

”電子-正孔対”と”電子-電子対”の凝縮状態を高圧力で制御

[1] 要旨

近年、電子と正孔の束縛状態である励起子が凝縮状態となった励起子絶縁体の研究が活発に行われている。その有力な候補物質である Ta_2NiSe_5 に対して、高圧力を精密に制御した環境下での物性測定が行われた。その結果、半導体-半金属転移に伴って励起子相が不安定化し、電子格子相互作用が主要となる混成ギャップが生じること、さらにそのギャップが消失した高圧域において超伝導が出現することが見出された。

[2] 本文

超伝導は電子どうしの対（クーパー対）が凝縮状態となることで電気抵抗がゼロとなる現象である。電子間にはクーロン斥力が働くために互いに反発するはずであるが、従来型超伝導においては格子振動を媒介として電子間に有効的な引力が働くために電子対が形成される。超伝導におけるクーパー対と類似した電子と正孔の間に働くクーロン引力による束縛状態は励起子と呼ばれる。半導体と半金属の境界領域では、励起子が安定的に存在することが可能となり、その凝縮状態が実現する可能性があるが、その場合には系は絶縁体となる。超伝導は 100 年以上前に発見されて以来、高温超伝導体も含む様々な超伝導物質が見出されてきたが、一方、励起子凝縮による励起子絶縁体は 50 年以上前にその存在が理論的に予言されたにも関わらず、実験的な証拠が確立した物質はほとんどない。このような状況下で、近年、半導体-半金属境界付近に位置する層状遷移金属カルコゲナイド Ta_2NiSe_5 において、励起子絶縁体の実現を示唆する特徴的なバンド構造の変化や電子相図が報告されたことから、再び注目を集めている。ただし、 Ta_2NiSe_5 における励起子相への相転移は構造変化を伴うことから、電子正孔間相互作用のみならず、電子格子相互作用も重要な役割を果たしているとの指摘もあり、その相転移の起源をめぐる論争が現在も続いていた。

最近、電気通信大学大学院情報理工学研究所のメンバーを中心とする研究グループは、励起子絶縁体の有力な候補物質である Ta_2NiSe_5 に対して 10 万気圧 (GPa) 級の高圧力下での精密物性測定を行うことにより、低圧半導体相から高圧半金属相に至るまでの包括的な相図を作成することに成功した。さらに、半導体-半金属転移に伴って生じる混成ギャップが消失する圧力近傍において超伝導が発現することを発見した。この成果は、*Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2021 年 7 月号に掲載された。

高圧力を印加することにより系は半導体から半金属へと変化するが、低圧相で観測される励起子相への相転移と類似した構造相転移を伴うギャップ的異常が高圧半金属相でも観測された。キャリア数が増加した高圧半金属相では、遮蔽効果のために励起子の束縛エネルギーは抑制されるため、高圧相においては電子正孔間相互作用よりも電子格子相互作用がギャップ形成と超伝導発現に主要な役割を果たしている可能性が指摘された。また、高圧域における相図は Ta_2NiSe_5 と同様に励起子絶縁体の可能性が指摘されている半金属物質 TiSe_2 における相図と酷似していることから、これらの典型物質の背後に潜む共通した物理の存在が示唆される。本研究の成果は、半導体と半金属の境界領域において電子正孔間相互作用と電子格子相互作用が相まった多彩な量子凝縮相が存在することを示しており、今後の物質開発の指針となる可能性がある。また、高圧力の他にもレーザー光や強磁場を用いて励起子相を制御する試みや、 Ta_2NiSe_5 と類似構造を有する物質開発の報告も行

われており、今後のさらなる研究の進展が期待される。

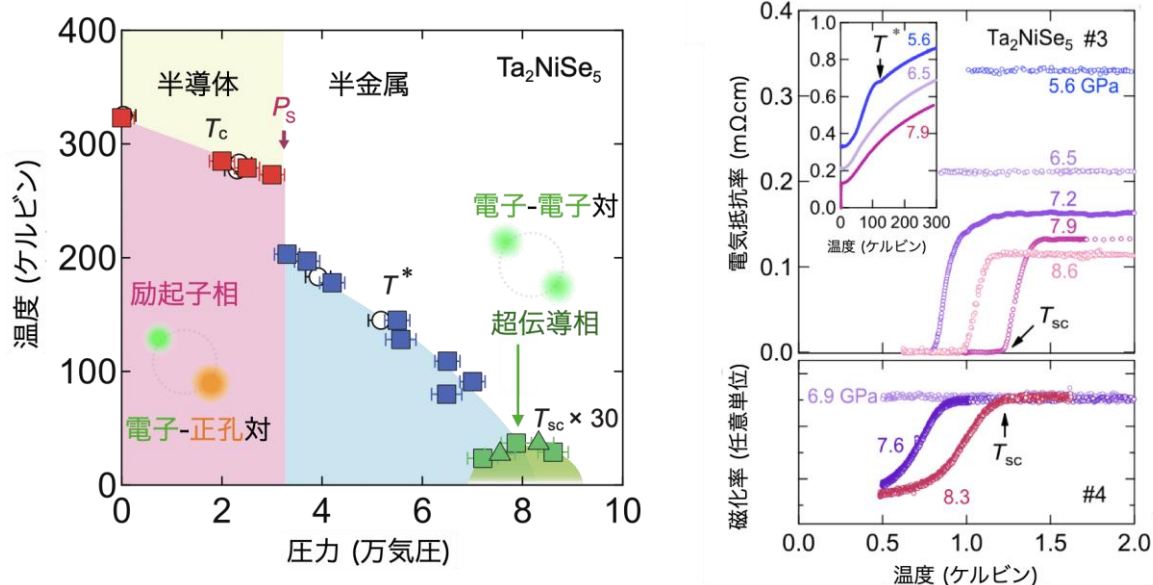


図 1. Ta_2NiSe_5 の圧力-温度相図 (左) と電気抵抗率および磁化率の温度依存 (右)。高圧力の印加により半導体相から半金属相へと変化し、構造転移を伴う混成ギャップが生じる。さらに高圧域で混成ギャップが消失する圧力近傍で超伝導が出現する。相図中の超伝導転移温度は 30 倍で示されている。

原論文(6月11日公開済)

Hybridization-gap Formation and Superconductivity in the Pressure-induced Semimetallic Phase of the Excitonic Insulator Ta_2NiSe_5

K. Matsubayashi, H. Okamura, T. Mizokawa, N. Katayama, A. Nakano, H. Sawa, T. Kaneko, T. Toriyama, T. Konishi, Y. Ohta, H. Arima, R. Yamanaka, A. Hisada, T. Okada, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, K. Munakata, A. Nakao, M. Nohara, Y. Lu, H. Takagi, and Y. Uwatoko, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 074706 (2021)

<情報提供：松林和幸（電気通信大学大学院情報理工学研究科）>