新しい概念の磁性体を実験的に検証 ——中性子散乱実験による交替磁性体の観測—

物性研究所 中性子科学研究施設 Zheyuan Liu, 益田 隆嗣

〈研究の背景〉

磁性体のミクロな構造は、スピンが平行に整列した強磁 性体(図 1(a)上図)と、スピンが反平行に整列した反強磁性 体(図 1(b)上図)の二つに分類されてきました。ところが最 近、第三の磁性体として「交替磁性体」が提案されました [1]。「スピン周辺の結晶構造まで含めた対称性により磁性 体を分類する」という新しい概念を導入することで現れた 新しい磁性体です。反強磁性体の場合、隣接するスピン周 辺の結晶構造は同じですが、交替磁性体の場合は図 1(c)上 図のように異なります。左下の赤い矢印で示されている上 向きスピンの周囲の結晶構造(簡略して灰色のダイヤで表 されています)と、左上(もしくは右下)の青い矢印で記さ れている下向きスピンの周囲の結晶構造は、そのままでは 重なりません。90度回転させることによってはじめて重 なります。このように、そのままずらしただけでは重なら ず、回転させることによって重なるような対称性を持つ結 晶構造をもち、かつスピンが反平行に配列している磁性体 が、交替磁性体として分類されました。

このように新しく分類された交替磁性体では、時間反転 対称性が破れており、電子バンド構造のスピン偏極分裂[2] や磁気ピエゾ効果[3]、X 線磁気円二色性[4]など興味深い 物理現象が観測されてきました。カイラルマグノンも時間 反転対称性の破れにより現れる物理状態の一つであり[5]、 マグノンスピン流を運ぶことができる準粒子として興味を 集めています。従来、強磁性体のカイラルマグノンが注目 されてきましたが、デバイスとして見ると、低周波数 (GHz)でしか動作しないという課題があります。また、有 限の磁化を持つため、望ましくない漏れ磁場もあります。 一方、反強磁性体では、高周波数(THz)での動作が期待さ れていますが、マグノンのカイラリティが完全に打ち消し あって(図1(b)下図参照)スピン流を運ばないため、デバイ スとして動作させることは困難です。これらに対し、交替 磁性体は強磁性体と反強磁性体の利点を兼ね備えています。 交替磁性体のマグノンは高周波数で大きくカイラル分裂す ることが理論的に予想されています(図 1(c)下図参照)。反 強磁性体のようにスピン配列が反平行となっていて磁化が



図 1 (a) 強磁性体(第一の磁性体)、(b) 反強磁性体(第二の磁性体)、(c) 交替磁性体(第三の磁性体)にお けるスピン構造(上)とマグノンのエネルギーと運動量の関係「分散関係」(下)の概略図。*M* は磁化を示 します。分散関係に描かれている赤と青の矢印付き回転円は、各々異なるカイラリティを表しています。

ゼロであり、漏れ磁場の心配がないにもかかわらず、磁化 が有限の強磁性体のようなカイラルマグノンを有している 点で新しいのです。このため、交替磁性体のマグノンを直 接観察することは、その物質が交替磁性を有するか否かの 判定のためと、デバイス応用の可能性を探るための両方の 意味で重要です。交替磁性体の候補物質は数多くあります が、これまでマグノンの観測には成功していませんでした。

〈研究の内容〉

わたしたちは、交替磁性のマグノン分散を観測するため に、交替磁性候補物質MnTeの良質な大型単結晶を合成し ました。この物質は、磁性が観測されやすいMnイオンを 含んでおり、かつ、交替磁性の特徴の一つである電子バン ドのスピン分裂が光電子分光実験で報告されていたため、 マグノンのカイラル分裂の観測にも適切であろうと予想し ました。さらに研究グループは、大強度陽子加速器施設 J-PARC 物質・生命科学実験施設 MLF の HRC 高分解能 チョッパー分光器を用いて非弾性中性子散乱実験を行いま した。結晶の評価には研究用原子炉 JRR-3 の HODACA 分光器も用いられました。



図 2 (a)&(c) MnTe の中性子スペクトル。それぞれ異なる運動量 領域を示していますが、(a)のh = 1.33 と(c)のl = -1.33 は同じ運 動量(-1.33, 0, -1.33)となっています。この運動量では約 2 meV のマグノン分裂が観測されています。(b)&(d) 計算されたマグノ ンのカイラリティ。赤色と青色は各々異なるカイラリティを持つ マグノンを示しています。灰色の実線および破線は計算されたマ グノン分散を示しています。

観測された中性子スペクトルを図 2(a)および(c)に示し ます[6]。図 2(a)では、E = 30 meV 以上の高エネルギーで、 白丸で示されているように約 2 meV のマグノン分裂が観 測されました。一方低エネルギーの小さな運動量領域の周 りのマグノン分散は、反強磁性体に似て、直線的に立ち上 がっています。これらは、交替磁性体の存在を示す重要な 証拠です。図 2(c)は、別な運動量領域での高エネルギース ペクトルですが、分裂したマグノン分散が運動量軸に沿っ て交替に伝播している様子が明瞭に観測されました。計算 されたマグノン分散を、図 2(b)および(d)で黒い実線と点 線で示します。計算は観測された中性子スペクトルを完全 に再現しました。さらに、異なるカイラリティを赤色と青 色で表すと、低エネルギーでは二つのカイラリティが打ち 消しあって無色となっていますが、高エネルギーでは二つ のマグノンは異なるカイラリティを有し、青色と赤色が明 瞭となっています。図2(d)ではカイラリティが交替的に変 化することが確認されました。これらのことから、観測さ れたマグノンはマグノンスピン流を運ぶカイラルマグノン であることが明らかとなりました。

〈今後の展望〉

交替磁性体は、新しい概念の磁性体です。本研究でカイ ラルマグノンの存在が実証されたことから、マグノンスピ ン流生成をもたらすことが明らかとなりました。今後、 様々な交替磁性体での研究が進むことで、より高速で効率 的な電子デバイスが実現し、我々の日常生活にも大きな変 革をもたらすことが期待されます。

- L. Šmejkal, J. Sinova, and T. Jungwirth, Phys. Rev. X 12, 031042 (2023).
- [2] T. Osumi *et al.*, Phys. Rev. B **109**, 115102 (2024), J.
 Krempaský *et al.*, Nature **626**, 517 (2024), S. Lee *et al.*, Phys. Rev. Lett. **132**, 036702 (2024),
- [3] T. Aoyama et al., Phys. Rev. Mater. 8, L041402 (2024).
- [4] A. Hariki et al., Phys. Rev. Lett. 132, 176701 (2024).
- [5] M. Naka *et al.*, Nat. Commun. **10**, 4305 (2019), L.
 Šmejkal *et al.*, PRL **131**, 256703 (2023).
- [6] Z. Liu et al., Phys. Rev. Lett. 133, 156702 (2024).