

氏 名	杉浦 栞理
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 8493 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 30年 3月 23日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	Studies on Electronic Phase in High Magnetic Field for Layered Organic Conductors (層状有機導体における強磁場電子相の研究)

主 査	筑波大学教授(連係大学院)	理学博士	宇治 進也
副 査	筑波大学教授(連係大学院)	理学博士	胡 暁
副 査	筑波大学教授	博士(理学)	神田 晶申
副 査	筑波大学准教授(連係大学院)	博士(理学)	山口 尚秀

論 文 の 要 旨

本審査対象論文では、1. π - d 系有機導体 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の電気的・磁氣的性質、および 2. 層状有機超伝導体 β'' -(ET) $_2$ SF $_5$ CH $_2$ CF $_2$ SO $_3$ における新奇超伝導状態、についての系統的な研究結果をまとめている。まず π - d 系有機導体 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ では、この系の長年の論点である反強磁性絶縁体 (AFI) ー常磁性金属 (PM) 転移機構の詳細を明らかにするため、電気抵抗・磁気トルク・磁気熱量効果測定を行っている。AFI 相内で非線形伝導、磁化の主軸の変化、磁気熱量効果の異常がほぼ同じ磁場 (~ 5 T) で観測される事を明らかにし、さらに、電気伝導特性と磁気特性の両方に ~ 5 T で異常が見られる事から、これが電荷とスピンの両方の自由度に起因する異常であることを明らかにしている。また、磁気熱量効果測定では ~ 5 T で特に明瞭な相転移の証拠が観測されていないことから、この5 T での異常がクロスオーバー現象であると結論している。

次に、層状有機超伝導体 β'' -(ET) $_2$ SF $_5$ CH $_2$ CF $_2$ SO $_3$ では、強磁場における特異な超伝導 (FFLO) 相への相転移現象を調べるため、磁気トルク・磁気熱量効果・電気抵抗の詳細な実験を行っている。磁気トルクの磁場方位依存性を精密に測定し、1.5K以下の低温域で約 10T以上で反磁性磁化率が急激に減少する振る舞いを捉えている。これは、均一な超伝導状態から、秩序変数が空間的に振動する FFLO 超伝導へと転移した証拠となるものと判断している。さらに磁気熱量効果の実験では、低温域で約 10Tで、磁気エントロピーのピーク構造を捉えており、これを明確な相転移の証拠としている。この異常は、超伝導面内付近の極限られた磁場方位でしか観測されないことから、FFLO 超伝導状態が軌道効果に極めて弱

いことを明確に示すものとしている。さらに磁場を伝導面から傾けていくと、FFLO 相が消失した後、磁気熱量効果に特徴的なピーク構造を発見している。その磁場方位依存性から、ボルテックスの量子融解転移と結論している。また、伝導面間方向の電気抵抗の詳細な測定結果も報告している。電気抵抗の磁場依存性には、低温強磁場領域で、超伝導相であるにも関わらず大きな有限の抵抗値が観測している。この有限な抵抗値は、ボルテックスが電流により駆動された結果であり、特に FFLO 相が実現する磁場領域で抵抗に周期的な構造が出現するところを明らかにしている。この周期構造は、FFLO 相の超伝導秩序変数の nodal line 構造と、磁束量子が形成する格子との整合・不整合効果であると結論している。適切な仮定の下、FFLO 相を特徴付ける nodal line 間隔を見積もっている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本審査対象論文では、層状有機伝導体である、 π - d 系有機導体 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ および β'' -(ET) $_2$ SF $_5$ CH $_2$ CF $_2$ SO $_3$ における居磁場電子状態において、電気抵抗、磁気トルク、磁気熱量効果の系統的な実験結果について議論している。 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ は、高温では常磁性金属状態であるが、低温低磁場で反強磁性絶縁体状態に転移する。その転移のメカニズムに関し長年の議論があるが、未解決の問題となっている。本審査対象論文では、その詳細な実験結果から、伝導 π -電子と局在 d 電子の磁性と磁気エントロピーの磁場変化を初めて明らかにしたもので、伝導 π -電子が反強磁性転移を起こすが、局在 d 電子は常磁性のままであることを示すものである。この結果は、この転移に関する理論研究に重要な知見を与えるもので、今後の発展が見込まれるものである。

一方、 β'' -(ET) $_2$ SF $_5$ CH $_2$ CF $_2$ SO $_3$ は、ET 分子層 (伝導層) 間に大きな負のイオンが配置している構造を持ち、極めて2次元性の高い超伝導体であることが指摘されて来た。このような2次元性の高い超伝導体では、磁場が伝導面に平行な時、パウリ常磁性極限を超えても超伝導が安定できる新規の超伝導相、FFLO 相の存在が理論的に示唆されている。本審査対象論文では、正確に方位が制御された磁場中で、この FFLO 相の詳細な実験結果を報告している。正確に伝導面に平行な磁場中で、磁気熱量効果の磁場変化に、10T付近で異常 (ピーク構造) を発見している。磁気熱量効果は電子系の磁気エントロピーに極めて敏感であるため、相転移を発見するには強力な手段となっている。本論文では、詳細な実験を通して、FFLO 相への転移を発見したもので、その学術的価値は極めて高い。特に、FFLO 相転移とボルテックス相転移を明確に区別して観測していることは、注目に値する。さらにその超伝導状態の磁気エントロピー状態や FFLO 相における超伝導秩序変数の空間波長について、初めて半定量的に報告するもので、本論文は FFLO 相発現メカニズムに重要な知見を与えるものと評価できる。

〔最終試験結果〕

平成30年2月14日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。