

2018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に関する数理物理学的研究も行っている。

1.1.1 強相関系

Kitaev スピン液体における光学応答

Kitaev 模型は、ハニカム格子に定義されるスピン $1/2$ の量子スピン系で、スピン間には方向に依存したイジング的な相互作用が働く。この模型は、局所的保存量の存在に着目することで、自由フェルミオン系に帰着させることができ、そのため任意の固有状態を求めることができるという特筆すべき性質を持つ。また、その励起は粒子と反粒子が同一となるマヨラナフェルミオンによって記述されるため、注目を集めている。Kitaev 模型の相互作用項は、通常のスピン系としては不自然なものだが、Jackeli と Khaliullin は、Ir 酸化物などのスピン・軌道相互作用の強い系では、そのような項が、スピンと軌道モーメントの合成からなる擬スピン間の相互作用として自然に現れることを示した。このことを契機に、Kitaev 模型に近い現実の物質の探索が進展している。

桂は、東大理物の Bolens・宮下・小形と、そのような Kitaev 物質の中でも最も精力的に研究が行われている、 α -RuCl₃ における最近の実験結果に着目した。Little らは、この物質のテラヘルツ領域での光学伝導度に、スピン自由度に起因すると考えられる寄与があることを指摘している [A. Little *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 227201 (2017)]。これを理解するため、まず多軌道 Hubbard 模型から出発し、局所的電気分極をスピン自由度で表す表式を導出した。この表式は、Kitaev 模型だけに限らず、その他の補正項が存在する場合にも適用できるものである。次に求めた表式を用いて、Kitaev 模型の面内の光学伝導度を調べた。この場合には、自由フェルミオン系へのマッピングを用いることで、光学伝導度を（数値的に）厳密に計算することができる。これにより、観測されている低エネルギー領域における光学伝導度の

スペクトルを定性的に説明できることを示した。これらの結果は、原著論文にまとめられ [1]、国際会議などで発表された [27]。

相互作用するマヨラナフェルミオン系の基底状態

Kitaev により考案された 1 次元 p 波超伝導体の模型 (Kitaev 模型) は、そのトポロジカル相でマヨラナフェルミオンの端状態が現れることから、トポロジカル超伝導体の典型例として注目を集めている。桂は以前、この Kitaev 模型に最近接相互作用を導入した模型について調べ、フラストレーション・フリーと呼ばれる条件を満たす場合には基底状態が厳密に求まることを示した [H. Katsura, D. Schuricht, and M. Takahashi, Phys. Rev. B **92**, 115137 (2015)]。今年度、桂は、Utrecht 大 (オランダ) の Wouters, Schuricht とともに、この模型を非一様なオンサイト・ポテンシャルを含む場合に拡張した。また、この模型についても、(i) 基底状態 (周期系) のトポロジカル数が非自明であること、(ii) 縮退した二つの基底状態の厳密な表式、(iii) エネルギーギャップの存在、(iv) 縮退した二つの基底状態の間を結ぶマヨラナ演算子の具体形、などを明らかにした。また、この模型と非一様磁場中の XYZ および XXZ スピン鎖との関係についても詳しく議論した。これらの結果は、原著論文 [4] にまとめられ、国内学会などで発表された [48, 58]。

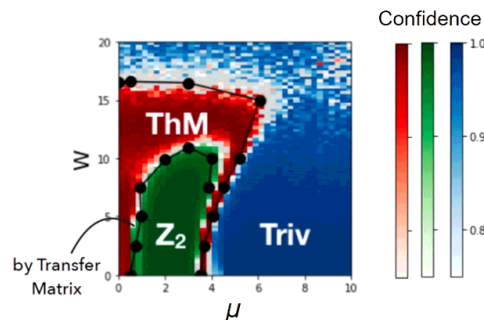


図 1.1.1: 機械学習により得られた、乱れの強さ W と化学ポテンシャル μ に対する相図。Z₂, Triv, ThM は、それぞれトポロジカル超伝導相、自明相、thermal metal 相の各相を表し、色の濃さは確信度を表す。実線は、転送行列法によって得られた独立な結果を示す。

1.1.2 トポロジカル系

乱れたトポロジカル超伝導体における対称性の統計的回復による学習と分類

非従来型超伝導体の中でも、特に波動関数のもつトポロジカルな性質により特徴付けられるトポロジカ

ル超伝導体は、基礎から応用まで様々な観点から注目を集めている。代表的な候補物質である $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ や $\text{FeTe}_x\text{Se}_{1-x}$ では、試料表面や接合界面での、2次元なトポロジカル超伝導相の実現が報告されている。これらは、時間反転対称性を保ち、かつスピン回転対称性をもたないクラス DIII に属するとされる。このような実験的進展を鑑みると、クラス DIII の2次元系を理論的に調べることに大きな意義がある。一方で、乱れの存在下では、従来のトポロジカル不変量の公式が適用できないことが知られている。

吉岡・赤城・桂は、画像認識などで特に有効性の認められている、ニューラルネットワークの手法と、並進対称な場合のトポロジカル不変量の結果を組み合わせることで、乱れの存在下での相判定を行った。ランダムポテンシャルを導入すると、並進対称性は一般に失われ、例えば準粒子分布などの局所的な量に、空間的非一様性が現れるが、いくつもの分布に関して平均をとると、失われた対称性が「統計的に」回復する。従って、乱れない極限で構築した、準粒子分布に関する分類器を適用することが可能となる。この手法で作成された相図(図 1.1.1)は、転送行列法・非可換幾何による手法と整合することが示された。さらに、本研究で提案された手法は、従来の手法では扱えないような、より一般的な格子上でも適用が可能である。これらの結果は、国際学会等 [17, 54] で発表されたほか、原著論文 [2] にまとめられた。

ノードを伴う 3 次元カイラル超伝導体における内因性熱ホール効果

時間反転対称性の自発的な破れに起因して、クーパ対が有限の角運動量を持つものを、「カイラル超伝導体」と呼ぶ。超伝導性と有限磁化の共存というエキゾチックな性質を示すカイラル超伝導性に関して、検証方法が複数考案されている。中でも決定的証拠としての役割を期待されているのが、自発的な熱ホール効果、すなわち磁場印加のない状況で熱勾配に対し垂直方向に温度差を生ずる現象の観測である。

現在知られている 3 次元カイラル超伝導体の候補物質の内因性熱ホール効果を議論する上で重要なのが、ノードの影響である。ノードとは、準粒子スペクトルにおいてギャップの閉じる点もしくは領域を指す。例えば点ノードが存在する場合には、2次元のトポロジカル不変量であるチャーン数が第三方向に関して空間依存性を持つ。そのため、内因性熱ホール係数は量子化されない一方で、ブリルアンゾーンにおけるノード間距離に比例する。吉岡と岡山理科大学の今井、チューリッヒ工科大の Sigrist は、このことを数値的に確認した。さらに、温度に関する高次項を考慮すると、準粒子スペクトルのノード周辺における分散を反映した補正が加わることを示した。さらに両者を組み合わせたことにより、ペアリングに強力な制限を課すことが可能であることを明らかにした。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。

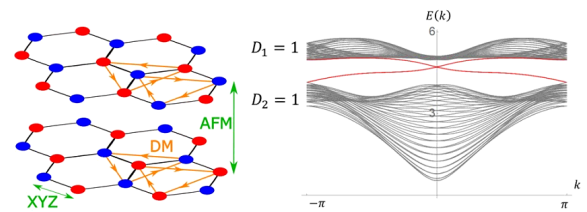


図 1.1.2: (左図) マグノンスピンホール系の模式図。二層のハニカム格子上の反強磁性体からなる。(右図) バルクおよびヘリカルエッジ状態のエネルギー分散。 D_1, D_2 は、対応する \mathbf{Z}_2 トポロジカル不変量。

マグノンスピンホール系における \mathbf{Z}_2 トポロジカル不変量

電子系において様々な成果をもたらしたトポロジカル絶縁体の研究は、ボゾン系にも波及している。その一例として、磁性体におけるボゾンの素励起であるマグノンによる熱 Hall 効果が理論・実験両面から盛んに研究されている。また、マグノン系におけるスピンホール効果の対応物が理論的に提案されているものの、ボゾン系における時間反転対称性が Kramers 対の存在を保証しないことから、この系の相をトポロジカル不変量によって特徴づけるという研究は現在までなされてこなかった。

近藤・赤城・桂は、このようなボゾン系においても Kramers 対の存在を議論できるような擬時間反転演算子を導入し、その対称性に基づいてマグノンスピンホール系の \mathbf{Z}_2 トポロジカル不変量を定義した。また、2つのマグノンスピンホール系のモデルを構築し、トポロジカル数と系のヘリカルエッジ状態の有無との対応関係を議論した(図 1.1.2)。このうちの1つは、マグノンスピンホール系の文脈では議論されてこなかった、スピン非保存項をもつモデルである。これらの結果は、国内外の学会 [15, 18, 20, 22, 30, 31, 34, 38, 43, 46, 56] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。また、近藤は、これらの結果を修士論文としてまとめた [12]。

非エルミート Kitaev 模型とその端状態

トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類は、近年では非エルミート系への拡張され、それらの系を特徴づけるトポロジカル数や端状態などが議論されている。桂は、東大理物の川畑・蘆田・上田とともに、トポロジカル超伝導体の典型例である Kitaev 模型に、非エルミート性を導入した系について調べた。この系では、両端に複素のポテンシャルが課されており、これによりエルミート性は破れているが、系全体は PT (パリティ・時間反転) 変換のもとで不変である。この複素ポテンシャルの大きさ γ がゼロの場合には、系を記述するハミルトニアンはエルミートで、マヨラナ・ゼロモードの存在するトポロジカル相と存在しない自明相の2つに分かれる。 γ が小さい場合に

は、ハミルトニアンは非エルミートであるが固有値は全て実であり、PT 対称性は破れていない。この場合には、相似変換により、ハミルトニアンをエルミートなものにマップできるが、我々はそのような相似変換をあらわに求めた。一方、 γ がしきい値を超えると複素固有値が現れ、PT 対称性は破れる。この場合には、固有値をシフトするモードが端に局在しており、これにより複素固有値が現れることを明らかにした。これらにより、この系では、マヨラナ・ゼロモードの有無、複素シフトモードの有無に応じた4つの異なる相が現れることが分かった。これらの結果は、原著論文 [3] にまとめられた。

1.1.3 可解模型・統計力学

スピン 2 Bose-Hubbard 模型についての厳密な結果

光学格子上に閉じ込められたスピン自由度をもつアルカリ原子系は、相互作用の効果により多彩な相を実現することが期待されている。このような系を記述する有効模型として、スピン自由度をもつ Bose-Hubbard 模型がよく知られている。しかし、強相関電子系の標準的な模型である (Fermi-)Hubbard 模型に比べて、この模型について厳密に示されている結果は少なく、先行研究でのスピン 1 の Bose-Hubbard 模型に対する結果などに限られている [H. Katsura and H. Tasaki, Phys. Rev. Lett. **110**, 130405 (2013)]。

Yang と桂は、スピン 2 の Bose-Hubbard 模型の基底状態に関する厳密な結果を新たに導出した。この模型には、スピンに依存する相互作用が 2 種類存在する。これらの相互作用の係数に応じて、基底状態は (i) 強磁性状態、(ii) スピン一重項 or 五重項状態、(iii) SU(5) 強磁性状態、となることを、Perron-Frobenius の定理などを用いて示した。また、特に (ii) に対応する場合には、ハミルトニアンに SO(5) 対称性があることを明らかにした。結果は、空間次元や格子構造、粒子数によらず普遍的に成り立つものである。これらの結果は、国際学会等 [24, 40] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。

一般化イジング模型のボルツマン機械への変換

近年の機械学習の目覚ましい成功に触発され、ニューラルネットワークによる物理状態の表現に関する研究が数多く行われている。特に、量子多体系の基底状態・励起状態・時間発展などへのボルツマン機械の応用が急速に進む一方で、古典系における応用可能性については、ほとんど調べられていない。新しく登場した変分関数の表現能力を包括的に理解するためには、古典系への適用を議論することが不可欠である。吉岡・赤城・桂は、バイナリ変数に関するボルツマン因子の代数変形によって、任意の一般化イジング模型と等価なボルツマン機械を構築可能であることを示した。言い換えれば、補助的なイジング自由度を適切に導入すると、二体相互作用のみ

を用いて元の多体相互作用を表現できることを、具体的な構成法とともに示した。

さらに吉岡らは、上記の変換をモンテカルロ・シミュレーションに応用し、その計算効率を議論した。一般に、多体相互作用を含む系に対してクラスター更新法を適用することはできないが、二体相互作用のみを用いて記述される場合には、従来の手法が適用できる。特に、二体相互作用および三体相互作用を含むカゴメ格子上的模型について、この手法を用いることで、強磁性-常磁性相転移近傍における臨界減衰を大幅に緩和できることを数値的に示した。以上の成果は、原著論文として [10] にまとめられたほか、国内外の学会などで発表された [16, 19, 39, 57]。

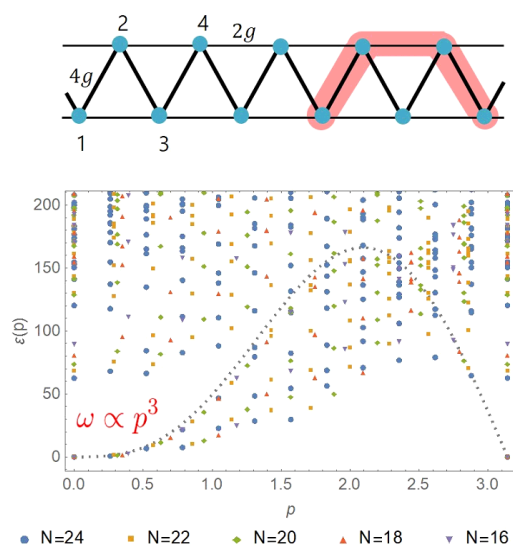


図 1.1.3: Majorana-Nicolai 模型の模式図 (上図) と、厳密対角化により求めた $g = 8.0$ の場合の低エネルギー励起の分散関係 (下図)。波数 $p = 0$ の近傍では、 p^3 に比例する分散関係が見られる。

$\mathcal{N} = 1$ 超対称性の破れと南部・ゴールドストーンフェルミオン

連続的かつ大域的な内部対称性の自発的な破れにともない、南部・ゴールドストーンボゾンと呼ばれるギャップレスな励起モードが現れることが知られている。近年、非相対論的な系での自発的対称性の破れと南部・ゴールドストーンボズンの関係が大きな注目を集めている。また、相対論的な系ではフェルミオンの対称性である超対称性の破れに伴って、南部・ゴールドストーンフェルミオンと呼ばれる励起モードが現れることが知られている。しかし、非相対論的な系での超対称性の破れおよび、それに伴う励起モードに関して包括的な理解に至っていない。

三ノ宮と桂は、Majorana-Nicolai 模型という $\mathcal{N} = 1$ の超対称性を有する $(1+1)$ 次元の格子フェルミオン

ン模型を導入し、その性質を超対称性の破れの観点から調べた。具体的には、数学的および数値的手法を用いて、有限系および無限系でも超対称性が自発的に破れる場合があり、この時には自発的な超対称性の破れに伴ってギャップレスな励起モードが出現することを示した。また、有限系では超対称性が破れるにも関わらず、無限系では超対称性が回復することがあることを数値計算により示した。さらに、超対称性が破れない場合には相互作用があるにも関わらず、解析的に基底状態を計算できることを示した。これらに加えて、超対称性の破れに伴うギャップレス励起が波数の3乗に比例する分散関係をもつことを厳密対角化により示した (図 1.1.3)。これらの結果は原著論文 [9] としてまとめられたほか、国内外の学会で発表された [23, 44]。

Wishart 型 Sachdev-Ye-Kitaev 模型とその性質

Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型は、フェルミオン間にランダムな4体相互作用が働く模型で、AdS/CFT 対応のトイモデルとしても近年注目を集めている。この系では、粒子数 N が大きい極限で、out-of-ordered-time correlator (OTOC) と呼ばれる相関の減衰率が理論上の最大値を取る。このことから、この系は最大カオスのとも呼ばれている。桂と伊與田・沙川 (東大物工) は、この SYK 模型の亜種として、乱れない場合を含む Wishart-SYK 模型と呼ばれるクラスの模型を新たに構成した。また、フェルミオン系、ハードコア・ボゾン系それぞれの拡張において、基底状態の縮退度は、粒子数に対して指数関数的に増大することを示した。このことは、残留エントロピーが示量的であることを意味する。さらに、この系の OTOC の振る舞いを、フェルミオン・ボゾンの場合についてそれぞれ数値的に調べた。その結果、フェルミオン系の場合には、OTOC は長時間平均の周りに大きな時間ゆらぎを示すことを明らかにした。このことは、OTOC が時間的に滑らかに変化する元々の SYK 模型とは対照的である。この現象の原因はまだ明らかになっていないが、基底状態の巨視的縮退が効いているのではないかと考えられる。我々はさらに、これらの模型の準位統計を調べ、フェルミオン系の場合にはポアソン分布であることを明らかにした。このことは、系が可積分であることを示唆するが、実際に、フェルミオン系の Wishart SYK 模型は、適切な変換により、Richardson-Gaudin 模型と呼ばれる、既知の量子可積分系にマップできることを示した。これらの結果は、原著論文 [5] にまとめられた。

1.1.4 その他

赤城は、非可換幾何の手法を用いて、乱れのあるマグノンホール系における Chern 数に対応するトポロジカル不変量を定義した。フェルミオン系では見られなかった特有の数学的性質 (非エルミート性) に注意し、ボゾン系における“フェルミ”射影演算子を

導入することで、自然な拡張に成功した。定義の妥当性を確かめるため、乱れのあるマグノンホール系を記述する2次元スピアイス模型に適用したところ、乱れない極限での Chern 数と整合的な結果が得られた。これらの結果は、国内外の学会で発表された [14, 37, 41, 46, 55, 59]。

赤城・吉岡・桂は、教師なし学習の一手法であるオートエンコーダを用いて、様々な量子スピン鎖の量子相を判定した。顕著な結果として、対称性に守られたトポロジカル相である Haldane 相と自明相である large- D 相間の相転移の検出に成功した。この相転移は、局所的な秩序変数の変化では特徴付けられないと従来考えられているが、入力データとして4サイト程度までの相関関数を用いても検出できた点は興味深い。これらの結果は、国内外の学会で発表された [21, 32, 36, 42, 45, 49]。

桂と柴田は、量子コンパス模型と呼ばれるスピン鎖に散逸が加わった場合のダイナミクスを、Lindblad 方程式を厳密に解析することで調べた。特に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。また端スピンの自己相関関数を組み合わせ論的手法を用いて調べた。これらの結果は、国内外の学会で発表された [25, 50]。また、柴田の修士論文としてまとめられている [13]。

平坦バンド系は強磁性や分数量子ホール効果などの観点から興味を持たれており、また近年では冷却原子系や光学系を用いた実現も話題を集めている。田村と桂は、平坦あるいはほとんど平坦なバンドをもつ Hubbard 模型における強磁性に関する厳密な結果を、 $SU(n)$ 対称性をもつ Fermi-Hubbard 模型に拡張した。この結果は、国内学会で発表された [47]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita: Mechanism for subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials, *Phys. Rev. B* **97**, 161108(R) (2018).
- [2] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Learning disordered topological phases by statistical recovery of symmetry, *Phys. Rev. B* **97**, 205110 (2018) (Editors' Suggestion).
- [3] Kohei Kawabata, Yuto Ashida, Hosho Katsura, and Masahito Ueda: Parity-time-symmetric topological superconductor, *Phys. Rev. B* **98**, 085116 (2018) (Editors' Suggestion).
- [4] Jurriaan Wouters, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht: Exact ground states for interacting Kitaev chains, *Phys. Rev. B* **98**, 155119 (2018).
- [5] Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa: Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models, *Phys. Rev. D* **98**, 086020 (2018).
- [6] Nobuyuki Yoshioka, Yoshiki Imai, and Manfred Sgrist: Spontaneous Thermal Hall Effect in Three-dimensional Chiral Superconductors with Gap Nodes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 124602 (2018).

- [7] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: \mathbf{Z}_2 topological invariant for magnon spin Hall systems, *Phys. Rev. B* **99**, 041110(R) (2019).
- [8] Hong Yang and Hosho Katsura: Rigorous Results for the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 053401 (2019).
- [9] Noriaki Sannomiya and Hosho Katsura: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in interacting Majorana chains, *Phys. Rev. D* **99**, 045002 (2019).
- [10] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Transforming generalized Ising models into Boltzmann machines, *Phys. Rev. E* **99**, 032113 (2019).
- (国内雑誌)
- [11] 赤城裕: 機械学習によるトポロジカル相転移の検出, 「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」NEWSLETTER No. 4, コラム記事.
- (学位論文)
- [12] 近藤寛記: Topological invariants and surface states in magnon systems (修士論文).
- [13] 柴田直幸: Exact solutions of quantum spin models with dissipation (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] Yutaka Akagi: Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder, *International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics*, Tokyo, Japan, June 2018.
- [15] Hiroki Kondo: \mathbf{Z}_2 Topological Invariant for Magnon Spin Hall Systems, *International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics*, Tokyo, Japan, June 2018.
- [16] Nobuyuki Yoshioka: Cluster updating classical spin systems by equivalent Boltzmann machines, *Machine Learning for Quantum Many-body Physics*, Dresden, Germany Jun. 2018.
- [17] Nobuyuki Yoshioka: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *Machine Learning for Quantum Many-body Physics*, Dresden, Germany Jun. 2018.
- [18] Hiroki Kondo: \mathbf{Z}_2 topological invariant for magnon spin Hall systems, *BEC2018X*, Tokyo, Japan, Nov. 2018.
- [19] Nobuyuki Yoshioka: Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine, *At the Crossroad of Physics and Machine Learning*, California, USA, Feb. 2019.
- [20] Hiroki Kondo: \mathbf{Z}_2 topological invariant for magnon spin Hall systems, *Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2019 (TPFC2019)*, Kashiwa, Japan, Feb. 2019.
- [21] Yutaka Akagi, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura: Detection of Phase Transitions in Quantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [22] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: \mathbf{Z}_2 topological invariant for magnon spin Hall systems, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [23] Noriaki Sannomiya and Hosho Katsura: Spontaneous SUSY breaking and NG modes in interacting Majorana chains, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [24] Hong Yang and Hosho Katsura: Rigorous Results for the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [25] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Exact solutions of dissipative quantum spin chains using Majorana fermions, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [26] Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa: Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- 招待講演
- [27] Hosho Katsura: Majorana excitations in Kitaev spin liquids, *SAMAHANG PISIKA NG PILIPINAS Physics Society of the Philippines*, Puerto Princesa, Philippines, Jun. 2018.
- [28] Hosho Katsura: Fradkin, Fredkin or Fridkin?, *EXACTLY SOLVABLE QUANTUM CHAINS*, Natal, Brazil, Jun. 2018.
- [29] Hosho Katsura: Sine-square deformation of one-dimensional critical systems, *Integrable systems in Condensed Matter / Statistical Physics*, Bangalore, India, Aug. 2018.
- [30] Hosho Katsura: \mathbf{Z}_2 topological invariants of fermionic and bosonic insulators, *Progress in the Mathematics of Topological States of Matter*, Sendai, Japan, Aug. 2018.
- [31] Hosho Katsura: \mathbf{Z}_2 invariant for topological magnon insulators, *Quantum Magnetism: Frustration, Low-dimensionality, Topology*, Beijing, China, Sept. 2018.
- [32] Yutaka Akagi: Detection of Phase Transition in Quantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning, *Mini-workshop on "Machine Learning in Physics"*, Tokyo, Japan Sept. 2018.

- [33] Hosho Katsura: Fradkin, Fredkin, or Fridkin?, *Exactly Solvable Models of Quantum Field Theory and Statistical Mechanics*, Stony Brook, US, Nov. 2018.
- [34] Hosho Katsura: \mathbf{Z}_2 invariants for disordered topological insulators and superconductors, *Theoretical studies of topological phases of matter*, Tokyo, Japan, Feb. 2019.
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 赤城裕: 機械学習を用いた多体系トポロジカル相の探求, 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募研究キックオフミーティング, 2018年6月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [36] 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称: 教師無し学習による量子スピン鎖の相判定, 量子情報・物性の新潮流 -量子技術が生み出す多様な物性と情報処理技術-, 2018年8月, 東京大学物性研究所.
- [37] 赤城裕: 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [38] 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称: マグノンスピンホール系における \mathbf{Z}_2 トポロジカル不変量, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [39] 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称: フラストレート・スピン系と等価なボルツマン機械による大域的更新法, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [40] Hong Yang, Hosho Katsura: Rigorous Results for the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [41] 赤城裕: 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量, 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 2018年11月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [42] 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称: 教師無し学習による量子スピン鎖の相転移検出, 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 2018年11月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [43] 近藤寛記: マグノンスピンホール系における \mathbf{Z}_2 トポロジカル不変量, 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 2018年11月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [44] 三ノ宮典昭: 格子フェルミオン模型における超対称性の破れと南部・ゴールドストーンフェルミオン, 2018年金沢大学量子ダイナミクス研究会, 2018年12月, 金沢大学.
- [45] 赤城裕: 教師無し学習による量子スピン鎖の相転移検出, 第4回 TMS 領域研究会 (TMS2019), 2019年1月, 名古屋大学.
- [46] 赤城裕: マグノン系トポロジカル相とその不変量, 第八回「強相関電子系理論の最前線」, 2019年2月, 熱海.
- [47] 田村健祐, 桂法称: $SU(n)$ Hubbard 模型における強磁性, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [48] 桂法称, Jurriaan Wouters, Dirk Schuricht: 縮退した基底状態をもつ非一様な XXZ スピン鎖, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [49] 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称: 教師無し学習による量子スピン鎖の相転移検出, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [50] 柴田直幸, 桂法称: 厳密に解ける散逸のあるスピン鎖とその端スピンの動的相関関数, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [51] 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称: 3次元 \mathbf{Z}_2 トポロジカルマグノン系とその表面ディラック状態, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- 招待講演
- [52] 桂法称: 量子ハングル (Quantum Hangel), 物性理論のフロンティアと社会への展開, 2018年5月, 東京大学.
- (セミナー)
- [53] 赤城裕: 量子スピンネマティック相におけるトポロジカル励起とそのシミュレーションのための効率的なスピンフリップ, 理論物理学セミナー 2018年5月, 東京理科大学.
- [54] 吉岡信行: Machine Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, BEC セミナー 2018年6月, 筑波大学.
- [55] 赤城裕: Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder, Seminar 2018年8月, 沖縄科学技術大学院大学.
- [56] 桂法称: \mathbf{Z}_2 invariant for topological magnon insulators, Topological Science Seminar 2018年11月, 慶應大学.
- [57] 吉岡信行: Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine, 統計力学セミナー 2018年12月, 東京大学.
- [58] 桂法称: Topological order and zero modes in interacting Kitaev/Majorana chains, Particle Physics Theory Group Seminars, 2019年1月, 大阪大学.
- [59] 赤城裕: Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder, Seminar 2019年3月, 京都大学基礎物理学研究所.

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 which would give rise to a variety of interesting phases. We study theoretically such systems, with the aim of predicting novel quantum phenomena that have no counterpart in weakly-interacting systems. We are currently interested in (i) topological phases of matter, (ii) low-dimensional correlated systems, (iii) magnetism in Bose and Fermi Hubbard models, and (iv) 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 2018 are the following:

- Strongly correlated systems
 - Subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials [1]
 - Nambu-Goldstone fermions in interacting Majorana-fermion chains [2]
 - Topological order in interacting Kitaev/Majorana chains [3]
- Topological phases of matter
 - Machine learning phases of disordered topological superconductors [4]
 - Thermal Hall effect in chiral superconductors with gap nodes [5]
 - \mathbf{Z}_2 topological invariant for magnon spin Hall systems [6]
 - Zero and shift modes in a non-Hermitian Kitaev chain with parity-time symmetry [7]
- Mathematical and statistical physics
 - Rigorous results for the ground states of the spin-2 Bose-Hubbard model [8]
 - Algebraic transformations of generalized Ising models and Boltzmann machines [9]
 - Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models [10]

- [1] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, *Phys. Rev. B* **97**, 161108(R) (2018).
- [2] Noriaki Sannomiya and Hosho Katsura, *Phys. Rev. D* **99**, 045002 (2019).
- [3] Jurriaan Wouters, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht, *Phys. Rev. B* **98**, 155119 (2018).
- [4] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. B* **97**, 205110 (2018).
- [5] Nobuyuki Yoshioka, Yoshiki Imai, and Manfred Sigrist, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 124602 (2018).
- [6] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. B* **99**, 041110(R) (2019).
- [7] Kohei Kawabata, Yuto Ashida, Hosho Katsura, and Masahito Ueda, *Phys. Rev. B* **98**, 085116 (2018).
- [8] Hong Yang and Hosho Katsura, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 053401 (2019).
- [9] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. E* **99**, 032113 (2019).
- [10] Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa, *Phys. Rev. D* **98**, 086020 (2018).