

2020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

ほぼ平坦なバンドを持つ d 次元 $SU(n)$ Hubbard 模型における強磁性

近年、冷却原子系において n 成分の内部自由度を持ち $SU(n)$ 対称性を持つフェルミオン系の実現が報告されている。このような系は強相関電子系を記述する模型である $SU(2)$ Hubbard 模型の一般化である $SU(n)$ Hubbard 模型で記述される。この模型は理論的な興味を集める一方、 $SU(2)$ Hubbard 模型と比べて厳密に確立された結果は少ない。知られている厳密な結果の中に平坦バンド強磁性の $SU(n)$ への拡張がある。平坦バンド強磁性とは一体のエネルギー準位の巨視的な縮退に由来して多体系の基底状態が強磁性を示すことである。 $SU(2)$ の場合、さらに摂動を加えバンド構造が分散を持つ場合の強磁性に関する厳密な結果も任意の次元に対して得られている。一方で摂動を加えた場合の結果の $SU(n)$ への拡張は1次元に限られ、高次元における結果は得られていなかった。

田村と桂は、任意の次元 d (≥ 2) において、最低バンドがわずかに分散を持つような $SU(n)$ Hubbard 模型の強磁性に関して厳密に成り立つ結果を確立した。我々はまず完全に平坦なバンドを持つ場合の強磁性に関する定理を証明した。そしてそこに摂動項を加えた模型を議論した。この時、バンドギャップと相互作用が十分大きくホッピング項のパラメータが n および d に依存した閾値より小さい状況で強磁性を示すことを証明した。これらの結果は、国際会議等 [22, 33] で発表されたほか、原著論文 [13] にまとめられた。

量子スピン鎖における非線形 Drude 重み

輸送現象は凝縮系物理学における最も重要なテーマの1つとして、これまで精力的に研究されてきた。一方で、これまでの理論的なアプローチは線形応答理論に基づくものや自由粒子系に対するものが主で、強い外場下における強相関系の非線形輸送現象については、いまだに体系的な理解は得られていない。しかし最近、[H. Watanabe and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **102**, 165137 (2020)] において非線形輸送に関する「非線形 Drude 重み」という量が新たに導入された。この量は、伝導性の指標として重要な役割を果たしてきた線形 Drude 重みの自然な拡張であり、非線形輸送特性に関して有益な情報をもたらすものとして期待されている。

谷川・桂と高三 (UC Berkeley) は、典型的な相互作用系であるスピン $1/2$ XXZ 鎖の絶対零度における非線形 Drude 重みを厳密に解析し、熱力学的極限で発散するパラメータ領域の存在を明らかにした。これは線形 Drude 重みには見られない興味深い特徴である。また、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用や外部磁場が及ぼす影響についても調べた。さらに、この発散の起源が基底状態エネルギーに対する非解析的な有限サイズ補正であることを解明し、それに基づいて発散を伴うパラメータ領域と発散の強さを特定することにも成功した。これらの結果は、国内会議 [40] で発表されたほか、プレプリント [17] にまとめられた。

1.1.2 トポロジカル系

スピン自由度をもつ遍歴ボゾン系における対称性に守られたトポロジカル相

スピン自由度をもつ遍歴ボゾン系の対称性に守られたトポロジカル相 (SPT 相) に関する研究を行った。SPT 相に関する研究は、先行研究では電子系や量子スピン系に関するものが主で、遍歴ボゾン系に関するものはあまりない。これは、ボゾンのスピン自由度と「電荷」自由度の両方を同時に取り扱うことが理論的には難しいためである。一方で、冷却原子系においては、むしろそのような状況が標準的である。このギャップを埋めるべく、Yang・中野 (東大理物・藤堂研)・桂は、Bose-Hubbard 模型の範囲内で、種々のボゾンの SPT 相を実現できることを理論的に提案した。鍵となるのは、一粒子ハミルトニアンが平坦バンドと呼ばれる縮退した基底状態をもつ点である。この性質を用いて様々な数学的に厳密な結果を導出した。また1次元系については、可解な場合から少しずれた状況についても、摂動論や数値計算により解析し、SPT 相の安定性を議論した。

これらの結果は、国際会議等 [23, 32] で発表されたほか、プレプリント [6] にまとめられた。

マグノン Bogoliubov-de Gennes 系の非エルミート・トポロジカル相

近年、物質中の電子の波動関数のトポロジーに基づいた物質相の提案や分類が盛んにおこなわれている。特に重要なものはトポロジカル絶縁体と呼ばれるものであり、それらの物質においては、スピン軌道相互作用などによって電子の波動関数がヒルベルト空間の中で非自明なトポロジーを生じ、それによって時間反転対称性によって保護された頑強な金属的状态が表面のみに現れる。このような新しい物質相の研究は、電子系のみならずフォトンやフォノン、マグノンといったボース粒子系にも波及している。

近藤・赤城・桂は、ボゾン Bogoliubov-de Gennes (BdG) 系における非エルミート性に着目してマグノンのトポロジカル相の研究をレビューした [10]。このレビューでは、電子系における量子ホール効果から量子スピンホール効果、それに続く 3 次元トポロジカル絶縁体の研究に触れた後、対応するマグノン系の研究をまとめた。マグノン系においては、Kramers 縮退を生じるようなフェルミオンの対称性（擬時間反転対称性）を導入することで 2 次元及び 3 次元トポロジカル絶縁体の対応物を構築し、その対称性の議論について詳しく述べた。これらのマグノン系は粒子数の保存しないペアリング項を含んだ BdG ハミルトニアンによって記述されるが、このような系はフェルミオン系にはなかった数学的構造（非エルミート性）を有する。レビューでは非エルミート系におけるトポロジカル相の分類の研究についても触れ、上記のマグノン系がどの分類に属するのかや、具体的にどのようなトポロジカル数で特徴づけられるのかなどもまとめた。

結晶対称性に保護されたマグノンの表面状態

電子の波動関数のトポロジーに由来して、時間反転などの対称性に保護された表面状態が現れるトポロジカル物質はさまざまな種類のものが提案されている。一方、マグノンなどのボゾン系では、時間反転対称性が Kramers 対の存在を保証しないため、この対称性に保護された表面状態は期待できない。フェルミオンの擬時間反転対称性を満たすようにしてマグノンの表面状態を有する磁性体のモデルが提案されているが、そのようなモデルを実現する候補物質は未だ見つかっていない。

近藤と赤城は、時間反転と単位胞の半分の空間並進を組み合わせた対称性は波数空間上のある面において Kramers 対を生じることに着目して、その対称性に保護されたマグノンの表面状態を有する磁性体のモデルを提案した。さらに、提案したモデルが磁性体 CrI_3 で実現される可能性があることを明らかにした。また、この磁性体に電場を加えることで表面状態の分布に不均衡が生じ、結果として電場でマグノン流を駆動することができることを明らかにした。これらの結果は、国際会議 [20] で発表されたほか、プレプリント [12] にまとめられた。

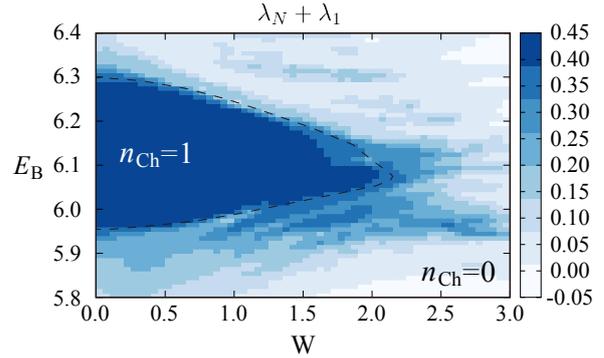


図 1.1.1: 人工的スピンアイス模型における仮想的フェルミレベル E_B 、乱れの強さ W に対する $\lambda_N + \lambda_1$ とトポロジカル不変量 n_{Ch} 。ここで、 λ_N (λ_1) は、2 つの射影演算子の差で定義される演算子 A の最大 (最小) 固有値を表す。点線領域の内側は $\lambda_N > 0.995$ の領域である。

乱れのある Bosonic Bogoliubov-de Gennes 系における非可換指数

大きな成功を収めたフェルミオン自由度に起因したトポロジカル物性の研究はボゾン系にも波及している。特に最近、磁性体におけるボーズ準粒子であるマグノンに関するトポロジカル物性の研究が急激に増加している。一方、ペアリング項を持つような BdG 型のボゾン系には、その統計性に由来した非エルミート性があるため、エルミート系におけるトポロジカル相の分類/特徴付けを直接適用することは出来ない。また、トポロジカル相は乱れに強いとされているが、系に乱れがあると波数が定義できないため、相を特徴付けるトポロジカル不変量を定めることは自明ではない。

そこで赤城は、非可換幾何の手法を用いることで、乱れのあるマグノンホール系における Chern 数に対応する非可換指数を定義した。ここでは、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上記の手法を拡張した。また、この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人工的スピンアイス模型における非可換指数を数値的に調べた。結果として、図 2.1.1 に示すように、clean limit で Chern 数が +1 となるような場合に乱れを導入しても、非可換指数は $n_{\text{Ch}} = +1$ となり、実際に乱れのあるマグノンホール系を特徴付けられることを明らかにした。本手法は、擬時間反転対称性に守られた Z_2 トポロジカル相などの他のクラスへの拡張も可能であり、いくつかの例も示した。これらの結果は、原著論文 [11] にまとめられたほか、Anderson 局在に関する国際研究会 Localisation 2020 での招待講演 [27] をはじめとして、APS March Meeting [26] やセミナー [49, 50] でも発表された。

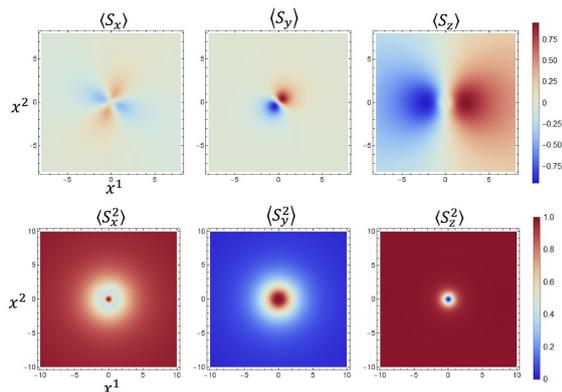


図 1.1.2: 得られた解析解を用いて計算した $S = 1$ スピン演算子の期待値。スキルミオンは、原点を中心として、等方的に広がっている。

Dzyaloshinskii-Moriya 型相互作用によって安定化した CP^2 スキルミオン

近年、様々な系において 2 次元スキルミオンの研究が盛んに行われており、実際にカイラル磁性体、フラストレート磁性体などで実験的に観測されている。一方、 $SU(N > 2)$ 対称性をもつ磁性体中の 2 次元スキルミオンに関する理論的研究も数多くなされている。例えば、 $SU(N)$ 強磁性 Heisenberg 模型は連続極限において CP^{N-1} 非線型シグマ模型となり、この模型における 2 次元スキルミオン解は古くから知られている [V. Golo and A. Perelomov, Phys. Lett. B **79**, 112 (1978)]。しかし、この解は模型のスケール不変性に起因する不安定性をもつ。

赤城と甘利 (JINR)・澤渡 (東京理科大)・Shnir (JINR) は、 CP^2 非線型シグマ模型のスケール不変性を、Dzyaloshinskii-Moriya 型の相互作用項を加えることによって破り、安定な 2 次元スキルミオン解を解析的・数値的に構成した。また、得られた孤立スキルミオン解のエネルギーが、一様な真空解 (スピンネマティック状態) のエネルギーよりも低いパラメータ領域を見出した。これは、得られたスキルミオン (または、それらで構成されたスキルミオン格子) が系の基底状態として現れうることを示唆している。さらに、 $SU(3)$ スピン演算子と $S = 1$ スピン演算子の対応関係を用いて、得られた孤立スキルミオンの持つ磁化ベクトルなどを計算した。図 2.1.2 に示すように、無限遠方では磁気秩序が存在しないにも関わらず、スピン空間の回転対称性が破れており、スピンネマティック状態となっている。一方で、スキルミオンの周りには磁気双極子が現れている。これは、スキルミオンが磁気双極子を誘起することを意味しており、時間反転対称なために観測が難しいスピンネマティック相の (間接的な) 観測の可能性を期待させる結果である。これらの成果は、論文 [16] にまとめられた。

1.1.3 散逸のある量子多体系

散逸のある強相関系のトポロジカルな特徴づけ

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、開放量子系と呼ばれ Lindblad 方程式などのマスター方程式により記述される。近年の開放量子系のエンジニアリングの実験的進展に刺激され、このような散逸のある量子系の理論的研究も進展している。特に、そのような系の有効ハミルトニアンと見なせる、非エルミートなハミルトニアンにより記述される系のトポロジカル相の分類に関する研究が急速に進展している。一方で、Lindblad 方程式の枠組み内での非平衡状態のトポロジカルな特徴づけはあまり議論されてこなかった。

桂と吉田・工藤・初貝 (筑波大) は、系の時間発展の生成演算子 (リウビリアン) の固有演算子に対して、そのトポロジカル不変量を定義する方法を提案した。具体的には、この固有演算子を二重ヒルベルト空間における状態ベクトルとみなし、それに対して擬スピン Chern 数と呼ばれる量を定義した。この量は量子化した値を取るトポロジカル不変量であり、また、散逸がロスのみあるいはゲインのみの場合には、対応する非エルミートなハミルトニアンに対して定義されるトポロジカル不変量に帰着する。このことは、従来の非エルミートな有効ハミルトニアンによるトポロジカルな性質の議論に正当性を与えている。さらに、この新しく導入された不変量の有用性を、二体の粒子ロスのある分数量子ホール系に適用して数値的に実証した。これらの結果は、原著論文 [9] にまとめられた。論文では、他にも位相緩和のある Su-Schrieffer-Heeger 模型のトポロジカルな性質の、Berry 位相を用いた特徴づけについても議論している。

端に散逸のある量子 Ising 鎖

近年、開放量子系は物性物理のみならず量子情報 / 量子計算などの幅広い分野で関心を集めている。Lindblad 方程式は、開放量子系の有効的なダイナミクスを記述する。この方程式はかつては少数系に用いられることが多かったが、近年の量子技術の発展に伴い、Lindblad 方程式を多体系へも適用しようという動きが加速している。一方、可解模型は、複雑な量子多体系を理解する試金石として重要な役割を果たす。近年、開放量子多体系でありながら厳密に解ける模型がいくつか報告されている。

柴田と桂は、新たに可解な開放量子多体系の模型を考案した。これは量子 Ising 鎖の両端に位相緩和と呼ばれる散逸が働く模型であり、適切なマッピングにより、両端に複素ポテンシャルのあるタイト・バインディング模型の問題に帰着する。このマッピングにより、緩和時間の逆数に対応するリウビリアンギャップと呼ばれる量を詳細に調べることができる。その結果、リウビリアンギャップがサイト数 N の逆 3 乗でスケールすることを数値的/解析的に明らかにした。この結果は原著論文 [8] にまとめられた。

1.1.4 数理物理学・統計力学

Onsager 代数に起因する完全 Scar 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（現・東大物工）・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。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 [3] にまとめられたほか、国内外の研究会での招待講演 [28, 44] をはじめとして、多くの研究会 [21, 31] やセミナー [46, 47, 48, 51] でも発表された。

束縛のある量子系における誤差上限の評価

十分大きなエネルギーギャップが開いている量子系の物理は、低エネルギー理論により有効的に記述できると期待される。例えば、Rydberg 原子系の低エネルギー有効理論として PXP 模型が知られている。このような有効理論によるダイナミクスと実際のダイナミクスを比較すると、近似の誤差は時間とともに大きくなっていくと予想されるが、それがどのように増加していくのかは知られていなかった。

上田研の Gong（現・Max-Planck-Institut für Quantenoptik）・濱崎（現・理研）・桂研の吉岡（現・東大物工）・柴田は、近似の誤差についての普遍的かつ厳密な上限を得た。少数系では、この上限は線形に増加していくほか、上限がある意味でタイトなものであることを示した。また、この手法を応用し、量子多体系や開放量子系での束縛のあるダイナミクスについても厳密な誤差上限を得た。この結果は、原著論文 [4, 5] にまとめられた。

Nicolai 模型の古典的な基底状態と保存量

Nicolai により 1970 年代に提案された 1 次元格子上のフェルミオン模型（Nicolai 模型）は、超対称性量子力学の意味での超対称性をもつ模型で、そのハミルトニアンは超電荷 Q, Q^\dagger の反交換子で与えられる。また、基底状態の個数は系のサイズとともに指数関数的に増大することが知られている。このような基底状態は、単純な直積状態で書ける状態（以下、古典的な基底状態）を数多く含む。

桂と守屋（金沢大）・中山（立教大）は、これらの古典的な基底状態は、Nicolai 模型に存在する隠れた超対称性の破れによって特徴づけられることを見出した。この新たな対称性は、 Q とも Q^\dagger とも反交換するフェルミオンの局所演算子で記述される。また、これらの局所的演算子を用いて、ハミルトニアンと交換するボゾンの演算子を構成することもできることを明らかにした。さらに、特定の境界条件のもとでの有限系では、古典的な基底状態は Fock 真空状態に、上述のフェルミオンの局所演算子を次々と作用させることにより構成できることを証明した。これらの結果は、原著論文 [7] にまとめられた。

 $SU(N)$ 引力 Hubbard 模型におけるマヨラナ鏡映正值性

$SU(N)$ Hubbard 模型は、 N 成分の内部自由度を持つ粒子が強く相互し合う系である（図 2.1.3）。これは、スピン 1/2 の電子を記述する通常の $SU(2)$ Hubbard 模型の内部自由度に関する拡張になっている。近年、本模型は冷却原子気体による実現 [S. Taie, R. Yamazaki, S. Sugawa, and Y. Takahashi, *Nat. Phys.* **8**, 825 (2012)] により注目を集めている。しかし、 $SU(N)$ ($N > 2$) Hubbard 模型の解析は $SU(2)$ の場合よりも困難であり、厳密な結果はほとんど知られていない。 $SU(2)$ Hubbard 模型の基底状態を解析するための強力な数理手法としては、スピン鏡映正值性 [E. H. Lieb, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 10 (1989)] の手法がある。しかし、これは上向きスピンと下向きスピンの間の対称性を用いるため、 $SU(N)$ Hubbard 模型にそのまま適用することはできない。

そこで吉田と桂は、 $SU(N)$ 引力 Hubbard 模型の基底状態を、近年提案されたマヨラナ鏡映正值性 [A. Jaffe and F. L. Pedrocchi, *Ann. Henri Poincaré* **16**, 189 (2015)] の手法を応用して厳密に解析した。その結果、二部格子上的 $SU(N)$ 引力 Hubbard 模型の基底状態の縮退度や粒子数などを明らかにした。また、2 つの部分格子のサイト数がマクロに異なるとき、系が電荷密度波的な秩序を示すことも明らかにした。これらの結果は国内会議 [41] で発表されたほか、原著論文 [14] にまとめられた。

<受賞>

- [1] 桂 法称, オンライン授業等におけるグッドプラクティス総長表彰, 東京大学, 2021 年 3 月 22 日.

<報文>

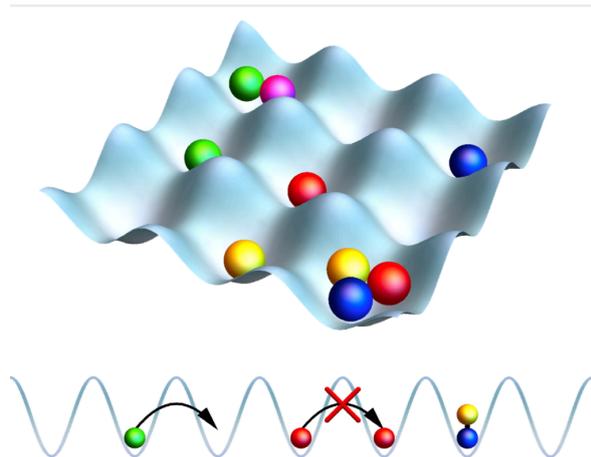


図 1.1.3: $SU(N)$ 引力 Hubbard 模型の模式図。複数の色の自由度を持つ粒子が谷(サイト)と谷の間を飛び移りながら運動し、同じサイトにある粒子の間には引力相互作用が働く。

(原著論文)

- [2] 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).
- [3] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura: Onsager's Scars in Disordered Spin Chains, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 180604 (2020) [Selected as Editors' Suggestion].
- [4] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki: Universal Error Bound for Constrained Quantum Dynamics, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 210606 (2020).
- [5] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki: Error bounds for constrained dynamics in gapped quantum systems: Rigorous results and generalizations, *Phys. Rev. A* **101**, 052122 (2020).
- [6] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura: Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, Preprint (2020). arXiv:2003.01705
- [7] Hosho Katsura, Hajime Moriya, and Yu Nakayama: Characterization of degenerate supersymmetric ground states of the Nicolai supersymmetric fermion lattice model by symmetry breakdown, *J. Phys. A: Math. Theor.* **53**, 385003 (2020).
- [8] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Quantum Ising chain with boundary dephasing, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 12A108 (2020).
- [9] Tsuneya Yoshida, Koji Kudo, Hosho Katsura, and Yasuhiro Hatsugai: Fate of fractional quantum Hall states in open quantum systems: characterization of correlated topological states for the full Liouvillian, *Phys. Rev. Research* **2**, 033428 (2020).
- [10] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Non-Hermiticity and topological invariants of magnon Bogoliubov-de Gennes systems, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 12A104 (2020).
- [11] Yutaka Akagi: Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 123601 (2020).
- [12] Hiroki Kondo and Yutaka Akagi: Dirac surface states in magnetic analogs of topological crystalline insulators, Preprint (2020). arXiv:2012.02034
- [13] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Ferromagnetism in d -Dimensional $SU(n)$ Hubbard Models with Nearly Flat Bands, *J. Stat. Phys.* **182**, 16 (2021).
- [14] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura: Rigorous Results on the Ground State of the Attractive $SU(N)$ Hubbard Model, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 100201 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].
- [15] Hosho Katsura: Unraveling the Nature of Exotic Phase Transitions in Quantum Spin Chains, *JPSJ News Comments* **18**, 04 (2021).
- [16] Yutaka Akagi, Yuki Amari, Nobuyuki Sawado, and Yakov Shnir: Isolated Skyrmions in the CP^2 nonlinear sigma-model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction, *Phys. Rev. D* **103**, 065008 (2021).
- [17] Y. Tanikawa, K. Takasan, and H. Katsura: Exact results for nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, Preprint (2021). arXiv:2103.05838

(学位論文)

- [18] 真田兼行: Exact results for the degeneracy of energy eigenstates in inhomogeneous quantum spin systems (修士論文).
- [19] 坪田祥一: Analysis of spectral and topological properties of electronic systems on the Thue-Morse lattice (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [20] Hiroki Kondo (Yutaka Akagi): Dirac surface states in topological crystalline magnon insulators, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.
- [21] Naoyuki Shibata (Nobuyuki Yoshioka, Hosho Katsura): Onsager's scars in disordered spin chains, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.
- [22] Kensuke Tamura (Hosho Katsura): Ferromagnetism in d -dimensional $SU(n)$ Hubbard models with nearly flat bands, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

- [23] Hong Yang (Hayate Nakano, Hosho Katsura): Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.
- [24] Tsuneya Yoshida (Koji Kudo, Hosho Katsura, Yasuhiro Hatsugai): Non-Hermitian fractional quantum Hall states in open quantum systems, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.
- [25] Kimberly Remund (Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon): Equations of motions for spin-1 magnets – a $u(3)$ formalism, suitable to investigate dynamical and thermodynamical properties, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.
- [26] Yutaka Akagi: Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.
- 招待講演
- [27] Yutaka Akagi: Noncommutative indices for disordered topological phases, *Localisation 2020*, online, Japan, August 2020.
- [28] Hosho Katsura: Onsager’s scars in non-integrable spin chains, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics II*, online, Japan, November 2020.
- [29] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains, *Non-Hermitian Physics*, online, India, March 2021.
- (国内会議)
- 一般講演
- [30] 赤城裕: 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起と創発現象, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」C01 班公募研究キックオフミーティング, 2020年7月, オンライン.
- [31] 柴田直行, 吉岡信行, 桂法称: Onsager 代数を用いた乱れのあるスピン鎖における量子多体傷跡状態の構成, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [32] Hong Yang, Hayate Nakano, Hosho Katsura: Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [33] 田村健祐, 桂法称: ほぼ平坦なバンドを持つ d 次元 $SU(n)$ ハバード模型における強磁性, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [34] 坪田祥一, 赤城裕, 桂法称: Thue-Morse 格子上の電子系の Z_2 Berry phase を用いたトポロジカルな特徴付け, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [35] 真田兼行, 桂法称: 非一様な変形パラメーターをもつ量子スピン鎖の厳密に縮退したエネルギー準位, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [36] 吉田恒也, 工藤耕司, 桂法称, 初貝安弘: 量子開放系での分数量子ホール状態の特徴付け, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [37] Remund Kimberly, Pohle Rico, Akagi Yutaka, Shannon Nic: Analytical Derivation of Equations of Motion for Spin-1 Magnets II, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [38] Pohle Rico, Akagi Yutaka, Remund Kimberly, Shannon Nic: Numerical Integration of Equations of Motion for Spin-1 Magnets, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.
- [39] 赤城裕: 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起とダイナミクス, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2020 年 12 月, オンライン.
- [40] 谷川悠飛, 高三和晃, 桂法称: スピン 1/2 XXZ 鎖における非線形スピン Drude weight の厳密な解析, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.
- [41] 吉田博信, 桂法称: $SU(N)$ 引力ハバード模型におけるマヨラナ鏡映正値性, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.
- [42] Hosho Katsura, Hal Tasaki: Mott-insulating Bose-Einstein condensation in a tight-binding system of interacting bosons with a flat band, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.
- [43] 小野淳, 赤城裕: 三角格子遍歴磁性体における光誘起スピンスカラーカイラル状態, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.
- 招待講演
- [44] 桂法称: 量子多体傷跡状態の代数的構成法, 量子多体系の熱力学-数理の発展と展望, 2020 年 9 月, オンライン.
- (セミナー)
- [45] 桂法称: Integrable dissipative spin chains, 統計力学 seminar, 2020 年 5 月, オンライン.
- [46] 柴田直幸: Onsager’s scars in disordered spin chains, 東大物工・渡辺研セミナー, 2020 年 6 月, オンライン.
- [47] 柴田直幸: Onsager’s scars in disordered spin chains, 阪大・藤本・水島研セミナー, 2020 年 6 月, オンライン.
- [48] 桂法称: Onsager’s scars in non-integrable spin chains, Theory Seminar at APCTP/POSTECH (Korea), 2020 年 8 月, オンライン.
- [49] 赤城裕: Noncommutative indices for disordered topological phases, 統計力学 seminar, 2020 年 11 月, オンライン.
- [50] 赤城裕: Noncommutative indices for disordered topological phases, 求研究室セミナー, 2020 年 12 月, オンライン.
- [51] 桂法称: Onsager’s Scars in Non-Integrable Spin Chains, Condensed Matter/Materials & Biological Physics Seminar at Washington University in St. Louis (US), 2021 年 3 月, オンライン.

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) magnetism in Fermi Hubbard models, (iv) dissipative quantum many-body systems, and (v) non-ergodic dynamics in non-integrable systems. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2020 are the following:

- Topological phases of matter
 - Topological magnon systems characterized by \mathbf{Z}_2 topological invariants [1]
 - Topological invariants of bosonic Bogoliubov-de Gennes systems with disorder [2]
 - Skyrmions in the nonlinear sigma model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction [3]
 - Symmetry-protected topological phases in spinor Bose-Hubbard models
- Strongly correlated systems
 - Ferromagnetism in the $SU(n)$ Hubbard model with a nearly flat band [4]
 - Exact analysis of nonlinear Drude weights for quantum spin chains
- Dissipative quantum many-body systems
 - Topological characterization of fractional quantum Hall states in the presence of dissipation [5]
 - Exact analysis of quantum Ising chain with boundary dephasing [6]
- Mathematical and statistical physics
 - Constructing an infinite sequence of non-integrable models exhibiting perfect quantum many-body scars [7]
 - Error bounds for constrained quantum dynamics [8, 9]
 - Classical supersymmetric ground states of the Nicolai model [10]
 - Majorana reflection positivity in the attractive $SU(n)$ Hubbard model [11]

[1] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 12A104 (2020).

[2] Yutaka Akagi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 123601 (2020).

[3] Yutaka Akagi, Yuki Amari, Nobuyuki Sawado, and Yakov Shnir, *Phys. Rev. D* **103**, 065008 (2021).

[4] Kensuke Tamura and Hosho Katsura, *J. Stat. Phys.* **182**, 16 (2021).

[5] Tsuneya Yoshida, Koji Kudo, Hosho Katsura, and Yasuhiro Hatsugai, *Phys. Rev. Research* **2**, 033428 (2020).

[6] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 12A108 (2020).

[7] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 180604 (2020) [Editors' Suggestion].

[8] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 210606 (2020).

[9] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki, *Phys. Rev. A* **101**, 052122 (2020).

[10] Hosho Katsura, Hajime Moriya, and Yu Nakayama, *J. Phys. A: Math. Theor.* **53**, 385003 (2020).

[11] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 100201 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].