1　2022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、相関の強い多体系における創発的な物性の解明および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的な手法や、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、平衡および非平衡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・トポロジカル系

非エルミート量子多体系における複素 Berry 位相の量子化

基底状態にギャップをもつエルミート量子多体系のトポロジカル相を解析する有効な手法の一つとして、量子化 Berry 位相を用いる方法がある。これは系に局所的なひねりを導入することで定義された Berry 位相が、幾つかの対称性の下で量子化し、それによりトポロジカル相を特徴付けているスピン一重項などのオブジェクトの有無を検出できるというものである。

坪田は、楊、赤城、桂とともに、この量子化 Berry 位相の方法を非エルミートな場合に拡張した。実ラインギャップがある非エルミート量子多体系において、複素 Berry 位相という非エルミート系に一般化された Berry 位相が、二種類の一般化された対称性の下で $\mathbf{Z}_2$ 量子化を示すことを証明した。また、具体的なモデルでの数値的検証により、この量子化複素 Berry 位相がフェルミオン系・スピン系に関わらず非エルミート多体系のトポロジカル相の解析に有効であることを示した。これらの結果は原著論文 [2] にまとめられた。

一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する SU(3) 磁性体における CP^2 スキルミオン結晶

2009 年、磁気スキルミオンと呼ばれるトポロジカルソリトンが、磁性体中で観測された。それを契機として、実験と理論の両面から、磁気スキルミオンの研究が精力的に行われ、トポロジカルホール効果などの磁気スキルミオンに起因した新たな物理現象の発見や、低消費電力デバイスをはじめとする磁気スキルミオンの工業的応用の提案がされてきた。近年では、従来の磁気スキルミオンにはない特性をもつトポロジカルソリトンの探索が盛んに行われ、反強磁性体やフェリ磁性体などの様々な磁性体中のスキルミオンも議論されている。ただし、これまで安定なスキルミオン結晶（スキルミオンが周期的に配列した磁気構造）が見出されていたのは、秩序変数空間が $S^2 = CP^1$ である古典スピン系あるいはスピン 1/2 の系に限られていた。

甘利と赤城は、Gudnason（河南大）、新田（慶應大）、Shnir（JINR）と共に、秩序変数空間が複素射影空間 $CP^2 = \mathrm{SU}(3)/\mathrm{U}(2)$ である、一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用と Zeeman 相互作用を含んだスピン 1 の SU(3) 強磁性体の模型において、低磁場領域と高磁場領域で異なる種類のスキルミオン結晶が系の基底状態として現れることを見出した。具体的には、高磁場領域では単位トポロジカルチャージをもつスキルミオンの三角格子が、低磁場領域ではトポロジカルチャージ 1/2 をもつスキルミオン、すなわち半スキルミオンから成るハニカム格子が系の基底状態であることがわかった。これらのスキルミオン結晶を、系の秩序変数空間が CP^2 であることから、CP^2 スキルミオン結晶と名付けた (図 1.1.1(a) 参照)。上記 2 種類の CP^2 スキルミオン結晶間の遷移は、相転移ではなくクロスオーバーであると、これらの配位が持つエネルギーやトポロジカルチャージ密度から計算される配位的エントロピー（Shannon エントロピーを場の理論的に一般化した量）の振る舞いなどから結論付けた。また、これらの配位は従来の磁気スキルミオンと同様に磁気双極子の構造因子に triple-q 構造を持つことに加え、CP^2 スキルミオン結晶特有の性質として、磁気四重極子の構造因子においても triple-q 構造を持つことを数値的に見出した (図 1.1.1(b) 参照)。これらの結果は、国際会議 [23, 35]、国内会議 [43, 56, 59, 68, 70] で発表されたほか、原著論文 [5] にまとめられた。

$S = 1$ スピン鎖における双対性・臨界性・トポロジー

$S = 1$ スピン鎖における Haldane 相は、対称性に守られたトポロジカル相 (SPT 相) の典型例として知られている。Kennedy と田崎は、非局所的なユニタリー変換（KT 変換）を用いることで、Haldane 相は隠れた $\mathbf{Z}_2 \times \mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相にあることを明らかにした。またこれにより、隠れた反強磁性秩序の存在や有限系における端状態の存在などを統一的に理解できることを示した。KT 変換により、元々の $S = 1$ スピン鎖では無秩序であった基底状態は、古典的な秩序のある状態へとマップされる。このことは、量子 Ising 鎖において、Kramers-Wannier 双対変換が無秩序相と秩序相を関係付ける点に似ている。

このことをヒントに、Yang と桂、Li（東大物性研）と奥西（新潟大）は、スピン 1 bilinear-biquadratic (BLBQ) 鎖とその KT 変換による双対をパラメター λ で内挿する模型を考え、その性質を調べた。その結果以下の興味深い結果が得られた。(i) 自己双対線

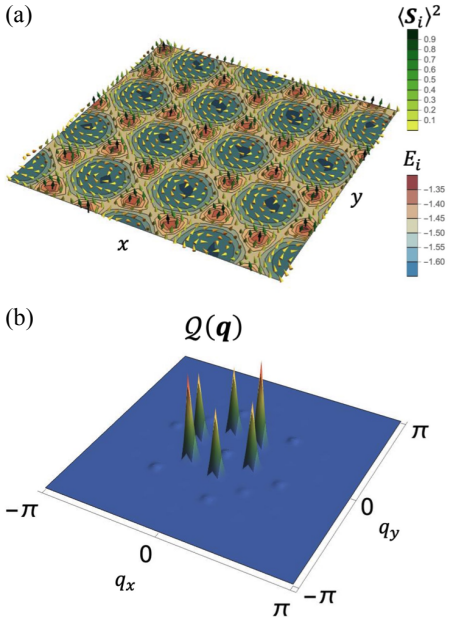

図 1.1.1: (a) CP^2 スキルミオン結晶と (b) その磁気四重極子の構造因子 $Q(\mathbf{q})$

における臨界性：量子 Ising 鎖とのアナロジーからも、KT 変換により自己双対な場合は、系はギャップレスであることが期待される。このことを、自己双対な模型と $S = 1/2$ XXZ スピン鎖との関係を用いることで厳密に示した。特に元の模型が $S = 1$ Heisenberg 鎖の場合は、自己双対な模型は低エネルギーでは $S = 1/2$ XY スピン鎖に帰着する。また、自己双対線上には中心電荷 $c = 1$ の共形場理論で記述される臨界的な相および多重臨界点が存在することを明らかにした。(ii) トポロジカルおよび自明な Ising 臨界性：BLBQ 模型のパラメター θ および λ の 2 つのパラメターに関する基底状態相図を密度行列繰り込み群（DMRG）法で調べた。その結果、$-\pi/4 \leq \theta \leq \arctan 1/2$, $-1 \leq \lambda \leq 1$ の範囲には、4 つの相があることを明らかにした。このうち 2 つは Haldane 相および $\mathbf{Z}_2 \times \mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相、残りの 2 つは $\mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相である。詳細な解析により、Haldane 相と $\mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相の境界はトポロジカルな Ising 臨界性を示すこと、この相境界の KT 双対は自明な Ising 臨界性を示すことを明らかにした。これらの結果は、研究会 [37, 42] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。Yang はこの研究と、これまで行ってきた研究を博士論文にまとめた [11]。

1.1.2 散逸のある量子多体系

散逸ハバード模型におけるリウビリアンギャップと単一スピンフリップダイナミクス

量子系は、環境との相互作用によって必ず散逸を受ける。そのため、散逸のある開放量子系の問題を考えることは、物理現象をより適切に記述するために必要不可欠である。その中でも、我々は実験的に重要である 2 体の原子ロスのある Fermi-Hubbard 模型に注目した。この模型の理論的な解析は散逸がない場合よりも難しく、例えば緩和時間を特徴づける量であるリウビリアンギャップの厳密な解析は 1 次元かつスピンが 1/2 の場合に限られていた。

そこで d 次元立方格子上の SU(N) フェルミハバード模型のリウビリアンギャップを、1 サイトあたりの平均原子数が 1 個の場合に解析的に求めた。特に、リウビリアンギャップは d や N に依存せず、立方格子の一辺の長さが L かつ周期的境界条件の場合には、L の逆二乗に比例することを示した。次に、各サイトが 1 種類の粒子で詰まった状態から、1 つだけ違う種類の粒子に置き換えた状態を初期状態とするダイナミクスを調べた。この場合、置き換えた粒子の生存確率は散逸や原子間の相互作用が小さな場合には指数関数的に減衰するのに対し、散逸や原子間の相互作用が大きな場合はべき的に減衰することを解析的・数値的に示した。これらの結果は、国際会議 [15, 18, 26, 27, 30]、国内会議 [46, 57] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。

1.1.3 数理物理学・統計力学

量子多体傷跡状態をもつ高次元スピンレスフェルミオン系

非可積分な孤立量子多体系の熱化の機構は統計力学の基礎に関わる問題として長年調べられてきた。現在、熱化を説明する仮説として固有状態熱化仮説 (ETH) が知られており、多くの量子多体系で成立することが確認されている。一方で近年、孤立量子系において非可積分系であるにも関わらず熱化しないダイナミクスが確認された。その背景には量子多体傷跡状態 (QMBS) という非熱的な励起状態の存在が指摘されており、初期状態がこの状態と大きくオーバーラップを持つときに、熱化が妨げられると考えられている。これは上述の ETH を破る例として興味を集めており、QMBS の性質や QMBS の現れる模型の構成法などが盛んに研究されている。ただし従来のこうした研究では一次元系を調べるものが多く、またその自由度に関してはほとんどがスピン系を取り扱っていた。そのため、そうした例と比較して、高次元系およびフェルミオン系のような粒子系での QMBS はまだ十分に調べられていない。

田村と桂はスピンレスフェルミオン系において QMBS が現れる高次元模型の系統的な構成法を新たに提案した。任意の二部格子上のホッピング項と、隣

接サイトの粒子の有無に依存して運動する、density-assisted hopping と呼ばれる項からなる模型を考える。このときホッピング項を定めるホッピング行列は任意の実対称行列とする。そしてこのホッピング行列から決まる係数を持った density-assisted hopping 項を考える。まずこのような模型において、あるクラスの固有状態が厳密に構成できることを明らかにした。さらにこの状態が実際に非熱的な状態であることを議論するために、エンタングルメント・エントロピー、粒子数密度の相関関数、ダイナミクスを数値的に計算した。その結果、構成された状態が非熱的な性質を持つことが確認された。なお、この模型の構成法において、並進対称性は必ずしも仮定されないため、並進不変でないランダムネスのある場合の厳密な QMBS の例にもなっている。最後に、この QMBS を基底状態に持つハミルトニアンを具体的に構成し、ある条件のもとでそれが一意な基底状態であることを証明した。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。

$S = 1$ 量子磁性体における半古典的シミュレーション

量子磁性体の古典的極限を考えるとき、個々のスピンを O(3) ベクトルと考えるのが通例である。これにより、スピン 1/2 の磁性体における通常の磁気秩序は、半古典的なレベルで驚くほどうまく記述できる。しかし、$S > 1/2$ のような磁性体は「より古典的」であると考えられるにもかかわらず、O(3) ベクトルではその特性の多くを説明することはできない。特に、磁性絶縁体、鉄系超伝導体、冷却原子系において実現の可能性が示唆されている単一サイトで磁気四極子を持つ状態を記述することはできない。これらの問題に対しては、古典的な極限を別の形でとらえる必要があり、そのために新しいツールが必要である。

赤城と Remund（OIST）, Pohle（東大院工）, Romhányi（California 大 Irvine 校）, Shannon（OIST）は、$S = 1$ 量子磁性体の半古典的特性を正しく記述する新しい方法を確立した。この方法は、量子スピン 1 を完全に記述するために必要な $su(3)$ 代数を拡張した $u(3)$ 代数に基づいている。このアプローチにより、磁気双極子と磁気四極子を同等に扱う枠組みが得られ、数値計算を実装しやすい運動方程式の記述が可能となる。

この新しい方法を、三角格子上の $S = 1$ bilinear biquadratic 模型の磁気四極子状態（スピンネマティック状態、スピン液晶状態）に適用し、解析的に求められる古典的低温展開や flavor wave 理論と、古典的モンテカルロ法や分子動力学シミュレーションなどの数値計算との比較を通じ、その妥当性を確かめた。そして、本手法の大きな成果として、半古典分子動力学シミュレーションによる動的構造因子に補正項 ω/T を加え $T \to 0$ の極限を取ることで、$T = 0$ の flavor wave 理論の（量子論の）結果を再現できることを明らかにした [図 1.1.2 参照]。また、実験との関連性を考慮し、本手法が異方性を持つ模型にも適用できることを確かめた。この手法によって、今までアクセスできなかったスピン液晶におけるトポロジカル励起のダイナミクスを調べることもできる。これらの成果は、国際会議 [16, 20, 31] で発表されたほか、論文 [3] にまとめられた。

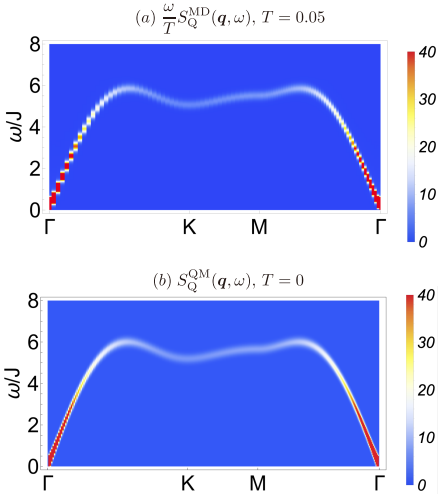

図 1.1.2: (a) $u(3)$ 分子動力学シミュレーションと (b) $T = 0$ での flavor-wave 理論によって得られた磁気四極子 $S_{\mathrm{Q}}(\mathbf{q}, \omega)$ の動的構造因子

1.1.4 その他

高次元拡張 Nicolai 模型におけるフェルミオン的部分系対称性とフラクトン相

フラクトン相とは、(i) 基底状態が指数関数的に縮退している（ただしエントロピーは体積則よりは小さい）、(ii) 運動が空間的に制限された励起をもつ、(iii) 部分系対称性がある、などの特徴をもつ。このような相を実現する微視的モデルとしては、X-cube 模型と呼ばれるものが有名であり、現在まで様々な種類の模型が提案されている。一方で、従来議論されてきた部分系対称性は主にボゾン的な対称性であり、超対称性などのフェルミオン的対称性はほとんど議論されてこなかった。

桂と中山（立教大）は、Nicolai 模型と呼ばれる超対称性をもつ格子フェルミオン系の模型の副格子自由度を含む拡張を考えると、フェルミオン的部分系対称性が自然に現れることを明らかにした。この模型はパラメター g で特徴付けられ、$g \neq 0$ の場合には、超対称性は自発的に破れており、またフェルミオン的部分系対称性の帰結として、基底状態エントロピー S は L^{d-1} に比例する。ただし、$d = 2, 3$ は模型が定義される格子の空間次元で、L は系の線形サイズである。一方で、相互作用が強い極限（$g = 0$）では、元々の Nicolai 模型と同様に、基底状態エントロピーは $S \propto L^d$ と体積則に従う。したがって、こ

の拡張 Nicolai 模型は、$g \neq 0$ の場合には上述のフラクトン的な相にあることが分かった。さらに、これらの格子模型の連続極限や、フェルミオン的部分系対称性のゲージ化についての議論を行った。これらの結果は、原著論文 [4] にまとめられた。

＜受賞＞

[1] 赤城 裕, 第 17 回日本物理学会若手奨励賞「トポロジカルな磁性とその発現機構・創発現象に関する理論的研究」, 日本物理学会, 2023 年 3 月 23 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Shoichi Tsubota, Hong Yang, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian systems, Phys. Rev. B **105**, L201113 (2022).

[3] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhanyi, and Nic Shannon: Semi-classical simulation of spin-1 magnets, Phys. Rev. Research **4**, 033106 (2022).

[4] Hosho Katsura and Yu Nakayama: Spontaneously broken supersymmetric fracton phases with fermionic subsystem symmetries, J. High Energ. Phys. **2022**, 72 (2022).

[5] Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, and Yakov Shnir: CP^2 skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a generalized Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Phys. Rev. B **106**, L100406 (2022).

[6] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Quantum many-body scars of spinless fermions with density-assisted hopping in higher dimensions, Phys. Rev. B **106**, 144306 (2022).

[7] Hong Yang, Linhao Li, Kouichi Okunishi, and Hosho Katsura: Duality, criticality, anomaly, and topology in quantum spin-1 chains, Phys. Rev. B **107**, 125158 (2023).

[8] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura: Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, Phys. Rev. A **107**, 033332 (2023).

(学位論文)

[9] 北濱駿太: Exact results for Kitaev nanoribbons with boundary dephasing (修士論文).

[10] 長尾健太郎: 超対称性のある格子フェルミオン模型とスピン 1/2 鎖の関係 (修士論文).

[11] Hong Yang: Symmetry-Protected Topological Phases of Quantum Particles with Integer Spin (博士論文).

[12] 田村健祐: Rigorous Results for SU(N) Ferromagnetism in Hubbard-type Models (博士論文).

(著書)

[13] 『–Python で実践– 基礎からの物理学とディープラーニング入門 (エンジニア入門シリーズ 112)』, 福嶋 健二, 桂 法称.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[14] Hong Yang: Magnetic and Topological Phases of "Spinful Bosons" in Optical Lattices, *Ultracold Atoms Japan 2022*, Okinawa, Apr. 2022.

[15] Hironobu Yoshida: Exact analysis of the Liouvillian gap for the SU(N) Hubbard model with two-body loss in arbitrary dimension, *Ultracold Atoms Japan 2022*, Okinawa, Apr. 2022.

[16] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon, Spin-1 magnets – A $u(3)$ Formalism, *The 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 [HFM22]*, Paris, France, June 2022.

[17] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, *The 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 [HFM22]*, Paris, France, June 2022.

[18] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Exact analysis of the Liouvillian gap for the SU(N) Hubbard model with two-body loss, *SCES 2022*, Amsterdam, the Netherlands, July 2022.

[19] Shunta Kitahama (Hosho Katsura, Naoyuki Shibata): Kitaev Nanoribbon Model with Boundary Dephasing, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[20] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon, Spin-1 magnets – A $u(3)$ Formalism, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[21] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[22] Atsushi Ono and Yutaka Akagi, Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[23] Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir: CP^2 Skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a generalized Dzyaloshinskii-Moriya interaction, *2nd International Symposium on Trans-scale Quantum Science (TSQS2022)*, Tokyo, Nov. 2022.

[24] Shunta Kitahama: Kitaev Nanoribbon with Boundary Dephasing, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2022*, Kyoto, Nov. 2022.

[25] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, The German Conference of Women in Physics (Deutsche Physikerinnentagung), Karlsruhe, Germany, Nov. 2022.

[26] Hironobu Yoshida: Exact analysis of the Liouvillian gap and dynamics in the dissipative SU(N) Fermi-Hubbard model, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2022*, Kyoto, Dec. 2022.

[27] Hironobu Yoshida: Single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, *The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration*, Nagoya University, Feb. 2023.

[28] Shunta Kitahama (Hosho Katsura, Naoyuki Shibata): Kitaev Nanoribbon Model with Boundary Dephasing, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[29] Kensuke Tamura (Hosho Katsura): General theory of flat-band ferromagnetism in the SU(n) Hubbard model, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[30] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[31] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon, Spin-1 magnets – a $u(3)$ Formalism, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[32] Atsushi Ono and Yutaka Akagi, Optically controlled spin scalar chirality in centrosymmetric magnetic metals, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

招待講演

[33] Hironobu Yoshida: Rigorous Results for Lattice Fermion Models with SU(N) Symmetry, *Asian-European workshop on "*SU(N) *physics in condensed matter and cold atoms"*, online, Japan, May 2022.

[34] Hosho Katsura: Magnonic analogs of topological insulators in two and three dimensions, *Band Topology in Quantum Magnets: From Nontrivial Excitations to Non-Hermitian Topology and Spintronics*, Dresden, Germany, June 2022.

[35] Yutaka Akagi: Emergence/control of topological spin textures in various spin systems, *12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, online, Spain, July 2022.

[36] Hosho Katsura, Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, *Quantum extreme universe from quantum information*, Kyoto, Japan, Sept. 2022.

[37] Hosho Katsura, Duality, criticality, and topology in quantum spin-1 chains, *Delft Many-Body Workshop Series*, Delft, the Netherlands, Oct. 2022.

[38] Hironobu Yoshida, Majorana reflection positivity in the attractive SU(N) Fermi-Hubbard Model, *Rigorous statistical mechanics and related topics*, Kyoto, Japan, Nov. 2022.

[39] Hosho Katsura, Magnonic analogs of topological insulators in 2 and 3 dimensions, *APCTP-IACS-SNBNCBS Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter*, Kolkata, India, Nov. 2022.

[40] Hosho Katsura, Flat bands and related topics, *APCTP-IACS-SNBNCBS Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter*, Kolkata, India, Nov. 2022.

[41] Hosho Katsura, Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, *Rikkyo MathPhys 2023* Japan, Jan. 2023.

(国内会議)

一般講演

[42] Hong Yang: Duality, Criticality, Anomaly, and Topology in Quantum Spin-1 Chains, 第 17 回量子スピン系研究会, 2022 年 4 月, ハイブリッド.

[43] 赤城裕: 磁性体におけるスピン液晶スキルミオンの開拓, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 第二期公募研究キックオフミーティング, 2022 年 6 月, 東京大学物性研究所 (ハイブリッド).

[44] 田村健祐: SU(n) Hubbard 模型における平坦バンド強磁性の一般論, 格子上の場の理論と連続空間上の場の理論, 2022 年 7 月, 京大基礎物理学研究所.

[45] 山本真太朗, 甘利悠貴, 澤渡信之: Din-Zakrzewski インスタントン上のフェルミオンの数理, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[46] 吉田博信, 桂法称: 原子ロスのある SU(N) フェルミハバード模型のリウビリアンギャップの厳密な解析, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[47] 北浜駿太, 柴田直幸, 桂法称: 境界散逸のあるキタエフナノリボン模型の厳密解, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[48] 田村健祐, 桂法称: SU(n) Hubbard 模型における平坦バンド強磁性の一般論, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[49] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: Rydberg 原子を用いた Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する量子スピン鎖の実現方法の提案, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[50] 中川大也, 桂法称, 上田正仁: 多成分 Hubbard 模型の部分可積分性：散逸によって誘起される非エルゴード的ダイナミクス, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[51] 小野淳, 赤城裕: 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティと円偏光自由度の非線形結合, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[52] 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文: 数値的負符号問題の解決 1 有限温度キタエフ模型の数値解, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[53] 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文: 数値的負符号問題の解決 2 無限乗積展開法の発展, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[54] 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文: 数値的負符号問題の解決 3 第二密度行列くりこみ群法の発見, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[55] 甘利悠貴, 赤城裕, 澤渡信之, Yakov Shnir: 一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する CP^2 非線形シグマ模型における孤立スキルミオン, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[56] 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir: 一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する SU(3) スピン系における CP^2 スキルミオン結晶, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[57] 吉田博信, 桂法称: 原子ロスのある SU(N) フェルミハバード模型におけるリウビリアンギャップと粒子数ダイナミクス, 第 4 回冷却原子研究会「アトムの会」, 2022 年 9 月, 関西セミナーハウス.

[58] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: Rydberg 原子を用いた Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する量子スピン鎖の実現方法の提案と非平衡スピンダイナミクス, 第 4 回冷却原子研究会「アトムの会」, 2022 年 9 月, 関西セミナーハウス.

[59] 赤城裕: Topological magnetism in quantum spin-nematics, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2022 年 12 月, 名古屋大学 (ハイブリッド).

[60] 甘利悠貴, 赤城裕, S. Gudnason, 新田宗土, Y. Shnir: Realization of spin nematic Skyrmion crystals in cold atom systems, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2022 年 12 月, 名古屋大学 (ハイブリッド).

[61] 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川将文: 行列積くりこみ群法の開発, 物性研短期研究会「固体におけるエニオンと分数統計粒子研究の最前線」, 2023 年 2 月, 物性研究所 (ハイブリッド).

[62] 長尾健太郎, 桂法称: 超対称性のある格子フェルミオン模型とスピン 1/2 XXZ 鎖の関係, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[63] 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称: XCuCl$_3$ (X=Tl, K) の BEC 相における電場誘起トリプロン熱ホール効果, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[64] 山本真太朗, 甘利悠貴, 澤渡信之: Din–Zakrzewski インスタントンとマヨラナフェルミオンの数理, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[65] 古谷峻介, 桂法称, 堀田知佐: 非一様な feedback 制御による量子多体基底状態への緩和, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[66] 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川将文: 行列積繰り込み群法による Yang-Lee 模型の解析, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[67] 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川将文: 行列積くりこみ群法による二次元量子多体系の解析, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[68] 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir: スピン軌道相互作用を有する冷却原子系における CP^2 スキルミオン結晶とその派生相, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

招待講演

[69] 桂法称: SU(N) ハバード模型における厳密な結果, 格子上の場の理論と連続空間上の場の理論, 2022 年 7 月, 京大基礎物理学研究所.

[70] 赤城裕: トポロジカルな磁性とその発現機構・創発現象に関する理論的研究, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

(セミナー)

[71] Hong Yang: Duality, Criticality, Anomaly, and Topology in Quantum Spin-1 Chains, OIST 量子理論ユニットセミナー, 2022 年 4 月, ハイブリッド.

[72] Hosho Katsura: Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, University of Tuebingen, Mathematical Physics Seminar, 2022 年 5 月, ハイブリッド.

[73] Hosho Katsura: Magnonic analogs of topological insulators in two and three dimensions, Utrecht University, Quantum Matter Colloquium, 2022 年 10 月, ハイブリッド.

[74] Hosho Katsura: Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, University of Amsterdam, CMT seminar, 2022 年 10 月, ハイブリッド.

[75] Hironobu Yoshida: Rigorous results for lattice fermion models with SU(N) symmetry, 凝縮系理論グループセミナー, 京都大学, 2022 年 12 月, ハイブリッド.

[76] Yuki Amari: Skyrmion crystals and their relatives in SU(3) chiral magnets, OIST 量子理論ユニットセミナー, 2023 年 2 月, ハイブリッド.

[77] Hironobu Yoshida: Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, Quantum Materials Seminar, University of California, Berkeley, 2023 年 3 月, ハイブリッド.

[78] Shunta Kitahama: Kitaev nanoribbon with boundary dephasing: Non-Hermitian free-fermion Hamiltonians and its application, Quantum Materials Seminar, University of California, Berkeley, 2023 年 3 月, ハイブリッド.

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. 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) quantum magnetism, (iii) dissipative quantum many-body systems, and (iv) 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 2022 are the following:

- Topological phases of matter
  - Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian systems [1]
  - Duality, criticality, anomaly, and topology in quantum spin-1 chains [2]
- Quantum magnetism
  - CP^2 skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction [3]
  - Semi-classical simulation of spin-1 quantum magnets [4]
- Nonequilibrium quantum dynamics
  - Quantum many-body scars of spinless fermions in higher dimensions [5]
  - Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model [6]
- Mathematical and statistical physics
  - Spontaneously broken supersymmetric fracton phases with fermionic subsystem symmetries [7]
  - Flat-band ferromagnetism in the SU(N) Hubbard and Kondo lattice models [8]

[1] S. Tsubota, H. Yang, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **105**, L201113 (2022).

[2] H. Yang, L. Li, K. Okunishi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **107**, 125158 (2023).

[3] Y. Amari, Y. Akagi, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, Phys. Rev. B **106**, L100406 (2022).

[4] K. Remund, R. Pohle, Y. Akagi, J. Romhanyi, and N. Shannon, Phys. Rev. Research **4**, 033106 (2022).

[5] K. Tamura and H. Katsura, Phys. Rev. B **106**, 144306 (2022).

[6] H. Yoshida and H. Katsura, Phys. Rev. A **107**, 033332 (2023).

[7] H. Katsura and Y. Nakayama, J. High Energ. Phys. **2022**, 72 (2022).

[8] K. Tamura and H. Katsura, Preprint, arXiv:2303.15820 [cond-mat.str-el] (2023).