

擬一次元量子反強磁性体の磁区パターンを光で可視化

大阪公立大学・大学院工学研究科・木村 健太
(2024 年度物性研究所客員准教授)

研究の背景と経緯

近年の磁性研究のキーワードとして、「反強磁性体」と「量子揺らぎ」が挙げられます。反強磁性体は、ミクロな磁石である電子のスピンを互いに反対向きに並べようとする力、すなわち反強磁性相互作用が支配的に働く物質のことです。通常反強磁性体では、磁気転移温度以上ではスピンの向きはバラバラですが、磁気転移温度以下になると、隣り合う電子スピンは全体の磁化を打ち消し合うように秩序化します。このとき、例えば図 1 のように、スピンの向きが **down-up** と並んだ磁区 I と、スピンの向きが **up-down** と並んだ磁区 II は、同じエネルギーをもちます。そのため、これらの磁区は一つの試料内にランダムに混在すると考えられます。しかし、磁区 I と II を外場で上手く操作し、何らかの方法で区別して読みだすことができれば、情報記憶担体として利用できます。磁化をもたない反強磁性体は、強磁性体で問題となる漏れ磁場や反磁場の影響を受けないため、素子の高集積化が期待できます。このような期待から、反強磁性体は次世代のエレクトロニクス材料として活発な研究がなされています[1,2]。

一方、量子揺らぎは、電子の量子力学的な性質に起因する揺らぎで、熱揺らぎが消失する絶対零度においても残存します。量子揺らぎが顕在化することで、特異な物性を示す磁性体はいくつも知られています。スピン量子数の小さ

な ($S = 1/2$ や 1) 磁性イオンが鎖状に配列している擬一次元量子反強磁性体はその代表例であり、量子スピン液体やトポロジカルスピン励起といった特異な量子現象を示すために活発な研究がなされています。また、スピン鎖の間に弱い相互作用がある場合、その相互作用の大きさで決まる非常に低い温度において、スピンは秩序化します。ところが、通常反強磁性体とは異なり、スピンの量子揺らぎが顕在化するため、個々のスピンの秩序成分は著しく抑制されています。したがって擬一次元量子反強磁性体は、反強磁性磁区と量子揺らぎの関連性を探究するのに適していると考えられます。しかし、磁気転移温度が低く、かつスピンの秩序化成分が小さいことから、従来用いられてきた手法で擬一次元量子反強磁性体の磁区を観察することは難しいと予想され、これまで報告されていませんでした。

研究の内容

本研究[3]では、最も代表的なスピン $1/2$ 擬一次元量子反強磁性体の一つである $\text{BaCu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ [4]における反強磁性磁区の可視化に挑みました。 $\text{BaCu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ は最小のスピン量子数 ($S = 1/2$) をもつ銅イオン (Cu^{2+}) がジグザグの鎖状に並んでいます[図 2(a)]。 $T_N = 9.2 \text{ K}$ 以下で反強磁性秩序が現れますが、その秩序化モーメントは Cu^{2+} 1 個あたり $0.1\mu_B$ と大変小さいものです。可視化には、私たちが 2020 年に世界に先駆けて報告した方向二色性に基づく手法[5]を用いました。方向二色性とは、光の伝搬方向や磁気秩序変数の符号を反転することで光吸収が変化する現象です。そのため、図 1 に示すように、反強磁性ドメインパターンは透過光の強度の違いとして可視化されます。方向二色性が生じるためには、物質の空間反転対称性と時間反転対称性の両方が破れている必要があります。今回用いた $\text{BaCu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ では、 Cu^{2+} のジグザグ配列とスピンの反平行配列の組み合わせることで対称性の要件が満たされ、方向二色性が発現すると考えました。以下の実験では、益田隆嗣教授グループによって浮遊帯域法で合成された $\text{BaCu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ の単結晶を用いました。

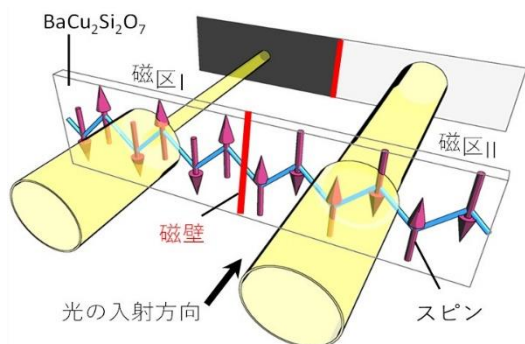


図 1 方向二色性による反強磁性磁区の可視化の概念図。磁壁で隔てられた磁区 I と磁区 II は異なる光透過率をもつため、明暗のコントラストとして可視化できる。

量子揺らぎが顕在化する擬一次元量子反強磁性体の磁区パターンについて、方向二色性を原理とした光学的手法で可視化できることが分かりました。本研究では電場により磁壁が動くことも運動前後の画像の比較から明らかになりましたが、今回用いた光学顕微鏡による観察は非常に簡便かつ短時間で済むため、今後、磁壁が動いている様子をリアルタイムで可視化することも期待されます。

謝辭

参考文献

- [5] K. Kimura and T. Kimura, APL Mater. 11, 100902 (2023).