

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13849

研究課題名（和文）人工量子多体系における新奇な局在現象の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study of disorder-free localization in artificial quantum many-body systems

研究代表者

久野 義人 (Kuno, Yoshihito)

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：30753628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：フォトリック結晶や冷却原子系で構成可能な人工量子多体系の理論モデルをターゲットに新奇な局在現象の性質を明らかにした。特に、研究期間全体を通してフラットバンド系の理論モデルおよび多体相互作用を含む疑似的可積分系での理論モデルに着目し不純物ポテンシャル誘起ではない局在および多体局在現象を数値的計算により明らかにした。また非平衡ダイナミクスの詳細な解析により三体相互情報量を用いることで局在的傾向を初期状態依存性に関係なく特徴づけられることを明らかにした。また観測誘起型相転移にも着目し、不純物誘起ではない局在現象の非平衡ダイナミクスを特徴づけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで局在や多体局在現象は不純物ポテンシャルに起因して起きるものと考えられていたが、本研究においてはフラットバンド上のコンパクト固有状態の存在や多体相互作用によって並進対称性を保ったまま局在や多体局在現象が起きるといった事例を示した。この成果は従来の局在物理では考えられていなかった新奇な局在の発現機構を例示したという点で学術的意義がある。また、このような多体局在現象は初期の量子状態を保護する機構も持っており今回の不純物ポテンシャルによらない局在現象の発現は単一サンプルで初期の量子情報の保持につながる可能性がある。この性質は量子デバイスの開発などへの応用も期待され社会的意義もある。

研究成果の概要（英文）：We studied theoretical models of artificial quantum many-body systems that can be constructed in artificial quantum system such as photonic crystals and cold atoms in an optical lattice. We clarified the presence of novel localization and many-body localization phenomena without disorder. In particular, we have focused on theoretical models for complete flat-band system and nontrivial integrable systems with many-body interactions, carried out numerical calculations. The numerical calculations characterized the presence of novel localization and many-body localization phenomena without disorder. Furthermore, detailed analysis of nonequilibrium dynamics reveals that the tripartite mutual information is much efficient quantity to characterize the localization properties regardless of the initial state. Finally, we focused on a measurement induce phase transition in a quasi-integrable system. We showed that the tripartite mutual information is good indicator to detect localization.

研究分野：数理物理・物性基礎

キーワード：人工量子多体 多体局在 アンダーソン局在 非平衡ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

量子系の局在問題は 50 年以上も続いている。これまで局在問題の研究の多くは粒子間相互作用を考慮しない不純物を含んだ電子系を念頭に集中して行われてきたが、近年光格子冷却原子系やフォトニック結晶系における実験技術の進歩により人工的に興味ある量子系を構築しシミュレーションする研究が進展している。その実験研究の潮流に乗じて、多体相互作用の効果を考慮した多体局在の研究が盛んに行われている。多体局在はエンタングルメントの性質や非平衡現象において統計力学的予想とは異なる振る舞いが現れ未だ共通の理論的理解が得られていない性質が多く存在する。さらにもう一つの観点として、多体局在現象の研究の延長線として量子傷跡と呼ばれる系の非局在的エネルギーバンド内の中に局在的性質を示す少数の非典型的な固有状態の存在が、Rydberg 原子を多数並べた人工量子系実験において発見された。量子傷跡とはあるパターンで励起された Rydberg 原子多体状態に対して熱平衡化が起きないダイナミクスとして検出され、多体局在現象と共通点が多いダイナミクスであるがその理論的な発現機構およびその厳密な多体波動関数の構造の深くは明らかになっていない。量子傷跡は多数の非局在した固有状態の中に隠れた非典型的な状態であり、固有状態熱化仮説を破る状態であることが示唆されている。

2. 研究の目的

本研究ではフラットバンドなどから並進対称な系において“不純物誘起以外の多体局在現象や量子傷跡現象が”が導かれるかもしれないという着想のもと研究を推進した。

(A) これまでの局在問題の模型の設定においてランダムポテンシャルが局在の基本的な発現起源と考えられてきたが、「別の発現機構により多体局在等の現象が見いだされるかどうか」を本研究の研究目的とする。従来の不純物(ランダムネス)誘起の局在問題に対して、冷却原子系やフォトニック結晶などの制御可能な人工量子系をターゲットに不純物誘起ではない並進対称性を保持した多体局在の発現機構を深く探求し、そして、不純物誘起の典型的な多体局在と比べ：(i) エンタングルメント特性、(ii) 熱平衡化特性(エルゴード性)がどのように異なるのかを明らかにする。

(B) Rydberg 原子を多数並べた人工量子系実験において構成される量子傷跡ではない、別の模型において量子傷跡を構成し、それを数値的にデモンストレーションできるかどうかを研究目的とする。特に、フラットバンド理論モデルに着目し、そこでの量子傷跡の構成法を提示する。さらに、その厳密な量子傷跡の多体固有状態から演繹的にエンタングルメントおよび非平衡ダイナミクスの性質を予想し詳細な数値計算により量子傷跡それらの予想を検証する。また、現実の実験系に近い人工量子多体系モデルで量子傷跡の実装法を提案する。

3. 研究の方法

完全フラットバンドモデルに存在する局在 1 粒子状態(コンパクト局在状態)が粒子間相互作用を印加した場合においても局所的運動積分として機能し局在現象を与えるかどうかを数値対角化法による固有値分布統計で模型の振る舞いを検証した。さらに 1 粒子密度行列法という数値的手法により、相互作用系でありながら 1 粒子状態軌道を抜き出し、その波動関数の局在的傾向を検証した。

完全フラットバンドモデルにおける多体局在現象をダイナミクスの側面から数値的に検証した。時間発展厳密対角化法という数値手法を用いることにより、多体系ハミルトニアンを厳密な時間発展多体波動関数を計算した。そしてその多体波動関数により数値的にエンタングルメントエントロピー時間発展を測定した。さらに、初期波動関数と時間発展後の波動関数のオーバーラップ等を数値的に計算し観察することで、フラットバンド系における局所的軌道状態が初期量子状態の保存に影響し、熱平衡化するかどうかを検証し、その初期状態が多体局在の状態かあるいは量子傷跡的な状態かどうかを検証した。

4. 研究成果

(1) フォトニック結晶や冷却原子系で構成可能な並進対称なフラットバンド系をターゲットにし、短距離エンタングルメントするフラットバンド局在固有状態の波動関数が弱い隣接相互作用下

では維持され、次第に構造が壊れていく様子を数値的な一粒子密度行列法より明らかにした。相互作用がない場合のコンパクトな局在波動関数は相互作用により波動関数振幅のコンパクト性は次第に崩壊に向かうことわかった。これよりフラットバンド多体局在状態から強い相互作用化で熱平衡状態に相転移することが数値的に示された。

(2)のこぎり波状の格子構造の格子系を考え、コンパクト局在状態を用いた多体波動関数が大多数の熱平衡多々固有状態の中に少数個存在する特殊な固有状態構造をもつモデルを提案した。このモデルにおいて少数のコンパクト局在状態を用いた多体波動関数は固有状態熱化仮説を破り、系全体としては強い固有状態熱化仮説を破ることを数値的に明らかにし、量子傷跡的な傾向が出現することが明らかにした。さらに、ある特定の多体波動関数の初期状態を準備しその系での量子エンタングルメントの増大について数値的に詳細に調べると、少数のコンパクト局在状態を用いた多体波動関数に近い初期状態のみが熱平衡化が非常に遅くなることを数値的確認し、従来のスピン模型以外の系で量子傷跡的な状況が現れる例を示した。

(3)フォトニック結晶や冷却原子系で構成可能な並進対称な多体量子スピン系をターゲットに、2体の隣接相互作用以上の多体相互作用が存在したとき、その固有状態の局在性がどのように変化し、三体相互情報量を数値的に計算することで局在的傾向がどのように現れるかを数値的に明らかにした。3体以上のスピン相互作用は系の非平衡ダイナミクスに強い局在的傾向を与え、三体相互情報量はその局在的傾向を初期状態依存性に関係なく特徴づけられることを明らかにした。

研究期間全体を通して、フラットバンド系および可積分および非可積分系における不純物ポテンシャル誘起ではない局在および多体局在現象を数値的計算により明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kuno Yoshihito, Orito Takahiro, Ichinose Ikuo	4. 巻 24
2. 論文標題 Localization and slow-thermalization in a cluster spin model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 073019 ~ 073019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ac7d01	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 Taie Shintaro, Ibarra-Garcia-Padilla Eduardo, Nishizawa Naoki, Takasu Yosuke, Kuno Yoshihito, Wei Hao-Tian, Scalettar Richard T., Hazzard Kaden R. A., Takahashi Yoshiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Observation of antiferromagnetic correlations in an ultracold SU(N) Hubbard model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1356 ~ 1361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01725-6	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 Orito Takahiro, Kuno Yoshihito, Ichinose Ikuo	4. 巻 106
2. 論文標題 Quantum information spreading in random spin chains with topological order	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.106.104204	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 Yatsugi Kenichi, Yoshida Tsuneya, Mizoguchi Tomonari, Kuno Yoshihito, Iizuka Hideo, Tadokoro Yukihiro, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Observation of bulk-edge correspondence in topological pumping based on a tunable electric circuit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-022-00957-5	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 Kuno Yoshihito, Orito Takahiro, Ichinose Ikuo	4. 巻 106
2. 論文標題 Purification and scrambling in a chaotic Hamiltonian dynamics with measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.106.214304	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 Kuno Yoshihito, Orito Takahiro, Ichinose Ikuo	4. 巻 106
2. 論文標題 Information spreading and scrambling in disorder-free multiple-spin-interaction models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 12435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.012435	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 Ichinose Ikuo, Orito Takahiro, Kuno Yoshihito	4. 巻 103
2. 論文標題 Flat-band full localization and symmetry-protected topological phase on bilayer lattice systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184113-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.184113	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 Yoshida Tsuneya, Mizoguchi Tomonari, Kuno Yoshihito, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Square-root topological phase with time-reversal and particle-hole symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235130-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.235130	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 Kuno Yoshihito, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Plateau transitions of a spin pump and bulk-edge correspondence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045113-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045113	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 Mizoguchi Tomonari, Kuno Yoshihito, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Flat band, spin-1 Dirac cone, and Hofstadter diagram in the fermionic square kagome model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035161-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.035161	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 Kuno Yoshihito, Mizoguchi Tomonari, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Multiple quantum scar states and emergent slow thermalization in a flat-band system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085130-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.085130	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 Orito Takahiro, Kuno Yoshihito, Ichinose Ikuo	4. 巻 104
2. 論文標題 Interplay and competition between disorder and flat band in an interacting Creutz ladder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094202-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.094202	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 Kuno Yoshihito, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Topological pump and bulk-edge-correspondence in an extended Bose-Hubbard model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125146-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.125146	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 Kudo Koji, Kuno Yoshihito, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence in the adiabatic heuristic principle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L241113-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L241113	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 Mizoguchi Tomonari, Kuno Yoshihito, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Construction of interacting flat-band models by molecular-orbital representation: Correlation functions, energy gap, and entanglement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023102-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac015	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 Orito Takahiro, Kuno Yoshihito, Ichinose Ikuo	4. 巻 105
2. 論文標題 Deformation of localized states and state transitions in systems of randomly hopping interacting fermions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094201-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.094201	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3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久野義人、初貝安弘
2. 発表標題 拡張ボースハバード模型におけるトポロジカルポンプとバルクエッジ対応
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshihito Kuno
2. 発表標題 Topological pump from SPT phases and its bulk-edge-correspondence in interacting systems
3. 学会等名 Bulk-Edge/Boundary-Correspondence 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久野義人、初貝安弘
2. 発表標題 S 1スピン系におけるトポロジカルポンプとバルクエッジ対応
3. 学会等名 日本物理学会 2021年 秋季大会
4. 発表年 2021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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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