

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 劉 東

本論文は、擬2次元有機伝導体  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> (以下 $\alpha$ -I<sub>3</sub>と略記) における電荷秩序相から質量ゼロのディラックフェルミオン相への転移の臨界圧力付近を電気抵抗測定と核磁気共鳴実験で調べた結果を報告している。電荷秩序相においては、端状態の可能性とスピン励起の起源が示されるとともに、ディラック電子相の低温電子輸送および磁性に対する電子間クーロン相互作用の効果が明らかにされた。

第1章では、本研究の背景として、まず、代表的なディラックフェルミオン系である単層グラファイト (グラフェン) の電子間クーロン相互作用に関する研究の現状が述べられている。質量ゼロのディラックフェルミオンとはフェルミ準位近傍でコーン型の分散関係 (ディラックコーン) を有する電子系であり、低温で伝導キャリア密度が減少するために、長距離クーロン相互作用が遮蔽されないという特徴を持つ。この効果として理論的に予言されていたフェルミ速度の発散的増大がグラフェンの実験で確認されているが、電気伝導度が低温で発散的に増大するとの理論的予言はこれまでの実験で観測されていないことが述べられている。次いで、本研究が対象とする物質 $\alpha$ -I<sub>3</sub>についての先行研究が紹介されている。 $\alpha$ -I<sub>3</sub>は、常圧下 135K 以下で電荷秩序を示すが、約 11 kbar でディラックフェルミオン相へと転移する。後者においては、グラフェン同様、長距離クーロン相互作用によるフェルミ速度の発散的増大が観測されている一方で、電気伝導度が低温に向かって対数的に減少する振舞いについては、その起源が明らかになっていない現状が述べられている。最後に、本研究が、 $\alpha$ -I<sub>3</sub>のディラックフェルミオン相が電荷秩序相に隣接して発現するという特徴に着目し、電荷秩序転移近傍にあるディラックフェルミオン系を調べることで、電子相関効果を明らかにすることを目的としていることが述べられている。

第2章では、実験に用いた $\alpha$ -I<sub>3</sub>結晶、電気抵抗測定法およびNMR測定系について述べられている。また、NMRスペクトルから単位胞内の分子サイト毎の局所的スピン磁化率を求める方法 (site-selective NMR) が詳述されている。

第3章では、電荷秩序相における電気抵抗測定とNMR測定の結果が述べられている。まず、精密に制御された圧力下における電気抵抗の測定から電荷秩序転移温度の圧力依存性が詳細に調べられ、転移温度が加圧とともにほぼ線形に減少し、臨界圧力 11.8 kbar でディラックフェルミオン相へと転移することが示された。一方、電荷秩序相における電気抵抗の温度依存性から求めた活性化エネルギーは、圧力の増大に対して急激に減少し、電荷秩序相が消失する臨界圧より十分に低い 8 kbar でゼロになることを見出した。これは、電荷秩序相の電荷励起ギャップを捉えたものではなく、ディラックフェルミオン相近傍にある電荷秩序相に発現することが理論的に予言されていた端伝導状態を反映したものであると主

張されている。NMR スペクトルは、電荷秩序転移に伴う電荷不均化の発生を捕らえており、その圧力依存性の詳細が明らかにされた。また、NMR スピン格子緩和率  $1/T_1$  の温度依存性がいくつかの圧力下で測定され、電荷秩序相のスピンギャップが、電荷秩序転移温度の圧力依存性とは異なり臨界圧力近くまではほぼ一定であることから、この系のスピン励起が、電荷密度波相に期待される準粒子励起ではなく、強相関電荷秩序相に期待されるスピン三重項励起であることが証明された。

第4章では、ディラックフェルミオン相における電気抵抗測定と NMR 実験の結果が述べられている。まず、ディラックフェルミオン相の電気伝導度が低温で減少に転ずるという先行研究の結果が試料に依存せず再現されることが確認された。その後、この振る舞いが圧力をパラメータとして調べられ、低温での伝導度の減少が電荷秩序転移の臨界圧力近傍で擬似臨界的に増強されることが明らかにされた。この振る舞いから、伝導度の低温での減少が、電荷秩序の起源である短距離クーロン相互作用によるものであると結論付けている。一方、NMR シフトの測定から、各分子サイトの局所スピン磁化率の温度依存性が求められ、その振る舞いが長距離クーロン相互作用によるフェルミ速度の対数的繰り込みで理解できるとする先行研究を再現すること、そして、この特徴が圧力にほとんど依らないことが示された。これは、ディラックフェルミオン系に対する長距離クーロン相互作用の効果が物質パラメータの変化に鈍感であることを示す結果であると主張されている。一方、NMR 緩和率  $1/T_1$  はべき乗則で近似される温度依存性を示し、その指数が臨界圧力近傍で急峻に増大することが見いだされた。これは、反強磁性スピン揺らぎを引き起こす短距離クーロン相互作用の効果が臨界圧近傍で特異的に変化していること示していると結論されている。

第5章は、本論文をまとめている。

以上を総合すると、本研究は、擬2次元有機伝導体  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> における電荷秩序相とそれに隣接する質量ゼロのディラックフェルミオン相の低温電子輸送特性と磁性を圧力をパラメータとして系統的に調べ、ディラックフェルミオン相の電荷およびスピン状態に及ぼす短距離・長距離クーロン相互作用の効果を明らかにした。これは、現在、広く研究されているディラックフェルミオン系一般に共通する強相関効果に実験サイドから光を当てたものであり、物性物理学および理工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。