

# 2017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、関連の強い多体系（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 強相関係

#### 1次元電子系の光学応答におけるスピン・軌道相互作用と Zeeman 相互作用の協奏

低次元強相関係における電子スピン共鳴や光学伝導度などの動的特性は、系のハミルトニアンの詳細や低エネルギー励起を調べるプローブとして、理論的にも実験的にも盛んに研究されている。また、近年ではトポロジカル絶縁体の発見を契機に、固体中のスピン・軌道相互作用の重要性が再認識されている。

桂は、東大理物の Bolens、宮下、小形と1次元電子系において、スピン・軌道相互作用(SOC)と外部磁場との Zeeman 相互作用が、どのように光学応答に影響を与えるかを調べた [3]。具体的には、強相関電子系を記述する標準的な模型である Hubbard 模型に、SOC をスピンに依存するホッピングの形で取り込んだ模型に久保公式を適用して調べた。まず、オンサイト Coulomb 相互作用  $U = 0$  のとき、SOC と磁場の両方が存在する場合には、electric dipole spin resonance (EDSR) と呼ばれる応答が起こることを解析的に示した。また、この EDSR が SOC を特徴づけるベクトル(Dベクトル)と磁場のなす角度に非自明に依存することを明らかにした。次に、 $U \neq 0$  の場合について数値的に調べ、 $U$  の大きさに応じて EDSR のピーク周波数の位置や振幅が変化することを明らかにした。ハーフフィリングの Mott 絶縁体相では、 $U \rightarrow \infty$  で EDSR の応答はなくなってしまうが、この場合についても有効スピン模型を用いて光学伝導度を調べ、SOC と磁場の双方に依存する非自明な応答が起こることを明らかにした。

## ダイマー・トライマー・スピン鎖と SPT

スピン 1 の bilinear-biquadratic (BLBQ) スピン鎖は、対称性に守られたトポロジカル (SPT) 相である Haldane 相や、ダイマー相、強磁性相やスピン四重極相を含む量子スピン系のひな型として、現在まで多くの研究がなされてきた。桂と Lee (東大物性研), Oh, Han (韓国・成均館大) は、BLBQ スピン鎖とは異なるタイプの模型として、ハミルトニアンがダイマーおよびトライマーへの射影演算子からなる模型を考えた。ここで、ダイマーとは隣り合う 2 つのスピン 1 からなるスピン二重項、トライマーとは隣接する 3 つのスピン 1 からなるスピン一重項を意味する。

この模型の基底状態における様々な相関関数やエンタングルメントを密度行列繰り込み群(DMRG)により調べたところ、ダイマー・トライマー相互作用の強さの比に応じて、(1) ダイマー相、(2) SPT 相、(3) トライマー液体相、(4) 巨視的に縮退した相、の 4 つの相が現れることが明らかになった (図 1.1.1)。また、数値計算結果は、これらの相の間の相転移は 1 次転移であることを示唆している。相 (1), (2) は、それぞれ BLBQ スピン鎖のダイマー相、SPT 相と断熱的に繋がっていると考えられる。また、ギャップレスの相 (3) は、BLBQ 鎖のスピン四重極相と定性的には同じ相であることを、種々の相関関数・エンタングルメントおよび基底状態を比較することで示した。さらに、相 (4) では基底状態の縮退度は系のサイズに対して指数関数的に増大することを、その厳密な下限を求めることにより示した。これらの結果は、論文 [5] にまとめられ、国際会議などで発表された [20, 43]。

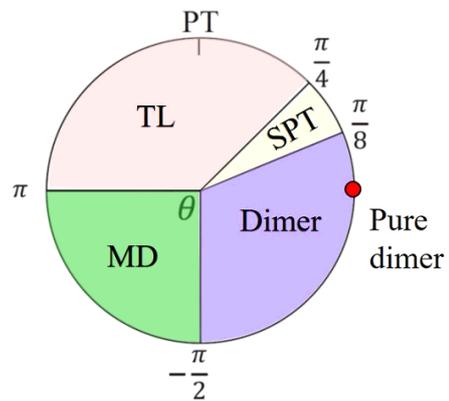


図 1.1.1: ダイマー・トライマー・スピン鎖の基底状態相図。ダイマー相互作用とトライマー相互作用の強さ比は、 $\cos \theta : \sin \theta$  である。Dimer, SPT, TL, MD は、それぞれダイマー相、SPT 相、トライマー液体相、巨視的に縮退した相の各相を表す。

## ボソン系とフェルミオン系の基底状態エネルギー

相互作用のない場合、ボソン系の基底状態エネルギーは常に、同じ粒子数で同じ一粒子固有エネルギーを持つフェルミオン系の基底状態エネルギー以下になる。これは、ボソン系では最低エネルギーの一粒子状態にいくらでも粒子を「詰める」ことができるためである。しかし、粒子間に相互作用が働く場合にも、この関係式が成立するかは自明ではない。桂は、押川 (東大物性研), Nie (中国・四川大) と、この問題を格子系について詳しく調べた。具体的には、同じ格子上で同じ飛び移り積分のハードコアボソン系とスピンレスフェルミオン系の基底状態エネルギーを様々な場合に比較した。その結果、すべての飛び移り積分が非負で、格子が一定の条件を満たす場合には、ボソン系の基底状態エネルギーの方が必ずフェルミオン系のそれよりも下がることを厳密に示した。また同様の不等式を、スピン自由度がある場合やその他の相互作用がある場合についても拡張した。

このような基底状態エネルギーの間の「自然な」大小関係は、飛び移り積分が負符号をとる (ホッピングにフラストレーションがある)、あるいは複素の場合には破れることもある。実際に、磁束の貫いたリング状の系や、そのようなリングが結合した系 (図 1.1.2)、カゴメやパイロクロア格子などの平坦バンドを持つ系においては、ボソン系の基底状態エネルギーの方がフェルミオン系のそれよりも高くなることを、有限系の数値対角化や基底状態エネルギーの下限に関する Anderson の議論 [P. W. Anderson, Phys. Rev. **83**, 1260 (1951)] などを用いて示した。これらの結果は、論文 [9] にまとめられている。

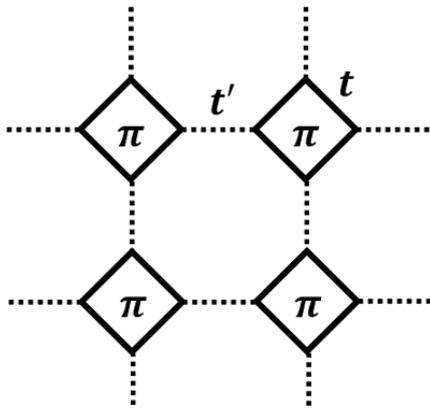


図 1.1.2:  $\pi$  フラックスが貫いたリングが弱く結合した系。実線 (破線) 上の飛び移り積分は、 $t$  ( $t'$ ) である。 $t'/t < (\sqrt{2}-1)/2$  のとき、ハードコアボソン系の基底状態エネルギーの方が、スピンレスフェルミオン系のそれよりも高くなることが示せる。

## 1.1.2 トポロジカル系

## 捻り境界条件下での Kitaev 模型とゼロモード

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、川畑、小林と Wu (北京理工大学) とともに、捻り境界条件を課した Kitaev 模型について調べた。その結果、この系では、端がないにもかかわらずマヨラナ・ゼロモードが現れる場合があることを明らかにした。また、このマヨラナ・ゼロモードは、ある種の場合には乱れに対してもロバストであることを、ハミルトニアンと交換する演算子を構成することで具体的に示した。さらに最近接相互作用がある場合も、フェルミオン・パリティによる議論および数値対角化から、トポロジカル相では、ある捻り角においてマヨラナ・ゼロモードが存在することを明らかにした。

これらの結果は、従来は端がある場合だけに現れると考えられていたマヨラナ・ゼロモードが、端がない場合にも表れ得ることを明らかにしたものであり、意義のあるものである。また、捻り境界条件は、物理的にはリング状の系を貫く磁束とジョセフソン結合により実現できるものと考えられる。これらの結果は、論文誌 [1] にまとめられ、また国際会議などで発表された [25, 32]。

乱れたトポロジカル絶縁体:  $\mathbf{Z}_2$  指数の新しい数値計算法

物質内部はエネルギーギャップを有する一方、その表面にはギャップレスの“金属”状態が現れる物質をトポロジカル絶縁体と呼び、そのトポロジカルな性質から乱れに強いとされ、大きな注目を集めている。しかし、系に乱れがあると、系を特徴づけるトポロジカル不変量の値を決めることは数値的にも難しい。特に、トポロジカル不変量の一つである  $\mathbf{Z}_2$  指数の値を計算する方法は、今までにも数多く試みられてきた。

赤城・桂は、高麗 (学習院大) と、非可換微分幾何に基づいた  $\mathbf{Z}_2$  指数の新たな数値計算法を提案し、それを乱れのある  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル絶縁体の典型的な模型に適用した [7]。本手法は、強い乱れがある場合にも適用可能で、 $\mathbf{Z}_2$  指数を数値的に効率良く計算できるという特徴をもつ。この  $\mathbf{Z}_2$  指数は、2つの射影演算子の差で表される演算子  $A = P_F - D_a P_F D_a$  の固有値  $\lambda = 1$  の縮退度の偶奇によって定義される。ここで、 $P_F$  は Fermi エネルギー以下の準位への射影演算子、 $D_a$  は  $D_a^2 = 1$  を満たす Dirac 作用素である。この  $\mathbf{Z}_2$  指数は、厳密には無限系で定義されるものである [8]。本研究では、どのように  $A$  を有限次元の行列で近似し、有限系で  $\mathbf{Z}_2$  指数  $\nu$  を数値的に計算するかを提案した。この方法を 3 次元  $\mathbf{Z}_2$  ト

ポロジカル絶縁体を記述する Wilson-Dirac 型模型に適用し、 $A$  の固有値を詳細に調べたところ、得られた相図 (図 1.1.3) は、転送行列を用いて得られた相図と良く一致することが分かった。また、強いトポロジカル絶縁相は非自明な  $\mathbf{Z}_2$  指数  $\nu = 1$  によって特徴付けられ、それ以外の相では  $\nu = 0$  となった。2次元の Bernevig-Hughes-Zhang 模型も扱い、先行研究と同様の一致を得た。これらの結果は、乱れがあっても、この  $\mathbf{Z}_2$  指数がトポロジカル絶縁体を特徴付けているトポロジカル不変量だということを示している。これらの結果は、研究会などでも発表された [14, 38]。

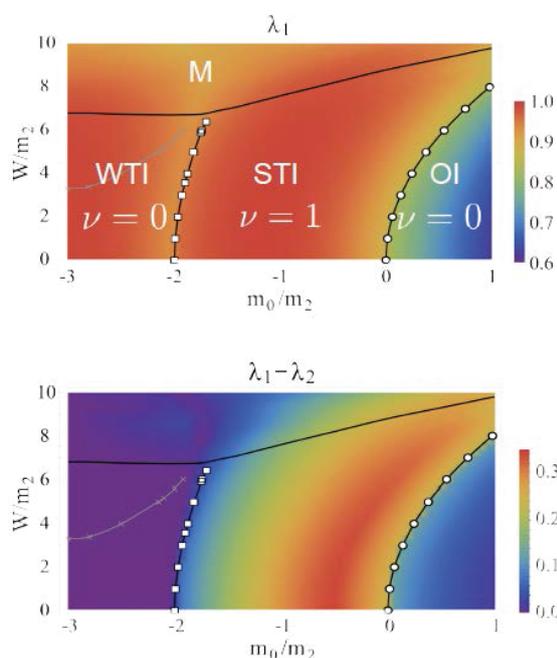


図 1.1.3: Wilson-Dirac 型模型における質量項  $m_0$ , 乱れの強さ  $W$  に対する  $\lambda_1$  と  $\lambda_1 - \lambda_2$ 。ここで、 $\lambda_1, \lambda_2$  は、2つの射影演算子の差で定義される演算子  $A$  の (縮退度を含めて) 大きい方から 1 番目と 2 番目の固有値を表す。M, WTI, STI, OI は、それぞれ diffusive metal, 弱いトポロジカル絶縁体, 強いトポロジカル絶縁体, 通常の絶縁体の各相を表す。また各相における、 $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル数  $\nu$  の値も示した。

### 1.1.3 可解模型・統計力学

#### Fredkin スピン鎖のエンタングルメント

近年、新しいクラスの可解なスピン鎖が注目を集めている。通常、局所相互作用からなる 1次元量子系の基底状態のエンタングルメント・エントロピー

(EE) は、系のサイズ  $n$  に関して定数で抑えられる (面積則)、あるいは対数的に振る舞う。一方、この新しいクラスの模型は、ハミルトニアンが局所的かつバルクでは並進対称な相互作用からなるにもかかわらず、基底状態の EE は、 $\sqrt{n}$  あるいは  $n$  に比例する (体積則) という特異な振る舞いを見せる。

宇田川と桂は、上の模型のさらに拡張である変形 Fredkin スピン鎖という可解な半奇整数スピン鎖の、基底状態および励起状態について調べた。この模型の厳密な基底状態は色付き Dyck パスと呼ばれる組み合わせ論的オブジェクトの重ね合わせとして表現される [2]。我々は、特に模型のパラメータ  $t$  が  $t > 1$  の場合について解析を行った。その結果、有限サイズギャップが系の大きさに対して少なくとも指数的に減衰することを変分法を用いて証明した。また、基底状態における磁化が  $z$  軸方向に沿っており、その  $z$  成分がドメインウォール構造を示すことを明らかにした。さらに、系を任意の場所で二分割したときの基底状態のエンタングルメントについても調べた。レニー・エントロピーおよび EE が、スピン  $1/2$  のときは面積則、スピン  $3/2$  以上のときは体積則を満たすことを、不等式を用いた評価によって示した。また、1サイトあたりのエンタングルメント・スペクトルが低エネルギー領域において近似的に等間隔に分布することを示した。これらの成果は投稿論文、学会で発表された [4, 30]。また、宇田川は、これらの結果を修士論文としてまとめた [11]。

#### 1.1.4 共形場理論のサイン二乗変形

系の局所ハミルトニアンを正弦関数の二乗でスケールリングするサイン二乗変形 (Sine-Square Deformation, SSD) は、1+1次元量子系において開放境界の効果効率的に抑えるためのスムージングとして導入され、その特異な性質からも注目されてきた。特に、共形場理論においても SSD を施したハミルトニアンが Virasoro 代数の生成子を用いて表現され、そのエネルギースペクトルが連続になるなど、様々な性質がこれまで発見されている。

田村と桂は、共形場理論における SSD について、その固有状態は (変形前の一様系の) 真空状態を除いて有限のノルムを持たないことを示した。また SSD を施したハミルトニアンは、Virasoro 演算子の差  $L_1 - L_{-1}$  から生成されるユニタリ変換を用いた極限操作を一様系のハミルトニアン  $L_0$  に作用させることで得られることを示した。これにより、よく知られている一様系の固有状態から SSD ハミルトニアンの固有状態を統一的に求めることができる。さらにはこの変換を介することで、ノルムの発散する固有状態における物理量の期待値を極限操作を用いた外挿値として計算することができる。特に論文 [6] では、SSD ハミルトニアンのゼロエネルギー状態を求め、その「規格化」の方法を明らかにした。これらの結果は各種学会などで発表され [27, 28]、また、田村の修士論文としてまとめられている [12]。

## 1.1.5 その他

桂は、東大理物の Bolens, 宮下, 小形と、 $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  における最近の実験結果を念頭に、Kitaev 物質における局所的電気分極の表式および光学伝導度について調べた。その結果、Kitaev 模型の素励起であるマヨラナフェルミオンの動的相関により、観測されている光学伝導度の低エネルギーの振る舞いを定性的に説明できることを示した [10, 33]。

吉岡, 赤城, 桂は、乱れた 2 次元のトポロジカル超伝導体の相図を、機械学習を用いて調べることを試みた。具体的には、系の準粒子分布を画像とみなし、その特徴を機械に学ばせることで相判定を行う。その結果、乱れがないときの準粒子分布のみを学習した機械への入力として、準粒子分布を平均化した画像を用いることで、乱れがある場合の相判定が可能であることを明らかにした。この結果は、国際会議などで発表されている [18, 19, 22, 24, 36, 37]。

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や光学系を用いた実現も話題を集めている。桂は、平坦バンドをもつ Hubbard 模型における強磁性や関連する話題についての入門的な講演を行った [26]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Kohei Kawabata, Ryohei Kobayashi, Ning Wu, and Hosho Katsura: Exact zero modes in twisted Kitaev chains, *Phys. Rev. B*, **95**, 195140 (2017).
  - [2] Olof Salberger, Takuma Udagawa, Zhao Zhang, Hosho Katsura, Israel Klich, and Vladimir Korepin: Deformed Fredkin Spin Chain with Extensive Entanglement, *J. Stat. Mech.*, 063103 (2017).
  - [3] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita: Synergetic effect of spin-orbit coupling and Zeeman splitting on the optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model, *Phys. Rev. B*, **95**, 235115 (2017).
  - [4] Takuma Udagawa and Hosho Katsura: Finite-size gap, magnetization, and entanglement of deformed Fredkin spin chain, *J. Phys. A: Math. Theor.* **50**, 405002 (2017).
  - [5] Yun-Tak Oh, Hosho Katsura, Hyunyong Lee, and Jung Hoon Han: A new kind of spin-1 chain model with competing dimer and trimer interactions, *Phys. Rev. B*, **96**, 165126 (2017).
  - [6] Shota Tamura and Hosho Katsura: Zero-energy states in conformal field theory with sine-square deformation, *Prog. Theor. Exp. Phys* **2017**, 113A01 (2017).
  - [7] Yutaka Akagi, Hosho Katsura, and Tohru Koma: A New Numerical Method for  $\mathbf{Z}_2$  Topological Insulators with Strong Disorder, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 123710 (2017).
  - [8] Hosho Katsura and Tohru Koma: The noncommutative index theorem and the periodic table for disordered topological insulators and superconductors, *J. Math. Phys.* **59**, 031903 (2018).
  - [9] Wenxing Nie, Hosho Katsura, and Masaki Oshikawa: Particle Statistics, Frustration, and Ground-State Energy, *Phys. Rev. B* **97**, 125153 (2018).
  - [10] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita: Mechanism for subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials, to appear in *Phys. Rev. B*.
- (学位論文)
- [11] 宇田川拓麻: Quantum entanglement in frustration-free spin chains associated with combinatorics (修士論文).
  - [12] 田村翔太: 連続場の理論におけるサイン二乗変形 (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [13] Yun-Tak Oh (Hyunyong Lee, Jung Hoon Han, Hosho Katsura): Resonating Valence Bond States with Trimer Motifs, *2017 KPS Spring Meeting*, Daejeon Convention Center, April 2017.
  - [14] Yutaka Akagi: Noncommutative  $\mathbf{Z}_2$  index of 3D topological insulators with disorder, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, Tokyo, May 2017.
  - [15] Noriaki Sannomiya: SUSY breaking and NG fermions in  $\mathbf{Z}_2$  Nicolai model, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, Tokyo, May 2017.
  - [16] Nobuyuki Yoshioka: Anomalous Thermal Hall Effect in Nodal Chiral Superconductors, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, Tokyo, May 2017.
  - [17] Noriaki Sannomiya: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in  $\mathbf{Z}_2$  Nicolai Model, *Croucher Summer Course "Quantum Entanglement and Topological Order"*, Hong Kong, June 2017.
  - [18] Nobuyuki Yoshioka: Machine learning phases of disordered topological superconductors, *Machine Learning and Many-Body Physics*, Beijing, China, July 2017.
  - [19] Nobuyuki Yoshioka: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)*, Kyoto, Oct. 2017.
  - [20] Hosho Katsura: Quantum Hangul, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)*, Kyoto, Nov. 2017.

- [21] Noriaki Sannomiya: Supersymmetry Breaking in an Interacting Majorana Chain, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)*, Kyoto, Nov. 2017.
- [22] Nobuyuki Yoshioka: Machine Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *APS March Meeting*, Los Angeles, Mar. 2018.
- [23] Noriaki Sannomiya: Spontaneous SUSY Breaking and Nambu-Goldstone fermions in extended Nicolai models, *APS March Meeting*, Los Angeles, Mar. 2018.
- [24] Nobuyuki Yoshioka: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *FOR1807 Winter School on Numerical Methods for Strongly Correlated Quantum Systems*, Marburg, Feb. 2018.
- 招待講演
- [25] Hosho Katsura: Topological order and zero modes in interacting Kitaev/Majorana chains, *Quantum Devices*, Natal, Brazil, Aug. 2017.
- [26] Hosho Katsura: Tasaki is ubiquitous, *Flatband Networks in Condensed Matter and Photonics*, Daejeon, Korea, Aug. 2017.
- (国内会議)
- 一般講演
- [27] 桂法称: Sine-square deformations of one-dimensional critical systems: exact results, サイン 2 乗変形 (SSD) とその周辺, 2017 年 6 月, 理研.
- [28] 田村翔太, 桂法称: 共形場理論におけるサイン二乗変形とそのゼロエネルギー状態, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [29] 桂法称, Hyunyong Lee, Yun-tak Oh, Jung Hoon Han: 量子トライマー模型の RVB 状態と  $\mathbf{Z}_3$  トポロジカル秩序, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [30] 宇田川拓麻, 桂法称, Olof Salberger, Vladimir Korepin, Zhao Zhang, Israel Klich: 変形 Fredkin スピン鎖におけるエンタングルメントおよび量子相転移, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [31] 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称: 乱れたトポロジカル超伝導体の非可換指数と量子相関, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [32] 川畑幸平, 小林良平, Ning Wu, 桂法称: 捻り境界条件を課した Kitaev 模型におけるマヨラナ・ゼロモードの出現, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [33] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, Seiji Miyashita: Charge fluctuation and optical response in two-dimensional Mott insulators, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [34] 伊與田英輝, 桂法称, 沙川貴大: 乱れた量子多体系における量子情報の非局所化, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [35] 三ノ宮典昭, 桂法称: Majorana Nicolai 模型における超対称性の破れと南部-Goldstone フェルミオン, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [36] 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称: 機械学習による乱れたトポロジカル超伝導体の相判定, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.
- [37] 吉岡信行: 対称性の統計的回復による乱れたトポロジカル相の学習と分類, 第 11 回 物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月, 東大物性研.
- [38] 赤城裕:  $\mathbf{Z}_2$  指数の新しい計算法: 乱れたトポロジカル絶縁体, 第 11 回 物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月, 東大物性研.
- [39] 赤城裕: 対称性の統計的回復による乱れたトポロジカル相の学習と分類, 第 7 回 強相関電子系理論の最前線, 2017 年 12 月, 函館.
- [40] 柴田直幸, 桂法称: 散逸のある XY スピン鎖のマヨラナフェルミオンを用いた解法, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.
- [41] 今村征央, 桂法称: 1 次元マヨラナ-スピン混合系の可解模型, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.
- [42] 赤城裕, 植田浩明, Nic Shannon, トポロジカル励起のシミュレーションのための効率的なスピンフリップ, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.
- [43] 桂法称, Yun-tak Oh, Hyunyong Lee, Jung Hoon Han: S=1 ダイマー・トライマー模型の基底状態相関, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.
- [44] 川畑幸平, 蘆田祐人, 桂法称, 上田正仁, 流入・散逸のあるキタエフ鎖におけるパリティ・時間対称性によって誘起されたエッジ状態, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.
- (セミナー)
- [45] 三ノ宮典昭: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in Lattice Models, 駒場素粒子論研究室セミナー, 2017 年 4 月, 東京大学.
- [46] 桂法称: Quantum Hangel, 統計力学セミナー, 2017 年 5 月, 東京大学.
- [47] 三ノ宮典昭: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in Extended Nicolai Models, 初田量子ハドロン物理学研究室セミナー, 2017 年 5 月, 理研.
- [48] 赤城裕: Noncommutative  $\mathbf{Z}_2$  index of 3D topological insulators with disorder, 統計力学セミナー, 2017 年 7 月, 東京大学.
- [49] 吉岡信行: Machine Learning Crash Course for Condensed Matter Physicists, Informal Condensed Matter Seminar, 2017 年 11 月, 京都大学.

- [50] 桂法称: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in lattice models, CMT seminar, 2017 年 11 月, Amsterdam 大学.
- [51] 桂法称: Quantum Hangel, CMT seminar, 2017 年 11 月, Utrecht 大学.
- [52] 吉岡信行: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, Hadron Physics Group semiar, 2017 年 12 月, 東京大学.
- [53] 桂法称: 1次元量子臨界系のサイン二乗変形, 東京無限可積分系, 2018 年 1 月, 東京大学.
- [54] 桂法称: Thermal Hall effect of magnons, Max Planck-UBC-UT Winter School, 2018 年 2 月, 東京大学.
- [55] 吉岡信行: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, Seminar in Solid State Physics, 2018 年 2 月, Zurich 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 such 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) low-dimensional correlated electron systems, and (iii) entanglement in quantum spin chains. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2017 are the following:

- Strongly correlated systems
  - Optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model with spin-orbit coupling [1]
  - Subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials [2]
  - Ground-state phase diagram of quantum dimer-trimer chain [3]
  - Ground-state energies of spinless free fermions and hard-core bosons [4]
- Topological phases of matter
  - Zero modes in a Kitaev chain with twisted boundary conditions [5]
  - Topological invariants for disordered topological insulators [6, 7]
- Solvable models and field theories
  - Volume-law entanglement in deformed Fredkin spin chain [8, 9]
  - Sine-square deformation of conformal field theories [10]

- [1] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, *Phys. Rev. B*, **95**, 235115 (2017).
- [2] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, to appear in *Phys. Rev. B*.
- [3] Yun-Tak Oh, Hosho Katsura, Hyunyong Lee, and Jung Hoon Han, *Phys. Rev. B*, **96**, 165126 (2017).
- [4] Wenxing Nie, Hosho Katsura, and Masaki Oshikawa, *Phys. Rev. B* **97**, 125153 (2018).
- [5] Kohei Kawabata, Ryohei Kobayashi, Ning Wu, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. B*, **95**, 195140 (2017).
- [6] Yutaka Akagi, Hosho Katsura, and Tohru Koma, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 123710 (2017).
- [7] Hosho Katsura and Tohru Koma, *J. Math. Phys.* **59**, 031903 (2018).
- [8] Olof Salberger, Takuma Udagawa, Zhao Zhang, Hosho Katsura, Israel Klich, and Vladimir Korepin, *J. Stat. Mech.*, 063103 (2017).
- [9] Takuma Udagawa and Hosho Katsura, *J. Phys. A: Math. Theor.* **50**, 405002 (2017).
- [10] Shota Tamura and Hosho Katsura, *Prog. Theor. Exp. Phys* **2017**, 113A01 (2017).