

構造の回転歪みと偽キラルな反強磁性が生み出す強トロイダル状態

[1] 要旨

強トロイダル状態は、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れている特殊な物質状態であり、光の入射方向の反転により吸収が変わる方向二色性といった多彩な物理現象を引き起こす。それゆえ、強トロイダル状態を如何にして実現するかは興味ある問題である。今回、 $\text{PbMn}_2\text{Ni}_6\text{Te}_3\text{O}_{18}$ の反強磁性相において、強トロイダル状態の形成を示す方向二色性が観測された。この結果と対称性の議論から、結晶構造の回転歪みと、反平行スピン対をベースとした“偽キラル”な反強磁性の組み合わせが、強トロイダル状態を実現する新たな指針となることが示された。

[2] 本文

物質の性質は対称性と密接に関わっており、複数の対称性が共に破れると通常物質では起こりえない現象が生じる。例えば、空間反転対称性と時間反転対称性が共に破れている絶縁体では、印加電場に比例した磁化や印加磁場に比例した電気分極が誘起される。この現象は線形電気磁気効果と呼ばれ、エネルギー散逸の少ない電場による磁性の制御を可能にするため、省電力デバイスへの活用が期待されている。空間反転対称性および時間反転対称性を共に破る物質の状態にはいくつかのタイプがあり、そのうちの 하나가、磁気トロイダルモーメントを有する強トロイダル状態である。ここで、磁気トロイダルモーメントは、速度ベクトルと同様の対称性を有するベクトル的な物理量であり、磁気モーメント（スピン）がドーナツ状に並んだ場合などに有限となる。強トロイダル状態は、光の入射方向の左右で光の吸収量に変化する方向二色性や、電流や熱流の非相反な伝搬、さらには電流誘起磁化といった新現象をもたらすことから、強トロイダル状態をどのように実現するかは、応用・学術の両面で興味深い問題といえる。これまでの精力的な研究により、ドーナツ状のスピン配列だけでなく、互いに直交する磁化と電気分極の組み合わせや、磁化とキラリティの組み合わせなどによっても、強トロイダル状態が得られることが分かっている。

最近、大阪公立大学工学研究科物質化学生命系専攻の研究グループは、マンガンとニッケルのイオンが磁性を担う反強磁性体 $\text{PbMn}_2\text{Ni}_6\text{Te}_3\text{O}_{18}$ において方向二色性を観測し、強トロイダル状態が形成されていることを発見した。この強トロイダル状態は、結晶構造の回転歪みと反平行スピン対をベースとした“偽キラル”な反強磁性配列の組み合わせによって発現している。これは従来から知られた発現機構とは異なっており、強トロイダル状態を実現する新たな物質設計指針を与えるものである。この成果は JPSJ の 2024 年 6 月号に掲載された。

強トロイダル状態を特徴づける磁気トロイダルモーメント \mathbf{T} は、時間反転と空間反転に加えて、 \mathbf{T} に垂直な軸周りの 180 度回転（2 回回転操作）によっても符号を変える。つまり、有限の \mathbf{T} を得るためには、これら 3 種類の対称性をすべて破らねばならない。その方策として本研究で着目されているのは、「アキシシャルモーメント」と「偽のキラリティ」の組み合わせである。アキシシャルモーメントは、図 1(a) に示したような結晶構造の回転歪みを特徴づけるベクトル量であり、時間反転と空間反転に対しては対称であるが、回転歪みの軸に垂直な 2 回回転対称性を破る。一方、偽のキラリティは、ある物体に鏡映操作を施すと元と重ならず、あたかもキラリティがあるかのように見えるが、時間反転操作を含めると元と重なってしまう状況を表す学術用語である。図 1(b) に示す直線状に並んだ反平行スピン対はまさにこの状況を満たしており、このような反強磁性を本研究では偽

キラル反強磁性と呼んでいる。偽キラル反強磁性は、空間反転対称性と時間反転対称性を共に破るが、スピンの垂直な2回回転操作に対しては対称であるため、磁気トロイダルモーメントを生み出さない。しかし、アキシャルモーメントが存在すると、その2回回転対称性は破れる。すなわち、アキシャルモーメントと偽キラル反強磁性の組み合わせによって、磁気トロイダルモーメントが生じると期待される [図 1(c)]。

本研究で調べられた反強磁性体 $\text{PbMn}_2\text{Ni}_6\text{Te}_3\text{O}_{18}$ は、アキシャルモーメントを伴う結晶構造を有しており、加えて、 $T_N=86\text{ K}$ 以下で反平行スピン対をベースとした偽キラル反強磁性を示すことから、上記提案の実証に適した物質である。実際、図 1(d)に示すように、 T_N 以下の反強磁性相で、強トロイダル状態の直接的証拠となる無偏光の方向二色性が観測された。本研究成果は、強トロイダル状態を得るための新たな物質設計指針を示すものであり、強トロイダル物質のさらなる開拓につながると期待される。また、強トロイダル状態、アキシャルモーメント及び偽キラル反強磁性の結合が生み出す新物性についても、今後の研究の展開が期待される。

原論文 (2024年5月16日公開済)

Ferrotoroidic State Induced by Structural Rotation and Falsely Chiral Antiferromagnetism in $\text{PbMn}_2\text{Ni}_6\text{Te}_3\text{O}_{18}$

R. Nakamura, I. Aoki, and K. Kimura, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 063703 (2024).

<情報提供：木村健太（大阪公立大学）>

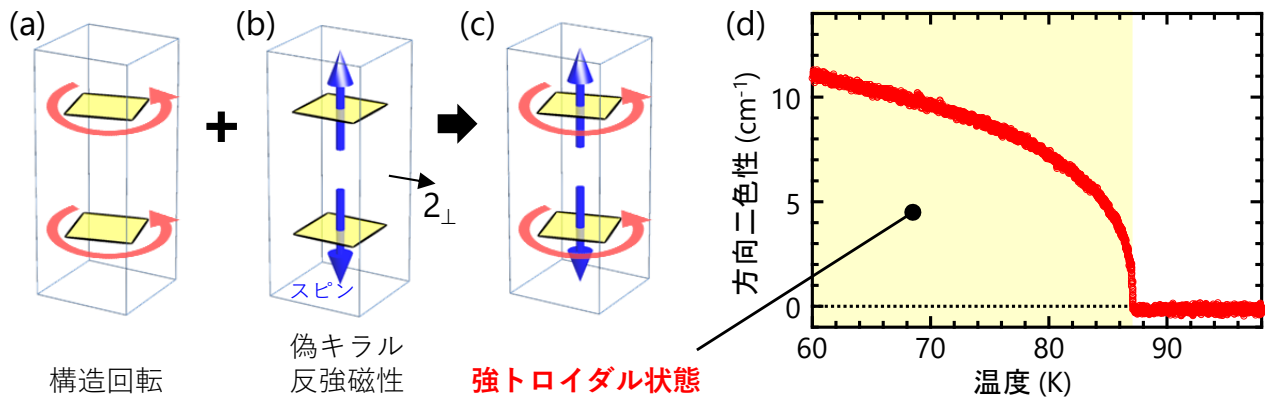


図 1. (a)-(c) 構造回転(a)と偽キラル反強磁性(b)による強トロイダル状態(c)の実現の概念図。(d) $\text{PbMn}_2\text{Ni}_6\text{Te}_3\text{O}_{18}$ における無偏光の方向二色性の温度依存性。 $T_N(=86\text{ K})$ 以下で強トロイダル状態の証拠となる無偏光の方向二色性が現れる。