

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K17822

研究課題名(和文) 相関の強い非一様絶縁体のトポロジカル分類と端状態：冷却気体系から固体系への展開

研究課題名(英文) Topological classification and edge states of strongly correlated nonuniform insulators: from cold atoms to solids

研究代表者

手塚 真樹 (Tezuka, Masaki)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：40591417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：量子系の新たなトポロジカル輸送現象として、二次元光格子系に斜めの格子を加えた系で、冷却原子が格子の駆動方向と一般に異なる向きに量子化された輸送を示す現象を理論的に提案した。また、トポロジカル超伝導体などでの実現が期待され、重力系とホログラフィー対応を持つと考えられるサチデフ-イエ-キタエフ模型に、フェルミオンのホッピングを導入した際のカオス性の破れがフォック空間での多体局在現象であることを示し、この系の局在前後のふるまいを解析的・数値的手法で明らかにした。これらに関連し、有効電場や磁場の制御による量子多体系ダイナミクスの予測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子多体系のフォック空間での局在として、多体局在現象を定量的に解析的・数値的手法の両面から研究できるモデルを確立した。多体局在-カオス転移を特徴づける量として、エネルギー準位統計やスペクトル構造因子の振る舞いを明らかにした。また、有限時間のリアプノフスペクトルや、2点相関を行列とみた際の特異値の準位統計も、多体局在相に隣接するカオスのダイナミクスの領域を特徴づけることを提案した。さらに、強電場下での電荷の局在現象を基に、スピン自由度の時間発展を逆転できる系を提案したが、これは量子情報の非局所化(スクランプリング)を定量化する非時間順序相関の実験的測定につながるものである。

研究成果の概要(英文)：We theoretically proposed a new topological transport in quantum systems in two-dimensional optical lattice with an additional slanted lattice, whose motion causes quantized motion to a different direction in general. Also, for the Sachdev-Ye-Kitaev model, which is expected to be realized in systems such as topological superconductors and is believed to holographically correspond to a gravitational model, we showed that the breakdown of chaotic features due to the introduction of fermion hopping is a many-body localization phenomenon in the Fock space, and we revealed the behavior of this system before and after the localization combining analytical and numerical methods. In relation to these studies, we predicted the quantum many-body dynamics in systems where the effective electric or magnetic is manipulated.

研究分野：物性物理学理論

キーワード：多体局在 量子カオス SYK模型 トポロジカル輸送現象 準位統計 スクランプリング エンタングルメント・エントロピー

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

乱れない理想的な結晶の絶縁体は、バンド絶縁体とモット絶縁体に大別される。バンド絶縁体では、単位格子あたり偶数個の電子が価電子帯に収容され、伝導帯との間のギャップは、弱相関極限を考慮してもつぶれない。一方、モット絶縁体は電子相関により絶縁化する。しかし、非一様性の効果を考えると、絶縁体はこれらだけではない。多体局在は、乱れのある系で、相関効果により、基底状態のみならず、多体系の一般の固有状態が局在している状況である。系を二分したときのエンタングルメント・エントロピーが切断面の面積で決まる(area law)などの著しい性質をもつ。電子系でこのような局在状態が実現されれば系は絶縁体となる。

絶縁体はバルクに励起ギャップをもつ。トポロジカル絶縁体は、電子構造で決まるトポロジカルな量が非自明な値をとる。真空や通常の絶縁体との境界ではギャップが閉じて端状態を形成し、輸送係数が量子化されたエッジ流など著しい性質を示す。2005年のトポロジカル絶縁体の予言以降、関連分野の研究が急速に進展した。トポロジカル量子現象として理解される中には量子ホール効果のような既知の現象のほか、系の周期的変化で駆動される粒子数の量子化であるThouless量子ポンプ([1]の提案が冷却原子系で2015年に実現された[2-3])などもある。トポロジカル相の分類は、弱相関のバンド絶縁体で弱い乱れにより結晶対称性が失われた場合に始まり、清浄な系で結晶対称性の効果がみられる場合や、強相関の場合へと発展してきた。強相関効果を考えることで、一体問題のハミルトニアンで記述される弱相関系のトポロジカル相に対応物を持たない新たな相が提案されたことに注目し、強相関かつ空間的非一様性が強いことにより多体局在的に絶縁化した系について、トポロジカルな性質も含めて調べることを構想した。

### 2. 研究の目的

乱れと相関効果が共存する絶縁体について、非自明なトポロジカル相がいつどのように現れるかを、系の空間次元および対称性に応じて系統的に明らかにすること、また、このような系の輸送現象について、既知のトポロジカル絶縁体相との差異が明らかになるような実験での実現方法を提案し、定量的に予測・評価することを目的として応募した。

ところが、本研究の応募時に存在を認識できていなかった研究[4](2016年12月出版)において、多体局在のうち全ての固有状態が局在する場合については、系に対称性があると強い制限がかかることが指摘された。また、同時期に、空間2次元以上での多体局在がそもそも実現するか否かや、空間1次元で多体局在の典型的モデルとされてきたランダム磁場量子スピン鎖での多体局在の位置についても議論が盛んとなった。このような中で、非一様系のトポロジカル輸送や、多体局在転移の存在、多体局在相および隣接する相の特徴づけについて、まず基礎的な知見を確立し、それらを総合して当初の目的に迫るべく、研究を続行することとした。

### 3. 研究の方法

冷却原子系および固体系を想定した、非一様性をもつ量子多体系のモデルの固有状態および、量子ダイナミクスの理論的研究を行った。本研究では、量子多体系の波動関数を、モデルに含まれる乱数の値を指定した個々のサンプルについて、密度行列繰り込み群や厳密対角化により直接計算することを繰り返し、物理量の分布をみる数値的な方法を用いた。これと並行して、国際共同研究により、乱数に関する平均を摂動展開やレプリカ法等で解析した結果と比較、検証した。

### 4. 研究成果

当初目的とした、多体局在相のトポロジカルに非自明な端状態およびそれを特徴づける輸送現象の理論的確立には至らなかった。しかし、トポロジカルな輸送現象、乱れを持つ量子多体系での多体局在相の存在や、近接するカオス的なダイナミクスをもつ領域の特徴づけ、これらの実験的検証に向けた制御方法等に関して、以下に述べる成果を得た。

#### (1)トポロジカル量子ポンプ

2次元系の光格子中の冷却気体系に、斜めの細いトラップあるいは周期格子を加えた系を考えた。有限サイズの格子で端に局在したバンド間固有状態が存在することを見出した。また、斜めの格子を動かした場合に、ディオファントス方程式の解で決まる、一般に掃引方向とずれた方向への量子化された輸送が起きるといふ、トポロジカル量子ポンピングの2次元への非自明な拡張が成り立つことを提案した。

## (2) 新たな多体局在系の開拓と量子カオス

Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型は系を構成する全て ( $N$  個) のフェルミオンの間にランダムな 4 点相互作用をもつ空間 0 次元の模型であり、 $N$  が大きい極限で解け、低温で下に述べる「カオスの上限」を満たす。代表者らによる冷却気体系での実現法の提案[5]後、近年では、トポロジカル絶縁体上に形成された超伝導体に関いた穴や、グラフェンの小片などで実現する可能性も提案され、NMR による小規模な系の実験も行われている。

この模型の変形で多体局在を実現する可能性について研究を行った。SYK 模型にホッピングに相当する 2 点相互作用を加えた系のうち、2 点相互作用が全対全でランダムな場合[6]にカオス性の破れを見出した。また、2 点相互作用が長距離および隣接サイト間の場合ともに、4 点相互作用の到達距離を限定すると、1 次元空間の多体局在が起きることを、準位統計の解析により明らかにした。さらに、2 点相互作用のみの模型および、両相互作用を併せ持った模型のエネルギー準位相関を表すスペクトル構造因子等を、解析計算と数値計算を併用して調べた。

多体系の量子カオスは従来、エネルギー準位統計および、非時間順序相関 (OTOC) で特徴づけられてきた。エネルギー準位統計は厳密対角化が可能な小さな系を除いて計算が困難である。一方、OTOC の時間依存性から求まるリアブノフ指数が、基礎物理定数と温度の積で書かれる「カオスの上限」をもつことが近年指摘され、SYK 模型などでの研究が急速に進んだ。これに関連し、まず古典カオス系に対し、有限時間のリアブノフスペクトル(LyS)の準位統計とランダム行列理論との対応を見出した。これを量子系に拡張し、[6]の系、および多体局在の典型的模型であるランダム磁場を加えた量子スピン鎖について、量子 LyS の準位統計とカオス性の対応を示した。さらに、より単純な、2 点関数の行列の特異値スペクトルでも同様の対応を見出した。

## (3) 多体局在の解析的予測と数値的検証

上述の[6]の系のカオス性の破れがフォック空間での固有状態の多体局在であることを指摘した。2 点相互作用の強さのパラメータ  $\delta$  の関数として局在の起きる点および、その手前での固有関数のモーメント、ハミルトニアン固有エネルギーの準位統計について、解析的な結果と厳密対角化による数値的結果のよい一致を見た。さらに、この系で、多体局在の手前でも、ダイナミクスが等エネルギー曲面の一部に制限された非エルゴード的な状態となっているかどうかを調べた。ほぼ等エネルギーの状態が張る部分空間でエルゴード性が成り立っていると仮定した場合の、系を二分した際のエンタングルメント・エントロピーの解析的な表式は、 $\delta$  に依存しない領域をもつ。厳密対角化で求めたエンタングルメント・エントロピーが、 $N$  が大きくなるとともに、 $\delta$  の関数としてプラトーを発達させることを確認した。

## (4) 実験での実現に向けて

冷却原子系でトポロジカルエッジ流が実験的に調べられている、1 次元鎖上の原子の内部自由度を追加の空間次元として扱い、さらに磁場に相当する人工ゲージ場を加えた系に関して、基底状態での粒子流に対する粒子間相互作用の効果を密度行列繰り込み群で解析した。リフシツク転移による粒子流の方向の反転を含む結果を得るとともに、平均場近似等と比較を行った。

また、スピン 1/2 のフェルミオン間に斥力をもつ強束縛模型に、直流電場に相当する、時刻によらないポテンシャル勾配を加えた系を考えた。隣接サイト間のエネルギー差が斥力を大きく上回るとワニエ・シュタルク型の局在が起きる。隣接サイト間のスピン有効相互作用は勾配がないと反強磁性的だが、勾配を加えると強磁性的となることを、摂動論および、ホッピングの位相が時刻に比例するゲージでのフロケ有効模型の解析により提案した。そして、時間を反転したスピンダイナミクスを数値的に確認した (論文投稿中)。これは量子系のスクランプリングを特徴づける非時間順序相関の測定に必要なハミルトニアンの符号反転につながる成果である。

< 引用文献 >

- [1] D. J. Thouless, Phys. Rev. B **27**, 6083 (1983).
- [2] S. Nakajima et al., Nat. Phys. **12**, 296 (2016).
- [3] M. Lohse et al., Nat. Phys. **12**, 350 (2016).
- [4] A. C. Potter and R. Vasseur, Phys. Rev. B **94**, 224206 (2016).
- [5] I. Danshita, M. Hanada, and M. Tezuka, PTEP **2017**, 083I01 (2017).
- [6] A. M. Garcia-Garcia, B. Loureiro, A. Romero-Bermudez, and M. Tezuka, Phys. Rev. Lett. **120**, 241603 (2018).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 手塚真樹	4. 巻 57
2. 論文標題 Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型と量子スクランプリング, 多体局在	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 217-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 松田冬樹, 手塚真樹, 川上則雄	4. 巻 56
2. 論文標題 冷却原子系におけるサウレスポンプの2次元への拡張とディオファントス方程式	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 409-416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tzu-Chen Huang, Ying-Hsuan Lin, Kantaro Ohmori, Yuji Tachikawa, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical evidence for a Haagerup conformal field theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Felipe Monteiro, Masaki Tezuka, Alexander Altland, David A. Huse, and Tobias Micklitz	4. 巻 127
2. 論文標題 Quantum Ergodicity in the Many-Body Localization Problem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 030601-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.030601	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 Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Masaki Tezuka, Masahito Ueda, and Norio Kawakami	4. 巻 105
2. 論文標題 Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: Case study of a non-Hermitian XXZ spin chain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205125-1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.205125	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 Chen-How Huang, Masaki Tezuka, and Miguel A Cazalilla	4. 巻 24
2. 論文標題 Topological Lifshitz transitions, orbital currents, and interactions in low-dimensional Fermi gases in synthetic gauge fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 033043-1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ac5a87	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 Antonio M. Garcia-Garcia, Bruno Loureiro, Aurelio Romero-Bermudez, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 126
2. 論文標題 Garcia-Garcia et al. Reply:	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 109102-1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.109102	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 Pak Hang Chris Lau, Chen-Te Ma, Jeff Murugan, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 54
2. 論文標題 Correlated disorder in the SYK2 model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 095401-1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/abde77	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 Felipe Monteiro, Tobias Micklitz, Masaki Tezuka, and Alexander Altland	4. 巻 3
2. 論文標題 Minimal model of many-body localization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013023-1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013023	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 Fuyuki Matsuda, Masaki Tezuka, and Norio Kawakami	4. 巻 89
2. 論文標題 Two-Dimensional Thouless Pumping of Ultracold Fermions in Obliquely Introduced Optical Superlattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114708-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114708	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 Hrant Gharibyan, Masanori Hanada, Brian Swingle, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 102
2. 論文標題 Characterization of quantum chaos by two-point correlation functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022213-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.022213	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 Pak Hang Chris Lau, Chen-Te Ma, Jeff Murugan, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 795
2. 論文標題 Randomness and chaos in qubit models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 230 ~ 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.05.052	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 Hrant Gharibyan, Masanori Hanada, Brian Swingle, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 1904
2. 論文標題 Quantum Lyapunov Spectrum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 082-1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2019)082	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 Antonio M. Garcia-Garcia and Masaki Tezuka	4. 巻 99
2. 論文標題 Many-body localization in a finite-range Sachdev-Ye-Kitaev model and holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054202-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054202	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 Mitsutoshi Fujita, Rene Meyer, Sumiran Pujari, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 1901
2. 論文標題 Effective hopping in holographic Bose and Fermi-Hubbard models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 045-1-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2019)045	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 Hrant Gharibyan, Masanori Hanada, Stephen H. Shenker, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 1807
2. 論文標題 Onset of random matrix behavior in scrambling systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 124-1-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2018)124	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 Antonio M. Garcia-Garcia, Bruno Loureiro, Aurelio Romero-Bermudez, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 120
2. 論文標題 Chaotic-integrable transition in the Sachdev-Ye-Kitaev model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 241603-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.241603	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 Masanori Hanada, Hidehiko Shimada, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 97
2. 論文標題 Universality in Chaos: Lyapunov Spectrum and Random Matrix Theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022224-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.022224	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 Jordan S. Cotler, Guy Gur-Ari, Masanori Hanada, Joseph Polchinski, Phil Saad, Stephen H. Shenker, Douglas Stanford, Alexandre Streicher, and Masaki Tezuka (in alphabetical order)	4. 巻 1705
2. 論文標題 Black holes and random matrices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 118-1-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2017)118	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44件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 25件)

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Fock space localization in a perturbed Sachdev-Ye-Kitaev model
3. 学会等名 17th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 手塚真樹
2. 発表標題 Sachdev-Ye-Kitaev 模型における多体局在の定量的研究
3. 学会等名 離散的手法による場と時空のダイナミクス2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Many-body localization in quasiperiodic systems and effect of nonhermitian terms
3. 学会等名 IRN-APERIODIC “Open space between aperiodic order and physics & chemistry of materials” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Quantitative analysis of many-body localization in Sachdev-Ye-Kitaev type models
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 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Characterization of chaos in many-body quantum systems
3. 学会等名 2019 The Korean Physical Society Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 The Sachdev-Ye-Kitaev model as a maximally chaotic lattice model: study towards experimental realization and new characterizations of chaos
3. 学会等名 Workshop on Holography and Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 The Sachdev-Ye-Kitaev model, scrambling and chaos
3. 学会等名 Youth Symposium on theoretical high energy physics in Southeast University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 The Sachdev-Ye-Kitaev model, random matrices and quantum chaos
3. 学会等名 Recent developments in SYK model and wormholes (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Characterization of chaotic dynamics in quantum systems
3. 学会等名 3rd French Russian Conference on Random Geometry and Physics: Sachdev-Ye-Kitaev Model and Related Topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Characterization of quantum chaos by two-point correlators
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Sachdev-Ye-Kitaev model, topological materials and chaos
3. 学会等名 第4回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 手塚真樹
2. 発表標題 Level statistics and Lyapunov spectrum of the SYK model
3. 学会等名 Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time (「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 手塚真樹
2. 発表標題 Sachdev-Ye-Kitaev 模型と量子カオス
3. 学会等名 ミニワークショップ「量子カオスとホログラフィー」 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 The Sachdev-Ye-Kitaev model, random matrices and Lyapunov exponents
3. 学会等名 Black Holes, Quantum Chaos, and Solvable Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Tezuka
2. 発表標題 Proposal for a cold atom realization of the Sachdev-Ye-Kitaev model:a desktop quantum gravity laboratory
3. 学会等名 The 2nd Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/~tezuka/research.html">http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/~tezuka/research.html</a>
---

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	UCバークレー	プリンストン大学	カリフォルニア工科大学	他5機関
スペイン	ドノスティア国際物理学センター			
ブラジル	ブラジル物理学研究センター			
ドイツ	ケルン大学			
中国	上海交通大学	華南師範大学		
英国	サリー大学	サウサンプトン大学		
南アフリカ	ケープタウン大学			
台湾	国立清華大学	国立台湾大学		