

平成30年6月14日
千葉大学先進科学センター
千葉大学大学院理学研究院

電子正孔間の強い引力相互作用が導く新しい絶縁体状態の創出

電子と正孔が強いクーロン引力相互作用でペア（励起子）を作り、それが多数集まってボース・アインシュタイン凝縮した励起子絶縁体と呼ばれる状態の実現が、層状遷移金属カルコゲナイド Ta_2NiSe_5 で議論され注目を集めています。本研究では、光学伝導度スペクトルに現れる異常なピーク構造の解析から、この物質が、価電子帯と伝導帯が重なる半金属的バンド構造を持つにも拘らず、電子正孔間の強い引力相互作用のため絶縁化した新型の強結合励起子凝縮状態を形成していることを明らかにしました。新機能性材料として、その光学応答の特異性が注目されます。

千葉大学先進科学センターの杉本高大特任助教と同大学大学院理学研究院の太田幸則教授のグループは、国内外2機関の研究者の協力を得て、励起子絶縁体候補物質 Ta_2NiSe_5 の光学伝導度スペクトルを、類似の構造を有する単純な半導体物質 Ta_2NiS_5 のそれと比較・解析し、前者が新しいタイプの強結合型の励起子絶縁体状態にあることを明らかにしました。これらの物質の結晶構造の模式図を図1に示します。

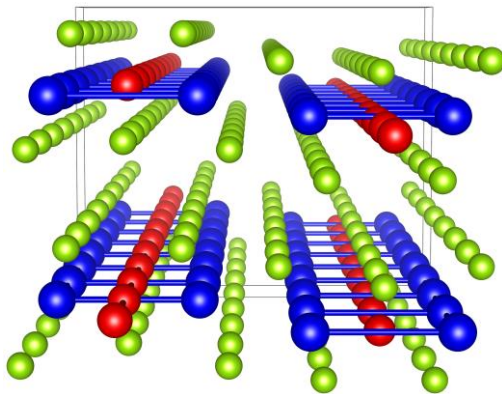


図1. Ta_2NiSe_5 および Ta_2NiS_5 の結晶構造の模式図。赤丸はNiイオン、青丸はTaイオン、緑丸はSeまたはSイオンを表す。

従来の励起子凝縮の理論によると、正常相が価電子帯と伝導帯のバンドが重なった半金属の場合、励起子凝縮は、超伝導におけるクーパー対凝縮と類似のバーディーン・クーパー・シュリーファー (BCS) 型となり、正常相が価電子帯と伝導帯の間にギャップが開いた半導体の場合、励起子凝縮は、高温から発生する励起子対のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) として記述されるとされています (図2左)。

本研究では、半世紀に渡り信じられてきたこの概念を覆し、現実の物質 Ta_2NiSe_5 では、仮想的な正常相が半金属であっても、強い電子・正孔間クーロン引力により BEC 型の励起子凝縮が起きていること、すなわちこの系の基底状態は、これまで知られていない新しいタイプの絶縁体状態にあることを、実験で観測される光学伝導度スペクトルの解析に基づいて明らかにしました。

従ってこの物質は、電子・正孔間の強い引力相互作用で、転移温度より高温でも電子・正孔ペア（プリフォームド励起子）が形成され絶縁体的に振舞う、新しいタイプの絶縁体であり（図2右）、電子間の強い斥力相互作用で転移温度より高温でも絶縁体的に振舞ういわゆるモット絶縁体と対比されるべき、物性物理学の新概念を提供します。またこの新規絶縁体状態は、特異な光学応答を有し、新規機能性材料として工学的応用も期待されます。

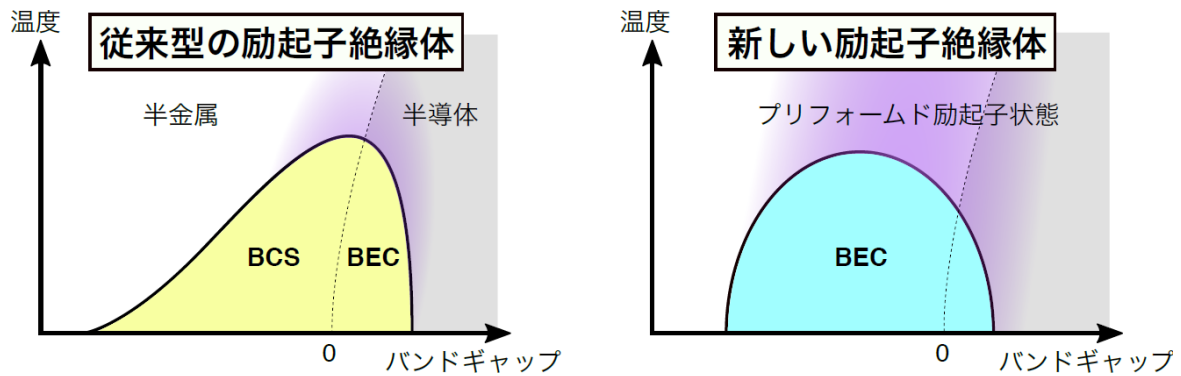


図2. 従来型の励起子絶縁体の模式的相図（左図）と新型励起子絶縁体の模式的相図（右図）。

本研究成果は、科学研究費補助金（JP15H06093, JP17K05530, JP18K13509）およびドイツ DFG（SFB 1143）の支援下で得られたものであり、米国物理学会刊行の学術雑誌 *Physical Review Letters* 誌の 2018 年 6 月 18 日号にオンライン出版される予定です。

【用語説明】

- (1) ボース・アインシュタイン凝縮... ある転移温度以下で巨視的な数のボース粒子が最低エネルギーの 1 粒子状態に落ち込む相転移現象。
- (2) 励起子絶縁体... バンドの重なりが小さな半金属、あるいはバンドギャップが小さな半導体において生成されたマクロな数の電子と正孔の対（励起子）が量子凝縮し絶縁化した状態。
- (3) BCS 超伝導理論... 超伝導現象発見以来、初めてこの現象を微視的に解明した理論。
- (4) クーパー対... 超伝導体において何らかの引力相互作用によって形成された電子の対。
- (5) モット絶縁体... バンド理論では金属的と予想されるに拘わらず、電子間斥力相互作用の効果で絶縁化した状態。

本研究に関するお問い合わせ先

千葉大学先進科学センター（特任助教・杉本高大）

Tel: 043-290-2753 Fax: 043-290-3523

E-mail: sugimoto@chiba-u.jp

千葉大学大学院理学研究院（教授・太田幸則）

Tel: 043-290-2755 Fax: 043-290-2874

E-mail: ohta@faculty.chiba-u.jp