

有機物質のディラックコーンにおける強相関効果

平田 倫啓 〈東北大学金属材料研究所 michihiro_hirata@imr.tohoku.ac.jp〉

鹿野田一司 〈東京大学大学院工学系研究科 kanoda@ap.t.u-tokyo.ac.jp〉

松野 元樹 〈名古屋大学大学院理学研究科 matsuno@s.phys.nagoya-u.ac.jp〉

小林 晃人 〈名古屋大学大学院理学研究科 akito@s.phys.nagoya-u.ac.jp〉

物質中の電子は、物質の結晶構造や対称性、元素組成などによって決まるさまざまな大きさの見かけ上の質量、有効質量をもつ。近年、特定の条件がそろったときに、固体中の電子が質量ゼロの相対論的な粒子のように振る舞うことが見出され、大きく注目されている。このように質量がゼロの奇妙な電子状態のことを「ゼロ質量ディラック電子」と呼び、グラファイトを単層剥離し作製するグラフェン中で10年ほど前に確認された。それ以降、ゼロ質量のディラック電子は、表面のみ金属的な伝導特性を示すトポジカル絶縁体、その類縁物質であるトポジカル半金属、さらには有機物質中などでも見つかり、「ディラック物質」の科学として新たな広がりを見せている。

ゼロ質量ディラック電子の運動は、ディラックコーンと呼ばれる線形なエネルギー・運動量の分散関係で記述される。このコーン型分散をもつことの帰結として、コーンの交点近傍では、キャリア数が極端に少なくなり、通常の金属や半導体で見られるクーロン相互作用の(遍歴電子による)遮蔽効果が消失する。このため、普通は隠れているクーロンポテンシャルの長距離成分($\propto 1/r$)が復活し、従来とは全く異なる電子相関効果が期待される。実際、グラフェンにおいては、電子相関が(通常とは逆に)電子の速度の特異な増大を引き起こし、その結果、コーンが内向きに変形する現象が確認されている。しかし、グラフェンでは電子相関の大きさ自体が小さく、また乱れなどの影響で、交点まわりでの電子の励起を詳細に検証することが難しい。

このため、ディラックコーン系における電子相関効果の全貌は、実験的に十分には解明されていない。

そんな中、筆者らのグループは最近、強い電子相関と高い結晶性を合わせもつ、有機物質 α -(BEDT-TTF)₂I₃のゼロ質量ディラック電子系に着目し、低エネルギー励起と相関効果の検証に有効な核磁気共鳴(NMR)測定を行った。理論モデルの数値解析を併用し精査することで、ディラックコーン系の電子相関効果に、従来物質とは著しく異なる階層性が存在することを明らかにした。

α -(BEDT-TTF)₂I₃における¹³C NMR測定によって、局所電子スピン帯磁率の温度依存性が導出される。コーン交点に位置するフェルミ準位のまわりでの熱励起特性を調べることで、三つの電子相関効果が異なる温度(エネルギー)スケールで現れることが示される。すなわち、(A)室温から100 K程度までの温度領域では、従来の強相関電子系と同様に、短距離相互作用によるバンド幅(運動エネルギー)の抑制が生じる。(B)~100 K以下になると、クーロンポテンシャルの長距離成分によって電子速度が増大し、ディラックコーンの顕著な変形(右下図)が見られる。さらに、(C)60 K以下の温度領域になると、オンサイトのクーロン斥力によって磁場誘起のフェリ磁性分極が発現する。ディラックコーン系の電子相関効果に、このように多彩な階層構造が見出されたことは、ディラック物質全般における多体効果を解明し理解していく上での第一歩である。

—Keywords—

電子相関による速度の減少とバンド幅の抑制：

フェルミ流体論が成り立つ通常の金属物質では、相互作用する電子系を自由な準粒子(相互作用の着物をまとった粒子)の集団としてとらえ直すことができる。このとき準粒子の速度は、静的な相関効果により一般に元の電子の速度よりも小さくなる($\omega=0$ での自己エネルギーの実部による有効質量の増大)。また運動エネルギーに対応するバンド幅は、動的な相関効果により抑制される(有限の ω での自己エネルギーの虚部による有効質量の増大)。しかしディラックコーン系では、前者の効果が通常の金属とは真逆に働き、運動量ゼロのときに(つまり長波長極限で)速度を発散的に増大させる。

