

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05554

研究課題名(和文) 複雑な秩序変数を持つ量子凝縮体におけるトポロジカル励起

研究課題名(英文) Topological Excitations in Quantum Condensates with Complex Order Parameters

研究代表者

中原 幹夫 (Nakahara, Mikio)

近畿大学・理工学総合研究所・研究員

研究者番号：90189019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：磁場下での超流動 $^3\text{He-B}$ の渦糸を解析し、圧力や磁場が変化した時に得られる渦糸の相図を求めた。平行平板中の超流動 $^3\text{He-A}$ における半整数渦糸を解析した。3次元トラップに閉じ込められたスピン1ポラー相BECにおいて、4重極磁場と軸方向の一樣磁場を時間的に制御することにより、任意のHopfチャージを持ったリンク構造が実現することを示した。スピン2BECのサイクリック相およびバイアキシャル・ネマティック相における3次元スキルミオンを解析した。曲がった時空において、超流体やヤン・ミルズ場のつくるアナログ重力を解析した。ユニタリー群に関する平均値が有限個の点に関する平均値で置き換えられることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超流動 $^3\text{He}$ やスピン自由度を持つボース凝縮体など、複雑な秩序変数を持つ凝縮体におけるトポロジカル励起の研究や、組み合わせ論と量子情報の共通領域であるユニタリー $t$ -デザインの研究など、物理学と数学の諸分野にまたがる研究を行った。ワークショップ等を通して、これらの分野の研究者の交流を深めた。また、多くの国際共同研究の成果を、インパクトファクターの高い雑誌に多数出版することにより、我が国および世界の学術的レベルの向上に寄与した。

研究成果の概要(英文)：Vortices in superfluid  $^3\text{He-B}$  under magnetic field were analyzed and phase diagram of various vortices were obtained as a function of pressure and magnetic field for example. Half-quantum vortices in  $^3\text{He-A}$  was analyze in the slab geometry. Link structure with arbitrary Hopf charge was obtained in the polar phase of  $F=1$  BEC in a 3-d trap by manipulating the quadrupole field and uniform axial magnetic field as functions of time. The 3-d skyrmions in the cyclic and the biaxial nematic phases of  $F=2$  BEC were analyzed. Analogue gravity associated with superfluid and Yang-Mills field was analyzed in a curved spacetime. It was shown that an average over unitary group manifold can be replaced by an average of a finite set of points in the unitary group (unitary  $t$ -design).

研究分野：数理系科学

キーワード：ボース凝縮 超流動ヘリウム3 量子渦 スキルミオン ホップ写像 ユニタリー $t$ -デザイン アナログ重力 光格子

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

超流動  $^3\text{He}$  や冷却原子のボース凝縮体(以下 BEC)は、複雑な秩序変数をもち、それゆえに研究の初期の段階から、物性研究者のみならず、素粒子論や宇宙論の研究者の参加を含む分野横断型の研究がなされてきた。その中でも、ホモトピー群を用いて特徴づけられるトポロジカル励起の研究は、この複雑な秩序変数に固有な研究テーマである。本研究ではホモトピー群、超流動  $^3\text{He}$ 、BEC に関し長年の研究を行ってきた中原の豊富な経験を活かし、BEC の専門家笠松と  $^3\text{He}$  の専門家高木と共同研究を行った。研究グループには、これらの分野ですでに世界的な実績のあるフィンランド・アアルト大学の応用物理学科や低温研究所のグループ、および量子制御ですでに共同研究を行っている研究者などを含めた国際共同研究体制を確立し、この分野のさらなる発展と多分野交流を目指した。

### 2. 研究の目的

フェルミ粒子系である超流動  $^3\text{He}$  と、冷却原子の BEC は、全く異なる物理系であるにもかかわらず、理論的には驚くほど共通点が多い。本研究では、その両分野にまたがる長年の研究経験と数理論理学の素養をもつ代表者中原が、これらの複雑な秩序変数を持つ凝縮体におけるトポロジカル励起を、それぞれの分野の世界的なエキスパートである理論家および実験家とともに研究し、新たなトポロジカル励起の発見や、その実験的提案と検証を行うことを主目的とした。また、代表者中原は量子情報、量子計算、量子制御にも豊富な経験を持ち、これらの分野で培った手法、例えば非断熱量子制御、や見地から、複雑な秩序変数を持つ凝縮体におけるトポロジカル励起の生成と実証を目的とした。また、得られた知見の、トポロジカル量子計算や、量子情報理論へのフィードバックも目的とする。

### 3. 研究の方法

研究目的を遂行するために、日本、フィンランド、アメリカ、韓国の研究者からなるグループを構成する。当初、平成 29 年度にできるだけ多くのメンバーが集まり、第 1 回の会議を行う予定であったが、中原と Mottonen がそれぞれの国の代表者を務める二国間交流事業(セミナー)が採択されたため、当年度にフィンランドでより多くの参加者による拡大会議を開催した。平成 30 年度と令和元年度は、近畿大学で 10~20 名前後の小規模なワークショップを開催し、研究成果の発表や他分野の研究者と交流を行う。中原と笠松は定期的に意見交換を行い。高木は、近畿大学で開催されるワークショップには可能な限り参加して、中原と笠松と議論を行う。中原は定期的にフィンランドを訪問し、アアルト大学の共同研究者と議論、共同研究を行い、その成果を論文として発表する。

### 4. 研究成果

超流動  $^3\text{He}$ 、BEC、その他の成果に分けて紹介する。

- (1) 超流動  $^3\text{He}$  では、中原と笠松は B 相において、渦系の軸方向と渦系に垂直に磁場が印可された場合の渦系の内部構造を解析し、磁場や圧力が変化した時の相図を求めた (Phys. Rev. B 99, 104513)。 $^3\text{He}$  の B 相における渦系は 1980 年代の Erkki Thuneberg たちによる先駆的な研究により、中心に特異コアをもつ o-vortex、コアが A 相超流体で埋められた v-vortex、2 つのコアを持つ d-vortex が Ginzburg-Landau 方程式を満たす解として知られていた。また磁場が存在しない時に、温度と圧力の関数としてどのタイプの渦系が実現するかも知られていた。今回の我々の研究により、渦系軸に平行な強磁場が印可されたときは、すべての圧力領域で 2 重コアをもつ d-vortex が安定となる(図 1)が、軸に垂直に印可された時は、高圧力領域で v-vortex が d-vortex よりも安定となることが導かれた(図 2)。特異コアがある o-vortex はいずれの場合も実現しない。高木は NMR を用いた  $^3\text{He}$ -A 秩序変数の可視化を行い、超低温の  $^3\text{He}$ -A フェイルムにおいてカイラルドメインウォールが安定に存在することを確認した(Phys. Rev. Lett. 120 205301, 2018)。

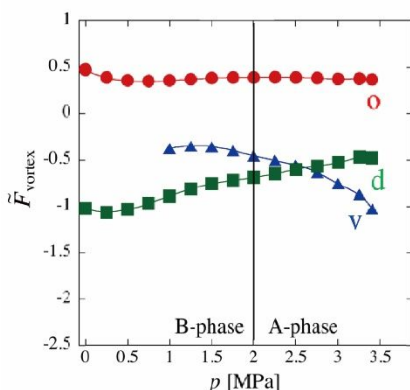


図 1 比較的低磁場を渦系の軸と平行に印可した時の各渦系の GL 自由エネルギー。B 相ではすべての圧力で d-vortex が最も安定となる。

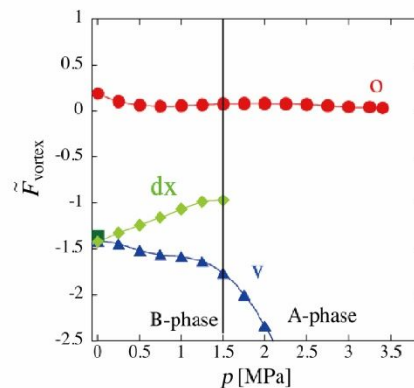


図 2 比較的高磁場を渦系の軸と垂直に印可した時の各渦系の GL 自由エネルギー。高圧力では v-vortex が最も安定となる。

また、 $^3\text{He-A}$  相のカイラルドメイン構造で、スピン流が発生し、壁の両側では磁化が発生し、既存の理論では保存則が敗れることから、磁化の自発的な減衰機構として Leggett-Takagi 緩和機構の適用を試みた。カイラルドメインにおいて生成消滅を観測したところ、対消滅が可能なものと不可能なものを見出した。

- (2) BEC では、中原はアルト大学のグループと共同研究を行い、超微細スピン 1 を持つ BEC のポーラー相に非断熱量子制御の方法を援用して、結び目構造を短時間でトポロジカルに印可する研究を行った(Phys. Rev. A 96, 063609)。この非自明な構造は 2 次元球面の 3 次ホモトピー群で分類される(図 3)。中原は同グループとの共同研究で、超微細スピン 2 を持つ BEC のサイクリック相とパイアキシャル・ネマティック相においても同様の解析を行い、3 次元スキルミオンの生成プロトコルを与えた(New J. Phys. 20, 055011 (2018))。これらの構造は  $U(1) \times SO(3)$  を適当な有限群で割った多様体の 3 次ホモトピー群で分類されることを示した。また、複素ベクトルの Majorana 表示を用いて、このホモトピー群の非自明な元を可視化した(図 4)。中原は研究協力者増田と増田・中村が開発した早送り法を用いて BEC に短時間で位相を印可する方法研究し、それを一様な運動量密度をもつ波束の生成に適用した。

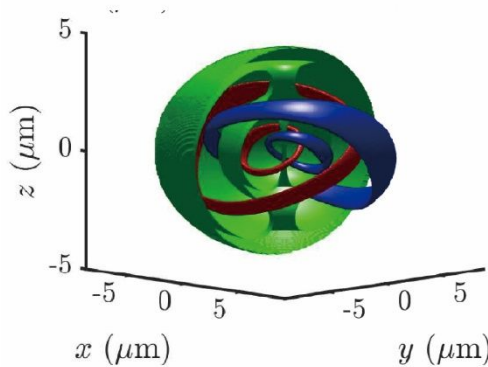


図3 F=1 BEC のポーラー相における結び目構造の例。これらの構造は球面  $S^2$  の 3 次ホモトピー群で分類される。

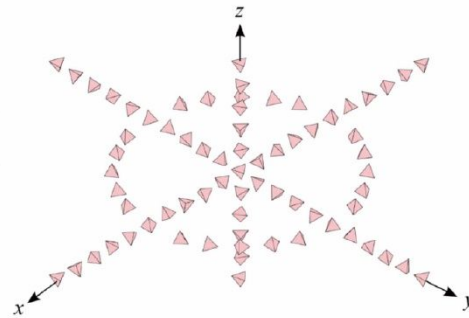


図4 F=2 BEC のサイクリック相におけるスキルミオンの例。正四面体は 5 次元複素ベクトルを Majorana 表示したもの。この構造は  $U(1) \times SO(3)/\Gamma$  の 3 次ホモトピー群で分類される。ここに  $\Gamma$  は正四面体群。

笠松は冷却ボース気体を用いた(1+1)次元  $U(1)$  ヒッグスゲージ理論の量子シミュレーションを提案した(Phys. Rev. D 95, 094507 (2017))。モンテカルロシミュレーションにより、モデルが有する Higgs 相-閉じ込め相間の非自明な相転移の存在を明らかにし、各相における電束の安定性のダイナミクスを切断 Wigner 近似を用いた準古典的動的シミュレーションにより明らかにした。笠松は疑 2 次元一様系において、BEC 中の巻き数 2 の渦の安定性を解析し、系のサイズが大きくなると、不安定性を引き起こす素励起の振動数の虚部が有限の値に収束し、一様系において多重量子渦の動的不安定性を明らかにした(J. Phys. Soc. Jpn. 87, 023601 (2018))。笠松は回転ポテンシャル中の 2 成分 BEC において、異成分間の相互作用と同成分間の相互作用の大きさが等しいときに注目をして量子渦格子の詳細を調べ、数値計算で見られたストライプ構造と蜂の巣構造はグローバルな  $SU(2)$  変換における連続変形でつながっていることを明らかにした(Phys. Rev. A 97, 053622 (2018))。密度分布で見える構造は異なるが、トポロジカルチャージ密度でみると、それらは 2 重の巻き数をもつ半スカーミオンの 3 角格子構造と見なせることを示した。笠松は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、平面波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解析した(J. Phys. B 52, 045301 (2019))。スピン軌道相互作用による異方性の効果によって広いパラメータ領域において混合状態が不安定化することを明らかにし、非線形ダイナミクスにおいても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。笠松はラビ結合した 2 成分 BEC の相対位相におけるドメインウォール構造を解析し、ウォールがスネーク不安定性により分裂することの解釈を与えた(Phys. Rev. A 100, 013630 (2019))。光格子にランダム分布した長距離相互作用をもつハードコアボソンの非平衡緩和過程を研究し、相互作用が増加するにつれて動的局在状態が実現することを明らかにした(Phys. Rev. Lett. 124, 010404 (2020))。Lee-Huang-Yang 補正項をもつ 2 成分 BEC において、量子補正項が強くなるにつれ一様な状態から複数の量子液滴を動的に生成することを明らかにした(Symmetry, 12, 174 (2020))。

- (3) 中原は超流動を用いて音響的なブラックホールの構成とアナログ Minkowski 時空の研究を行った(Phys. Rev. D 99, 104047 (2019))。従来アナログ重力は平坦な時空上で研究されたが、我々は相対論的な Gross-Pitaevskii 方程式と Yang-Mills 場を用いて、曲がった時空上におけるアナログ重力を研究した。出現する音響的計量は、曲がった時空の計量と、アナログ計量の Hadamard 積で与えられることを示した。この方法により、2+1 次元の Minkowski 時空が 3+1 次元のアンチ de Sitter 時空が

ら得られることを示した。また、中原はユニタリー- $t$ -デザインの研究を行い、ある条件の下で、 $U(d)$ の $(t+1)$ -デザインは、 $U(d)$ のユニタリー- $t$ -群から得られることを示し、それを用いて  $U(3)$ のユニタリー-2-群である  $SL(3,2)$ から  $U(3)$ の3-デザインを、 $U(4)$ のユニタリー-3-群である  $Sp(4,3)$ から  $U(4)$ のユニタリー-4-デザインを求めた (J. Phys.: A Math and Theor., 52, 495301 (2019))。また、この結果が量子状態の区別や熱的分布関数の導出など物理へ応用できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kasai J., Okamoto Y., Nishioka K., Takagi T., Sasaki Y.	4. 巻 120
2. 論文標題 Chiral Domain Structure in SuperfluidHe3?Astudied by Magnetic Resonance Imaging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.205301">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.205301</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 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) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.104513">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.104513</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 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 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/10.1088/1361-6455/aafbdd">https://doi.org/10.1088/1361-6455/aafbdd</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 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 053622-053622
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.97.053622">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.053622</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 T. Ollikainen, S. Masuda, M. Mottonen, M. Nakahara	4. 巻 96
2. 論文標題 Quantum knots in Bose-Einstein condensates created by counterdiabatic control	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063609-063609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.96.063609	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 Masuda Shumpei, Nakamura Katsuhiko, Nakahara Mikio	4. 巻 20
2. 論文標題 Fast-forward scaling theory for phase imprinting on a BEC: creation of a wave packet with uniform momentum density and loading to Bloch states without disturbance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 025008-025008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/aaacea	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 Tiurev Konstantin, Ollikainen Tuomas, Kuopanportti Pekko, Nakahara Mikio, Hall David S, M?tt?nen Mikko	4. 巻 20
2. 論文標題 Three-dimensional skyrmions in spin-2 Bose?Einstein condensates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 055011 ~ 055011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1367-2630/aac2a8">https://doi.org/10.1088/1367-2630/aac2a8</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 該当する

1. 著者名 Y. Kuno, S. Sakane, K. Kasamatsu, I. Ichinose, T. Matsui,	4. 巻 95
2. 論文標題 Quantum simulation of (1 + 1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model on a lattice by cold Bose gases	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094507-094507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.094507	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 H. Takeuchi, M. Kobayashi, K. 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 Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 023601-023601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 Ge Xian-Hui, Nakahara Mikio, Sin Sang-Jin, Tian Yu, Wu Shao-Feng	4. 巻 99
2. 論文標題 Acoustic black holes in curved spacetime and the emergence of analogue Minkowski spacetime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	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/PhysRevD.99.104047	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 Bannai Eiichi, Nakahara Mikio, Zhao Da, Zhu Yan	4. 巻 52
2. 論文標題 On the explicit constructions of certain unitary t-designs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 495301 ~ 495301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1751-8121/ab5009">https://doi.org/10.1088/1751-8121/ab5009</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 Ihara Kousuke, Kasamatsu Kenichi	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 013630-013630
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.100.013630">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.013630</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 Li W., Dhar A., Deng X., Kasamatsu K., Barbiero L., Santos L.	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 Letters	6. 最初と最後の頁 010404-010404
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.124.010404">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.010404</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 Mithun Thudiyangal, Maluckov Aleksandra, Kasamatsu Kenichi, Malomed Boris A., Khare Avinash	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 ~ 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

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Creation of knots in Bose-Einstein condensates by counterdiabatic quantum control
3. 学会等名 C3QS: Coherent Control of Complex Quantum Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Quantum Information, Quantum Computing and Combinatorics
3. 学会等名 Design Theory from the Viewpoint of Algebraic Combinatorics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 中原幹夫
2. 発表標題 Counter-Diabatic DrivingによるSpinor BECのトポロジカル励起生成
3. 学会等名 第26回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Majorana Representation of Complex Vectors and Some of Applications
3. 学会等名 Taipei International Workshop on Combinatorics and Graph Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikio Nakahara, Kenichi Kasamatsu, Ryota Mizuno and Tetsuo Ohmi
2. 発表標題 VORTICES IN SUPERFLUID 3HE-B UNDER MAGNETIC FIELD
3. 学会等名 Finnish Physical Society Meeting (Physics Days 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原幹夫
2. 発表標題 Counter-Diabatic DrivingによるSpinor BECのトポロジカル励起生成
3. 学会等名 超流動 <sup>3</sup> HeおよびスピノールBECにおけるトポロジカル相・励起 (招待講演)
4. 発表年 2018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

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
2. 発表標題 非軸対称な芯をもつ量子渦 ~ Rabi 結合した2成分BECおよび超流動 $^3\text{He-B}$ ~
3. 学会等名 超流動 $^3\text{He}$ およびスピノールBECにおけるトポロジカル相・励起 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木 丈夫
2. 発表標題 超流動 $^3\text{He-A}$ 相でのカイラルドメインとスピン流
3. 学会等名 超流動 $^3\text{He}$ およびスピノールBECにおけるトポロジカル相・励起 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Topological vortex creation in BEC
3. 学会等名 International Workshop on Topological Structures in Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Quantum knots in $F = 1$ BEC created by counterdiabatic control
3. 学会等名 Ultracold Atomic Gases and Quantum Control (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村豊, 小原顕, 矢野英雄, 高木丈夫, 山下譲, 石川修六
2. 発表標題 平行平板中超流動ヘリウム $^3\text{-A}$ 相での半整数量子渦
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 木村豊, 小原顕, 矢野英雄, 高木丈夫, 山下譲, 石川修六
2. 発表標題 平行平板中超流動ヘリウム3-A相での半整数量子渦の観測
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 Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Vortex dynamics in multicomponent Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 International Workshop on Topological Structures in Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Dynamics of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017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 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018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
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 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Majorana Representation of Complex Vectors and Some of Applications
3. 学会等名 Shanghai Jiao Tong University Combinatorics Seminar (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原幹夫
2. 発表標題 $F=2$ BECにおける3次元Skyrmion
3. 学会等名 Bose-Einstein凝縮体における数学的側面 (招待講演)
4. 発表年 2020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

〔図書〕 計0件

〔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	高木 丈夫  (Takagi Takeo)  (00206723)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授   (13401)	
研究 分担者	笠松 健一  (Kasamatsu Kenichi)  (70413763)	近畿大学・理工学部・准教授   (34419)	
研究 協力者	ヴォロヴィック グレゴリ  (Volovik Gregori)		
研究 協力者	チューネバーグ エルッキ  (Thuneburg Erkki)		
研究 協力者	モットネン ミッコ  (Mottonen Mikko)		
研究 協力者	クルシウス マッティ  (Krusius Matti)		
研究 協力者	ホール ディヴィッド  (Hall David)		



## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	シン ヨンイル  (Shin Yong-il)		
研究協力者	増田 俊平  (Masuda Shumpei)		
研究協力者	オリカインен テュオマス  (Ollikainen Tuomas)		