

量子極限状態における励起子の BCS 的状態実現の可能性

パルス強磁場下における精密な電気伝導および磁化測定によって、53 T 以上の強磁場下でグラファイトが量子極限状態にあるとみなせる実験結果が示された。量子極限状態で期待されるバンド構造について考えると、この磁場領域で観測されている特異な電気伝導は電子正孔対 (励起子) の BCS 的状態である可能性が高い。理論的提案から約半世紀の間謎に包まれていた励起子の BCS 的状態の研究が新展開を迎えようとしている。

半導体は価電子帯の頂上と伝導帯の底との間にエネルギーギャップを持ち、熱励起された電子および正孔が電気伝導を担う [図 1(a) : $\Delta > 0$]。このギャップを何らかの外部パラメータで抑制し、バンドの重なりが生じると絶対零度でも電子と正孔が存在する半金属になる [図 1(b) : $\Delta < 0$]。両者の境界付近を考えたとき電子正孔対 (励起子) の束縛エネルギーが $|\Delta|$ より大きくなると、自発的に励起子が形成されて、低温では励起子の BEC 的または BCS 的状態が出現すると予想されてきた。強磁場下で実現する量子極限状態 (すべてのキャリアが最低 Landau 準位だけを占有した状態) では、磁場によって Δ を連続的に変化させられるとともに、励起子の束縛エネルギー自体も磁場印加によって増大するため、励起子の量子凝縮相を探索する舞台として理想的である。

代表的な単元素半金属であるグラファイトは量子極限状態を実現しうる理想的物質の一つである。電子および正孔の密度は $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度と非常に小さいため、Coulomb 相互作用が遮蔽されにくいという特徴を持つ。グラファイトでは、炭素原子が作るハニカム格子面と垂直に 7.4 T 以上の磁場を印加すると、スピン分裂した電子的 Landau 準位 2 本と正孔的 Landau 準位 2 本だけが Fermi 面と交差した準量子極限状態が実現することが知られてきた。このとき磁場と垂直方向のキャリアの運動の自由度は抑制されるため、磁場方向にのみバンド分散を持つ擬一次元導体とみなすことができる。

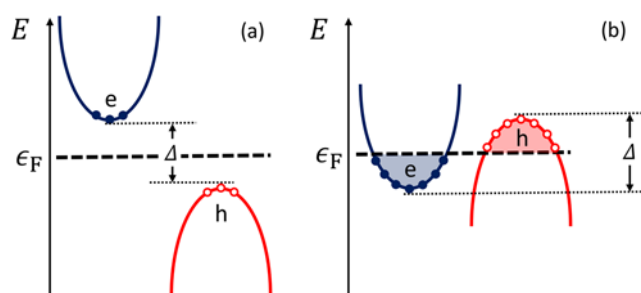


図 1 模式的に描いた(a)半導体および(b)半金属のエネルギーバンド構造。

このたび、東京大学物性研究所と東京理科大学工学部のメンバーからなる研究グループは、最高 75 T までのパルス強磁場下で様々な種類のグラファイト試料に対して電気抵抗、Hall 抵抗、および磁化の精密な測定を行った。その結果は、53 T 以上の磁場下ですべてのキャリアが最低 Landau 準位だけを占有した量子極限状態の実現を示唆している。この磁場領域で観測された c 軸伝導のギャップ的振る舞いを量子極限状態におけるバンド構造に基づいて考えると、電子正孔対による BCS 的状態が実現している可能性が高い。これらの成果は日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan* (JPSJ) の 2015 年 5 月号に掲載された。

先行研究では 53 T 以上の磁場下におかれたグラファイトにおいて、面間抵抗がギャップ的な振る舞いを示すことが報告されていたが、その起源は明らかでなかった。今回の研究を通じて著者らは、(1) 53 T 付近で磁化の微分信号に異常が現れる、(2) 53 T 以上の磁場下で Hall 抵抗がほぼ零になる、(3) 53 T 付近の転移磁場は正孔ドープで下がる、という特徴を見いだした。これらの実験結果は準量子極限状態で Fermi 準位と交差していた 4 本の Landau 準位のうち 2 本が Fermi 準位を離れ、量子極限に到達したと考えれば説明できるとしている。

この量子極限状態で考えられるバンド分散は図 2 のようになる。これは図 1(b)に示した電子的および正孔的バンドが一つずつという理想的状況を実現したことに相当する。この量子極限状態は擬一次元系とみなすことができ、Fermi 点を結ぶ波数の変調に対して不安定と考えられる。今 4 個の Fermi 点があるためそのような波数としては図 2 に示した I から III の 3 種類がある。このうち I は通常の電荷密度波に相当し、II および III は励起子の BCS 的状態に相当する。著者らは物理的考察に基づき、III で特徴付けられる励起子の BCS 的状態が実現したという提案を行った。

この提案の是非に関しては今後微視的な手段での検証が必要である。励起子の BCS 的状態がどのような物性を示すか、実験的にはほとんど分かっていない。またグラファイトは単一元素からなるシンプルな物質であるため、理論的研究においても比較的扱いやすいと考えられる。本研究を端緒として、実験・理論の両面からグラファイトの量子極限環境下における電子状態が解明されていくことが期待される。

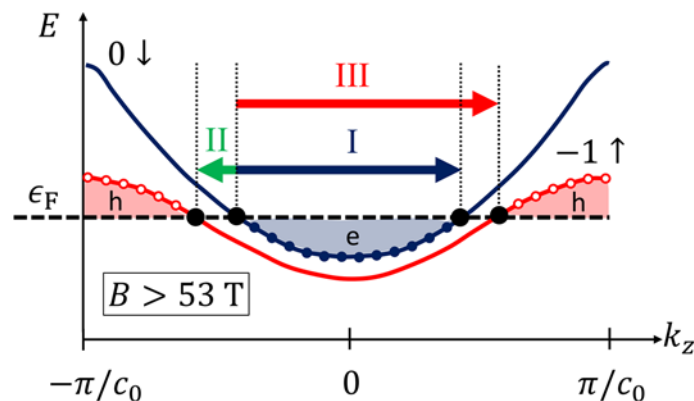


図 2 53 T 以上の磁場下で実現していると考えられるグラファイトの量子極限状態における Landau 準位の分散関係の模式図。図中の I から III は Fermi 点を結ぶ 3 種類の波数ベクトルを表す。

原論文

[Possible Excitonic Phase of Graphite in the Quantum Limit State](#)

[Kazuto Akiba, Atsushi Miyake, Hiroshi Yaguchi, Akira Matsuo, Koichi Kindo, and Masashi Tokunaga, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 054709 \(2015\).](#)

問合せ先：徳永 将史 (東京大学物性研究所)