

# 2019年度 研究活動報告

## 1.1 桂研究室

物性理論・統計力学の基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。特に、相関の強い多体系（電子系、ボゾン系、スピン系、...）における磁性・強誘電性・量子ホール効果・超伝導などの物性の解明および新奇現象の予言を目指している。またこれらの系に対して、平均場近似やスピン波理論などの従来の手法や、場の理論的手法、数値的対角化などを組み合わせて多角的にアプローチしている。同時に、量子多体系や可解模型、非平衡系に関する数理物理学的研究も行っている。

### 1.1.1 強相関係系・トポロジカル系

わずかに分散のあるバンドをもつ  $SU(n)$  Hubbard 模型における強磁性

固体中で互いに相互作用しあう電子を記述する単純化された模型である Hubbard 模型は、そのスピン自由度に関する  $SU(2)$  対称性を持つ。近年では冷却原子系の技術の発展により、 $SU(n)$  対称性を持つ多成分フェルミオン系も実現されており、理論的にはこれらの系は  $SU(n)$  Hubbard 模型で記述される。しかし  $SU(2)$  Hubbard 模型に比べて、この模型で知られている厳密な結果は少なく、平坦バンド強磁性に関する先行研究 [R. Liu, W. Nie, and W. Zhang, *Sci. Bull.* **64**, 1490 (2019)] などに限られる。ここで、平坦バンドとは巨視的に縮退した一粒子のエネルギースペクトルを指し、この縮退に由来する状態密度の発散をとまなう。平坦バンド強磁性はこのような特異的な状況における厳密な結果である。

田村と桂は1次元の場合の平坦バンド強磁性を  $SU(n)$  Hubbard 模型において議論し、先行研究より一般的なパラメータに対しても厳密に成立することを示した。さらに摂動を加えることで状態密度の発散を取り除いた場合 (図 1.1.1) の強磁性も議論した。その結果、摂動に対してバンドギャップと相互作用が十分大きな領域で強磁性相が現れることを示し、特異性のない  $SU(n)$  Hubbard 模型における厳密な結果を確立した。これらの結果は、国際会議等 [22, 30, 40] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。また、田村はこれらの結果を修士論文としてまとめた [16]。

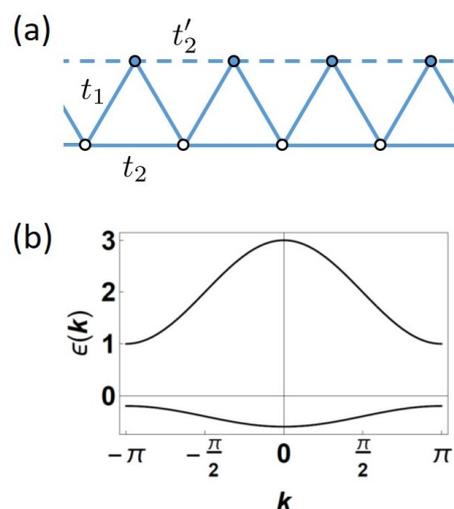


図 1.1.1: (a) ほぼ平坦なバンドをもつ tight-binding 模型が定義される 1 次元格子と (b) そのエネルギーバンド。下のバンドがほぼ平坦。

### 3次元のマグノン・トポロジカル相

当初は電子系を中心に進展していた物質のトポロジカル相の研究は、その後大きな広がりを見せており、フォトンやフォノン、マグノンといったボゾン系においても対応する現象が研究されている。マグノンとは磁性体中のボゾンの素励起であるが、近年スピンホール絶縁体の対応物がマグノン系においても理論的に提案されている。また、近藤・赤城・桂は、このような系を特徴づけるトポロジカル不変量を論文 [H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **99**, 041110(R) (2019)] で提案している。このように、マグノンのトポロジカル相についての理解は進んでいるものの、研究の多くは2次元以下の系に限られてきた。

近藤・赤城・桂は、今年度新たに3次元トポロジカル絶縁体に対応するマグノン系のモデルを構築した。その一例は、電子系における Fu-Kane-Mele 模型 [Phys. Rev. Lett. **98**, 106803 (2007)] の、マグノン系における自然な対応物とみなせる。これらの系は昨年度の研究において導入された、Kramers 対の存在を保証する擬時間反転対称性を有しており、この対称性によって保護された表面状態が現れる。我々はこの対称性に基づいて系を特徴づけるトポロジカル数を定義し、その表面状態の数の偶奇との対応関係を確認した。また、表面に磁場を印加することにより誘起される熱ホール効果についても議論した。これらの結果は、国際学会等 [20, 28, 29, 31, 56, 57, 59] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。

### 1.1.2 散逸のある量子多体系

#### 散逸のある量子多体系の定常状態のニューラルネットワークを用いた構成

内部で閉じた相互作用のために、ユニタリーな時間発展により記述される量子系と、外界との相互作用により、非ユニタリーな時間発展をする量子系は、それぞれ「孤立量子系」と「量子開放系」と呼ばれ、区別される。いずれも特定の条件を満たす場合には、熱平衡状態への緩和が生ずるが、一般には非自明な定常状態に落ち着くことも許される。特に近年は、量子開放系のエンジニアリングに関して実験的にも進展していることから、非平衡定常状態の探求を加速させるためにも、理論的・数値的な手法の確立が急務となっている。

吉岡と濱崎(東大理物・上田研)は、ニューラルネットワークの一種である制限ボルツマン機械によって表現した変分状態を用いて、非平衡定常状態を数値的に近似する手法を開発した。具体的には、モンテカルロ法によって、状態の変分パラメータを最適化する、「変分モンテカルロ法」を用いた。例えばギャップの開いた孤立量子系では、エネルギーを最小化するよう勾配法によって最適化するが、量子開放系においては、目的関数を時間発展の生成演算子により表現することで、非平衡定常状態を求めることが可能となる。以上の手続きによって制限ボルツマン機械による変分状態を最適化することで、1次元・2次元の量子スピン系における数値計算のほか、量子エンタングルメントが非常に複雑な状態でも効率的に表現できることを示した。これらの結果は、国際会議など [18, 25, 37, 42, 46, 53, 58, 60] で発表されたほか、原著論文 [5] にまとめられた。また、吉岡はこれらの結果を学位論文としてまとめた [17]。また、これらの業績により、日本物理学会の若手奨励賞(領域 11) 等を受賞した [1, 3, 52]。

#### 散逸のある1次元量子多体系と非エルミート量子力学

Lindblad 方程式は、量子開放系を記述する代表的な方程式である。従来、Lindblad 方程式は少数系のダイナミクスを記述するために用いられてきたが、近年では多体系での Lindblad 方程式も扱おうとする動きが加速している。しかし、解析の難しさゆえ、その理解は発展途上である。先行研究としては、数値計算による結果が多く、解析的に調べられた例は、自由フェルミオンの問題に帰着できるものや、1次元系の端にだけ散逸を入れたもの、および摂動的な取り扱いに限られている。

柴田と桂は、バルクに散逸が働く開放量子多体系で、以下の2つの可解模型を新たに見出した: (i) 1次元量子コンパス模型に、位相緩和と呼ばれる散逸が働く模型、(ii) 1次元量子 Ising 模型に、位相緩和と隣接2サイトに及ぶ散逸が働く模型。(i), (ii) どちらの場合についても、密度演算子をベクトルとみなすマッピングにより、対応する Liouvillian を梯子状

に配置された非エルミートな量子スピン系のハミルトニアンとみなすことができる。

(i) については、Kitaev のハニカム格子模型と呼ばれる、可解な量子スピン模型を解く際に用いられたマヨラナフェルミオンの解法を、この非エルミートなハミルトニアンにも適用することができ、Lindblad 方程式のダイナミクスを完全に解析することができる。この方法を用いて、定常状態が二重縮退していること、および、パラメータの大小によりある種の相転移現象を起こすことを明らかにした。また、量子コンパス模型が臨界的な場合の、緩和時間の厳密な表式を得た。加えて、端スピンの自己相関関数についても、組合せ論の手法を用いて、厳密な表式を得た。その結果から、元々の量子コンパス模型がトポロジカル相にある時、散逸によるデコヒーレンスが抑制されることを示した。

(ii) については、梯子系へのマッピングにより、元の Louvillian は、非エルミートな量子 Ashkin-Teller 模型に帰着する。これは、Jordan-Wigner 変換によって相互作用のあるマヨラナフェルミオンの模型、さらには、異方性パラメータが純虚数の staggered XXZ 模型へとマップされる。このマッピングにより、系の定常状態が二重縮退していることを厳密に示した。さらに、うまくパラメータを選んだ場合は、可積分な非エルミート様 XXZ 模型に対応するので、ペーテ仮設法などにより系の性質をより詳しく調べられる。その結果、厳密な緩和時間の表式を得て、やはり散逸の大小によりある種の相転移現象を起こすことを明らかにした。これらの結果は、国際学会等 [21, 26, 33, 38, 39, 44, 51, 62] で発表されたほか、(i) については [4]、(ii) については [6] として原著論文にまとめている。

### 1.1.3 数理物理学・統計力学

#### Onsager 代数に起因する完全スカー状態

非可積分な孤立量子多体系における熱化(もしくは平衡化)の条件は、ミクロな量子力学とマクロな統計力学を繋ぐ非常に重要な問題として、長年精力的に調べられている。特に最近、[H. Bernien *et al.*, Nature **551**, 579 (2017)] において異様に長時間のあいだ減衰しない秩序状態間の振動を示す Rydberg 原子の実験系が発見されたことから、「一部の特異的な励起状態(スカー状態)のみが熱化を示さない物理系」が注目を集めている。また、このような状態の背後にある数学的な構造の探求も盛んに行われている。

柴田・吉岡・桂は、Onsager 代数と呼ばれる数学的構造をもつ可積分な模型に、その可積分性を壊す摂動を加えることで、熱的な状態から完全に分離した部分 Hilbert 空間内において周期的運動を繰り返す、完全スカー状態を構成可能であることを明らかにした(図 1.1.2)。スピン 1/2 の場合は XY 模型、スピン 1 の場合は、Fateev-Zamolodchikov 模型に摂動を加えたものなどがその具体例であるが、我々はそのような模型が任意のスピン量子数  $S$  に対して、原理的

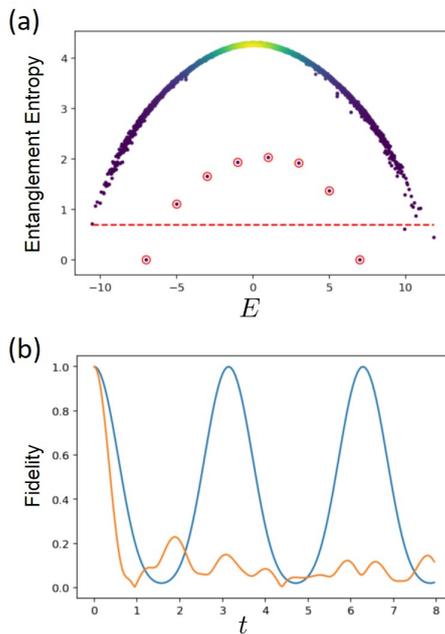


図 1.1.2: (a)  $S = 1/2$  の模型 ( $L = 8$  サイト) における各エネルギー固有状態のエンタングルメント・エントロピー。体積則に従わない、孤立した準位がスカー状態に対応する。(b) 初期状態とのフィデリティを時間  $t$  の関数として表したもの。初期状態がスカー状態の重ね合わせの場合は減衰せず振動するが、直積状態の場合は急激に減衰する。

には無限に構成できることを示した。また、このスカー状態のエンタングルメント・エントロピーは体積則に従わないことを証明した。この完全スカー状態は、ある種の並進対称性を破るような摂動に対しては、ロバストに非熱的な性質を示すが、このような並進不変でない系においても安定な完全スカー状態を陽に構成したのは、この研究が初めてである。これらの結果は、原著論文 [10] にまとめられた。

### 1.1.4 その他

#### 遍歴ボゾン系における Haldane 相

Yang と桂、中野（東大理物・藤堂研）は、スピン自由度をもつ Bose-Hubbard 模型における Haldane 相に関する研究を行った。具体的には、デルタ鎖と呼ばれる格子上的  $F = 1$  Bose-Hubbard 模型を考え、ある種の状況では有効スピン模型が、 $S = 1$  bilinear-biquadratic 模型となることを摂動的に示した。さらに、有効スピン模型が Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki (AKLT) 模型となる場合には、元の Bose-Hubbard

模型においても基底状態を陽に書き下すことが可能であり、その表式を用いてストリング秩序等の各種の相関関数が求まることを示した。この点は、この系における Haldane 相を代表する点と考えられる。さらに、一般の相互作用パラメーターに対する相関を、variational uniform matrix product state (VUMPS) 法を用いて数値的に調べ、AKLT 模型に対応する点の周辺に Haldane 相が広がっていることを明らかにした [11, 32, 45, 47]。Yang はこの研究と、昨年度行った研究 [H. Yang and H. Katsura, Phys. Rev. Lett. **122**, 053401 (2019)] を修士論文にまとめた [14]。

#### 断熱量子計算とエネルギーギャップの下限

断熱量子計算と標準的な量子回路模型の等価性を示す際に、Feynman のクロック・ハミルトニアンと呼ばれる定常ハミルトニアンのエネルギーギャップが、計算ステップ  $L$  の多項式の逆数で下から押さえられることが重要となる。このエネルギーギャップの下限は、先行研究では複雑な議論を用いて証明されていたが、桂と Dublin 高等研究所（アイルランド）の Dooley, Kells, Dorlas は、初等関数により固有値をあらわに書き下すことができる三重対角行列の性質と、エルミート行列に関する Weyl の定理を組み合わせることで、より良い下限をシンプルに導出できることを明らかにした。この結果は、原著論文 [9] にまとめられた。

#### <受賞>

- [1] 吉岡 信行, 第 14 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 11), 「ニューラルネットワークによる物理状態の分類と表現に関する理論的研究」, 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年.
- [2] 赤城 裕, 第 25 回日本物理学会論文賞, Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome, “Spin Chirality Ordering and Anomalous Hall Effect in the Ferromagnetic Kondo Lattice Model on a Triangular Lattice”, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 083711 (2010), 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年.
- [3] 吉岡 信行, 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程), 東京大学, 2020 年 3 月 23 日.

#### <報文>

(原著論文)

- [4] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Dissipative spin chain as a non-Hermitian Kitaev ladder, Phys. Rev. B **99**, 174303 (2019).
- [5] Nobuyuki Yoshioka and Ryusuke Hamazaki: Constructing neural stationary states in open quantum many-body systems, Phys. Rev. B **99**, 214306 (2019) [Featured in Physics, Editors’ Suggestion].
- [6] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Dissipative quantum Ising chain as a non-Hermitian Ashkin-Teller model, Phys. Rev. B **99**, 224432 (2019).

- [7] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Three-dimensional topological magnon systems, *Phys. Rev. B* **100**, 144401 (2019) [Editors' Suggestion].
- [8] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Ferromagnetism in the  $SU(n)$  Hubbard model with a nearly flat band, *Phys. Rev. B* **100**, 214423 (2019).
- [9] Shane Dooley, Graham Kells, Hosho Katsura, and Tony C. Dorlas: Simulating quantum circuits by adiabatic computation: improved spectral gap bounds, *Phys. Rev. A* **101**, 042302 (2020).
- [10] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura: Onsager's scars in disordered spin chains, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 180604 (2020) [Editors' Suggestion].
- [11] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura: Haldane Phase in Spin-1 Bosons with a Flat Band, Preprint, arXiv:2003.01705 (2020).
- (国内雑誌)
- [12] 吉岡 信行, 赤城 裕, 桂 法称: ニューラルネットワークによる物理状態の判定から表現まで, *固体物理* **54**, No. 9, 51 (2019).
- [13] 桂 法称: パズドラの数理と物理 (理学エッセイ), 理学部ニュース, 2019年7月号.
- (学位論文)
- [14] Hong Yang: Rigorous Results for the Ground States of Spinor Bose-Hubbard Models (修士論文).
- [15] 饗場亮介: 機械学習を用いたトポロジカル絶縁体・超伝導体の相の分類 (修士論文).
- [16] 田村建佑: Rigorous results for ferromagnetism in non-singular  $SU(n)$  Hubbard models (修士論文).
- [17] 吉岡信行: Classification and Representation of Physical States by Neural Networks (博士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [18] Nobuyuki Yoshioka: Constructing neural stationary states for open quantum many-body systems, *Engineering Nonequilibrium Dynamics of Open Quantum Systems*, Dresden, Germany, June 2019.
- [19] Nobuyuki Yoshioka (Yutaka Akagi, and Hosho Katsura): Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine, *StatPhys 27-International Conference on Statistical Physics*, Buenos Aires, Argentina, July 2019
- [20] Hiroki Kondo: Topological invariants and surface states in magnon systems, *Topological phase workshop*, Sendai, Japan, August 2019.
- [21] Naoyuki Shibata: Integrable dissipative spin chains, *IIS-Chiba Workshop NH2019*, Kashiwa, Chiba, Aug. 2019.
- [22] Kensuke Tamura (and Hosho Katsura): Ferromagnetism in the  $SU(n)$  Hubbard model with nearly flat band, *The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases*, YITP, Kyoto, Japan, Oct. 2019.
- [23] Hong Yang (and Hosho Katsura): Rigorous Results on the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases*, YITP, Kyoto, Japan, Oct. 2019.
- [24] Kensuke Tamura (Tatsuhiko Shirai, Hosho Katsura, Shu Tanaka, and Nozomu Togawa): Performance comparison of integer encoding methods in Ising machines, *Deep Learning And Physics DLAP2019*, YITP, Kyoto, Japan, Nov. 2019.
- [25] Nobuyuki Yoshioka (and Ryusuke Hamazaki): Constructing neural stationary states for open quantum many-body systems, *Deep Learning And Physics DLAP2019*, YITP, Kyoto, Japan (2019.10).
- [26] Naoyuki Shibata (and Hosho Katsura): Integrable dissipative spin chains, *Thermalization, Many body localization and Hydrodynamics*, ICTS, Bangalore, India, Nov. 2019.
- [27] Hong Yang (and Hosho Katsura): Rigorous Results on the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *Thermalization, Many body localization and Hydrodynamics*, ICTS, Bangalore, India, Nov. 2019.
- [28] Hiroki Kondo: Three-dimensional topological magnon systems, *International Conference on Topological Materials Science 2019 (Topo-Mat2019)*, Kyoto University, Kyoto, Dec. 2019.
- [29] Hiroki Kondo: Three-Dimensional Topological Magnon Systems, *Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts [BE/BC2020F]*, Tokyo, Japan, Feb. 2020.
- [30] Kensuke Tamura (and Hosho Katsura): Ferromagnetism in the  $SU(n)$  Hubbard model with nearly flat band, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.
- [31] Hiroki Kondo (Yutaka Akagi, and Hosho Katsura): Three-dimensional topological magnon systems, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.
- [32] Hong Yang (and Hosho Katsura): Haldane Phase in Spin-1 Bose-Hubbard Model with Flat Band, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.
- [33] Naoyuki Shibata (and Hosho Katsura): Dissipative quantum Ising chain as a non-Hermitian Ashkin-Teller model, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.
- [34] Nobuyuki Yoshioka (Yuya O. Nakagawa, Kosuke Mitarai, and Keisuke Fujii), Variational Quantum Algorithm for Markovian Open Quantum Systems, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.

## 招待講演

- [35] Hosho Katsura: Frustration-free Majorana fermion models, *Interacting Majorana Fermions*, Vancouver, Canada, May 2019.
- [36] Hosho Katsura: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in lattice models, *KIAS Workshop on Topology and Correlation in Quantum Materials*, Busan, Korea, May 2019.
- [37] Nobuyuki Yoshioka: Approximate and exact representation of physical states by neural networks, *5th Conference on Condensed Matter Physics*, Liyang, China, June 2019.
- [38] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains, *Amsterdam Summer Workshop on Low-D Quantum Condensed Matter 2019*, Amsterdam, Netherland, July 2019.
- [39] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains, *Topological phase workshop*, Sendai, Japan, August 2019.
- [40] Hosho Katsura: Ferromagnetism in the  $SU(n)$  Hubbard model with a nearly flat band, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, Kyoto, Japan, Nov. 2019.
- [41] Yutaka Akagi: Topological Invariants for Magnon Systems with Disorder, *Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts [BE/BC2020F]*, Tokyo, Japan, Feb. 2020.
- [42] Nobuyuki Yoshioka: Neural Networks in Open Quantum System, *Mini-Workshop on Quantum Optimization*, Keio University, Kanagawa, Japan Mar 2020.

## (国内会議)

## 一般講演

- [43] 桂法称: ディリクレ・ノイマン混合境界条件と half SSD, サイン 2 乗変形 (SSD) とその周辺 2019, 2019 年 7 月, 理研 iTHEMS.
- [44] 柴田直幸, 桂法称: 散逸のある量子 Ising 鎖と非エルミート Ashkin-Teller 模型, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.
- [45] Hong Yang, 桂法称: The Haldane Phase of Spinful Bosons with Flat Band, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.
- [46] 吉岡信行, 濱崎立資: ニューラルネットワークによる量子開放系の定常状態の表現, 第 13 回物性科学領域横断研究会, 2019 年 11 月, 東京大学.
- [47] 桂法称: スピン自由度をもつ Bose-Hubbard 模型の SPT 相, 2020 年 2 月, 大阪大学.
- [48] 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称: 時間反転×並進対称性に保護されたマグノンディラック表面状態と電場応答, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.
- [49] 田村健祐, 白井達彦, 桂法称, 田中宗, 戸川望: イジングマシンにおける整数バイナリ変換の性能比較, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.
- [50] 赤城裕: 実空間表現によるボゾン系の  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル不変量, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

## 招待講演

- [51] 桂 法称: 量子開放系の問題へのマヨラナ・フェルミオンの応用, 第 12 回トポロジー連携研究会「マヨラナ励起の実証に向けて」, 2018 年 11 月, 東京工業大学.
- [52] 吉岡信行: ニューラルネットワークによる物理状態の分類と表現に関する理論的研究, 日本物理学会第 75 回年次大会 若手奨励賞受賞講演, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

## (セミナー)

- [53] 吉岡信行: Representation of Quantum Many-body Systems by Neural Networks, TQM seminar, 2019 年 4 月, OIST.
- [54] 桂 法称: Fradkin, Fredkin, or Fridkin?, 統計力学 seminar, 2019 年 5 月, 東京大学.
- [55] 吉岡信行: 物性物理における機械学習, Graph Neural Network の最前線, 2019 年 6 月, NestHongo.
- [56] 近藤寛記: マグノン系の  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル相と表面状態, ASRC Seminar, 2019 年 6 月, JAEA.
- [57] 桂 法称: 磁性体におけるマグノンの熱ホール効果, 応用物理学談話会, 2019 年 6 月, 名古屋大学.
- [58] 吉岡信行: Designing neural networks for stationary states in open quantum many-body systems, Theoretical Quantum Physics Laboratory Seminar, 2019 年 7 月, 理化学研究所.
- [59] 桂 法称: マグノン系・量子スピン系とトポロジカル不変量, 新学術領域「次世代物質探索の離散幾何学」2019 年度第 1 回領域会議および研究成果発表会, 2019 年 8 月, 名古屋大学.
- [60] 吉岡信行: Designing neural networks for representation of many-body spin systems, Informal Seminar, 2019 年 9 月, 東京大学.
- [61] 桂 法称: 格子上のフェルミオン系の話題, QCD Club, 2019 年 10 月, 慶応大学.
- [62] 桂 法称: Integrable dissipative spin chains, 量子物理学・ナノサイエンスセミナー, 2020 年 1 月, 東京工業大学.
- [63] 吉岡信行: “ニューラル物性物理”, ASRC Seminar, 2019 年 11 月, JAEA.

# 1 Katsura Group

**Research Subjects:** Condensed Matter Theory and Statistical Physics

**Member:** Hosho Katsura and Yutaka Akagi

In our group, we study various aspects of condensed matter and statistical physics. In particular, our research focuses on strongly correlated many-body systems in and out of equilibrium, which would give rise to a variety of novel phases and dynamics. We study theoretically such systems, with the aim of predicting intriguing quantum phenomena that have no counterpart in weakly-interacting systems and cannot be understood within standard approaches. Our work involves a combination of analytical and numerical methods. We are currently interested in (i) topological phases of matter, (ii) low-dimensional correlated systems, (iii) dissipative quantum many-body systems, (iv) non-ergodic dynamics in non-integrable systems, and (v) application of machine learning. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2019 are the following:

- Topological phases of matter
  - Three-dimensional topological magnon systems characterized by  $\mathbf{Z}_2$  topological invariants [1]
- Low-dimensional correlated systems
  - Ferromagnetism in the  $SU(n)$  Hubbard model with a nearly flat band [2]
  - Haldane phase in the spin-1 Bose-Hubbard model with a flat band [3]
- dissipative quantum many-body systems
  - Constructing neural stationary states in open quantum many-body systems [4]
  - Exact analysis of dissipative spin chains using a mapping to non-Hermitian models [5, 6]
- Mathematical and statistical physics
  - Constructing an infinite sequence of non-integrable models exhibiting perfect quantum many-body scars [8]

- [1] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **100**, 144401 (2019) [Editors' Suggestion].
- [2] Kensuke Tamura and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **100**, 214423 (2019).
- [3] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura, Preprint, arXiv:2003.01705 (2020).
- [4] Nobuyuki Yoshioka and Ryusuke Hamazaki, Phys. Rev. B **99**, 214306 (2019) [Featured in Physics, Editors' Suggestion].
- [5] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **99**, 174303 (2019).
- [6] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **99**, 224432 (2019).
- [7] Shane Dooley, Graham Kells, Hosho Katsura, and Tony C. Dorlas, Phys. Rev. A **101**, 042302 (2020).
- [8] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura, Phys. Rev. Lett. **124**, 180604 (2020) [Editors' Suggestion].