

# らせん結晶における電流が誘起する軌道磁化

養田 大 騎 〈東京工業大学理学院物理学系 yoda.t.aa@m.titech.ac.jp〉

横山 毅 人 〈東京工業大学理学院物理学系 yokoyama@stat.phys.titech.ac.jp〉

村上 修 一 〈東京工業大学理学院物理学系, 東京工業大学元素戦略研究センター murakami@stat.phys.titech.ac.jp〉

固体結晶中の電流とスピン磁化はさまざまな形で相互変換することが近年の研究により明らかになってきており、スピントロニクスへの応用などさまざまな面で興味深い現象となっている。さまざまな理論的枠組みの整備が進み、またスピンを観測するための実験手法の開発・発展が進んできたことがその背景にある。例えばスピンホール効果は、試料に電流を流すとそれに垂直にスピン流が誘起される現象であり、さまざまな金属や半導体でその測定がなされ、その逆効果である逆スピンホール効果はスピン流の検知手段として広く使われている。またエーデルシュタイン効果は、電流誘起スピン磁化とも呼ばれ、電流を試料中に流すと試料全体が磁化する現象である。これは、試料のバンド構造がスピンの向きに応じて分裂しているため、電流を流すと電子の分布が非平衡へとずれるために生じる。これらの現象は全て、固体中のスピン軌道相互作用に起因し、電子の軌道運動が多様な形でスピンの影響を及ぼすものであり、一般に重い元素を含む物質で大きくなる。

本稿ではこれらとは全く異なる起源により、固体中で電流と磁化が結びつく現象を新たに提案する。固体結晶のなかにはさまざまな特異な結晶構造を持つものがあり、例えばテルルやセレンの単体はらせん状の原子鎖を束ねたようなカイラルな結晶構造をしていて、結晶には右回りらせんと左回りらせんの2種類が存在する。これはソレノイドと類似しているため、ソレノイドとの類推かららせん軸に沿った方向に電流を

流すことで磁化すると予想される。さらにその磁化は、らせんの巻き方を逆にすると反転すると予想される。この予想を立証するために我々は、結晶中の電流により軌道磁化が誘起される現象を定式化した。さらにその性質をみるために、らせん状の結晶構造を持つ模型を作って、確かにこうした結晶を持つ金属に電流を流すと軌道磁化が出ることを確かめた。

さらにその軌道磁化の振る舞いを詳しく解析し、与えられた電流密度に対してどのような場合に軌道磁化が大きくなるかを調べた。その結果、ワイル半金属という状態にあるときにこの軌道磁化が大きくなることが判明した。またこうしたカイラルな結晶構造での各単位胞をマイクロなソレノイドとみなした場合に、各単位胞あたりのソレノイドの巻数に対応する無次元量 $\zeta$ を定義して、その振る舞いを調べた。するとワイル半金属の場合には $\zeta$ が1を大きく上回る場合があることがわかり、これは古典的ソレノイドとの類推からでは予想できない、量子論による特異的な増大であるといえる。

物理的な起源でいえば、この効果は前述のエーデルシュタイン効果において、スピン磁化を軌道磁化に置き換えたものであり、その意味でこの効果を軌道エーデルシュタイン効果と言ってもよい。ただし通常のスピンエーデルシュタイン効果と異なり、ここではスピン軌道相互作用は必要とせず、そのため軽い元素からなる結晶でも、その結晶構造によってはこの効果が大きくなる<sup>1</sup>と期待される。

—Keywords—

**エーデルシュタイン効果：**  
金属に電流を流すと、スピン軌道相互作用によってスピン偏極が生じる現象。この現象が起こるためには空間反転対称性が破れている必要があり、らせん結晶はその例になっている。

**ワイル半金属：**  
縮退のない線形分散を持つ3次元物質。線形分散が1点で接触しており、その縮退点(ワイル点)はフェルミエネルギー近傍にある。この縮退点に対して量子化されたチャージ(トポロジカルナンバ)を定義することができ、結晶の対称性を低下させるような摂動に対しても安定に存在できる。この点はグラフェンなどの2次元物質の線形分散とは異なる。



ワイル半金属のバンド構造の模式図。