

数理物理学研究室

1. メンバー

教授	：山本 昌司	011-706-2681	yamamoto@phys.sci.hokudai.ac.jp
講師	：大原 潤	011-706-3668	ohara@phys.sci.hokudai.ac.jp
研究員	：井上 天	011-706-3668	tinoue@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC3	：田所龍人	011-706-3667	ryuto@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC1	：王シユ	011-706-3667	sheyou@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC2	：柯キンヤク	011-706-3668	kinyaku@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC1	：杉山宗一郎	011-706-3667	sugi@phys.sci.hokudai.ac.jp
B4	：鈴木健太	011-706-3667	suzuki.kenta.d6@elms.hokudai.ac.jp
B4	：澤谷明寛	011-706-3667	sawaya.akhito.l0@elms.hokudai.ac.jp

2. 研究成果

1) 三角格子および籠目格子反強磁性体の熱力学量に対する修正スピン波解析

三角形などの奇数角形を含む格子上的反強磁性体では、一般に **noncollinear**, **noncoplanar** なスピン配列が古典基底状態となる。このような系の有限温度物理量をサイズ無限大極限で評価することは解析的・数値的ともに極めて困難である。従来の修正スピン波理論では、フラストレイト磁性体において、その帯磁率が低温で発散を示すなど問題を抱えていた。我々は、**staggered** 磁化条件(**single constraint=SC**)を見直し、さらに回転座標系に乗って観るスピンの回転対称性を精査し、“**2重改良修正条件(double constraint=DC)**”を導入してフラストレイト磁性体を正しく記述するスピン波理論を開発した。物理量を評価する際、4ボソン項およびフラストレイト系特有の3ボソン項を含む相互作用を、最低次補正[$\mathcal{O}(S^0)$]のさらにその次[$\mathcal{O}(S^{-1})$]まで考慮する(S はスピン量子数)。このDC修正スピン波理論を用いて、三角格子と籠目格子反強磁性体の熱力学的性質、特に比熱の詳細解析を行った。前者は秩序基底状態を、後者は液体的基底状態を取ると言われており、その比熱構造は様々な手法(有限温度 **Lanczos** 法、高温展開法、テンソル・ネットワーク法など)で解析されており、議論が続いている。DC修正スピン波解析では、三角格子反強磁性体は“低温ピーク+ロトン起因中温アノマリ”を、籠目格子反強磁性体は“低温と中温にダブル・ピーク”を示すことを明らかにした。籠目格子では、平坦マグノン・バンドの下に音響マグノン・バンドが潜り込んでおり、比熱の機微はこの励起スペクトル構造を反映している。大規模厳密対角化計算から、トリプレット・ギャップの中に多数のシングルレット状態が存在すること、ボンド演算子を用いた解析から、平坦トリプレット励起モードの存在が指摘されており、スピン波理論から得た励起機構はこれらと整合する。

2) 準周期反強磁性体の Raman 散乱理論

D. Shechtman (2011 年ノーベル化学賞)により発見された準結晶は、物質の新たな秩序状態を示し、それまでの“個体”の概念を更新した。準結晶は併進対称性を持たず、通常の結晶では禁止されている回転対称性(5, 8, 10, 12 回対称性)を有している。準周期格子の代表例である Penrose 格子(C_{5v} 対称)上の電子モデルでは、零エネルギー・レベルに巨視的縮退状態(コンファインド状態)が表れるなど特異な物性を示す。我々は、準周期格子上の磁気ダイナミクスに注目し、Penrose 格子および Ammann-Beenker 格子(C_{8v} 対称)上の反強磁性 Heisenberg 模型とそこでの非弾性光散乱を解析した。Hubbard 模型を出発点とする有効磁気 Raman 演算子の導出に際して、2 次摂動までの Loudon-Fleury (LF)機構を超え、4 次摂動までの Shastry-Shraiman (SS)機構を考える。Raman 演算子は 2 スピン交換項 $\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$ に加え、3 スピン・カイラル項 $\mathbf{S}_i \cdot (\mathbf{S}_j \times \mathbf{S}_k)$ および 4 スピン・リング交換項 $(\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j) \cdot (\mathbf{S}_k \cdot \mathbf{S}_l)$ を含む。スピン演算子をスピン波により記述し、光 - マグノン散乱を考える。散乱スペクトルを摂動論的手法で計算する場合、4 粒子 Green 関数を勘定することになる。一般に 4 粒子以上の Green 関数の繰り込みは近似的に行う必要があり、散乱スペクトルはその近似方法に依存してしまう。そこで、我々は変分法的な Configuration Interaction (CI) 法によりマグノン間相互作用を取り扱い、散乱スペクトルを評価した。少数サイト数値厳密計算と比較することで、本手法の正当性を確認している。Penrose 格子と Ammann-Beenker 格子ともに、LF 機構では、 E_2 モードのみ Raman 活性であるが、SS 機構まで考慮すると、 A_1 モードと A_2 モードが活性化する。特にカイラル項起因の A_2 モード発現は準周期格子系(格子回折パターンを記述するために必要な波数ベクトルの最小数 D が物理次元 d よりも大きい系: Penrose と Ammann-Beenker 格子は共に $D=4$, $d=2$)の特徴の一つである。直線偏光と円偏光を組み合わせることにより、実際に各既約モードを個別測定できることも示した。

3) Kitaev ナノ・リボンにおけるトポロジカル相転移

異方的 Ising 型交換相互作用が周期的に空間変調する Kitaev 模型は、スピン液体状態を実現する“可解”理論模型として注目を集めている。近年では、Ir 酸化物や Ru 化合物などモデル物質も発見され、理論・実験一体となって活発な議論が展開されている。本研究は、Kitaev ナノ・リボン模型に焦点を当て、そのスピン液体状態をトポロジカルに特徴づけることを目指した。巻き付き数 ν_w をトポロジカル不変量とし、交換相互作用 $J_x + J_y + J_z = 1$ 平面上でのトポロジカル相図を求め、ジグザク端とアームチェア端の場合で比較した。ジグザク端の場合、自明相 ($\nu_w = 0$) とトポロジカル相 ($\nu_w \neq 0$) 間の相転移のみ現れるが、アームチェア端の場合、異なるトポロジカル相間も含む多段階の相転移が起こることを明らかにした。どちらの端形状においても、Majorana スピンノン分散関係そのものは背景場の秩序パターンに依存するが、ジグザク端ナノ・リボンの相図は背景場秩序に依存しない一方、アームチェア端ナノ・リボンでは、そこに現れるトポロジカル相の種類が背景場秩序パターンに依存する。

3. 成果発表

〈原著論文〉

- 1) Thermal features of Heisenberg antiferromagnets on edge-versus corner-sharing triangular-based lattices: A message from spin waves.
S. Yamamoto and J. Ohara:
*J. Phys. Commun. **7**, 065004, 1-34 (2023).

〈会議抄録〉

- 1) Topological characterization of Kitaev spin nanoribbons with ordered flux configurations.
R. Tadokoro and S. Yamamoto:
*JPS Conf. Proc. **38**, 011160, 1-6 (2023).
- 2) Multimagnon-mediated Raman scattering in two-dimensional quasiperiodic Heisenberg antiferromagnets.
S. Yamamoto and J. Ohara:
*J. Phys.: Conf. Ser. **2461**, 012012, 1-8 (2023).

4.1 学術講演 (国際学会・国際シンポジウム)

- 1) Possible ring exchange and chiral spin fluctuations in quasiperiodic planar antiferromagnets: Raman observations (**Invited as a Keynote Speech**).
S. Yamamoto:
The 8th Annual Conference of AnalytiX (AnalytiX-2023),
2023. 5. 17 ~ 19, Osaka, Japan.

4.2 学術講演 (国内学会・国内その他)

〈一般講演〉

《口頭発表》

- 1) Magnon localization in the two-dimensional Penrose antiferromagnet: Perpendicular-space analysis of the dynamic structure factor in quasiperiodic antiferromagnets.
*井上天, 山本昌司
2023年3月22日(木)~25日(土) 日本物理学会 2023年春季大会 オンライン

2) A challenge to modify spin waves in frustrated noncollinear antiferromagnets

*大原潤, 山本昌司

2023年9月16日(土)~19日(火) 日本物理学会第78回年次大会

東北大学(川内キャンパス)

3) Distinct thermal features of noncollinear antiferromagnets in triangular versus kagome lattice geometries: A message from spin waves

*山本昌司, 大原潤

2023年9月16日(土)~19日(火) 日本物理学会第78回年次大会

東北大学(川内キャンパス)

7. 科研費・助成等の取得状況

1) 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(C)

山本昌司

準周期格子磁性体のマグノン—新しい南部—ゴールドストーン・モードの探求—

¥1,100,000

8. その他