

圧力下の半金属黒燐における異常量子輸送現象

強磁場・高圧力の多重極限下における電気抵抗測定により、黒燐の半金属相における輸送特性が調べられた。その結果、磁場印加にともなう巨大な正の磁気抵抗効果と明瞭な量子振動が観測され、グラファイトやビスマスに匹敵する少数キャリア・高易動度の電子正孔系が実現していることが明らかとなった。電子正孔多体系の普遍的物理を解明するための理想的な舞台のひとつに、半金属黒燐が新たな候補として加わった。

負の電荷をもつ電子と正の電荷をもつ正孔が Coulomb 相互作用をおよぼし合いながら運動する電子正孔系は、物性物理学の対象である物質を表す最も基本的なモデルと言えるだろう。ビスマスやグラファイトに代表される半金属と呼ばれる物質群は、同数の電子と正孔が熱平衡に達している理想的な電子正孔系であり、かつ外部磁場でキャリア数とその間の有効的な相互作用の大きさを制御することができる。そのため半金属は、電子相関の効果による新奇な電子秩序の探索および解明の舞台として現在に至るまで研究が進められている。

本研究の対象である黒燐は、図 1(a)のように蜂の巣格子がひだ状に折り畳まれた特徴的な単原子層（フォスフォレン）を構成要素に持つ層状物質である。黒燐は常圧でナローギャップの半導体であるが、圧力を加えると層間相互作用の増大に伴いギャップは小さくなる。これまでの電気抵抗の温度依存性や光学的な測定の結果から、約 1.5 GPa でバンドがオーバーラップすることで半導体から半金属へ転移すると考えられていたが、半金属黒燐が具体的にどのような電子状態なのかは、これまでほとんど明らかになっていなかった。

この度、東京大学物性研究所、兵庫県立大学、電気通信大学のメンバーからなる研究グループは、常圧から 2.5 GPa にわたる圧力下において単結晶黒燐の磁場中電気抵抗測定を行い、半金属相での巨大な正の磁気抵抗効果と明瞭な量子振動現象を観測した[図 1(b)]。また量子振動の解析から、半金属黒燐はビスマスやグラファイトに匹敵するような少数キャリア・高易動度の電子正孔系であることを初めて明らかにした。この成果は JPSJ の 2015 年 7 月号に掲載された。

1.5 GPa 以下の半導体相では、磁場の逆数に対して周期的な磁気抵抗の振動が 77 K という比較的高温で観測された。これは光学フォノンによってキャリアが散乱され Landau 準位間を遷移することで起こる磁気フォノン共鳴として説明できる。磁気フォノン共鳴の周期から求められるキャリアの有効質量は圧力を加えることで減少しており、これは加圧によるエネルギーギャップの減少を反映する振る舞いとして理解できる。1.5 GPa 以上の半金属相では、0 T と 14 T における抵抗の比が約 1000 倍に達するような巨大な正の磁気抵抗効果とともに、それに重畳する明瞭な Shubnikov-de Haas (SdH) 振動が観測された[図 1(b)]。また半金属に転移直後の約 1.6 GPa では、11 T 以上の磁場下でキャリアが最低 Landau 準位にしか存在しない量子極限状態が実現できることも明らかとなった。観測された SdH 振動から、約 $0.02 m_0$ の有効質量を持つ 2 種類の Fermi 面が同定され、Fermi 面を球状と仮定したときのそれらのキャリア数は 10^{16} cm^{-3} 程度と見積もられた。このことは、半金属黒燐が典型的な半金属であるビスマスやグラファイトに匹敵する少数キャリア・高易動度の電子正孔系であることを示している。また半金属の量子極限状態で期待されている電子相関由来の相転移の可能性を探るために、半金属相で一定磁場下における抵抗の温度依存性が調べられた。その結果、零磁場下で金属的な依存性を示していた抵抗が、磁場中であたかも半導体的な振る舞いに変化する

様子が観測された。ただしこの振る舞いは補償された半金属に対する2キャリアモデルによって定性的に説明できる振る舞いであり、本研究の範囲では電子相転移を示す確証は見出されなかった。

黒燐は磁場だけでなく圧力によってもキャリア数を制御することができ、電子正孔系の物理を詳細に調べる上でとても好都合な物質と言える。今後のさらなる強磁場かつ高圧力の多重極限下における研究から、半金属黒燐の物性解明、ひいては電子正孔系で実現する普遍的な秩序状態の解明に向けた進展が期待される。

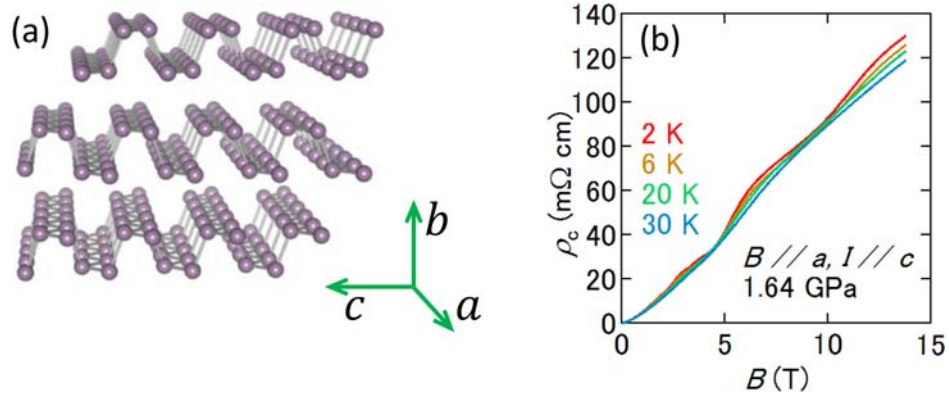


図 1 : (a) 黒燐の結晶構造。(b) 半金属相で観測された巨大な正の磁気抵抗効果とそれに重畳した Shubnikov-de Haas 振動。

原論文

Anomalous Quantum Transport Properties in Semimetallic Black Phosphorus

Kazuto Akiba, Atsushi Miyake, Yuichi Akahama, Kazuyuki Matsubayashi, Yoshiya Uwatoko, Hayato Arai, Yuki Fuseya, and Masashi Tokunaga: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 073708 (2015).

問合せ先：徳永将史（東京大学物性研究所）