

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03691

研究課題名（和文）フラットバンドを持つ光格子を用いた新奇超伝導物性の開拓

研究課題名（英文）Quantum simulation of novel superconducting phases in flat band systems using optical lattices

研究代表者

土屋 俊二 (Tsuchiya, Shunji)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：80579772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：フラットバンドを持つ系の新奇な超伝導状態を、光格子中のフェルミ原子を用いてシミュレートするため、本研究ではLieb光格子を対象に、引力ハバード模型を用いて超伝導状態の解析を行った。フラットバンドを持つフィリングで、超伝導ギャップの値が副格子によって異なるペア密度波超伝導状態が現れ、それが斥力ハバード模型のフラットバンド強磁性と関連があることを見出した。また、更により広い視点から、フラットバンド超伝導体の関わる多様な物理について、特に超伝導体におけるヒッグスモード、スピン1ボース凝縮体のスピン流、光格子中のボース粒子のエンタングルメントダイナミクス、測定型量子計算機への応用などについて調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フラットバンドという特徴を持つ超伝導物質は、高い温度で超伝導になるなど、様々な興味深い性質を持つことが予想されている。最近の実験では、レーザーで作った周期である光格子に冷却した原子を閉じ込めることで、固体中の電子と同じ状況を作り出し、超伝導状態を人工的な系でシミュレートすることが可能である。本研究では、そのような系を想定しフラットバンドを持つ超伝導状態について理論的に調べ、ペア密度波という空間的な秩序を持つ新奇な超伝導状態が現れる可能性があることを発見した。ペア密度波状態は高温超伝導体において見られている。この研究によりフラットバンドを持つ超伝導体と高温超伝導体との強い関連が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In order to simulate the novel superconducting state of systems with flat bands using fermionic atoms in an optical lattice, this study conducted an analysis of the superconducting state using the attractive Hubbard model on the Lieb lattice. At specific fillings with flat bands, a pair density wave superconducting state appeared where the value of the superconducting gap varied depending on the sublattice, revealing its connection to the flat-band ferromagnetism in the repulsive Hubbard model. Furthermore, taking a broader perspective, various physics related to flat-band superconductors were investigated, including the Higgs mode in superconductors, spin currents in spin-1 Bose-Einstein condensates, entanglement dynamics of Bose particles in optical lattices, and applications to measurement-based quantum computing.

研究分野：冷却原子気体、量子情報

キーワード：フラットバンド超伝導 光格子 ペア密度波 ヒッグスモード エンタングルメントエントロピー スピン流 測定型量子計算

1. 研究開始当初の背景

近年の物性物理の発展において、結晶の幾何学的構造が電子相関やスピン、軌道などの自由度と結合することにより新奇な物性が創発する例が多数見つかっている。カゴメ格子や Lieb 格子などの結晶構造では、量子力学的な干渉効果によりエネルギー固有状態が局在化し、エネルギーバンドが分散を持たないフラットバンドが現れる。フラットバンドは無限大の有効質量を持ち、運動エネルギーが小さい極限とみなせる。そのためフラットバンドを持つ系では電子相関の効果が顕著になり、例えば電子間斥力により電子スピンの揃うフラットバンド強磁性などの興味深い物性が創発する。特にフラットバンドを持つ系の超伝導の可能性が注目を浴びている。フラットバンドを持つ超伝導体は非常に高い転移温度を持つと予想され、高温超伝導体の候補と考えられている。その一方で、これまでフラットバンドを持つ物質で明確な超伝導は確認されておらず、フラットバンド系の超伝導の理解は進んでこなかった。しかし近年、冷却フェルミ原子気体の超流動に続き、フラットバンドをもつカゴメ光格子、Lieb 光格子が相次いで実現し、冷却原子系を用いてフラットバンドを持つ系の超伝導の量子シミュレーションを行う理想的な環境が整っている。

2. 研究の目的

本研究では光格子中の冷却フェルミ原子気体を用いたシミュレーションを念頭に、フラットバンドを持つ系の超伝導状態について引力ハバード模型に基づいて理論的に解析する。特にフラットバンド系に特有の空間変調を伴う新奇超伝導状態の可能性とその特性について明らかにすることを目的とする。更により広い視点から、フラットバンドを持つ超伝導体の関わる多様な物理について、特にヒッグスモード、スピン流、エンタングルメントのダイナミクス、量子コンピュータへの応用などについて調べ、冷却原子や光格子を用いた実験可能性に注目し研究を展開する。

3. 研究の方法

フラットバンドを持つ系の超伝導状態に関しては、平均場近似に基づき、空間変調した状態を記述可能な Bogoliubov-de Gennes(BdG)方程式を解析的、数値的に解く。更に粒子数方程式を BdG と連立させて解くことにより強結合効果を取り入れる。また、大規模な数値計算が必要な研究については、クラスター平均場近似や動的平均場理論(DMFT)、1次元的な系においては Time-evolving Block Decimation アルゴリズムに基づく数値計算を用いる。

4. 研究成果

(1) Lieb 格子におけるペア密度波超伝導状態

本研究では、フラットバンドを持つ格子系として、フラストレーションのない単純な格子系である Lieb 格子 (図 1) を対象に研究を行なった。Lieb 格子は bipartite な格子であるため、引力ハバード模型と斥力ハバード模型とのマッピングが存在し、超伝導状態を磁性的な秩序状態として解釈することができるという利点がある。以下に研究成果を述べる。

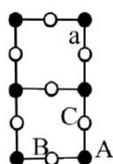


図 1. Lieb 格子の一部

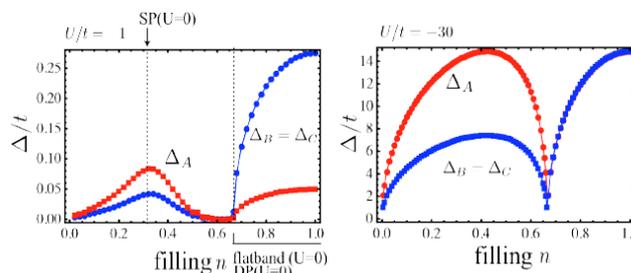


図 2. 超伝導秩序パラメータのフィリング依存性。

図 2 は、平均場近似を用いて得られた超伝導ギャップのフィリング依存性の結果を表す。左のグラフは弱結合領域 ($U/t=1$)、右のグラフは強結合領域 ($U/t=-30$) の結果である。左のグラフでフラットバンドのフィリング ($2/3 < n < 4/3$) に含まれる領域において、超伝導ギャップの値が副格子によって異なる、ペア密度波状態が出現していることがわかった。この結果を一粒子状態密度

と比較し、ペア密度波が現れる理由について考察したところ、フラットバンドは副格子 B、C に局在した波動関数を持つため副格子 B、C において状態密度が大きくなり、結果副格子 B、C の超伝導ギャップが大きくなり、ペア密度波状態が現れることがわかった。(各副格子は図 1 に示されている。)このように弱結合領域では、バンド構造を反映した副格子の状態密度の違いが、空間的に非一様なペア密度波状態が現れる原因となっている。他方、強結合領域では、フラットバンドに対応するフィリングではペア密度波状態は見られなかった。

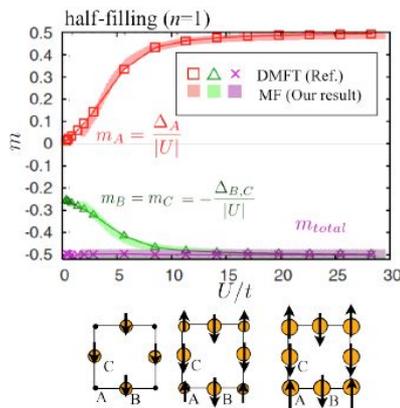


図 3. 超伝導ギャップ、及び対応する磁化の相互作用依存性

引力ハバード模型における超伝導ギャップは、マッピングした斥力ハバード模型における磁化に対応する。図 3 に、各副格子の超伝導ギャップ及び対応する磁化の相互作用の大きさ U に対する依存性を表す。実線が平均場近似の結果を表す。また、グラフの下の図は磁化の様子を表している。上で議論したように、ハーフフィリングにおいて弱結合領域ではペア密度波状態が現れ、強結合で消失することがわかる。更に下の図から、弱結合極限 $U \rightarrow 0$ では斥力側において、スピンの揃った強磁性状態が現れ、それが相互作用の増加と共に反強磁性状態に移行していく様子が見られる。これより、引力側のペア密度波は斥力側の強磁性状態に、引力側の一様な超伝導状態は斥力側の反強磁性状態に対応していることが明らかとなった。斥力側で弱結合領域に現れる強磁性状態は、フラットバンドが起源で現れることが知られている。すなわち、Lieb 格子において現れるペア密度波状態は、フラットバンド強磁性状態に対応していることが明らかとなった。また、図 3 の各線は平均場近似の結果を表し、シンボルは先行研究による斥力ハバード模型に対する DMFT 計算の結果を表している。平均場の結果と DMFT の結果が非常に良く一致していることがわかる。以上の研究成果については今後論文にまとめ、専門誌に投稿予定である。

(2) 量子多体系におけるエンタングルメントエントロピーのダイナミクス

近年、量子多体系のエンタングルメントが注目を浴びている。特にエンタングルメントエントロピーは量子多体系を特徴付ける新しい指標として注目されている。例えば、トポロジカルに非自明な量子相はエンタングルメントエントロピーによって特徴付けることができる。ハバード大のグループは冷却原子系の高い操作性を生かし、光格子中のボース原子系においてエンタングルメントエントロピーの一つであるレニーエントロピーを測定することに成功した。この実験がブレークスルーとなり、超伝導状態をはじめとする複雑な量子多体系のエンタングルメントを調べる試みが、冷却原子系だけでなく固体系において盛んになりつつある。

フラットバンド系の超伝導状態のエンタングルメントエントロピーを調べることは本研究課題にとって重要である。そこでカゴメ光格子中の超伝導状態についてエンタングルメントエントロピーを調べることを目標とし、その一歩として光格子中のボース粒子系のエンタングルメントエントロピーについて研究を行った。モット絶縁体相領域にクエンチした場合について、ダブロン、ホロンと呼ばれる準粒子を導入することにより、レニーエントロピーの時間発展を解析的に求めることに成功した。更に、系のエンタングルメントはダブロン-ホロンのエンタングルしたペアが担っていることを明らかにし、ダブロン-ホロンのエンタングルペアが励起され伝搬する振る舞いがレニーエントロピーの時間発展を決定していることを明らかにした。

また、光格子中の自由ボースのレニーエントロピーが、相関関数からなる行列の permanent から求まることを明らかにし、そのことを用いて効率的な自由ボース系のレニーエントロピーの計算法を提案した。

(3) フラットバンドを持つ超伝導体におけるヒッグスモード

ヒッグスモードは超伝導体の集団モードである。本研究では、超伝導体においてヒッグスモードが現れる起源について詳細に調べた。本研究の代表者と分担者は、フェルミ粒子の分散関係が粒子-正孔対称性を持つ場合に、BCS ハミルトニアンが擬スピン空間においてチャージ、パリティ、時間反転のそれぞれの操作に対して不変であることを示した。代表者はこの研究を拡張し、ヒッ

グスモードがこれまで考えられていたような連続対称性の破れではなく、離散的な時間反転対称性の破れに伴い現れることを示した。更に、フェルミ粒子間の相互作用がバンド幅よりも大きい極限、すなわちフラットバンド極限において解析を行い、超伝導体にはフェルミ面上の状態の数だけの複数のヒッグスモードが現れることを予言した。

(4) 2つのバンドからなる超伝導体のヒッグスモード

2つのバンドを持つ超伝導体において、ハミルトニアンを擬スピンを用いて表し、スピン波について解析を行なった。その結果、2つのバンドに属する超伝導ギャップの振幅の相対的な揺らぎに由来する新しいタイプのヒッグスモードが存在することを明らかにした。

(5) 光格子中のスピン1を持つ超流動体の安定性

スピン1を持つボース粒子系において、有効的な時間依存 Ginzburg-Landau 方程式に基づいて集団モードを調べることにより、超流動流に対する系の安定性について解析を行った。その結果、ポラー相と呼ばれる超流動相において、一次転移が起きる相境界近傍でスピン超流動流を流すと、超流動臨界速度がゼロになり、無限小のスピン流を流すと不安定化することがわかった。この結果は、これまで知られていない未知の超流動相が存在することを意味する。

(6) 磁場下のSU(3)ハイゼンベルグ模型における相転移

本研究では三角光格子中のSU(3)対称なハイゼンベルグ模型に対する強磁場効果を議論した。この系は 173Yb などのアルカリ土類原子の核スピン自由度を用いることで作成できる。通常のスピン 1/2 の電子系とは異なり、この場合は3つの成分と三角格子形状がマッチするために反強磁性的なスピン成分配置は一意に決まる。しかし、磁場中での準古典的な励起はフラットな構造を持ってしまう。この accidental な縮退が揺らぎによって破れる際に現れる新奇な量子現象を、大規模クラスター平均場+スケールリング法を用いて調べた。また、準古典モンテカルロ法を用いて有限温度の相転移現象も議論した。その結果、磁化およびスカラーネマティック秩序変数の磁場依存性における非自明なプラトーの形成、副格子スピンモーメントが有限にもかかわらず発現する「隠されたネマティック秩序」、渦度 1/2 を持つ渦対励起が誘起するトポロジカル相転移などを見出した。

(7) 光格子中の集団モードのトンネル効果

光格子中のボース粒子系では、モット相近傍の超流動相においてヒッグスモードが観測されている。そこで本研究では、光格子中の超流動体において、ヒッグスモードのトンネル問題について調べた。その結果、ヒッグスモードがポテンシャル障壁を完全透過する可能性があることを示した。

(8) グラフ状態に対するシンプルで高精度な検証方法の提案

フラットバンドを持つ超伝導体が高い転移温度を持つ場合には、超伝導量子ビットに用い、量子コンピュータへの応用が考えられる。従来は回路型の量子コンピュータが主流だったが、2002年に測定型量子計算が提案され、物性系を量子コンピュータに用いる可能性が大きく広がった。測定型量子計算では、リソース状態と呼ばれるエンタングルした量子状態に対し、1量子ビットずつ測定を行うことで計算を実行する。測定型量子計算を行うには、与えられたリソース状態が理想的なリソース状態にどれだけ近いかを調べる検証(verification)を行う必要がある。本研究では、グラフ状態と呼ばれる代表的なリソース状態に対して一般的なノイズモデルを仮定し、単一のスタビライザーを測定することで、リソース状態のフィデリティを高い精度で測定できることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshii Ryosuke, Yamashika Shion, and Tsuchiya Shunji	4. 巻 91
2. 論文標題 Entanglement Propagation in Thermalization of an Isolated Quantum System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054601, 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.054601	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 Yamashika Shion, Yoshii Ryosuke, Tsuchiya Shunji	4. 巻 103
2. 論文標題 Stability of supercurrents in a superfluid phase of spin-1 bosons in an optical lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043305-1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.043305	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 Yamamoto Daisuke, Suzuki Chihiro, Marmorini Giacomo, Okazaki Sho, Furukawa Nobuo	4. 巻 125
2. 論文標題 Quantum and Thermal Phase Transitions of the Triangular SU(3) Heisenberg Model under Magnetic Fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 057204-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.057204	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 Nakayama Takeru, Tsuchiya Shunji	4. 巻 100
2. 論文標題 Perfect transmission of Higgs modes via antibound states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63612
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.100.063612	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 Yamamoto Daisuke, Fukuhara Takeshi, Danshita Ippei	4. 巻 3
2. 論文標題 Frustrated quantum magnetism with Bose gases in triangular optical lattices at negative absolute temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-020-0323-5	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 Kagamihara Daichi, Kaneko Ryui, Yamashika Shion, Sugiyama Kota, Yoshii Ryosuke, Tsuchiya Shunji, Danshita Ippei	4. 巻 107
2. 論文標題 R ⁿ nyi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033305-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.033305	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 Akimoto Kazuki, Tsuchiya Shunji, Yoshii Ryosuke, Takeuchi Yuki	4. 巻 106
2. 論文標題 Passive verification protocol for thermal graph states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 012405-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.012405	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 Tokimoto Jun, Tsuchiya Shunji, Nikuni Tetsuro	4. 巻 208
2. 論文標題 Josephson Oscillation and Self-Trapping in a Fermi Superfluid Gas across the BCS-BEC Crossover	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 372 ~ 378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02794-w	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44件(うち招待講演 2件/うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Shunji Tsuchiya
2. 発表標題 Emergence of multiple Higgs modes in a superconductor due to spontaneous breakdown of a Z_2 symmetry
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, D. Kagamihara, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement dynamics of bosons in an optical lattice
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, D. Kagamihara, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement dynamics of bosons in an optical lattice
3. 学会等名 YITP International Workshop "Quantum Information Entropy in Physics" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Akimoto, S. Tsuchiya, R. Yoshii, and Y. Takeuchi
2. 発表標題 Deterministic verification method for thermal graph states
3. 学会等名 YITP International Workshop "Quantum Information Entropy in Physics" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Yoshii, S. Yamashika, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement propagation in thermalization of an isolated quantum system
3. 学会等名 YITP International Workshop "Quantum Information Entropy in Physics" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashika, R. Yoshii, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Critical superfluid velocity of spin-1 bosons in an optical lattice
3. 学会等名 51st Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Yoshii and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement propagation in thermalization of an isolated quantum system
3. 学会等名 20th Asian Quantum Information Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鏡原大地, 土屋俊二, 大橋洋士
2. 発表標題 超流動フェルミ原子気体のずり粘性率
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 秋本一輝, 吉井涼輔, 小西克樹, 土屋俊二
2. 発表標題 クラスター状態に対する有限温度と外部磁場の影響
3. 学会等名 第43回量子情報技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田海帆, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 離散時間量子ウォークにおけるAharonov-Bohm効果
3. 学会等名 第43回量子情報技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋本一輝, 吉井涼輔, 小西克樹, 土屋俊二
2. 発表標題 クラスター状態に対する外部磁場と有限温度の効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田海帆, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 離散時間量子ウォークにおけるAharonov-Bohm効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山鹿汐音, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 光格子中のスピン1超流動体の安定性とネマティック秩序
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 時本純, 土屋俊二, 二国徹郎
2. 発表標題 BCS-BECクロスオーバーにおける超流動フェルミ原子気体のジョセフソン振動及びセルフトラッピング現象
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林友輝, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 2バンド超伝導体におけるHiggsモード
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本大輔, Giacomo Marmorini, 古川信夫
2. 発表標題 三角光格子中のSU(3) Fermi原子気体における磁場効果とゆらぎによる秩序化
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 山本大輔
2. 発表標題 磁場中SU(3) Heisenberg模型の量子相と隠れたネマティック性を持つスピンドイポール秩序
3. 学会等名 第25回オンラインCMTセミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本大輔
2. 発表標題 SU(3)スピン模型におけるネマティックなスピンドイポール秩序
3. 学会等名 第15回量子スピン系研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山鹿汐音, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 光格子中のspin-1ボソンの超流動臨界速度
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 時本純, 土屋俊二, 二国徹郎
2. 発表標題 超流動フェルミ原子気体のジョセフソン振動におけるセルフトラッピング現象
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 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 孤立量子系におけるエンタングルメントの伝播
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 秋本一輝, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 クラスター状態に対する外部磁場と温度の影響
3. 学会等名 量子論の諸問題と今後の発展(QMKEK7)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山鹿汐音, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 Critical superfluid velocity of spin-1 bosons in an optical lattice
3. 学会等名 分野横断ワークショップ「量子コンピュータ研究開発の現在とこれから」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 孤立量子多体系におけるエンタングルメントの伝播と熱平衡化
3. 学会等名 第41回量子情報技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山鹿汐音, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 Ginzburg-Landau theory for spinor bosons in an optical lattice
3. 学会等名 第41回量子情報技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 固有状態熱化を起こす系のエンタングルメント構造
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋俊二, 中山健
2. 発表標題 反束縛状態を介したヒッグスモードの完全透過
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 時本純, 土屋俊二, 二国徹郎
2. 発表標題 フェルミ超流動体のBCS-BECクロスオーバーにおけるHiggsモードの振る舞い
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamamoto, Takeshi Fukuhara, and Ippei Danshita
2. 発表標題 Synthetic Frustrated Quantum Systems with Bose Gases in Triangular Lattices at Negative Absolute Temperatures
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamamoto
2. 発表標題 Quantum Simulation of Frustrated Quantum Magnetism with Bose Gases at Negative Absolute Temperatures
3. 学会等名 The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamamoto
2. 発表標題 Magnetic Phase Diagram of the SU(3) Heisenberg Model with Ultracold Fermions in a Triangular Optical Lattice
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference, Borneo Convention Centre Kuching (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Tsuchiya and T. Nakayama
2. 発表標題 Perfect transmission of Higgs modes via anti-bound states
3. 学会等名 Workshop on Quantum Mixtures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yoshii and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement transport and thermalization in an isolated many-body system
3. 学会等名 The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Kagamihara, R. Kaneko, S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, S. Tsuchiya, and I. Danshita
2. 発表標題 Re'nyi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sakamoto, R. Yoshii and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Leggett-Garg tests of macrorealism for a Bose condensate in a double-well potential
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, D. Kagamihara, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement dynamics of bosons in a 1D optical lattice
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sakamoto, R. Yoshii and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Violation of the Leggett-Garg inequality for a Bose condensate in a double-well potential
3. 学会等名 The 27th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashika, D. Kagamihara, R. Yoshii and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement dynamics of bosons trapped in a 1D optical lattice
3. 学会等名 The 27th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鏡原大地, 金子隆威, 山鹿汐音, 杉山康太, 吉井涼輔, 土屋俊二, 段下一平
2. 発表標題 自由Bose 粒子系におけるRenyiエンタングルメントロピーの時間発展
3. 学会等名 日本物理学会2022年度春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Kagamihara, R. Kaneko, S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, S. Tsuchiya, I. Danshita
2. 発表標題 Time evolution of Renyi entanglement entropy of free bosons in an optical lattice
3. 学会等名 The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂本翼, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 Violation of the LG inequality for a Bose condensate in a double-well potential
3. 学会等名 量子情報と量子基礎論の諸側面
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷沢朋紀, 竹内勇貴, 秋本一輝, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 脱分極ノイズ下のグラフ状態における効率的なフィデリティ推定
3. 学会等名 量子ソフトウェア研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山鹿汐音, 吉井涼輔, 鏡原大地, 土屋俊二
2. 発表標題 光格子中のボース多体系におけるエンタングルメントエントロピーのクエンチダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷沢朋紀, 竹内勇貴, 秋本一輝, 吉井涼輔, 土屋俊二
2. 発表標題 脱分極ノイズ下のグラフ状態における効率的なフィデリティ推定
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中央大学理工学部物理学科 土屋研究室
<https://www.phys.chuo-u.ac.jp/j/tsuchiya/>
日本大学文理学部 山本研究室
<https://www.phys.chs.nihon-u.ac.jp/yamamoto/>
青山学院大学 物理・数理学科 古川研究室
http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-furu/research_map (土屋俊二)
<https://researchmap.jp/7000020906>
Daisuke Yamoto's web page
<https://sites.google.com/site/daisukeyamamoto624/>
research map (山本大輔)
<https://researchmap.jp/dyamamoto>

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	山本 大輔 (Yamamoto Daisuke) (80603505)	日本大学・文理学部・准教授 (32665)	

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