

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13475

研究課題名(和文) テンソルネットワーク形式を用いた量子多体問題の計算複雑性解析

研究課題名(英文) Computational complexity of quantum many-body problem in terms of Tensor Network formalism

研究代表者

桑原 知剛(桑原知剛)(Kawahara, Tomotaka)

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員

研究者番号：70757773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：量子多体系のシミュレーションの計算複雑性を明らかにする分野はハミルトニアン複雑性と呼ばれている。本研究では一貫してハミルトニアン複雑性における未解決問題の解決に取り組んできた。これまでの期間で、固有状態熱化仮説(ETH)、エンタングルメントの境界則、長距離相互作用する系のLieb-Robinson限界、相互作用するボソン系におけるLieb-Robinson限界、熱平衡系におけるエンタングルメントに関する新しい境界則、ハミルトニアン学習のサンプル複雑性の解決、などの研究成果をはじめとして、主要な国際会議に多数、また物理学のトップジャーナルに10本(うち9本は主要著者)として採択されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハミルトニアン複雑性は物理学と計算機科学の境界領域を取り扱っており、計算機科学の概念を用いて、情報論的観点で量子多体系の原理を解明することを目指している。とりわけ、近年実用化されつつあるNISQ型の量子コンピュータ(誤り訂正機能のない小型の量子コンピュータ)を用いた量子アルゴリズムの開発やその精度解析の観点から、ハミルトニアン複雑性は量子情報分野において最も重要な研究対象の一つとなっている。本研究では、量子多体物理における数多くの重要な問題に対して、情報論的な構造の制約を明らかにして、その制約を用いた精度保証のあるアルゴリズム開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The field of revealing the computational complexity of quantum many-body simulations is known as Hamiltonian complexity. This research has consistently addressed open problems in Hamiltonian complexity. In this period of time, we have studied the eigenstate thermalization hypothesis (ETH), area law for entanglement, the Lieb-Robinson bound for long-range interacting systems, the Lieb-Robinson bound in interacting boson systems, new area laws for entanglement in thermal equilibrium systems, solving the sample complexity of Hamiltonian learning, and others. Those achievements have been accepted to many major international conferences and 10 top physics journals (9 of which he is a principal author).

研究分野：量子多体物理

キーワード：ハミルトニアン複雑性 量子もつれ 長距離相互作用系 量子コンピュータ リーブ・ロビンソン限界 境界則 テンソルネットワーク

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

申請者が取り組んでいる研究領域はハミルトニアン複雑性(Hamiltonian Complexity)と呼ばれる分野で、古典コンピュータ(または量子コンピュータ)を用いたときに、量子多体系のシミュレーションの難しさを計算機科学的な観点から明らかにすることを目的としている。ハミルトニアン複雑性は物理学と計算機科学の境界領域を取り扱っており、密度行列繰り込み群法の精度保障解析やエネルギーギャップの決定不可能性など、数多くのブレイクスルーが達成されてきた。ハミルトニアン複雑性では計算機科学の概念を用いて、情報論的観点で量子多体系の原理を解明することを目指している。

とりわけ、近年実用化されつつあるNISQ型の量子コンピュータ(誤り訂正機能のない小型の量子コンピュータ)を用いた量子アルゴリズムの開発やその精度解析の観点から、ハミルトニアン複雑性は量子情報分野において最も重要な研究対象の一つとなっている。一つには、量子コンピュータが古典コンピュータを上回る性能を持つこと(量子超越性)を理論的に証明する上で、ハミルトニアン複雑性が大きな役割を果たす。二つ目に、量子超越性が保証される具体的な応用例として有望視されている領域に、多体量子ダイナミクスのシミュレーションや量子機械学習アルゴリズムがある。これらの問題に対して経験論的な方法に頼らずに、理論的に最適な方法を探索する上でもハミルトニアン複雑性は様々な成功を収めている。最後に、より近年では、量子多体シミュレーションのアルゴリズムをサブルーチンとして、産業上重要な問題(例えば、半正定値計画問題)を高速で解くための量子アルゴリズムを開発する方向も大きく前進している。

2. 研究の目的

私自身の目的はハミルトニアン複雑性に関わる数学的な未解決問題を解決することにある。これらの未解決問題は量子情報/量子物性/量子機械学習/量子化学/量子材料科学/計算機科学/量子統計力学などの横断分野で巨大なインパクトを与え、達成に際しては分野を越えた幅広い研究者からのgeneral interestを得ることができる。

3. 研究の方法

本研究成果はほぼ全て理論的な計算のみを用いて行われている。数値計算等は予想が正しいかどうかをチェックするための副次的な目的として利用した。

4. 研究成果

様々あるので、特に重要なものを6つ取り上げて説明する。

[1] 閾値温度以上における量子マルコフ予想の証明

Hammersley-Cliffordの定理により、古典ボルツマン分布はマルコフ性という非常に良い性質を持つことが知られている。これは多体間において条件付きの相関を持たない、ということ定式化しており、機械学習分野におけるボルツマンマシンの計算機科学的な解析はこのマルコフ性に依存している。一方で、量子版のHammersley-Cliffordの定理が成り立つかどうかは、現時点でハミルトニアン複雑性分野における最重要未解決問題の一つとなっている。この予想が真である場合には、半正定値計画問題という産業分野を含め広く応用される問題が、特殊な場合

を除いて量子コンピュータによって超高速で解けることを意味している。本研究ではこの予想を温度パラメータがある閾値を超えた範囲において証明した。その補題として、量子ボルツマン分布はその閾値温度以上において古典的にも量子的にも効率的にシミュレートできることを同時に証明した。この研究はCaltech/Amazon Web ServiceのFernando Brandao氏とCaltechの加藤晃太郎氏(現 大阪大学)との共同で行った。

この結果はPhysical Review Lettersに掲載され、また量子情報のトップ会議であるQIP2020での口頭講演に選ばれた。

[2] 線形光円錐問題の解決

量子コンピュータにおいては、ユニタリー演算子と呼ばれる操作ををかけていくことによって、計算を実行していく。量子多体系をシミュレートする際には、時間発展を記述するユニタリー演算を量子コンピュータで扱えるような形式に分解していく必要がある。多体系が短距離の相互作用のみで記述される場合には、最も効率的な量子アルゴリズムがリーブ・ロビンソン限界と呼ばれる数学理論を用いて構築することができることが2018年にHaahらによって証明された。リーブ・ロビンソン限界は端的に言えば、情報の伝搬速度を数学的に記述する不等式として与えられる。線形光円錐問題は「多体系に長距離の相互作用が含まれる場合に、そもそも情報の伝搬速度の限界が存在するのか？」という問題であり、これは長年の未解決問題として残っていた。本研究では、情報の伝搬速度が存在するために長距離相互作用が満たすべき最適条件を明らかにし、その条件下におけるリーブ・ロビンソン限界を完全に解明した。本研究により線形光円錐問題は完全に解決された。この研究は慶應大学の齊藤圭司氏との共同で行った。この結果はPhysical Review Xに掲載され、かつ特に重要な研究としてFeatured in Physicsに選ばれ特集記事が組まれた(掲載された論文の10-15%が選出)。さらにQIPと並ぶ量子情報のトップ会議であるTQC2020での口頭講演にも選ばれた。

[3] 1次元の長距離の相互作用下での量子もつれの境界則予想の解決

絶対零度下において、量子多体系の情報論的な構造は量子もつれの大きさによって特徴づけられる。量子もつれは古典理論では説明のつかない量子力学特有の構造であり、量子コンピュータの優位性を得るには量子もつれを利用しなくてはならないことが証明されている。この量子もつれに関する量子多体系問題の最重要未解決問題として「Area law conjecture (境界則予想)」が知られている。この予想は「量子多体系を二つに分割したときに量子もつれの大きさはその境界部分の大きさに比例する」という形式で数学的に与えられる。この予想は量子多体系をシミュレーションする上での屋台骨となっており、予想の真偽は量子情報理論のみならず、量子物質科学や量子機械学習分野などの様々な領域で大きな影響を及ぼす。本研究では、「境界則は長距離の相互作用がある場合には成り立たない」という従来の認識を覆し、1次元系において長距離相互作用がある場合であっても一般に境界則が成り立つことを数学的に証明した。これにより、長距離の相互作用がある場合であっても、密度行列繰り込み群法をはじめとした、短距離の相互作用系と同様の計算手法を適用できることが一般的に示されたことになる。この研究は慶應大学の齊藤圭司氏との共同で行った。この結果は、Nature Communicationsに掲載された。

[4] 有限温度における新しいエントロピー境界則と擬線形時間アルゴリズムへの応用

有限温度の量子平衡状態の計算は、物性理論や量子統計力学において最も頻繁に現れる問題で

ある。より最近では、量子平衡状態を量子コンピュータで実装する量子ギブスサンプリングが量子ボルツマンマシンの実装や、半正定値計画問題のサブルーチンとして大きな注目を浴びている。効率的に量子平衡状態がシミュレートできるかどうかは、その状態が持つ情報論的な複雑性と密接な関係がある。この情報論的な複雑性を特徴づける量として最も頻繁に用いられる量として相互情報量が知られている。[5]で説明された境界則(area law)は有限温度でも成立し、これを熱的境界則(thermal area law)と呼ぶ。絶対零度における境界則が未だ未解決なのと対照的に、有限温度での境界則は極めて簡単な証明が既に与えられている。現状知られている熱的境界則はいくつかの定性的な議論(Quantum belief propagationなど)から、係数項を除いて最適な形式であると考えられてきた。本研究では、従来の熱的境界則は定性的なレベルでさらにより強い不等式に改善できることを明らかにした。我々の結果は、量子平衡状態をテンソルネットワークを用いて表現する際のパラメータ数が従来考えられていたよりも大幅に減らすことができることを解明した。より具体的には、システムサイズに対する多項式個のパラメータ数 $\text{poly}(n)$ を、システムサイズに対して擬線形($n^{1+\epsilon}$, $\epsilon>0$:arbitrary small)の形に改善することに成功した。同時に、多項式時間のアルゴリズムも擬線形時間アルゴリズムに改善した。この研究はUC BerkeleyのAnurag Anshu氏とMax Planck instituteのAlvaro Ahambra氏との共同で行っている。

この結果はPhysical Review Xに掲載され、またQIP2021での口頭講演に選ばれた。

[5] ハミルトニアン学習のサンプル複雑性問題の解決

自然界を記述するハミルトニアン(エネルギー関数)の学習は物理学において、また量子機械学習において最も本質的な問題である。これは、ハミルトニアンにその系の持つ全ての情報が含まれているからである。一方で、どの程度たくさんのデータサンプルがあれば、あるエラーの範囲でハミルトニアンを推定することができるのかは全く非自明な問題である。このように、あるエラーの範囲を許したときにハミルトニアン学習を原理的に保証するデータ量の推定を「ハミルトニアン学習のサンプル複雑性問題」と呼ぶ。この問題に関して古典系においては、ボルツマンマシンの文脈の中でサンプル複雑性問題は既に解決されていた。一方で、量子系になると古典系において成立していた様々な性質が一般的に破れてしまう。本研究では、量子ハミルトニアンのサンプル複雑性の問題を一般的かつ完全に解決することに成功した。

この研究はUC BerkeleyのAnurag Anshu氏、米国IBMのSrinivasan Arunachalam氏、MITのMehdi SoreimaniFar氏との共同で行った。なお、この研究は4人の研究者の共同で行われており主要著者は存在しないため、私自身の寄与を以下に記す。

サンプル複雑性の解析で最も重要な性質として、カルバック・ライブラー情報量の強い凸性(strong convexity)の証明がある。古典系においては厳密なマルコフ性が成立するため強い凸性の証明は容易であるのだが、量子系における証明はかなり難関なものとなる。私がPerimeter instituteに滞在した時点では、Commuting Hamiltonianと呼ばれる古典系に近いハミルトニアンのみで証明が与えられていた。私の寄与は、任意の量子ハミルトニアンにおいて強い凸性が成立することを示したことにある。60ページの論文のうち3分の2がこの強い凸性の証明に当てられている。

この結果はNature physics誌に掲載されると同時にNews & Viewsで取り上げられ、特集記事が組まれた。また、計算機科学におけるトップ会議であるFOCS2020の口頭発表に選ばれ、QIP2021での口頭講演にも選ばれた。

[6] 任意の温度における長距離量子もつれの存在に関するNo-go定理の確立

過去20年間に於ける量子情報理論の領域に於ける大きな成果のひとつは、情報理論的手法による量子多体系の特徴付けであると言える。特に、巨視的な長さスケールの量子もつれ（長距離もつれ）は、真に非自明な量子効果を解明するための重要な鍵を提供する。量子もつれの理論的進歩により、量子相の完全な分類、量子多体系をシミュレーションする古典・量子アルゴリズムの開発、誤りに強い量子計算などの新しい分野が開拓されている。一方で、量子もつれは一般的に超低温下でないと壊れてしまうことが知られている。この点に関する超重要な未解決の問題として「室温下でも巨視的な長さスケールの量子もつれは存在できるのか?」という問題がある。この素朴な疑問は、さまざまな立場の研究者から大きな関心を持たれており、情報理論、計算機科学、物理学を繋げる重要な課題である。

上記問題への取り組みには、主に、i) 長距離量子もつれを持つ量子熱平衡状態のクラスを見つける、ii) 長距離量子もつれの存在に関するNo-go定理を確立する、という2つの方向性がある。前者では、4次元量子多体系が室温で長距離もつれを持つことが確認されている。後者の方向でも、量子もつれの普遍的な法則を理解するために、膨大な数の数値的・理論的研究が行われてきたが、現在までに量子もつれの普遍的な性質を研究する理論的枠組みは一つとして存在しない。これは、i) 低温物理学の難しさ、ii) 量子もつれの数学的構造の難解さ、という二つの大きな壁が原因となっている。

本研究では、全く新しい方法論を用いてこの壁を打ち破り、 $1/T$ (T : 温度)の距離を超えると、二者間のエンタングルメントが指数関数的に減衰することを証明した。本結果は、任意の次元、任意の温度でありとあらゆる量子多体系に適用される極めて一般的なものである。この結果は、長距離の量子もつれが、有限温度では必ず（三者間以上の）量子もつれの形でしか生き残らないことを示す。これは、これまでに観測された有限温度の長距離量子もつれが、三者間相関に関連したトポロジカル秩序によって生じているという観測結果をサポートするものになっている。

この結果はQIP2022での口頭講演に選ばれており、またPhysical Review Xに掲載された。

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 3件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 124
2. 論文標題 Eigenstate Thermalization from the Clustering Property of Correlation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 200604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.200604	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 Tomotaka Kuwahara, Kohtaro Kato, Fernando Brandao	4. 巻 124
2. 論文標題 Clustering of Conditional Mutual Information for Quantum Gibbs States above a Threshold Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 220601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.220601	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 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 10
2. 論文標題 Strictly Linear Light Cones in Long-Range Interacting Systems of Arbitrary Dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 31010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevX.10.031010	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 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 421
2. 論文標題 Gaussian concentration bound and Ensemble equivalence in generic quantum many-body systems including long-range interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168278
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aop.2020.168278	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 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 11
2. 論文標題 Area law of noncritical ground states in 1D long-range interacting systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-18055-x	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 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 126
2. 論文標題 Absence of Fast Scrambling in Thermodynamically Stable Long-Range Interacting Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 30604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.030604	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 Sho Sugiura, Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 3
2. 論文標題 Many-body scar state intrinsic to periodically driven system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research (Letter)	6. 最初と最後の頁 L012010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.L012010	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 Tomotaka Kuwahara, Alvaro Alhambra, Anurag Anshu	4. 巻 11
2. 論文標題 Improved Thermal Area Law and Quasilinear Time Algorithm for Quantum Gibbs States	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 11047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.011047	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 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito	4. 巻 124
2. 論文標題 Eigenstate Thermalization from the Clustering Property of Correlation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 200604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.200604	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 石井隆、桑原知剛、森貴司、羽田野直道	4. 巻 120
2. 論文標題 Heating in Integrable Time-Periodic Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 220602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.220602	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 Anshu Anurag, Arunachalam Srinivasan, Kuwahara Tomotaka, Soleimanifar Mehdi	4. 巻 17
2. 論文標題 Sample-efficient learning of interacting quantum systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 931 ~ 935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01232-0	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 Kuwahara Tomotaka, Saito Keiji	4. 巻 127
2. 論文標題 Lieb-Robinson Bound and Almost-Linear Light Cone in Interacting Boson Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 70403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.127.070403	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 Minato Takaaki, Sugimoto Koudai, Kuwahara Tomotaka, Saito Keiji	4. 巻 128
2. 論文標題 Fate of Measurement-Induced Phase Transition in Long-Range Interactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 10603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.128.010603	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 Kuwahara Tomotaka, Saito Keiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Exponential Clustering of Bipartite Quantum Entanglement at Arbitrary Temperatures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 21022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.12.021022	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Tomotaka Kuwahara, Kohtaro Kato, Keiji Saito, Fernando Brandao
2. 発表標題 Area law and clustering of information in non-critical long-range interacting systems
3. 学会等名 QIP 2020, 23rd Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomotaka Kuwahara, Keiji Saito
2. 発表標題 Strictly Linear Light Cones in Long-Range Interacting Systems of Arbitrary Dimensions
3. 学会等名 TQC 2020, 15th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Anurag Anshu, Srinivasan Arunachalam, Tomotaka Kuwahara, Mehdi Soreimanifar
2. 発表標題 Sample-efficient learning of interacting quantum systems
3. 学会等名 The 61st Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Anurag Anshu, Srinivasan Arunachalam, Tomotaka Kuwahara, Mehdi Soreimanifar
2. 発表標題 Improved Thermal Area Law and Quasilinear Time Algorithm for Quantum Gibbs States
3. 学会等名 QIP 2021, 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomotaka Kuwahara, Alvaro Aghamba, Anurag Anshu
2. 発表標題 Sample-efficient learning of interacting quantum systems
3. 学会等名 QIP 2021, 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 長距離相互作用系における厳密な線形光 円錐
3. 学会等名 量子多体系の熱力学—数理の発展と展望 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 量子多体系の複雑性の情報論的解析
3. 学会等名 物理工学の新展開 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 ハミルトニアン学習のサンプル複雑性
3. 学会等名 コンピューテーション研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomotaka Kuwahara
2. 発表標題 Information propagation in long-range interacting systems
3. 学会等名 YITP workshop, Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 Area law and clustering of information in non-critical long-range interacting systems
3. 学会等名 23rd Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 Heating in integrable time-periodic systems
3. 学会等名 Symposium on Floquet Theory : Fundamentals and Applications (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 Lieb-Robinson bound and almost linear light cone in interacting boson systems
3. 学会等名 16th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2022)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑原知剛
2. 発表標題 Exponential clustering of bipartite quantum entanglement at arbitrary temperatures
3. 学会等名 25th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2022)(国際学会)
4. 発表年 2022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			
米国	California Institute of Technology	Massachusetts Institute of Technology	IBM	他1機関
ドイツ	Max Planck Institute			
カナダ	Perimeter institute			