

有機多層ディラック電子系の量子ホール強磁性相と表面状態

東京大学物性研究所 長田俊人

強磁場量子極限下の 2 次元 massless Dirac 電子系では、スピンとカイラリティ（バレー）について 4 重縮退した $n = 0$ の Landau 準位がゼロエネルギーに存在する。この縮退は Zeeman 効果や相互作用によって破れ、4 つの Landau 準位に分裂し、十分低温強磁場では中央の移動度ギャップ（局在領域）内に Fermi 準位が位置する $\nu = 0$ 量子 Hall 状態が実現する。これにはスピン分裂とバレー分裂の大小に応じ、完全にスピン偏極した量子 Hall 強磁性相と、スピン偏極がなく空間変調を伴う量子 Hall 絶縁相の可能性があり、両者はエッジ状態の有無で区別される。グラフェンにおける強磁場極限の基底状態は量子 Hall 絶縁相であるとされる。圧力下の有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ の伝導電子系は、2 次元 massless Dirac 電子系が弱く層間結合した多層 Dirac 電子系であるが、本講演ではこの系の強磁場電子状態について論ずる。

多層 Dirac 電子系の量子 Hall 強磁性状態では、試料内部は電子局在のため絶縁性であるが、試料側面は各層の逆向き・逆スピンの $n = 0$ エッジ状態が層間結合して試料を取り巻くヘリカル表面状態を形成して金属的になる。これはトポロジカル絶縁体の表面状態と似ているが、時間反転対称性がないためトポロジカルに保護されておらず、スピン反転後方散乱による拡散的な金属状態となる。このとき表面層間伝導は隣接層のエッジ状態間の単トンネル過程により支配される。このトンネル伝導は、隣接層のエッジ状態間を貫く磁束（試料側面に垂直な磁場成分）によって抑制される。すなわち磁場を傾斜させると層間抵抗が増大する。

α -(BEDT-TTF)₂I₃ の層間磁気抵抗は数 T 以上で指数関数的増大を示した後、強磁場で飽和傾向を示すことが知られている。この指数関数的増大は Fermi 準位が移動度ギャップ内にあることを意味し、系が $\nu = 0$ 量子 Hall 状態に移行していることを強く示唆する。強磁場での抵抗の飽和は量子 Hall 絶縁相の可能性を排除し、ヘリカル表面状態による金属的表面伝導が残る量子 Hall 強磁性相の発現を示唆する。

上の推論を検証するために、 α -(BEDT-TTF)₂I₃ の層間磁気抵抗の実験を行った。その結果、飽和領域の層間磁気抵抗は試料の断面積ではなく周長によりスケールされることを見出した。これは層間伝導が一般的なバルク伝導ではなく表面伝導によって担われていることの証拠である。また飽和領域の層間磁気抵抗の磁場方位依存性は特定の磁場方位（試料側面に平行）から傾けると増大することを見出した。これはヘリカル表面状態の層間トンネル伝導の描像と良く整合する。

以上の実験結果により、有機 Dirac 電子系 α -(BEDT-TTF)₂I₃ では、グラフェンで実現したバレー分裂による量子ホール絶縁相の可能性が排除され、ヘリカル表面状態による拡散的表面伝導を伴う量子 Hall 強磁性相が発現することが確認された。 $n = 0$ Landau 準位では擬スピン自由度はバレー自由度と同一視できる。グラフェンでは擬スピンの A・B サイトの副格子自由度となるため、有機系に比べサイト間の短距離相互作用がより有効にバレー分裂を引き起こすのではないかと考えられる。