

質量ゼロのディラック電子の流れを制御できる 新しい磁石を発見

¹大阪大学大学院理学研究科、²東京大学大学院工学系研究科、³国際超強磁場科学研究施設
酒井 英明^{1,2}、増田 英俊²、徳永 将史³、石渡 晋太郎²

研究の背景

通常の金属や半導体中の電子状態は、有効質量を持つ荷電粒子としてシュレディンガー方程式により良く記述できる。一方、結晶構造の対称性や電子の波動関数のトポロジーに起因して、電子状態が相対論的ディラック方程式で記述できる物質が、近年大きな注目を集めている。この最も有名な例の一つが、ノボセロフとガイムらにより発見された黒鉛の単一原子層であるグラフェンである。グラフェンの蜂の巣状の結晶格子を反映し、電子の固有エネルギーが波数に比例する分散関係が成り立つため、質量ゼロの二次元ディラック電子状態を固体中で実現できることが明らかとなった。この発見を契機に、ディラック電子系物質は基礎・応用の両面から精力的に研究がなされ、最近ではトポロジカル絶縁体の表面ディラック状態や、グラフェンの三次元版とされるディラック・ワイル半金属など、続々と新しい系が開拓されている。

ディラック電子の最大の特徴は、非常に高い移動度と、それに起因する特異な磁気伝導特性である。例えばグラフェンでは、ディラック点におけるベリー位相に由来する半整数量子ホール効果が生じ、さらに強磁場中ではそれが室温でも観測され得る。もしこれらの優れた量子伝導が、外部磁場に加え固体中のスピンの制御可能となれば、新しいスピントロニクス応用も期待でき、その物理や応用用途を著しく拡張できる。実際、最近では磁性トポロジカル絶縁体の表面状態において、ゼロ磁場においても量子ホール効果（量子異常ホール効果）が観測され[1]、超低消費電力エレクトロニクスへの展開も期待されている。しかし、このような磁性ディラック電子系のバラエティーは未だ非常に限られている。そこで我々のグループではさらなる開拓を目指し、より多彩な磁気秩序を実現できるバルク磁性体を対象に新物質開発を進めきた。本稿では、近年、この過程でモデル物質として見出した層状反強磁性体 EuMnBi_2 を取り上げ、磁気秩序を利用したディラック電子の量子伝導制御について紹介する[2]。

実験結果

EuMnBi_2 の結晶構造は図 1(a)にあるように、 Mn^{2+} の周りに形式価数-3 価の Bi が四面体配位したモット絶縁体層と、形式価数-1 価の Bi 正方格子からなるディラック電子伝導層が、Eu 磁性層（形式価数 2 価の場合、スピン=7/2）を挟んで積層した構造である。Eu イオンの配位により、Bi 正方格子では最外殻の $6p_x, 6p_y$ 軌道が二次元的ディラック電子状態を形成することが理論的に予測されており[3]、最近実験的にも実証されている[4]。このような多層ディラック電子系では、絶縁層と伝導層が空間的に分離しているため、前者を化学修飾することによりディラック電子状態を保ったまま、物性パラメータや新たな機能の付与が可能となる。実際に EuMnBi_2 も、先行して報告されていた同構造の SrMnBi_2 をベースとし、元素置換 Sr^{2+} (非磁性) $\rightarrow \text{Eu}^{2+}$ (スピン=7/2) により磁氣的応答性の大幅な増大をねらい、見いだされた物質である[5-8]。

$\text{SrMnBi}_2, \text{EuMnBi}_2$ の両物質とも、室温近傍で Mn 副格子が反強磁性秩序を示すが、電気伝導には大きな影響を与えることはない。ところが、ディラック電子層に隣接する Eu 層は、より低温の $T_N=22 \text{ K}$ で反強磁性秩序を示すにも関わらず、ディラック電子の伝導に大きく作用する。磁気構造の詳細は参考文献[2]に譲るが、共鳴 X 線散乱実験により、Eu スピンは面内で強磁性的であり、Bi 正方格子層の上下で向きが反転する反強磁性的秩序[図 1(a)]を示すと推定されている。このような積層構造は、さながら多層ディラック電子系にスピンバルブ構造が天然に埋め込まれた構造と見なすことができる。実際に Eu 層の磁気秩序に伴い、面内抵抗は減少し、面間抵抗が大きく増加する振る舞いが観測されており、ディラック電子の伝導が磁気秩序と強く相関していることが明らかとなった。

さらに興味深い点は、c 軸方向の外部磁場により Eu スピンの向きを面直から面内方向へフリップさせると[図 1(b)]、層間抵抗率 ρ_{zz} が約 10 倍増加する点である。図 1(c)に、国際超強磁場科学研究施設のパルス磁場を用いて測定した、代表的な温度点における ρ_{zz} の磁場依存性（約 45 T まで）を示す。最低温（1.4 K）では、 H_f 以上での ρ_{zz} の



