

2021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

量子スピン鎖における非線形 Drude 重み

近年、量子多体系における非線形輸送を特徴づける「非線形 Drude 重み」という量が新たに導入され、これに関連した研究が盛んに行われている。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、Bethe 仮設法を用いて厳密に解析し、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。このような発散は線形 Drude 重みには見られない特徴である。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、原著論文 [3] にまとめられたほか、国内会議 [43] で発表された。

谷川と桂はさらに、基底状態エネルギーに対する有限サイズ補正の一般形を求め、そこから異方性パラメータ Δ の全領域における非線形 Drude 重みの詳細な振る舞いを調べた。その結果、応答の次数やパラメータの値に応じて、系のサイズに関して収束・べき発散・対数発散のいずれかの振る舞いを示すことを明らかにした。また、こうした Δ に関する不連続な振る舞いが数値計算結果と一致することを確認した。さらに、任意の次数の非線形 Drude 重みが収束する特別なパラメータ値の存在も発見した。このことは、相互作用が存在するにもかかわらず自由粒子系と似た非線形応答特性を示す特別な場合があることを示唆している。これらの結果は、原著論文 [10] にまとめられたほか、国内外の研究会 [31, 43] で発表された。また、谷川はこれらの結果を修士論文としてまとめた [18]。

Z_3 パラフェルミオン模型の相図

パラフェルミオンは、マヨラナフェルミオンの自然な拡張であり、また量子計算への応用が期待されることから、近年注目されている。従来よく議論されているパラフェルミオンの模型は、 Z_N クロック模型と呼ばれる統計力学系に対応するものであり、パラフェルミオンの二次の項のみからなる。桂と Utrecht 大 (オランダ) の Wouters, Schuricht, Aachen 工科大 (ドイツ) の Hassler は、二次の項だけでなく四次の項も含む模型を考え、そのような系の分数量子ホール系・強磁性体・超伝導体からなるヘテロ構造における実現可能性を議論した。また、特に Z_3 パラフェルミオンの場合について、四次の項の効果や、密度行列繰り込み群法や場の理論的手法、厳密解を用いて詳しく調べた。その結果、四次の項とフリップ項と呼ばれる二次の項との競合により様々な相が現れることを明らかにした。フリップ項の係数 f が正の場合には、 Z_3 トポロジカル相と自明相の間の相転移が起き、これは中心電荷 $c = 4/5$ の共形場理論で記述される。また、その端点には $c = 8/5$ の多重臨界点が現れる。一方、 $f < 0$ の場合には、四次の項の係数 U が比較的小さい領域に $c = 1$ の臨界相が広がっていることを明らかにした。興味深いことに、この臨界相と Z_3 トポロジカル相の間の相転移は、Kosterlitz-Thouless 転移であることも分かった。これらの結果は、原著論文 [15] にまとめられた。

平坦バンドをもつボゾン系におけるモット絶縁体的 Bose-Einstein 凝縮 (BEC)

カゴメ格子上のタイトバインディング模型のような平坦バンド系は、強磁性などの強相関系特有の現象の舞台として過去に多くの研究が行われている。一方で、これらは主に電子系に関するものに限られており、平坦バンドのあるボゾン系に関する理論的研究はあまり例がない。

桂と川島・森田 (東大・物性研)、田中 (有明高専)、田崎 (学習院大) は、平坦バンドをもつ相互作用するボゾン系を考え、これらの系の基底状態はモット絶縁体的であるにもかかわらず、(準) 非対角長距離秩序 (ODLRO) を示すことを明らかにした。具体的には、まず一連の平坦バンドをもつタイトバインディング模型を考え、ここにある種の相互作用を導入した場合には、基底状態が「数サイトに広がった」1粒子固有状態の積状態として書き下せることを示した。次に、この基底状態における1粒子密度行列は、古典ループガス模型における相関関数として表現できることを示した。このことを用いて、高次元極限では、モデルのパラメータを変化させると、ODLROを示す BEC 相への量子相転移が起きることを明らかにした。さらに、二次元の場合については、モンテカルロ・シミュレーションにより対応する古典ループガス模型における上述の相関関数やヘリシティモジュラスと呼ばれる量を詳細に調べた。その結果、あるクラスの格子では、パラメータを変化させると Kosterlitz-Thouless 転移が起こり、準 ODLRO を示

す基底状態へと変化することを明らかにした。これらの結果は、原著論文 [7] にまとめられた。

拡張された $SU(N)$ Hubbard 模型における η クラスタリング状態

$SU(2)$ 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、 N 成分フェルミオン系における 3 体以上のクラスタリング状態は冷却原子の文脈で注目を集めている。

吉田・桂は、 η ペアリング状態を 1 次元格子上の N 成分フェルミオン系に一般化した、 η クラスタリング状態を構成した。また、 $SU(N)$ Hubbard 模型を拡張することによって、これらの状態を高エネルギーの固有状態として持つモデルを構築した。次に、シングレット相関関数を計算することで、これらの状態の振る舞いが N が偶数の場合と奇数の場合で定性的に異なることを明らかにした。 N が偶数の場合は、 η クラスタリング状態は N 粒子の ODLRO を示す。一方、 N が奇数の場合、相関はバルクでは距離に対して指数関数的に減少するが、両端の相関は熱力学極限で消えないことを発見した。最後に、 η クラスタリング状態が唯一の基底状態となるハミルトニアンを構築した。これらの結果は国際会議 [30]、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。また、吉田はこれらの結果を修士論文の一部としてまとめた [19]。

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・桂と中野 (東大理物・藤堂研) 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離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、国内会議 [38] で発表されたほか、原著論文 [5] にまとめられた。

マグノンのトポロジカル結晶絶縁体における Dirac 表面状態

量子ホール絶縁体、量子スピンホール絶縁体、Weyl 半金属などのマグノン系における対応物は近年盛んに調べられており、温度勾配に垂直な方向の熱流やスピン流など、その非自明な物性が議論されている。一方、電子系の 3 次元トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体の有する Dirac 表面状態は多くの興味深い性質を示し、トポロジカル物性の研究の中でも中心的な位置にあったが、そのマグノン系での対応物はほとんど考えられてこなかった。

近藤と赤城は、磁性体における時間反転と空間の半並進を組み合わせた対称性により、マグノンのようなボゾン系でも Kramers 縮退が生じることに着目し、この対称性に保護された Dirac 表面状態を有する 3 次元磁性体のモデルを構築した。この系はトポロジカル結晶絶縁体に対応するマグノン系のモデルであり、表面状態は電子系の場合のように、スピン運動量ロッキングなどの性質を示す。また、この系における電場応答も調べた。磁性体に電場をかけたとき、Dzyaloshinskii-守谷相互作用が変化することで、マグノンの磁気モーメントに依存した Aharonov-Casher 位相が加わることが知られている。今回の系でこの寄与を考えたとき、マグノンの表面状態の Dirac 分散が、互に向かい合った面でそれぞれ上下にシフトし、その過程でマグノン流が駆動できることを明らかにした。このような現象は、電子系のトポロジカル (結晶) 絶縁体でも、従来のマグノン系でも見られないものである。また、van der Waals 磁性体 CrI_3 がモノクリニック積層構造を有するとき、密度汎関数法などで見積もられたパラメータでマグノンバンドを計算することで、上記の表面状態が現れることを明らかにした。これらの結果は、原著論文 [9] にまとめられた。また、近藤はこれらの結果を博士論文の一部としてまとめた [21]。

マグノンの非線形スピン Nernst 効果とひずみにより調整可能な純スピン流

物質中の粒子が外場とは垂直に流れるといった非自明な輸送現象が、Berry 曲率の観点から次々に調べられている。中でも、磁性体中の輸送キャリアであるマグノンのスピン Nernst 効果は純スピン流の生成手段の 1 つである。しかし、線形応答のみを考慮した既存の理論的枠組みの中では、Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの重い原子に由来した特有の相互作用を必要としていた。

近藤と赤城は、反強磁性体における温度勾配に関する 2 次までの応答理論を構築し、マグノンの非線形スピン Nernst 効果を初めて定式化した。特に、非線形スピン Nernst 流が波数空間における Berry 曲率の双極子モーメントのような量 (拡張 Berry 曲率双極子) で記述されることを明らかにした。マグノンの拡張 Berry 曲率双極子は Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの特有の相互作用がなくても、系の対称性を崩すだけで容易に現れる。そのため、マグノン

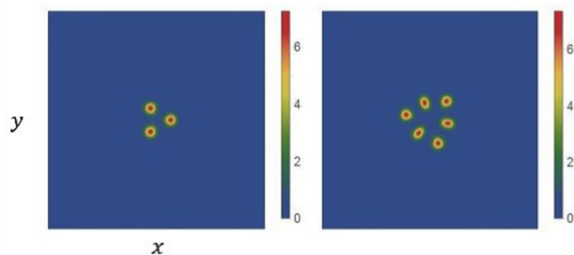


図 1.1.1: CP^2 非線型シグマ模型における分数スキルミオンのエネルギー密度. 左から合計トポロジカルチャージ $Q = 1, 2$.

の非線形スピン Nernst 効果は、広い範囲の単純な Heisenberg 反強磁性体で期待できる純スピン流生成の機構となっている。また、拡張 Berry 曲率双極子は外的に制御できることが多く、いくつかの反強磁性体において純スピン流の向きを格子ひずみで変えられることを明らかにした。さらに、マグノンの非線形スピン Nernst 効果で生じるスピン流の大きさを評価し、典型的な磁性体で十分に観測可能であることを示した。これらの結果は、国際会議等 [27, 45] で発表されたほか、原著論文 [17] にまとめられた。

CP^{N-1} 非線型シグマ模型における分数スキルミオン

スキルミオンのようなトポロジカル励起 (ソリトン) は位相的な保存量であるトポロジカルチャージによって特徴づけられ、通常整数値をとる。しかし、分数のトポロジカルチャージを持つトポロジカルソリトンが、冷却原子系や磁性体、中性子星の内部などに現れることが理論的に示唆されている。例えば、Heisenberg 模型や $SU(2)$ Yang-Mills 理論の有効模型である $O(3)$ 非線型シグマ模型において、容易面磁気異方性を表すポテンシャル項 (と Skyrme 項または Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの安定項) を加えると、トポロジカルチャージ $1/2$ を持った配位が得られる。このような配位は分数スキルミオン、またはメロンと呼ばれ、実際に $Co_5Zn_9Mn_3$ などのカイラル磁性体でも観測されている。

赤城と、甘利 (JINR), Gudnason (河南大), 新田 (慶応大), Shnir (JINR) は、 $O(3)$ 非線型シグマ模型の一般化である CP^{N-1} 非線型シグマ模型にポテンシャル項と安定項を加え、分数スキルミオン (分子) を数値的に構成した。ここで加えたポテンシャル項は、模型の $SU(N)$ 対称性を極大トラス部分群 $U(1)^{N-1}$ まで破り、また $N = 2$ のとき、容易面異方性をもつ相互作用に帰着するものである。図 1.1.1 に、 $N = 3$ のときに得られた配位、すなわち CP^2 分数スキルミオン分子のエネルギー密度を示す。エネルギーのピークが分数スキルミオンに対応している。各々の分数スキルミオンはトポロジカルチャージ $1/3$ を持ち、それらが合計のトポロジカルチャージ Q が整数となる分子を形成していることが見て取れる。これらの結果は、国内外の研究会 [35, 47, 48, 50]

で発表されたほか、原著論文 [12] にまとめられた。

1.1.3 数理物理学・統計力学

フラストレーションフリーな模型間の関係

フラストレーションフリー系は、可解模型のひとつのクラスで、全系の基底状態がそれぞれの局所ハミルトニアン基底状態となるという特徴をもつ。このようなフラストレーションフリー系の典型例としては、強磁性 Heisenberg 模型や Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki (AKLT) 模型などが挙げられる。

桂は、Utrecht 大 (オランダ) の Wouters, Schuricht とともに、このようなフラストレーションフリーな模型を系統的に構成する方法を提案した。この方法の要となるのは、conjugation と呼ばれる操作で、これは元々は Witten により超対称性のある系に適用されたものを、超対称性のない模型にも適用したのになっている。この方法を用いると、例えば、古典 Ising 模型のような、基底状態が自明に分かる模型から出発して、フラストレーションフリーな模型を無数に構成できることを明らかにした。これにより、従来は個別に議論されていた一群の模型を統一的に取り扱うことができることが分かった。また、既知のマヨラナフェルミオン、パラフェルミオン系のフラストレーション系のハミルトニアンを、この手法により構成できることを示した。さらに、この手法により新しいフラストレーションフリー系を複数構成し、そのエネルギーギャップの存在などを示した。これらの結果は、原著論文 [8] にまとめられた。

多重磁化プラトーを実現するフラストレートスピンラダー系

フラストレーションや量子効果の強い磁性体では、磁化曲線の途中に平坦な領域が生じる場合があり、これは磁化プラトーと呼ばれている。磁化プラトー上では、磁化は特別な有理数に量子化する。理論的には、二つのスピン鎖が結合したラダー系について多くの研究がなされている。特にスピン $S = 1$ の Gelfand ラダーと呼ばれる模型では、基底状態が厳密に求まり、 $1/4$ の倍数の磁化をもつプラトーが現れることが知られている。桂と、幸城・森田・川島 (東大物性研)、金子 (近畿大) は、この $S = 1$ Gelfand ラダーに、さらに次近接ラング間の反強磁性 Heisenberg 相互作用を加えた模型を考案した。また、この拡張された模型においても、基底状態が解析的に得られることを明らかにした。加えて、この拡張模型では、 $1/4$ の倍数の磁化をもつプラトーと、 $1/6$ の倍数の磁化をもつプラトーが共存することを明らかにした。このように、二つの異なる有理数の整数倍の磁化プラトーが共存する模型は知られておらず、本研究の結果は複雑な磁化プラトー形成の新しいメカニズムを示唆している。これらの結果は、国内会議 [46] で発表されたほか、原著論文 [11] にまとめられた。

正多面体上の反強磁性 Heisenberg 模型に対するエネルギースケール変形

臨界的な 1 次元量子系の局所的なエネルギースケールをサイン二乗関数によって変調した系が、元の系とほぼ同じ基底状態をもつことは多くの例において確認されており、また自由フェルミオン系や共形場理論による理解も確立されている。一方で、2 次元以上でも同様の現象が起きるかは自明ではない。

桂と江口・西野（神戸大）、大賀（東大物性研）、Gendiar（スロバキア科学アカデミー）は、2 次元系への拡張の第一歩として、正多面体上の反強磁性 Heisenberg 模型に対するエネルギースケール変形を考えた。具体的には、正多面体の中心から、各辺の中心へ向かう方向余弦を考え、それに応じた非一様な摂動項を、元々の一様なハミルトニアンに加えたものを、変形したハミルトニアンとして定義した。正 4 面体、正 6 面体、正 8 面体に対しては、このように定義された模型の基底状態は、変形の度合いが弱ければ、元の一様系と一致する。正 12 面体と正 20 面体についても、数値対角化により調べた結果、変形前と後の基底状態のオーバーラップは 98% 以上であった。これらの結果は、方向余弦に依存した摂動項の導入が、サイン二乗変形の球面上に埋め込まれた系への自然な拡張になっていることを示唆している。これらの結果は、国内会議 [54] で発表されたほか、原著論文 [13] にまとめられた。

1.1.4 その他

複数の平坦バンドをもつタイトバインディング模型の構成

平坦バンド系は、強相関係特有の現象の舞台として古くから興味を持たれており、最近ではその冷却原子系を用いた実現も話題を集めている。平坦バンドをもつタイトバインディング模型の構成法には様々なものが知られているが、多くは平坦バンドが一粒子エネルギースペクトルの端ないし中央に現れるタイプのものである。

桂と溝口・初貝（筑波大）、丸山（福岡工大）は、複数のエネルギー準位に平坦バンドが現れるタイトバインディング模型の系統的な構成法を考案した。具体的には、2 次元のハニカム格子、3 次元のダイヤモンド格子やパイロクロア格子の各辺を等価な「分子」で置き換えた格子を考えると、その分子のエネルギー準位に平坦バンドが現れることを見出した。このことは波数空間のハミルトニアンと孤立した分子のハミルトニアン間の行列表示の間に、intertwining relation と呼ばれるものが成立することから、簡単に理解することができる。また、この関係式を用いることにより、各平坦バンドの波動関数を、分子のエネルギー固有関数から構成できることを示した。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。また、国内外の会議で発表された [33, 52]。

Ising マシンにおけるバイナリ整数変換の性能比較

組合せ最適化問題は、与えられた候補の中からある目的関数を最大化あるいは最小化する候補の組合せを探し出す問題である。このタイプの問題の多くは、古典 Ising 模型の基底状態を求める問題 (Ising 問題) に変換可能である。近年ではこうした Ising 問題を効率よく解くハードウェアである Ising マシンの開発が盛んである。Ising 問題は $\{0, 1\}$ から成るバイナリ変数の 2 次式で記述されるため、Ising マシンを用いる際は組合せ最適化問題をバイナリ変数で表現し直す必要がある。また多くの場合、課される制約条件もバイナリ変数で表す必要がある。中でも不等式型の制約条件の場合、整数をバイナリ変数で表す変換が用いられる。このバイナリ整数変換は一意ではないため、実用の観点から Ising マシンにおけるバイナリ整数変換の性能比較は重要となる。

本研究ではバイナリ整数変換を比較する系統的な方法を与え、その方法を 2 次のナップサック問題 (QKP) に適用した。この問題は不等式制約を持ちつつ、その目的関数が一般的なバイナリ変数の 2 次式で与えられる。我々は QKP を解くことで典型的なバイナリ整数変換である one-hot, binary, unary エンコーディングの性能を比較した。そしてサイズが大きな問題に対しては unary エンコーディングが最も良い性能を示すことを明らかにした。これらの結果は原著論文 [4] にまとめられた。

<受賞>

- [1] 柴田 直幸, 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程), 東京大学, 2022 年 3 月 24 日.
- [2] 吉田 博信, 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程), 東京大学, 2022 年 3 月 24 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] Yuhi Tanikawa, Kazuaki Takasan, and Hosho Katsura: Exact results for nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, *Phys. Rev. B* **103**, L201120 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].
- [4] Kensuke Tamura, Tatsuhiko Shirai, Hosho Katsura, Shu Tanaka, and Nozomu Togawa: Performance comparison of typical binary-integer encodings in an Ising machine, *IEEE Access* **9**, 81032 (2021).
- [5] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura: Symmetry-protected topological phases in spinful bosons with a flat band, *Phys. Rev. Research* **3**, 023210 (2021).
- [6] Tomonari Mizoguchi, Hosho Katsura, Isao Maruyama, and Yasuhiro Hatsugai: Flat-band solutions in D -dimensional decorated diamond and pyrochlore lattices: Reduction to molecular problem, *Phys. Rev. B* **104**, 035155 (2021).
- [7] Hosho Katsura, Naoki Kawashima, Satoshi Morita, Akinori Tanaka, and Hal Tasaki: Mott Insulator-like Bose-Einstein Condensation in a

- Tight-Binding System of Interacting Bosons with a Flat Band, *Phys. Rev. Research* **3**, 033190 (2021).
- [8] Jurriaan Wouters, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht: Interrelations among frustration-free models via Witten’s conjugation, *SciPost Phys. Core* **4**, 027 (2021).
- [9] Hiroki Kondo and Yutaka Akagi: Dirac surface states in magnonic analogs of topological crystalline insulators, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 177201 (2021).
- [10] Yuhi Tanikawa and Hosho Katsura: Fine structure of the nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, *Phys. Rev. B* **104**, 205116 (2021).
- [11] Hidehiko Kohshiro, Ryui Kaneko, Satoshi Morita, Hosho Katsura, and Naoki Kawashima: Multiple magnetization plateaus induced by farther neighbor interaction in an $S = 1$ two-leg Heisenberg spin ladder, *Phys. Rev. B* **104**, 214409 (2021).
- [12] Yutaka Akagi, Yuki Amari, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, and Yakov Shnir: Fractional Skyrmion molecules in a CP^{N-1} model, *J. High Energ. Phys.* **2021**, 194 (2021).
- [13] Takuya Eguchi, Satoshi Oga, Hosho Katsura, Andrej Gendiar, and Tomotoshi Nishino: Energy Scale Deformation on Regular Polyhedra, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 034001 (2022).
- [14] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura: Exact eigenstates of extended $SU(N)$ Hubbard models: generalizations of η -pairing states with N -particle off-diagonal long-range order, *Phys. Rev. B* **105**, 024520 (2022).
- [15] Jurriaan Wouters, Fabian Hassler, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht: Phase diagram of an extended parafermion chain, *SciPost Phys. Core* **5**, 008 (2022).
- [16] Ning Wu, Hosho Katsura, Sheng-Wen Li, Xiaoming Cai, Xi-Wen Guan: Exact solutions of few-magnon problems in the spin- S periodic XXZ chain, *Phys. Rev. B* **105**, 064419 (2022).
- [17] Hiroki Kondo and Yutaka Akagi: Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable pure spin current, *Phys. Rev. Research* **4**, 013186 (2022).
- (学位論文)
- [18] 谷川悠飛: Exact Analysis of Nonlinear Drude Weights in the Spin-1/2 XXZ Chain (修士論文).
- [19] 吉田博信: Rigorous Results for Lattice Fermion Models with $SU(N)$ Symmetry (修士論文).
- [20] 三ノ宮典昭: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Modes in Interacting Majarana Chains (博士論文).
- [21] 近藤寛記: Theory of surface states and transport phenomena in topological magnon systems (博士論文).
- [22] 柴田直幸: Construction of Exact Quantum Many-Body Scar States (博士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] Yutaka Akagi (Hiroki Kondo, Hosho Katsura): Topological Magnons from “Nematicity”, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (online), May 2021.
- [24] Kimberly Remund (Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon): New Method for Studying Dynamics and Thermodynamics of Spin-1 Magnets: Application to the Ferroquadrupolar Order, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (online), May 2021.
- [25] Rico Pohle (Yutaka Akagi, Kimberly Remund, Nic Shannon): Dynamics of a quantum liquid crystal from numerical simulation, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (online), May 2021.
- [26] Rico Pohle (Yutaka Akagi, Kimberly Remund, Nic Shannon): Dynamics of spin-1 magnets from numerical simulations, XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (online), Aug. 2021.
- [27] Hiroki Kondo (Yutaka Akagi): Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable pure spin current, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [28] Kensuke Tamura (Hosho Katsura): Construction of quantum many-body scars in higher-dimensional spinless fermion systems, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [29] Shoichi Tsubota (Hong Yang, Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian many-body systems, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [30] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Generalized η -pairing States in Extended $SU(N)$ Hubbard Models, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [31] Yuhi Tanikawa (Hosho Katsura): Exact results for nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [32] Kimberly Remund (Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon): Spin-1 magnets – a $u(3)$ formalism, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- 招待講演
- [33] Hosho Katsura: Intertwining construction of flat bands, *The 21st International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design*, online, Japan, Sept. 2021.

- [34] Hosho Katsura: Experimental mathematical physics, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, online, Japan, Nov. 2021.
- [35] Yutaka Akagi: Topological Excitations and Their Emergent Phenomena in Quantum Spin Nematics, *International Conference on Frustration, Topology and Spin Textures*, online, Japan, Dec. 2021.
- [36] Naoyuki Shibata, Onsager's scars in disordered spin chains, *CONMAT2021*, online, Spain, Oct. 2021.
- (国内会議)
- 一般講演
- [37] 吉田 博信: $SU(N)$ 引力ハバード模型におけるマヨラナ鏡映正値性, 理論研究会: 量子多体系の相形成とダイナミクス, 2021 年 4 月, オンライン.
- [38] Hong Yang: Magnetic and Topological Phases of Spinful Bosons in Optical Lattices, 第 3 回 冷却原子研究会「アトムの会」, 2021 年 8 月, オンライン.
- [39] 田村 健祐: 高次元スピネルフェルミオン系における量子多体傷跡状態の構成, 第 3 回 冷却原子研究会「アトムの会」, 2021 年 8 月, オンライン.
- [40] 田村健祐, 桂法称: 高次元スピネルフェルミオン系における量子多体傷跡状態の構成, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [41] 吉田博信, 桂法称: 拡張された $SU(N)$ ハバード模型における N 粒子の非対角長距離秩序を持つ厳密な固有状態, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [42] Hong Yang, Linhao Li, Kouichi Okunishi, Hosho Katsura, Criticality, duality, and topology in quantum spin-1 chains, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [43] 谷川悠飛, 桂法称: スピン $1/2$ XXZ 鎖における非線形スピン Drude 重みの異方性に関する不連続な振る舞い, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [44] 坪田祥一, 楊 泓, 赤城裕, 桂法称: 反転対称性の下での複素ベリー位相の量子化, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [45] 近藤寛記, 赤城裕: 反強磁性体におけるマグノンの非線形スピネルンスト効果とひずみにより調整できる純スピン流, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [46] 幸城秀彦, 金子隆威, 森田悟史, 桂法称, 川島直輝: 多重磁化プラトーを実現するフラストレートスピラダー系の厳密解, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [47] 赤城裕: 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起, 第 5 回 QLC 若手コロキウム「古典的液晶と量子液晶の関係探索」, 2021 年 11 月, オンライン.
- [48] 赤城裕: Spin nematic Skyrmions in quantum magnets, 令和 3 年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究, 2022 年 2 月, オンライン.
- [49] 真田兼行, 桂法称: スカラーカイラリティに関連した量子多体傷跡状態をもつスピン模型, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [50] 赤城裕, 甘利悠貴, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir: 磁性体におけるスピン液晶分数スキルミオン, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [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の円偏光制御, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [52] 溝口知成, 桂法称, 丸山勲, 初貝安弘: 修飾されたハニカムおよびダイヤモンド格子上のフラットバンドの求め方, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [53] 中川大也, 桂法称, 上田正仁: 多成分 Hubbard 模型における η ペアリング状態とエルゴード性の弱い破れ日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [54] 江口卓也, 大賀理司, 桂法称, 西野友年: 正多面体上の Heisenberg モデルに対するエネルギースケール変形, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [55] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, Nic Shannon: Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [56] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon: Spin-1 magnets – a $u(3)$ formalism 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [57] 桂法称: 非エルミート量子系における複素ベリー位相の実部の量子化, 新学術領域「離散幾何学」領域会議, 2022 年 3 月, オンライン.
- (セミナー)
- [58] 桂 法称: The $SU(N)$ Hubbard model: some rigorous results, CREST Research Seminar on “Theoretical studies of topological phases of matter”, 2021 年 5 月, オンライン.
- [59] 桂 法称: Experimental mathematical physics, 統計力学セミナー (東京大学), 2021 年 7 月, オンライン.
- [60] 赤城 裕: Topological Magnons from “Nematicity”, OIST internal seminar (joint seminar by Shannon and Motome groups), 2021 年 7 月, オンライン.
- [61] 桂 法称: Sine-square deformation of one-dimensional critical systems, CEVIS, 2021 年 10 月, オンライン.
- [62] 吉田 博信: 拡張 $SU(N)$ ハバード模型における一般化 η -ペアリング状態, 藤本・水島研セミナー (大阪大学), 2021 年 10 月, オンライン.
- [63] 近藤 寛記: 対称性に保護されたマグノンのディラック表面状態と反強磁性体におけるマグノンの非線形スピネルンスト効果, Online CMT seminars, 2021 年 11 月, オンライン.
- [64] 桂 法称: 量子多体傷跡状態の代数的構成法, 素粒子論セミナー (京都大学), 2022 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 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) low-dimensional correlated systems, (ii) off-diagonal long-range order in Hubbard-like models, (iii) symmetry-protected topological phases, (iv) topological magnon systems, and (v) frustration-free spin models. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2021 are the following:

- Strongly correlated systems
 - Exact analysis of nonlinear Drude weights for quantum spin chains [1, 2]
 - Phase diagram of an extended parafermion chain [3]
 - Bose-Einstein condensation in an interacting boson model with flat bands [4]
 - $SU(N)$ generalization of η -pairing states and off-diagonal long-range order [5]
- Topological phases of matter
 - Symmetry-protected topological phases in spinor Bose-Hubbard models [6]
 - Dirac surface states in magnonic analogs of topological crystalline insulators [7]
 - Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable spin current [8]
 - Fractional Skyrmion molecules in a CP^{N-1} nonlinear sigma model [9]
- Mathematical and statistical physics
 - Interrelations among frustration-free models via Witten’s conjugation [10]
 - Multiple magnetization plateaus in an extended $S = 1$ Gelfand ladder [11]
 - Exact solutions of few-magnon problems in the spin- S periodic XXZ chain [12]
 - Performance comparison of typical binary-integer encodings in an Ising machine [13]

- [1] Y. Tanikawa, K. Takasan, and H. Katsura, Phys. Rev. B **103**, L201120 (2021) [Selected as Editors’ Suggestion].
- [2] Y. Tanikawa and H. Katsura, Phys. Rev. B **104**, 205116 (2021).
- [3] J. Wouters, F. Hassler, H. Katsura, and D. Schuricht, SciPost Phys. Core **5**, 008 (2022).
- [4] H. Katsura, N. Kawashima, S. Morita, A. Tanaka, and H. Tasaki, Phys. Rev. Research **3**, 033190 (2021).
- [5] H. Yoshida and H. Katsura, Phys. Rev. B **105**, 024520 (2022).
- [6] H. Yang, H. Nakano, and H. Katsura, Phys. Rev. Research **3**, 023210 (2021).
- [7] H. Kondo and Y. Akagi, Phys. Rev. Lett. **127**, 177201 (2021).
- [8] H. Kondo and Y. Akagi, Phys. Rev. Research **4**, 013186 (2022).
- [9] Y. Akagi, Y. Amari, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, J. High Energ. Phys. **2021**, 194 (2021).
- [10] J. Wouters, H. Katsura, and D. Schuricht, SciPost Phys. Core **4**, 027 (2021).
- [11] H. Kohshiro, R. Kaneko, S. Morita, H. Katsura, and N. Kawashima, Phys. Rev. B **104**, 214409 (2021).
- [12] N. Wu, H. Katsura, S.-W. Li, X. Cai, and X.-W. Guan, Phys. Rev. B **105**, 064419 (2022).
- [13] K. Tamura, T. Shirai, H. Katsura, S. Tanaka, and N. Togawa, IEEE Access **9**, 81032 (2021).