

カゴメ格子およびパイロクロア格子構造を持つ異方的磁性体におけるトポロジカル相

青柳 克（物性理論教室）

量子もつれによって生じる物性を理解するためのトポロジカル物質の研究が近年精力的に行われている。本研究は、カゴメ格子およびパイロクロア格子上の XXZ 模型に現れる、多者間もつれによって生じるトポロジカル相に関する数値的研究である。

異方性をもつカゴメ格子上的スピン 1/2 XXZ 模型において、3 量子ビットの W 状態の積状態を形成するような対称性の破れを伴わない量子相が現れることが示されており [1]、この相を $2\pi/3$ に量子化するベリー位相によって特徴づけられることが議論されていた [2]。本研究では量子モンテカルロ法を用いて 3888 スピンまでの大規模な系における量子化ベリー位相を計算し、W 相が $2\pi/3$ の量子化ベリー位相によって特徴づけられることを示し、さらに他の相でもそれぞれ特有の結果が得られ、相境界が定量的に再現されることを示すことにも成功した (図 1)。また、3 量子ビット W 相において系のエッジに現れる特徴的な磁性について議論し、エッジ付近に W 相特有の磁性が形成されることを見いだした [3]。

異方性をもつパイロクロア格子上的スピン 1/2 XXZ 模型では、対称性の破れを伴わない 2 つの相、八極子常磁性相 [4,5] および 4 量子ビット W 相が存在し、本研究ではこれら 2 つの相のトポロジカルな性質を調べた。まず、これらのトポロジカル相がエネルギーギャップをもち、XY 面内強磁性相に隣接しているという推測に基づき、量子モンテカルロ法を用いて 32000 スピンまでの系のスピンスティフネスを計算し、スケーリング解析により相図を得ることでその推測が正しいことを示した。また、これらのトポロジカル相を特徴づけるために系の対称性に基づいて 2 種類の量子化ベリー位相を導入し、量子モンテカルロ法によって計算することで、2 つのトポロジカル相がこれらの量子化ベリー位相によって特徴づけられることを示した。さらに、開いた境界条件の系を議論し、その表面における磁性を調べることで高次トポロジカル相が存在することを示し (図 2)、その表面状態およびエッジ状態が、表面およびエッジで定義される量子化ベリー位相によって特徴づけられることも示した。

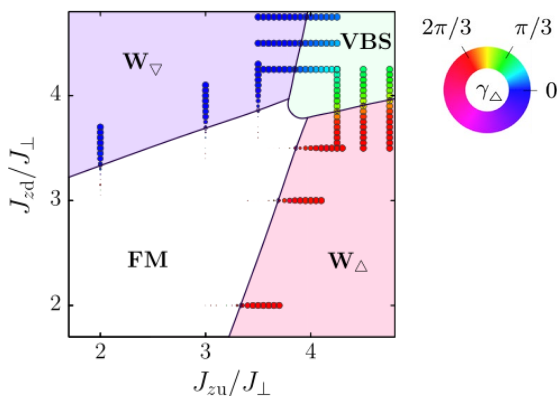


図 1: カゴメ格子 XXZ 模型の相図と量子化ベリー位相 γ_Δ 。プロットの円が小さいほど誤差が大きい。VBS はバレンスボンド固体相、FM は x - y 面内の強磁性相を表す。

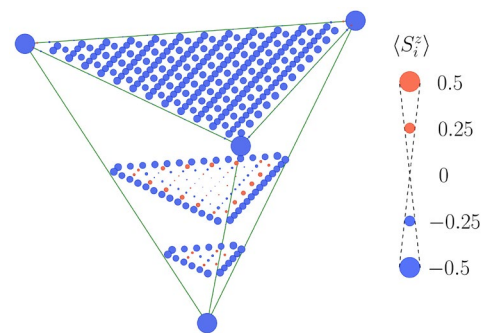


図 2: 四面体上の開いた境界条件をもつパイロクロア格子 XXZ 模型における高次トポロジカル相。各サイト i におけるスピンの z 成分 $\langle S_i^z \rangle$ が、系の内部、表面、辺、角それぞれ特徴的な値を示している。

- [1] J. Carrasquilla, G. Chen, and R. G. Melko, Phys. Rev. B 96, 054405 (2017).
- [2] T. Kawarabayashi, K. Ishii, and Y. Hatsugai, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 045001 (2019).
- [3] K. Aoyagi, K. Ishii, Y. Hatsugai, and T. Kawarabayashi, J. Phys. Soc. Jpn. 93, 064703 (2024).
- [4] J. G. Rau, et al., Phys. Rev. Lett. 116, 257204 (2016).
- [5] L. Savary, et al., Phys. Rev. B 94, 075146 (2016).