi-localization of Polar Gases in One-Dimensional Lattices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letter	6. 最初と最後の頁 10404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.010404	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 Thudiyangal Mithun, Aleksandra Maluckov, Kenichi Kasamatsu, Boris A. Malomed, Avinash Khare	4. 巻 12
2. 論文標題 Modulational instability, inter-component asymmetry and formation of quantum droplets in one-dimensional binary Bose gases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12010174	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 該当する

1. 著者名 Kasamatsu Kenichi, Sakashita Kouhei	4. 巻 97
2. 論文標題 Stripes and honeycomb lattice of quantized vortices in rotating two-component Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.97.053622	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 Mithun Thudiyangal, Kasamatsu Kenichi	4. 巻 52
2. 論文標題 Modulation instability associated nonlinear dynamics of spin-orbit coupled Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 045301 ~ 045301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/aafbdd	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 Kasamatsu Kenichi, Mizuno Ryota, Ohmi Tetsuo, Nakahara Mikio	4. 巻 99
2. 論文標題 Effects of a magnetic field on vortex states in superfluid He3?B	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.104513	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13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 小久保治哉、笠松健一、竹内宏光
2. 発表標題 対向流をもつ相分離した2成分ボース凝縮体における界面の非線形ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠松健一、久茂田倅、松居哲生
2. 発表標題 コンパクト群U(1), SU(2) 上の切断ウィグナー近似
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田佳央、段下一平、山本大輔、笠松健一
2. 発表標題 Mott絶縁体転移近傍の光格子中の2成分Bose粒子系における超流動液滴状態
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小久保治哉、笠松健一、竹内宏光
2. 発表標題 超流動界面で生じるケルビン・ヘルムホルツ不安定性の量子・古典クロスオーバー
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久茂田倅、笠松健一、松居哲生
2. 発表標題 コンパクト群 $U(1)$ , $SU(2)$ 上の切断ウィグナー近似 II
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Machida, K. Kasamatsu
2. 発表標題 Quench Dynamics From Mott Insulator to Superfluid in the Bose-Hubbard Model: Application of the Inhomogeneous Kibble-Zurek Mechanism
3. 学会等名 28th Annual International Laser Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y Ozaki, K Nagao, I Danshita, K Kasamatsu
2. 発表標題 Semi-Classical Dynamics of a Dark Soliton in a One-Dimensional Lattice Bose Gas
3. 学会等名 28th Annual International Laser Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K Ihara, K Kasamatsu
2. 発表標題 Transverse Instability and Disintegration of Domain Wall of Relative Phase in Coherently Coupled Two-Component Bose-Einstein Condensates
3. 学会等名 28th Annual International Laser Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 町田佳央, 笠松健一
2. 発表標題 超流動-Mott絶縁体転移における非一様Kibble-Zurek理論の適応
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 小久保治哉, 笠松健一, 竹内宏光
2. 発表標題 対向流をもつ相分離した2成分ボース凝縮体における界面の非線形ダイナミクス
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 井原康輔, 笠松健一
2. 発表標題 ラビ結合した2成分ボース凝縮体のドメインウォールの不安定化
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 尾崎裕介, 長尾一馬, 段下一平, 笠松健一
2. 発表標題 光格子中の一次元Bose気体におけるダークソリトンの準古典ダイナミクス
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 笠松健一, 大見哲巨, 中原幹夫
2. 発表標題 有限磁場下における超流動 $^3\text{He-B}$ 相の渦芯構造と相図II-横磁場の場合-
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ホームページ  <a href="https://www.phys.kindai.ac.jp/laboratory/kasamatsu/">https://www.phys.kindai.ac.jp/laboratory/kasamatsu/</a></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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------