



合わせて考察した 53 T 以上におけるグラファイトのバンド分散を図 2 に模式的に示す。今対象としている強磁場領域でグラファイトは磁場と垂直方向に分散を示さず、磁場方向にのみ分散関係を持った擬一次元系と見なせる。我々の実験結果から考察した 53 T 以上の状態では、図 2 のように 2 本のランダウ・サブバンドがフェルミ・レベルと交差する。ここで指数  $0 \downarrow$  および  $-1 \uparrow$  で表された状態は、それぞれ  $\downarrow$  スピンの電子的および  $\uparrow$  スピンの正孔的ランダウ・サブバンドに対応しており、電子・正孔ともにスピン分裂まで含めた最低ランダウ準位だけを占有する量子極限状態である。

このような擬一次元導体では一般に  $2k_F$  不安定性があり、フェルミ点間のネスティングによる相転移が起こりやすい[9]。図 2 の状況では第一ブリルアン・ゾーン内に 4 つのフェルミ点が存在するため、図中に両矢印 I~III で示した 3 通りのネスティングが考えられる（図を見やすくするため表示を省略しているが残された 2 つのフェルミ点間も同じ波数でネスティングを起こす）。このうち I のネスティングは電荷密度波に相当する。一方電子的および正孔的サブバンドの間を結ぶネスティングは励起子相であると考えられてきた[10]。励起子相とは電子-正孔対が BCS 的または BEC 的な凝縮状態を形成した量子相であり、理論的には約半世紀前から存在が指摘されてきた[11-13]。実験的にもいくつかの物質で励起子相実現の可能性が報告されてきたが[14-16]、決定的な証拠は得られていない状況である。

図 2 に示した量子極限状態にあるグラファイトのバンド構造は励起子相を実現する理想的な状況であるが、実際に 53 T 以上で見られる面間伝導にギャップの開いた相が励起子相であるか否かは現時点で明らかではない。ただ図 2 の III で示されたネスティングには一つ興味深い特徴がある。図 2 に見られるように  $2k_F^{(-1)} + 2k_F^{(0)} + 2\delta k = \pi/c_0$  ( $c_0$  は  $c$  軸長)であり、これに電荷中性条件から要請される  $k_F^{(-1)} = k_F^{(0)}$  という条件を加えると、III の長さは常に  $\pi/2c_0$  となる。このような格子と整合な変調は格子系と結合してさらなるエネルギー利得を得やすいと期待できる。

## 今後の展開

今後の最優先課題は、53 T 以上で見られる電子相が励起子相か否かを決定づける直接的な証拠を得ることであり、現在我々は様々な実験手段を使って研究を進めている。また同様の物理はグラファイトに限らず他の半金属でも期待できる。我々はビスマスや圧力下の黒燐などに対しても強磁場物性研究を進めており[17]、量子極限状態における相転移に関してより一般的な理解を目指している。

物性物理学の中心的テーマとして多くの人々を魅了する超伝導現象は、約百年前に当時高純度試料の得やすかった水銀で初めて発見された。その後も単純な系で基礎物性が解明されたことが後の BCS 理論の構築に役立ったと言えるだろう。電子-正孔対の BCS 的状態である励起子相についても、単純な系で基礎物性を明らかにすることが、物理の本質を切り出すために重要であると我々は考えている。パルス強磁場下で可能な実験手段とその精度は今世紀に入って飛躍的に向上しており、それらを駆使した実験を通じて量子極限状態における相転移および励起子相の物理の本質を多角的な研究によって解明したい。

## 謝辞

この研究成果は東京大学物性研究所の金道浩一教授、松尾晶技術専門職員、東京理科大学の矢口宏教授との共同研究である。また東京大学物性研究所の高田康民教授、家泰弘教授(現所属：日本学術振興会)および長田俊人准教授には議論および試料提供等を通じて多くのご支援をいただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。

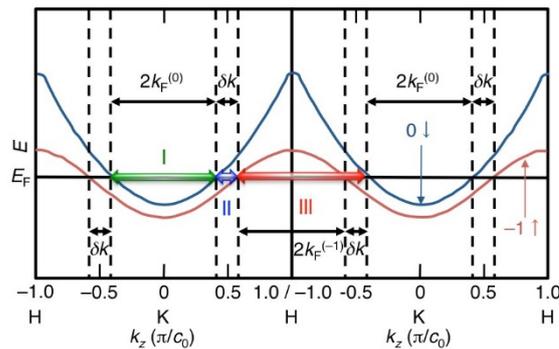


図 2 模式的に示した 53 T 以上の磁場領域で実現していると期待される電子的 ( $0 \downarrow$ ) および正孔的 ( $-1 \uparrow$ ) ランダウ・サブバンドの分散関係。図中の両矢印 I~III は可能なネスティング・ベクトルを表している。

## 参考文献

- [1] 「半金属中の電子・正孔相関と超音波の巨大量子減衰」 倉本義夫著、物理学最前線(2)、共立出版(1982).
- [2] S. Tanuma *et al.*, *Physics in High Magnetic Fields*, ed. S. Chikazumi and N. Miura (Springer Berlin, 1981).
- [3] H. Yaguchi and J. Singleton, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5193 (1998).
- [4] B. Fauqué *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 266601 (2013).
- [5] K. Akiba *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 054709 (2015).
- [6] D. Yoshioka and H. Fukuyama, *J. Phys. Soc. Jpn.* **50**, 725 (1981).
- [7] K. Sugihara, *Phys. Rev. B* **29**, 6722 (1984).
- [8] K. Takahashi and Y. Takada, *Physics B* **201**, 384 (1994).
- [9] H. Fukuyama, *Solid State Commun.* **26**, 783 (1978).
- [10] Y. Iye *et al.*, *Phys. Rev. B* **25**, 5478 (1982).
- [11] N. F. Mott, *Philos. Mag.* **6**, 287 (1961).
- [12] J. M. Blatt, K. W. Böer, and W. Brandt, *Phys. Rev.* **126**, 1691 (1962).
- [13] D. Jérôme, T. M. Rice, and W. Kohn, *Phys. Rev.* **158**, 462 (1967).
- [14] Th. Pillo *et al.*, *Phys. Rev. B* **61**, 16213 (2000).
- [15] B. Bucher, P. Steiner, and P. Wachter, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 2717 (1991).
- [16] Y. Wakisaka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 026402 (2009).
- [17] K. Akiba *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 073708 (2015).