

2015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。また、量子多体系や可解模型に関する数理物理学的研究も同時に行っている。

1.1.1 強相関系

相互作用するマヨラナフェルミオン系のトポロジカル秩序

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。また近年では、鉄の原子鎖を用いた実験的な実現も提案されている [Nadj-Perge *et al.*, *Science* **346**, 602 (2014)]。桂は、学習院大の高橋、Utrecht 大の Schuricht とともに、マヨラナフェルミオン間の相互作用を導入した Kitaev 模型について調べた [3, 30]。その結果、相図中のあるライン上で、基底状態が厳密に求まることを示した。このラインは、先行研究で数値的に調べられた相図中のトポロジカル相内にあり、求められた基底状態は、相互作用を導入した Kitaev 模型のトポロジカル相を代表していると考えられる。また、この基底状態と元の相互作用のない Kitaev 模型の基底状態とは、エネルギーギャップを閉じることなく断熱的に繋がっていることを証明した。また、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を求めた。

スピン-電荷結合系におけるカゴメネットワーク形成相と超固体相

遍歴電子と局在スピンの結合を記述する最も基本的な模型の一つである強磁性近藤格子模型は、マンガン酸化物等の強相関電子系の物性を理解するために長い間研究がなされてきた。最近では、幾何学的フラストレーションを有する格子系において、非共線・

非共面な磁気構造を持った種々の新規な磁性相の発現や量子異常ホール効果などの輸送現象の研究が精力的になされている。赤城と東大理工の求はこうした幾何学的フラストレーションの効果による新しい磁性・量子輸送現象を開拓する目的で、三角格子上の強磁性近藤格子模型を詳細に調べ、その基底状態相図を変分計算とアニーリング法を相補的に用いることで明らかにした。その結果、カゴメ格子状のネットワーク上でスピンの強磁性的に揃い、残りのサイト上のスピンはそれらと逆向きとなるような、カゴメネットワーク形成を伴う非自明な秩序相を得た。また、磁場変化に対する状態相図も調べたところ、このフェリ磁性状態は $1/2$ 磁化プラトーを経て、超固体相に連続転移することが明らかとなった。これらの相は、カゴメネットワーク形成や大きなフント結合に由来して、スピンの (ほぼ) 完全偏極した massless Dirac 電子を伴う非自明な磁性相である。これらの結果は投稿論文としてまとめられ [2]、日本物理学会で発表された [26]。

1.1.2 トポロジカル系

2次元トポロジカル絶縁体の Z_2 トポロジカル数

トポロジカル絶縁体とは、自明なバンド絶縁体とは断熱的に接続することができない絶縁体で、非自明なトポロジカル数により特徴づけられる。このトポロジカル数は、並進対称性がある場合には、波数空間での積分により自然に定義することが可能であるが、乱れのある場合には、その定義は自明ではない。桂は、学習院大の高麗と、乱れのある2次元の時間反転対称なトポロジカル絶縁体 (class AII) に対するトポロジカル数を、非可換幾何の手法を用いて導入した。また、このトポロジカル数の時間反転対称な摂動に対する安定性を証明した。このトポロジカル数は、Atiyah-Singer の Z_2 トポロジカル数の自然な拡張とみなせる。また、2次元のトポロジカル絶縁体の典型例である Kane-Mele 模型や、Bernevig-Hughes-Zhang 模型などに適用し、実際にこのトポロジカル数が非自明な値をとることを示した。これらの結果は [5] にまとめられ、また国際会議での招待講演などで発表された [20, 22, 32]。

量子スピンネマティック相におけるトポロジカル欠陥

液晶 (ネマティック相) において、トポロジカル欠陥は重要な役割を果たす。しかし、そのスピン版ともみなせるスピンネマティック相という、液晶とよく似た対称性を有する非自明な磁性相におけるトポロジカル欠陥の役割はあまり知られていない。そこで赤城と富山県大の植田、OIST の Shannon は、スピンネマティック相におけるトポロジカル欠陥について詳細に調べた。こうした非自明な磁性相が安定に存在する最も単純な模型の一つは、スピン 1 のハイゼンベルグ模型に双二次相互作用項を付加した模型 (bilinear-biquadratic 模型) である。三角格子上のこ

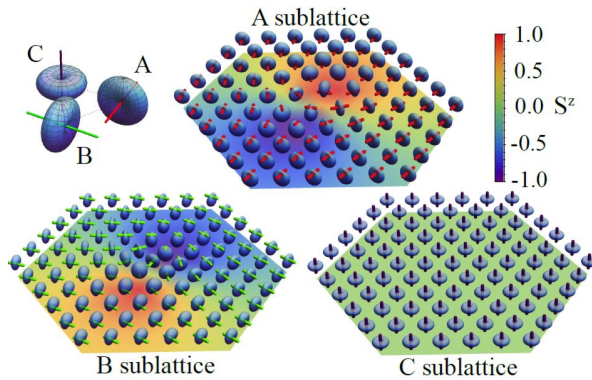


図 1.1.1: SU(3) symmetric point の 3 副格子 anti-ferro nematic order における π_2 トポロジカル欠陥。

の模型に対し、ホモトピーに基づいた解析と数値的な最適化法 (アニーリング法) を用いることで、どのようなトポロジカル欠陥が現れるかを明らかにした。その結果、SU(3) 対称性を有する特別な点において、新しいソリトン解を見出した [図 1.1.1]。そのうちのひとつである高次のトポロジカルチャージを有するソリトンは、自発的に 2 つに分裂し反発的相互作用が生じるという、今までに見つかった事のないタイプのソリトンである。これらの結果は投稿論文としてまとめられた [4]。また、国際会議での招待講演をはじめ、幾つかの研究会で発表された [19, 15, 17, 29, 33, 35]。

1.1.3 可解模型・統計力学

サイン二乗変形系

空間変調のある 1 次元量子系は、数値計算における有限サイズ効果の軽減や、量子状態の転送などの観点から注目を集めている。特に、量子臨界系にサイン二乗変形と呼ばれる変形を施した場合には、開放境界条件での多体の基底状態が、一様周期系の基底状態とほぼ一致するという非自明な性質が知られている。また、可解模型や共形場理論との非自明な関係も示唆されている。桂は、新潟大学の奥西と、1 次元の自由フェルミオン系のサイン二乗変形を、ポテンシャル中の 1 粒子量子力学の逆問題として定式化した [1, 28]。その結果、この系の 1 粒子固有関数は、Gegenbauer 多項式を用いて表せることを示した。また、このことから、この系の多体の基底状態が一様周期系の基底状態と厳密に一致することを証明した。さらに格子系との対応も数値対角化により調べ明らかにした。

有限時間スケールにおける時間周期ダイナミクス

周期的な駆動が掛かった量子多体系の動的構造の理解は統計物理学における重要な未解決問題となっている。このような時間周期系は、システムの構造

を制御する Floquet engineering という分野の発展と共に、新しいブレイクスルーを起こしうる物理系として注目を集めている。一方で、時間周期系の定常状態に関する十分な理解は極限的な場合 (相互作用のないフェルミオン系や高周波極限) を除いて得られていない。一般的な理論として、このような理想極限から少しでも外れると定常状態は熱化現象のため興味深い性質を示さなくなることが知られている。ところが、実用的には、時間周期系の無限時間極限を見ることは無意味で、実験の時間スケールで見えるような現象に興味がある。このような有限時間スケールで系の動的構造を理解することが今後の応用上極めて重要であるにも関わらず、厳密な解析はほとんどなされていないのが現状である。桑原、森 (東大)、斎藤 (慶応大) は Floquet-Magnus 理論をベースとして、有限時間ダイナミクスの基本的な枠組みを与えることに成功した [6, 8]。同時に、時間スケールで系を記述する有効ハミルトニアン の性質が定性的に異なることに着目し、時間周期系では我々は「Floquet Prethermalization」と呼ぶ 2 段熱化現象が普遍的に観測されることを示した。これらの成果は、[25] をはじめ幾つかの研究会で発表された [11, 12, 13]。

超対称性の破れとゴールドストーンフェルミオン

近年、非相対論的な場の理論における、自発的対称性の破れに付随する南部・ゴールドストーンボゾンが注目を集めている。三ノ宮と桂は、IPMU の中山と、格子フェルミオン系における超対称性の破れとゴールドストーンフェルミオンの関係について調べた。具体的には、Nicolai 模型と呼ばれる格子模型を拡張し、その模型において超対称性が自発的に破れている場合があることを示した。さらに数値対角化や場の理論的手法を用いて、低エネルギー励起が線形分散をもち、質量のないディラックフェルミオンによって記述されることを明らかにした。これらの成果は、[14] をはじめ幾つかの研究会で発表された [18, 34]。

1.1.4 その他

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を用いた実現 [Taie *et al.*, *Science advances* **1**, e1500854 (2015).] も話題を集めている。桂は、福岡工業大の丸山と、平坦バンドをもつモデルハミルトニアン の一般的な構成法についての解説記事を執筆した [9]。また桂は、最近話題のスキルミオンなどのトポロジカル励起と非線形方程式についての解説記事を執筆した [10]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kouichi Okunishi and Hoshio Katsura: Sine-square deformation and supersymmetric quantum mechanics, *J. Phys. A: Math. Theor.* **48**, 445208 (2015).

- [2] Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome: Spontaneous formation of kagome network and Dirac half-semimetal on a triangular lattice, *Phys. Rev. B* **91**, 155132 (2015).
- [3] Hosho Katsura, Dirk Schuricht, and Masahiro Takahashi: Exact ground states and topological order in interacting Kitaev/Majorana chains, *Phys. Rev. B* **92**, 115137 (2015).
- [4] Hiroaki T. Ueda, Yutaka Akagi, and Nic Shannon: Quantum solitons with emergent interactions in a model of cold atoms on the triangular lattice, *Phys. Rev. A* **93**, 021606(R) (2016). [selected for Kaleidoscope]
- [5] Hosho Katsura and Tohru Koma: The \mathbf{Z}_2 Index of Disordered Topological Insulators with Time Reversal Symmetry, *J. Math. Phys.* **57**, 021903 (2016).
- [6] Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, and Keiji Saito: Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven many-body quantum systems, *Ann. Phys.* **367**, 96 (2016).
- [7] Itai Arad, Tomotaka Kuwahara, and Zeph Landau: Connecting global and local energy distributions in quantum spin models on a lattice, *J. Stat. Mech.* 033301 (2016).
- [8] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito: Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 120401 (2016).
- (国内雑誌)
- [9] 桂 法称, 丸山 勲: フラットバンドの構成法—分子の奏でるハーモニー—, *固体物理* **50**, No. 5, 41 (2015).
- [10] 桂 法称: 非線形方程式とトポロジカル励起, *数理解科学*, 2016年1月号, No.631.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [11] Tomotaka Kuwahara: Persistent metastability in periodically driven systems, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015)*, Kashiwa, Jun. 2015.
- [12] Tomotaka Kuwahara: Universal character of metastability in periodically driven systems, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Kyoto, Aug. 2015.
- [13] Tomotaka Kuwahara: Universal character of metastability in periodically driven systems, *Yukawa International Seminar 2015 (YKIS2015)*., Kyoto, Aug. 2015.
- [14] Noriaki Sannomiya: Supersymmetry breaking and Goldstone fermions in an extended Nicolai model, *KEK Theory Workshop 2015*, Tsukuba, Dec. 2015.
- [15] Yutaka Akagi (Hiroaki T. Ueda, Nic Shannon): Topological defects in quantum spin-nematics, *APW-CEMS joint Workshop "Highlights of modern condensed matter physics"*, Wako, Jan. 2016.
- [16] Nobuyuki Yoshioka (Toshiya Ideue, Takashi Kurumaji, Hosho Katsura): Anomalous phonon Hall effect in polar ferrimagnets, *APW-CEMS joint Workshop "Highlights of modern condensed matter physics"*, Wako, Jan. 2016.
- [17] Yutaka Akagi: Topological Defects in Quantum Spin-nematics, *LMU-UT Cooperation in Physics Workshop*, Tokyo, Mar. 2016.
- [18] Noriaki Sannomiya: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in an extended Nicolai model, *LMU-UT Cooperation in Physics Workshop*, Tokyo, Mar. 2016.
- 招待講演
- [19] Yutaka Akagi (Hiroaki T. Ueda, Nic Shannon): Topological defects in quantum spin-nematics, *the 20th International Conference on Magnetism (ICM2015)*, Barcelona, July 2015.
- [20] Hosho Katsura: Topological indices of disordered insulators with time-reversal symmetry, *LMU-UT Cooperation in Physics Workshop*, Tokyo, Feb. 2016.
- (国内会議)
- 一般講演
- [21] 桂 法称, 高吉 慎太郎, 渡辺 伯陽, 青木 秀夫: 平坦バンドのある Bose-Hubbard 模型におけるペア朝永-Luttinger 液体相, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [22] 桂 法称, 高麗 徹: カイラル対称性をもつトポロジカル絶縁体と非可換指数定理, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [23] 坂本 良平, 桂 法称: 多成分非線形 Klein-Gordon 方程式における解の線形安定性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [24] 吉岡 信行, 松浦 弘泰, 小形 正男: Hofstadter's butterfly 中の massless Dirac fermion と free fermion, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [25] 桑原 知剛, 森 貴司, 斉藤 圭司: 時間周期系における準定常性の普遍的性質, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [26] 赤城 裕, 求 幸年: スピン-電荷結合系における磁場中相図: カゴメネットワーク形成相と超固体相, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [27] 植田 浩明, 赤城 裕, Nic Shannon: 三角格子上スピ ン-1-Bilinear-Biquadratic 模型の 120 度反強磁性相における \mathbf{Z}_2 -vortex の配向性とエネルギー, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.

- [28] 奥西 巧一, 桂 法称: サイン 2 乗変形と超対称量子力学, 東大物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」, 2015 年 11 月, 東大物性研.
- [29] 赤城 裕 (植田 浩明, Nic Shannon): 量子スピネマティック相におけるトポロジカル欠陥, 東大物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」, 2015 年 11 月, 東大物性研.
- [30] 桂 法称: Exact ground states and topological order in interacting Majorana- and parafermion chains, 第 1 回トポ物質科学領域研究会, 2015 年 12 月, 京都大学.
- [31] 吉岡 信行, 井手上 敏也, 車地 崇, 桂 法称: Anomalous phonon Hall effect in polar ferrimagnets, 第 1 回トポ物質科学領域研究会, 2015 年 12 月, 京都大学.
- [32] 桂 法称, 高麗 徹: 乱れのある \mathbf{Z}_2 トポロジカル絶縁体と非可換指数定理, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.
- [33] 赤城 裕, 植田 浩明, Nic Shannon: 三角格子上的 Bilinear-Biquadratic 模型におけるトポロジカル欠陥, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.
- [34] 三ノ宮 典昭, 桂 法称, 中山 優: 拡張 Nicolai 模型における超対称性の破れと Goldstone フェルミオン, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.

招待講演

- [35] 赤城 裕: 量子スピネマティック相におけるトポロジカル欠陥, 第五回「強相関電子系理論の最前線」研究会, 2015 年 12 月, 勝浦観光ホテル.

(セミナー)

- [36] 桑原 知剛: Universal character of metastability in periodically driven systems, 統計力学セミナー, 2015 年 5 月, 東京大学.
- [37] 桂 法称: Exact ground states and topological order in interacting Kitaev chains, 統計力学セミナー, 2015 年 6 月, 東京大学.
- [38] 桑原 知剛: 有限時間スケールにおける時間周期系の一般理論, 羽田野研究室セミナー, 2015 年 10 月, 東京大学.
- [39] 桑原 知剛: General theory for finite-time dynamics in periodically driven many-body systems, 村尾研究室セミナー, 2015 年 11 月, 東京大学.
- [40] 赤城 裕: Topological defects in quantum spin-nematics, 統計力学セミナー, 2015 年 12 月, 東京大学.

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 quantum phases. We study theoretically these 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) spin-charge coupled systems, and (iii) periodically driven quantum systems. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the study of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2015 are the following:

- Strongly correlated systems
 - Topological order in interacting Kitaev/Majorana chains [1]
 - Kagome network and Dirac half-semimetal in ferromagnetic Kondo lattices [2]
- Topological phases of matter
 - Disordered topological insulators [3]
 - Topological defects in quantum spin nematics [4]
 - Thermal Hall effect of magnons and phonons
- Solvable models and statistical physics
 - Sine-square deformation and supersymmetric quantum mechanics [5]
 - Transient dynamics of periodically driven quantum systems [6, 7]

[1] Hosho Katsura, Masahiro Takahashi, and Dirk Schuricht, *Phys. Rev. B*, **92**, 115137 (2015).

[2] Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome, *Phys. Rev. B* **91**, 155132 (2015).

[3] Hosho Katsura and Tohru Koma, *J. Math. Phys.* **57**, 021903 (2016).

[4] Hiroaki T. Ueda, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, *Phys. Rev. A* **93**, 021606(R) (2016).

[5] Kouichi Okunishi and Hosho Katsura, *J. Phys. A: Math. Theor.* **48**, 445208 (2015).

[6] Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, and Keiji Saito, *Ann. Phys.* **367**, 96 (2016).

[7] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 120401 (2016).