

1 2024年度 研究活動 報告

1.1 桂研究室

本研究室では、物性理論および統計力学における基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。特に、相関の強い量子多体系において創発する多彩な相や新奇な現象の理解と予言を目的として、具体的な理論模型に対し解析的手法と数値的手法を組み合わせた多角的なアプローチを行っている。また、開放および孤立量子系における非平衡ダイナミクスの解析や、可解模型の背後にある代数的構造の解明など、数理物理的観点からの研究にも力を入れている。

1.1.1 強相関係系

トライマー梯子上の Hubbard 模型のハーフフィリングにおける基底状態相図

バンドの分散が完全あるいはほとんど平坦な電子系では電子の運動が強く抑制されるため、わずかな相互作用や摂動によって多様な相が実現される。桂は S. N. Bose 国立基礎科学センター（インド）の Saha と Kumar と、トライマー梯子と呼ばれる格子構造上の電子系のハーフフィリングにおける基底状態相図を Hubbard 模型を用いて系統的に調べた [図 1.1.1]。トライマー梯子は三つの格子点からなる単位胞（トライマー）が 1 次元的に並んだ格子構造をもち、トライマー内の最近接ホッピング t_1 が、トライマー内の次近接ホッピング t_2 およびトライマー間のホッピング t_2' に比べて十分大きい場合には、Fermi 面近傍のバンドがほとんど平坦となる。そのような場合に、簡単のため $t_2 = t_2'$ とし、さらにオンサイトの斥力相互作用 U を導入した場合の相図を、厳密対角化法、密度行列くりこみ群法 (DMRG)、摂動論を用いて調べた。その結果、次の 5 つの相が現れることが分かった: (i) フェリ磁性相, (ii) 朝永-Luttinger 液体相 I, (iii) 朝永-Luttinger 液体相 II, (iv) up-up-down-down 相, (v) 可変スピン相。

相 (i) は相図上の広い領域に広がる絶縁体相である。 U の大きい強相関領域では局在スピン描像により、 U の小さい弱相関領域では平坦バンド描像によりフェリ磁性の出現を自然に理解することができる。一方、中間的なパラメータ領域の結果は DMRG により確立された。相 (ii), (iii) はともに朝永-Luttinger 液体相であるが、(ii) では電荷とスピンの両自由度が

ギャップレスであるのに対し、(iii) では電荷自由度のみがギャップレスである。相 (iv) は (i) と (ii) の、相 (v) は (i) と (iii) の間に存在し、パラメータ領域としては狭いが、フェリ磁性相とは異なる磁気的性質を示す絶縁体相である。

実在するトライマー梯子状の物質の多くは絶縁体であるが、本研究の結果は高压下などにおいて相 (ii), (iii) などの金属的な相が実現する可能性を示唆しており、今後の研究の進展が期待される。これらの結果は原著論文 [9] にまとめられた。

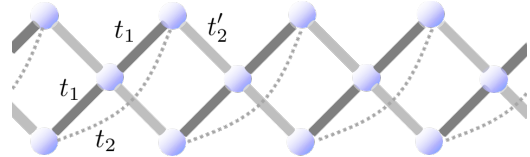


図 1.1.1: トライマー梯子の格子構造。

連続対称性の自発的破れを示す 1 次元量子スピン系

対称性の自発的破れは物理学における重要な概念である。例えば、身の回りの結晶や磁石は、それぞれ並進対称性やスピン空間の回転対称性といった対称性を自発的に破っている例として理解することができる。このように対称性の自発的な破れは、我々の住む 3 次元では身近な現象だが、ゆらぎの効果が顕著となる低次元系では事情が異なる。このことは古くは Mermin と Wagner により指摘されている。彼らは連続対称性を持ち短距離相互作用する 1, 2 次元系において有限温度で連続対称性の自発的な破れが起こらないことを証明している。この定理は絶対零度の量子系に対しては厳密には適用できないが、1 次元反強磁性 Heisenberg 模型など多くの例ではそのまま形で成立することが知られている。ただし、1 次元強磁性 Heisenberg 模型など秩序変数がハミルトニアンと交換する場合には例外的に、1 次元でも自発的対称性の破れが起こることが知られていた。

桂は渡邊 (東大理工) と Lee (米国・Illinois 大 Urbana-Champaign 校) と、秩序変数がハミルトニアンと交換しない 1 次元系においても、連続対称性の自発的な破れが起こることを発見した。鍵となるのは、フラストレーション・フリーという条件である。この条件は、系の基底状態が全ての局所ハミルトニアンのエネルギーを同時に最小化するという意味を意味する。(強磁性 Heisenberg 模型もこの条件を満たし、かつ秩序変数がハミルトニアンと交換する。) 本研究では、1 次元でも連続対称性の自発的破れを示すフラストレーション・フリーな量子スピン模型が無数に構成できることを示した。これらの模型ではパラメータ空間の特別な点を除いて、秩序変数はハミルトニアンと交換しない。さらに本研究では、このような系の存在が Mermin-Wagner の定理の絶対零度版となぜ矛盾しないかということ、低エネルギー

励起の分散関係に着目することにより明らかにした。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。

1.1.2 トポロジカル磁性

量子ダイマー磁性体 $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$) におけるトリプロンの熱 Hall 効果の電場による制御

近年、磁性体における熱ホール効果がマグノンなどの素励起の性質の探索、特にバンド構造のトポロジーの検出に有用であることから注目を集めている。スピン-重項が基底状態となる量子ダイマー磁性体においても、トリプロン励起由来の熱ホール効果の理論提案が主に $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ という物質に対して行われてきたが、トリプロンの熱ホール効果はいまだに観測されていない。一方で、格子の対称性による制約から、熱ホール効果を示す物質の探索は一般に難しく、トリプロンの熱ホール効果を示す新たな候補物質の探索はほとんど進んでいなかった。

そこで、江崎・赤城・桂は新たな候補物質として、トリプロンの Bose 凝縮や電気磁気効果の観点から注目されてきた量子ダイマー磁性体 $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$) の Bose 凝縮相を対象に、トリプロンの熱ホール効果の可能性を探索した。その結果、電場が 0 のときには格子の対称性により熱ホール効果が生じないが、電場がダイマー内に Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を誘起し、これによって対称性が破れることで、観測可能な大きさの熱ホール効果が生じることを見出した。さらに、電場の向きや強さを変えることで、熱ホール流の向きや大きさを制御することも明らかにした。

本研究は、トリプロンの熱ホール効果を示す新たな候補物質を理論的に提案しただけでなく、元々熱ホール効果を示さない物質に対しても、電場によって熱ホール効果を誘起・制御できる可能性を示唆しており、本分野の研究の可能性を広げることが期待される。これらの結果は原著論文 [2] として発表された。

トポロジカルスピントクスチャ上を運動する電子による高次高調波発生

近年、高次高調波発生 (HHG) に関する研究が精力的になされている。これは入射光に対して数次から数十次の高調波が生じる非線形・非摂動現象であり、そのスペクトルには物質の電子構造が反映されることが明らかにされている。この性質に基づく高次高調波発生を用いた新たな分光法がこれまで提案されており、固体結晶においては、そのエネルギーバンド構造のみならず、Berry 曲率などの幾何学的構造をも解析することが可能になりつつある。このような幾何学的構造に着目した研究は、空間反転対称性を持たない半導体やトポロジカル絶縁体・半金属を中心になされてきたが、磁気スキルミオン相な

どのトポロジカルな磁気秩序相における高次高調波発生に関しては十分な理解が得られていない。

小野 (東北大)、奥村 (東大物工)、今井 (東大物理)、赤城らは、遍歴電子と局在スピンを記述する強磁性近藤格子模型において、トポロジカルなスピントクスチャ上を運動する電子からの高次高調波発生を解析した。具体的な磁気構造として、2010 年に赤城と求 (東大物工) により高い安定性が明らかとなった三角格子上の 4 副格子 all-in/all-out 構造を持つスピンスカラーカイラル状態を対象とした。この 4 副格子スピンスカラーカイラル状態は、空間的に最小のトポロジカルな磁気構造として捉えられ、実際に CoTa_3S_6 や CoNb_3S_6 において実現していることが最近報告されている。これらの局在スピン構造を固定することで、光電場で駆動された電子系の実時間ダイナミクスは von Neumann 方程式によって記述される。この状態では、スピンスカラーカイラル性の符号が Berry 曲率の符号を変える一方で、エネルギーバンド構造には変化がないため、幾何学的な効果のみが HHG に影響を与えるという特徴がある。解析の結果、スカラーカイラル状態においては縦応答成分と同程度の大きな横応答成分が現れ、入射偏光角に対する高調波強度依存性にカイラル性の符号が顕著に反映されることが明らかになった。とりわけ、光周波数がエネルギーギャップよりも大幅に低い場合に、縦方向の電流応答がスカラーカイラル性の符号によって大きく影響を受けることがわかった。バンド内電流の異常速度項は横応答成分にしか寄与しないため、本研究で明らかとなった縦方向の大きな応答は、電子と正孔の再結合に由来したバンド間電流に起因した新しい物理現象であることが示唆される。本研究で提案した現象は、 CoTa_3S_6 や CoNb_3S_6 などの実際の物質においても観測される可能性があり、トポロジカルスピントクスチャに基づく新しい物理現象の理解が更に進むことが期待される。これらの成果は国際会議 [12, 19] で発表され、論文 [3] にまとめられた。

1.1.3 散逸のある量子多体系

2 体ロスのあるボゾン系の少数系ダイナミクスにおける普遍的な性質

2 体ロスのあるボゾン系は冷却原子系において実現されており、Mott 状態から超流動状態へのクロスオーバー [T. Tomita et al., Sci. Adv. **3**, e1701513 (2017)] などの興味深い現象が観測されている。そのダイナミクスも実験と理論の両方から調べられているが、理論による解析的な結果は非常に限られている。

そこで、吉田と桂は Paris-Saclay 大学 (フランス) の Marché, Nardin, Mazza と 2 体ロスを受ける 1 次元ボゾン系において、2 粒子の長時間ダイナミクスを Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式を用いて調べた。初期条件が 2 粒子の場合、ダイナミクスは非エルミート有効ハミルトニアンにより正確に記述され、長時間領域では連続体でも格子上でも解析的に調べることができる。2 粒子が重なる初

期条件では粒子の生存確率は時間 t に対して $t^{-3/2}$ に比例して減衰し、2 粒子が離れた初期条件では $t^{-1/2}$ に比例して減衰することを明らかにした。これらの結果は連続体でも格子でも成り立つが、後者の場合は対数補正が現れることが判明した。これらの結果は国内学会 [35] で発表されたほか、原著論文 [4] で発表された。

1.1.4 数理物理学・統計力学

Dzyaloshinskii-守谷相互作用を持つスピン鎖における量子多体傷跡状態

近年の量子技術の進歩により、さまざまな量子多体系をシミュレートすることが可能になっている。特に最近では、光ピンセットの技術と Rydberg 原子を組み合わせることで、様々な量子スピン模型が実現されている。このような Rydberg 原子系は、量子多体傷跡状態 (Quantum Many-Body Scars; QMBS) と呼ばれる特異な状態を持つ系をシミュレートできることから注目を集めている。QMBS は非可積分系における非熱的なエネルギー固有状態で、全てのエネルギー状態が熱的な状態であるという仮説 (固有状態熱化仮説) を破る反例として知られている。

桂は國見 (東京理科大)・富田 (分子研)・加藤 (東大総合文化) と、QMBS をもつ量子スピン模型を実験的にシミュレートする新たな手法を提案した。具体的には、この方法は以下の手順からなる：(a) ^{87}Rb 原子を 1 次元的に配置し二種類のレーザーを照射する、(b) 2 光子 Raman 遷移を用いて回転磁場を生成する、(c) この磁場が一様となるスピン回転座標系に移ることで実効的に Dzyaloshinskii-守谷 (DM) 相互作用を生成する。(ここでスピン自由度は、 ^{87}Rb の 2 つの Rydberg 状態に対応する。) この方法により、固体中では実現が難しい DM 相互作用が支配的となるスピン模型をシミュレートすることが可能となる。このような量子スピン模型の一例として、ハミルトニアンが DM 相互作用と Zeeman 項のみからなる模型 (DH 模型) を理論的に解析した。その結果、DH 模型には QMBS が存在すること、またそれに起因した特徴的なスピンダイナミクスを示すことを明らかにした。さらにこの系には漸近的量子多体傷跡状態 (AQMBS) が存在することも発見した。AQMBS とは、(i) すべての QMBS と直交、(ii) 低いエンタングルメント・エントロピー、(iii) 熱力学極限でエネルギー分散がゼロ、という 3 つの条件を満たす状態である。特に条件 (iii) は、熱力学極限での緩和時間が無限大となることを意味する。このような AQMBS をあらわに構成した研究は、先行研究 [L. Gotta, S. Moudgalya, and L. Mazza, Phys. Rev. Lett. **131**, 190401 (2023)] を除いて他に類がなく、孤立量子多体系における熱化 (もしくは平衡化) の問題に新たな視点を与えることが期待される。これらの結果は、原著論文 [5] にまとめられた。

多成分 Fermi-Hubbard 模型における一般化 η ペアリング状態とエルゴード性の弱い破れ

強相関電子系の標準的な模型である $\text{SU}(2)$ Fermi-Hubbard 模型の厳密な励起状態として、 η ペアリング状態が知られている。この状態は、非対角長距離秩序 (ODLRO) を持つため、超伝導や超流動との関係で活発に研究が行われている。一方で他成分のフェルミオン系における対応物は知られていなかった。桂は中川・上田 (東大) と $\text{SU}(N)$ Fermi-Hubbard 模型を特別な場合として含む、 N 成分 Hubbard 模型における新しい厳密な固有状態 (一般化 η ペアリング状態) を構成した。

一般化 η ペアリング状態は、ODLRO と磁気的な長距離秩序を兼ね備えている。これは、スピン重項からなるため磁性を示さない元々の η ペアリング状態とは大きく異なる特徴である。また一般化 η ペアリング状態は、固有状態熱化仮説を満たさない量子多体傷跡状態 (QMBS) であることも明らかにした。これは、この N 成分 Hubbard 模型 ($N \geq 3$) が、エルゴード性を弱く破っていることを意味している。さらに、この一般化 η ペアリング状態や $\text{SU}(N)$ 強磁性状態を初期状態とした場合、非エルゴード的ダイナミクスが現れることおよび、これらの特別な初期状態を散逸を制御することにより準備する方法を議論した。これらの結果は、原著論文 [7] にまとめられた。

可積分模型の埋め込みによるエルゴード性の弱い破れ

近年の量子多体系の研究において、非可積分系でありながら一部の状態が非熱的な振る舞いを示す系の存在が注目されている。特に、系全体としてはエルゴード的でありながら、ごく一部のエネルギー固有状態のみが非熱的であるという「弱いエルゴード性の破れ」は、量子ダイナミクスにおける新たな現象として関心を集めている。

桂は松井 (東大数理), Pozsgay (ハンガリー・Eötvös Loránd 大), Paletta (スロベニア・Ljubljana 大) と共に、可積分なスピン鎖模型を非可積分系の中に選択的に埋め込むことで、弱いエルゴード性の破れを実現する理論的手法を提案した。特に、可積分な部分空間が局所的なベクトル空間のテンソル積では表現できず irreducible string と呼ばれる配列で指定される非局所的な構造によって特徴づけられる点が、従来の単純な埋め込み手法に比べて新しい点である。

具体的には、まずヒルベルト空間の断片化を示す模型、例えばスピン 1 の Maassarani-Mathieu 模型などを出発点とし、これに特定の摂動を加えることで系全体としては非可積分となるが、上述の irreducible string で指定された部分空間では可積分性が保たれるという状況を構築した。その結果、系の大多数の状態は熱化する一方で、可積分部分空間に属する状態は非熱的な性質を示すという、新しいタイプのダイナミクスをもつ量子スピン模型を系統的に得ることに成功した。

本研究は、可積分性・ヒルベルト空間の断片化・エルゴード性の破れといった量子多体系のダイナミクスに関わる重要な概念を結びつけるとともに、固有状態熱化仮説に対する具体的な反例を構成するものである。これにより、孤立量子系における熱平衡化の理解に新たな視点を提供することが期待される。これらの結果は、以下の原著論文 [10] にまとめられた。

可積分な SYK 派生模型とカオスのダイナミクス

ブラックホールを記述する重力理論の最近の進展により、量子多体系のカオスのダイナミクスへの関心が高まっている。そのような研究において中心的な役割を果たしているのが、カオスの上限を飽和する例として知られる Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型である。SYK 模型はランダムな四体相互作用をもつマヨラナフェルミオン系である。桂は尾崎（東大・総合文化）と SYK 模型からランダム性を取り去った派生形「クリーンな SYK 模型」のダイナミクスを研究し、量子カオスとの関連を調べた。

クリーンな SYK 模型には、ハミルトニアンが相互作用項のみからなるにもかかわらず自由フェルミオン系のハミルトニアンと共通の固有状態をもつ、すばわち可積分であるという特筆すべき特徴がある。この点を利用して、量子カオスに関連する以下の三つの量について解析的および数値的手法を組み合わせ、解析を行った：準位統計、スペクトル構造因子 (SFF)、および非時間順序相関 (OTOC)。このうち、SFF はエネルギースペクトルの二点相関を、OTOC は系内での量子情報の広がり量を定量化する指標である。準位統計と SFF にはカオス的な兆候が見られなかった一方で、OTOC には短時間の指数関数的な増大が見いだされた。その増大時間は典型的な量子カオスにおけるものよりも短い、カオス的なダイナミクスに類似している。我々はさらに、超対称性のある SYK 模型からランダム性を取り去った模型についても解析し、同様の結論を得た。一連の結果は、未だ明確に定まらない量子多体系のカオスの判定基準に関する議論に新たな視点を提供するものであると期待される。これらの結果は国際研究会等で発表された [31, 46]。また、原著論文 [8] にまとめられた。

1.1.5 その他

量子スピネマティック相や冷却原子系における「重力波」

2017 年のノーベル物理学賞の対象となった重力波の観測は、連星ブラックホールの衝突・合体という宇宙の中で最も激しい事象によって初めて可能となった。依然として重力波の観測は困難であり、人の手による実験的な実現への道のりは遙か遠い。しかし、物質において、重力波と類似した現象を観察できる可能性が近年注目されている。特に、磁性体や冷却原子系で見られる量子スピネマティック相と呼ば

れる状態からの励起が、重力波の類似物として機能するかもしれないという理論的な期待がされていた。

赤城と Chojnacki (OIST), Pohle (東北大), Yan (東大物性研), Shannon (OIST) は、量子スピネマティック相における南部-Goldstone モードが、重力波に対応する質量を持たないスピン 2 ボソンとして振る舞うことを理論的に明らかにした。具体的には、平坦な時空における重力波と、量子スピネマティック相における低エネルギー励起が一对一に対応することを示した。これにより、量子スピネマティック相が、重力波によく似た性質を持つ物理的状态であることが明確に示された。また、量子スピネマティック相ではトポロジカル励起/点欠陥である $\mathbf{Z}_2$ ボルテックスが生じるが、その対消滅放射は連星ブラックホール合体による重力波と似た構造を有する事も、 $S=1$ bilinear biquadratic 模型の数値シミュレーションにより示した [図 1.1.2]。とりわけ、 ^{23}Na の光格子を利用することで、実験的に制御しながらこの「重力波」の観測が可能であることを示した。このことにより、宇宙の大規模な現象を実験室内で再現し、より深く理解するための道が開かれ、さらなる進展が期待される。これらの成果は、国内外の学会で発表され [29, 39]、論文 [1] にまとめられた。

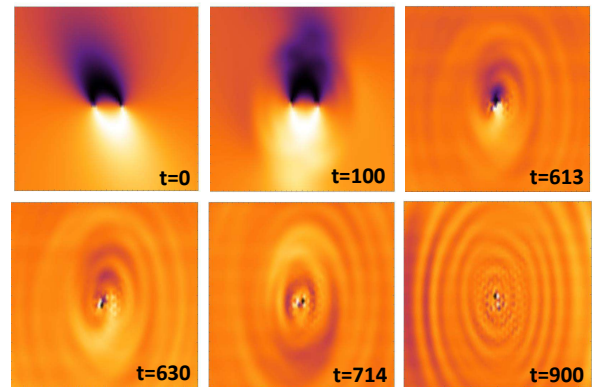


図 1.1.2: 量子スピネマティック相における $\mathbf{Z}_2$ ボルテックスの対消滅放射。量子スピネマティック相の秩序変数テンソルと一般相対論の計量テンソルは類似の構造を持つ。

<報文>

(原著論文)

- [1] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon: Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms, *Phys. Rev. B* **109**, L220407 (2024) [Selected as Editors' Suggestion].
- [2] Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Electric field induced thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets XCuCl_3 ($X=\text{Ti, K}$), *Phys. Rev. Research* **6**, L032050 (2024).

- [3] Atsushi Ono, Shun Okumura, Shohei Imai, and Yutaka Akagi: High harmonic generation from electrons moving in topological spin textures, *Phys. Rev. B* **110**, 125111 (2024).
- [4] Alice Marché, Hironobu Yoshida, Alberto Nardin, Hosho Katsura, and Leonardo Mazza: Universality and two-body losses: lessons from the effective non-Hermitian dynamics of two particles, *Phys. Rev. A* **110**, 033321 (2024).
- [5] Masaya Kunimi, Takafumi Tomita, Hosho Katsura, and Yusuke Kato: Proposal for simulating quantum spin models with Dzyaloshinskii-Moriya interaction using Rydberg atoms and construction of asymptotic quantum many-body scar states, *Phys. Rev. A* **110**, 043312 (2024).
- [6] Haruki Watanabe, Hosho Katsura, and Jong Yeon Lee: Critical spontaneous breaking of U(1) symmetry at zero temperature in one dimension, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 176001 (2024) [Selected as Editors' Suggestion].
- [7] Masaya Nakagawa, Hosho Katsura, and Masahito Ueda: Exact eigenstates of multicomponent Hubbard models: $SU(N)$ magnetic η -pairing, weak ergodicity breaking, and partial integrability, *Phys. Rev. Research* **6**, 043259 (2024).
- [8] Soshun Ozaki and Hosho Katsura: Disorder-Free Sachdev-Ye-Kitaev models: Integrability and a precursor of chaos, *Phys. Rev. Research* **7**, 013092 (2025).
- [9] Sourabh Saha, Hosho Katsura, and Manoranjan Kumar: Phase diagram of a coupled trimer system at half filling using the Hubbard model, *Phys. Rev. B* **111**, 094425 (2025).
- [10] Hosho Katsura, Chihiro Matsui, Chiara Paletta, and Balázs Pozsgay: Weak ergodicity breaking with isolated integrable sectors, *Phys. Rev. Research*, in press (2025).
- (学位論文)
- [11] 吉田博信: Rigorous Results on the Steady States and Long-Time Dynamics of Open Quantum Many-Body Systems: (博士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Atsushi Ono (Shun Okumura, Shohei Imai, Yutaka Akagi): High harmonic generation from electrons moving on topological spin textures, *Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena 2024 (PIPT8)*, Nijmegen, Netherlands, June 2024.
- [13] Shunta Kitahama: Higher-order exceptional point in many-body unidirectional Hatano-Nelson model, *IIS-LEAP Workshop NH2024*, Kashiwa, Japan, July 2024.
- [14] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Generalized η -pairing states in extended $SU(N)$ Hubbard models, *Princeton Summer School on Condensed Matter Physics*, IAS, USA, July 2024.
- [15] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *Prospects in Theoretical Physics*, IAS, USA, July 2024.
- [16] Yuki Amari (Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir): Skyrmion crystals with spin-nematic order in $SU(3)$ chiral magnets, *$SU(N)$ physics in quantum many-body systems: theory, experiment, and numerics (SUN2024)*, Sendai, Japan, July 2024.
- [17] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *Focus Week on Non-equilibrium Quantum Dynamics*, Tokyo, Japan, Sep. 2024.
- [18] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, *ISSP Theory mini-Workshop*, Kashiwa, Japan, Nov. 2024.
- [19] Atsushi Ono (Shun Okumura, Shohei Imai, and Yutaka Akagi): High harmonic spectroscopy of a topological spin texture, *Correlated Quantum Materials+beyond: Symposium (CQM+b2024)*, Chiba, Japan, Nov. 2024.
- [20] Tetsuya Iwasaki: Exact analysis of nonlinear Drude weights in the Hubbard chain, *New Trends in Condensed Matter Theory 2024*, Kashiwa, Japan, Dec. 2024.
- [21] Xinye Guan: Disorder-free Quantum Breakdown Model: exact solution and dynamics, *New Trends in Condensed Matter Theory 2024*, Kashiwa, Japan, Dec. 2024.
- [22] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025.
- [23] Shunta Kitahama: Solitons and scars in 1d interacting chiral fermion systems as qKdV equation, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025.
- [24] Tetsuya Iwasaki: Analysis of nonlinear transport properties on the one-dimensional Hubbard model, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025.
- [25] Xinye Guan: Quantum Breakdown Model: the Exact Solution and Dynamics, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025.
- [26] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.

- [27] Hironobu Yoshida: The Uniqueness of Steady States of the Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad Equation: A Simple Proof, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.
- [28] William Faugno (Hosho Katsura, Tomoki Ozawa): Quantum Many Body Scars from Emergent Chiral Symmetry in the Density-Difference-Dependent Gauge Field, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.
- [29] Nic Shannon (Kimberly Remund, Rico Pohle, Leilee Chojnacki, Yukitoshi Motome, Owen Benton, Judit Romhányi, Yutaka Akagi, Han Yan, Geet Rakala, Yuki Amari): Simulation of spin-1 magnets on frustrated lattices, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.

招待講演

- [30] Yutaka Akagi: CP^2 triple- Q state in the SU(3) Kondo lattice model, *The 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Toyama, Japan, July 2024.
- [31] Hosho Katsura: Integrable SYK-like models, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, Kyoto, Japan, November 2024.
- [32] Hironobu Yoshida: A criterion for the uniqueness of the steady state in open quantum systems, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, Kyoto, Japan, Nov. 2024.

(国内会議)

一般講演

- [33] 山田昌彦, 高橋雅大, 三野巧, 赤城裕, 諏訪秀磨, 藤本聡, 宇田川 将文, Matrix Product Renormalization Group Method, Tensor Network 2024, 2024 年 5 月, 石川県政記念 しいのき迎賓館.
- [34] 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称: Maple Leaf/Star 格子上的スピンドイマー系におけるトポロジカルトリプルの熱ホール効果, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [35] Alice Marché, 吉田博信, Alberto Nardin, 桂法称, and Leonardo Mazza: 二体ロスのあるボゾン系の二体問題に現れる普遍性, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [36] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: 漸近的量子多体傷跡状態に由来する perfect revival, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [37] 羽田野直道, 桂法称, 川畑幸平: ベーテ格子上的非エルミート系の量子輸送: ランダムネスの効果, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [38] 赤城裕: SU(3) 近藤格子模型における CP^2 triple- Q 状態と新奇トポロジカル絶縁相の発現, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [39] Rico Pohle, 赤城裕, 甘利悠貴, Owen Benton, Leilee Chojnacki, Yukitoshi Motome, Kimberly Remund,

Judit Romhányi, Han Yan, and Nic Shannon, Simulation of spin-1 magnets on frustrated lattices, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.

- [40] 江崎蘭世: Maple-leaf/star 格子上の量子ダイマー磁性体におけるトポロジカルトリプルのスピネルンストおよび熱ホール効果, ISSP Workshop 2024 カゴメフラストレート磁性研究の進展, 2025 年 3 月, 東京大学 物性研究所.
- [41] 岩崎哲也, 桂法称: 1 次元 Hubbard 模型における非線形 Drude 重みの解析, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.
- [42] 関欣也, 桂法称: 乱れのない量子 breakdown 模型: 厳密解とダイナミクス, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.
- [43] 國見昌哉, 桂法称, 加藤雄介: 漸近的量子多体傷跡状態の系統的な構成法と超対称性量子力学との関係 1, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.
- [44] 國見昌哉, 桂法称, 加藤雄介: 漸近的量子多体傷跡状態の系統的な構成法と超対称性量子力学との関係 2, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.

招待講演

- [45] 吉田 博信: 開放量子系における定常状態の一意性の判定方法, 第 3 回 金沢大学量子ダイナミクス研究会, 金沢大学, 2024 年 6 月.

(セミナー)

- [46] 桂 法称: Integrable SYK-like models, Budapest Integrability Events, 2024 年 4 月, オンライン.
- [47] 北浜駿太: Higher-order exceptional points of many-body unidirectional Hatano-Nelson model, Informal Quantum Seminar, 2024 年 9 月, LPTMS - Université Paris-Saclay.
- [48] 江崎蘭世: Theoretical Studies of the Electric Field Induced Thermal Hall Effect in the Quantum Dimer Magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), 2024 年 4 月, KAIST.
- [49] 江崎蘭世: 量子ダイマー磁性体 $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$) におけるトリプルの電場誘起熱ホール効果の理論, 2024 年 7 月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [50] 桂 法称: Frustration-free models and beyond, Ljubljana PhD School on Quantum Physics-2024, 2024 年 6 月, University of Ljubljana.
- [51] 桂 法称: Frustration-free systems and beyond, 極限宇宙循環ミーティング, 2025 年 1 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 conduct theoretical research on fundamental problems in condensed matter and statistical physics, with a particular focus on strongly correlated quantum many-body systems, both in and out of equilibrium. Our goal is to understand and predict novel quantum phases and emergent phenomena that arise in these systems. To this end, we use a combination of analytical and numerical methods. We are currently exploring topics such as (i) low-dimensional correlated systems, (ii) topological magnetism, (iii) open quantum many-body systems, and (iv) nonequilibrium dynamics in integrable and non-integrable systems. In addition, we are interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2024 are the following:

- Low-dimensional correlated systems
 - Ground-state phase diagram of the Hubbard model on a trimer ladder [1]
 - Spontaneous breaking of U(1) symmetry at zero temperature in one dimension [2]
- Topological magnetism
 - Electric field induced thermal Hall effect of triplons in quantum dimer magnets [3]
 - High harmonic generation from electrons moving on topological spin textures [4]
 - Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms [5]
- Open quantum many-body systems
 - Late-time dynamics of two particles with two-body losses in one dimension [6]
- Mathematical and statistical physics
 - Quantum many-body scars in spin models with Dzyaloshinskii-Moriya interaction [7]
 - Integrability and a precursor of chaos in disorder-free Sachdev-Ye-Kitaev models [8]
 - Weak ergodicity breaking in non-integrable models [9, 10]

- [1] S. Saha, H. Katsura, and M. Kumar, Phys. Rev. B **111**, 094425 (2025).
- [2] H. Watanabe, H. Katsura, and J. Y. Lee, Phys. Rev. Lett. **133**, 176001 (2024).
- [3] N. Esaki, Y. Akagi, and H. Katsura, XCuCl₃ ($X = \text{Ti, K}$), Phys. Rev. Research **6**, L032050 (2024).
- [4] A. Ono, S. Okumura, S. Imai, and Y. Akagi, Phys. Rev. B **110**, 125111 (2024).
- [5] L. Chojnacki, R. Pohle, H. Yan, Y. Akagi, and N. Shannon, Phys. Rev. B **109**, L220407 (2024).
- [6] A. Marché, H. Yoshida, A. Nardin, H. Katsura, and L. Mazza, Phys. Rev. A **110**, 033321 (2024).
- [7] M. Kunimi, T. Tomita, H. Katsura, and Y. Kato, Phys. Rev. A **110**, 043312 (2024).
- [8] S. Ozaki and H. Katsura, Phys. Rev. Research **7**, 013092 (2025).
- [9] M. Nakagawa, H. Katsura, and M. Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 043259 (2024).
- [10] H. Katsura, C. Matsui, C. Paletta, and B. Pozsgay, Phys. Rev. Research, in press (2025).