

時間・空間反転対称性の破れを伴わないフェロアキシシャル物性の開拓

[1] 要旨

物質の機能性と対称性は密接に関係している。とりわけ電子がもつ複数の内部自由度が絡み合う相関電子系においては、通常の磁性や誘電性とは質的に異なる機能性が創出される。その中でも本論文は、結晶が有する対称性の一つである鏡映対称性の破れを伴うフェロアキシシャル秩序のもとで発現する種々の物性現象を議論している。特に電場方向に平行に生成されるスピン流は、従来のスピンホール効果とは異なる新しい量子伝導現象である。本成果により、フェロアキシシャル秩序に由来する機能性開拓・物質探索のさらなる進展が期待される。

[2] 本文

磁性や誘電性といった物質の多様な機能性は、系の対称性の破れと密接に関係する。例えば、時間反転対称性の破れにより系は磁気的な性質(磁性)を獲得し、空間反転対称性の破れにより電気的な性質(誘電性)を獲得する。また、両者が同時に破れると、磁(電)気的な性質を電(磁)気的な外場により制御できるマルチフェロイクスを獲得する。これらの機能性は、電磁場や電流によって直接制御できることから、現代のエレクトロニクス、あるいは、電子のスピン自由度を用いたスピントロニクスを支える中核を担っている。

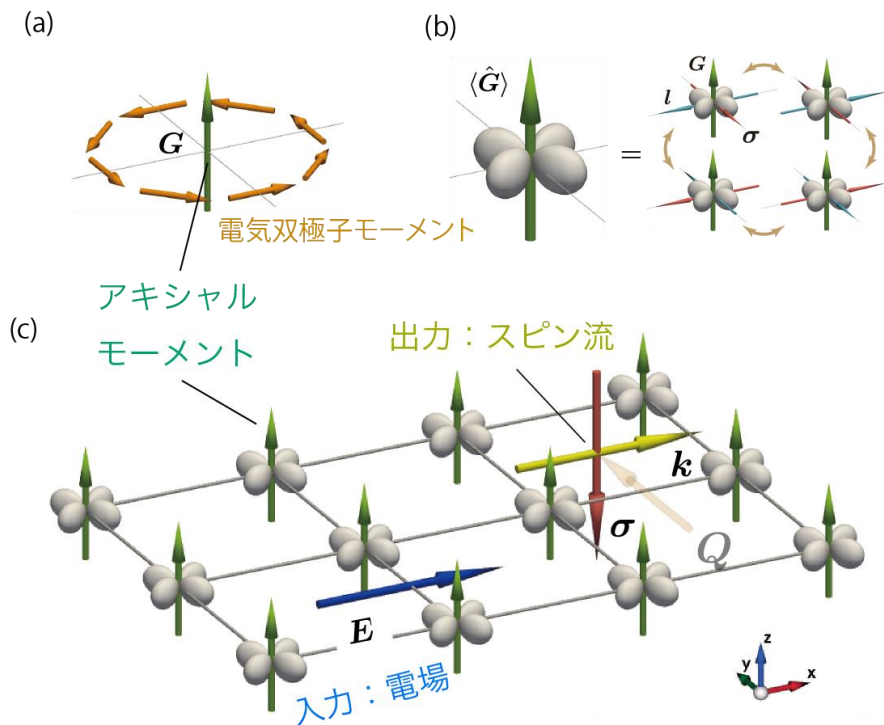


図 1。(a) 電気双極子の渦巻き構造を特徴づける古典的なアキシシャルモーメント(G)。 (b) 軌道角運動量演算子(\hat{L})とスピン演算子($\hat{\sigma}$)の外積からなる量子力学的なアキシシャルモーメント。 (c) フェロアキシシャル秩序下で生じる電場誘起のスピン流。

一方、本論文で議論されるフェロアキシヤル(電気トロイダル双極子あるいは八極子)秩序は、時間反転対称性や空間反転対称性の破れを伴う磁性や誘電性とは質的に異なる。アキシヤルモーメントは、古典的には実空間における電気双極子モーメントの渦状構造により特徴づけられ[図 1(a)]、アキシヤルモーメントに平行な鏡映面に関する対称性が破れる。近年、 $\text{CaMn}_7\text{O}_{12}$ 、 $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ 、 NiTiO_3 、 $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ などの物質において、フェロアキシヤルモーメントが一様に整列したフェロアキシヤル秩序の存在が実験的に確認されるなど著しい進展をみせている。さらに、アキシヤルモーメントの量子力学的な演算子表現が提案されたことでさらなる展開が期待されている。しかし、時間・空間反転対称性の破れを伴わないアキシヤルモーメントは電磁場と直接結合しないため、それらがどのような物性を示すか、十分に理解されていなかった。

最近、北海道大学大学院理学研究院と明治大学理工学部の研究グループは、フェロアキシヤルモーメントのもとで発現する物性現象をマクロな対称性およびミクロな多極子基底の観点から整理することで、種々の非対角応答現象を明らかにした。さらに、結晶場やスピン軌道相互作用の効果を取り込んだモデルを解析することで、フェロアキシヤル秩序下で外部電場を印加すると、その平行方向にスピン流が生成されるという新しい伝導現象を見出した。この成果は、JPSJ の 2022 年 11 月号に掲載された。

上述のようにフェロアキシヤル秩序は電場や磁場と直接結合しないので、その制御は困難であると思われていた。ところが、結晶の鏡映対称性が破れるため、フェロアキシヤルモーメントに対して垂直方向に外場を印加すると、印加した外場と同じ対称性の物理量が両者に垂直な方向に誘起される。例えば、図 1(c)のように、フェロアキシヤルモーメントが z 軸方向の場合、電場(\mathbf{E})を x 軸方向に印加すると、 y 軸方向に電場と同じ対称性をもつ物理量(\mathbf{Q} 、例えば電気分極)が誘起される。波数ベクトル \mathbf{k} とスピン σ の外積が物理量 \mathbf{Q} と同じ対称性であることに注意して、この解析をスピン流に応用すると、 z 軸方向のスピン成分を持つスピン流が x 軸方向に流れることになる。研究グループは、群論およびミクロな電子自由度の多極子基底を用いた解析により、この現象の発現に必要な結晶点群、モデルパラメータを明らかにしている。

本研究による解析結果から、フェロアキシヤル秩序を伴う物質群が、従来の磁性体や誘電体とは本質的に異なる電磁場応答現象を示すことが明らかにされた。上記の結果は、電場応答のみならず磁場応答や電流応答にも適用できる普遍的なものであり、今後のフェロアキシヤル物性に関する理論的基盤を与えると期待される。さらには、従来とは異なる機構のスピン流生成が可能であることから、新しいスピントロニクス材料としての応用も期待できるなど、多くの分野に波及効果をもたらすものと思われる。

原論文(2022 年 10 月 11 日公開済)

[Electric Ferro-Axial Moment as Nanometric Rotator and Source of Longitudinal Spin Current](#)

Satoru Hayami, Rikuto Oiwa, and Hiroaki Kusunose, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 113702 (2022).

< 情報提供 : 速水賢 (北海道大学大学院理学研究院) >