

学位論文題名

電荷密度波相の臨界圧力近傍における

NbSe_3 の電子輸送現象

学位論文内容の要旨

近年、低次元電子系における基底状態に関心が寄せられている。その理由は、量子ホール効果や電荷・スピンのストライプ相など新規量子現象が相次いで発見され、その展開が重要視されているためである。一次元電子系の基底状態は、電荷密度波(CDW)、スピン密度波(SDW)および超伝導であることが、 g -ology によって示されている。これらの基底状態間の移り変わりは、系の相互作用定数(g)の変化による量子相転移として捉えられている。実際に多くの擬一次元導体において、CDW、SDW、超伝導などが観測され、CDW(SDW) - 超伝導の相転移が圧力や磁場の変化によって生じることが知られている。しかしながら、これらの現象は、 g -ology よりも、むしろ平均場理論(フェルミ面のネスティング効果)に基づいて説明され、圧力や磁場は電子系の相互作用定数を制御するより、次元性を制御する変数として理解されている。

圧力は電子系の一次元性を弱め、磁場は一次元性を強める効果を持つ。実際、圧力により消失した SDW 相が磁場により誘起されている(磁場誘起 SDW)。一方、CDW 系においては、圧力により消失した CDW が磁場によって誘起される磁場誘起 CDW 相は、理論的予測はされているものの、実験的確認は得られていない。CDW 相が消失する臨界圧力において、CDW が磁場によって誘起されるか、という基本的な問題が残されている。

臨界圧力においては、CDW - 超伝導の相転移は低温で実現するため、 g -ology が示すような量子ゆらぎによる量子相転移が期待される。CDW が対角秩序(粒子性)、超伝導が非対角秩序(波動性)であることから、圧力が電子系の次元性だけでなく、粒子性と波動性を制御している可能性もある。さらに臨界圧力近傍の CDW 状態は、CDW 転移温度は低く、CDW の有効質量は軽いことから、CDW 特有の並進運動においても量子効果が期待される。また多数のノーマルキャリアが存在するため、それらと CDW との間の散乱や遮蔽効果も重要と考えられる。従って、臨界圧力近傍は、平均場理論で説明される現象以外に、量子ゆらぎを始めとする量子効果に強く関連した現象が期待され、非常に興味深い。

そこで本研究では、CDW 相と超伝導相が競合する臨界圧力における電子状態、およ

び磁場効果を実験的研究から調べることを目的とした。実験は、代表的な擬一次元導体 NbSe_3 の低温 CDW 相の臨界圧力に注目し、臨界圧力近傍の電気抵抗および磁気抵抗の温度・磁場依存性の測定を行った。

本論文の内容は以下の通りである。

第 1 章では、擬一次元導体の研究の背景について述べた。特に CDW 相と超伝導相の競合問題の解釈として、平均場近似に基づく Yamaji モデルと一次元系の弱結合理論に基づく g -ology との本質的な違いを指摘し、本研究の位置付けと目的を述べた。また、実験として擬一次元導体 NbSe_3 における低温 CDW 相の臨界圧力近傍を調べるのが適切である理由を述べた。

第 2 章では、まず一次元電子系に関する基本事項について、朝永-ラッティンジャー液体、 g -ology、Yamaji 理論から得られる知見を述べた。これらの基礎事項に基いて、磁場誘起 CDW の可能性を検討した。更に、臨界圧力での CDW 相と超伝導相の競合問題について、 g -ology の観点から量子相転移の可能性を指摘した。

第 3 章では、これまでに明らかにされてきた NbSe_3 の物性を圧力効果と磁場効果を中心にまとめた。特に、 NbSe_3 の低温 CDW 相で出現する特有の異常磁気抵抗について詳しく述べ、異常磁気抵抗の観測が臨界圧力近傍の CDW 相の有無を検証する上で、有力な手段となることを指摘した。

第 4 章では、実験方法について述べた。特に低温での幾つかの高圧発生法と圧力較正法について、超伝導マグネットを用いた強磁場発生、および高圧と強磁場を同時に実現させる多重極限環境技術について述べた。

第 5 章では、実験結果と考察について述べた。電気抵抗の温度依存性、磁気抵抗の温度依存性、および磁場依存性の結果を示し、データの解析を行った。特に磁気抵抗を Kohler の規則の観点から解析を行い、CDW 相の有無の検証、CDW ギャップの温度依存性について詳細に説明した。解析の結果、本実験において磁場誘起 CDW 相は出現しないことを明らかにした。また、磁気抵抗の振る舞いから、従来の臨界圧力以上においても、CDW 相が存在していることを示した。その CDW 状態は、不純物等によりピン止めされた状況とは異なり、微小電場でスライディング可能な Carlson-Goldman モードが実現している可能性を示した。このことは、CDW の運動状態における量子効果やノーマルキャリアによる遮蔽効果が重要な役割を演じていることを示唆している。

第 6 章では、本研究の結論を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 谷 和 彦

副 査 教 授 中 山 恒 義

副 査 教 授 田 中 啓 司

学 位 論 文 題 名

電荷密度波相の臨界圧力近傍における

NbSe₃ の電子輸送現象

近年、低次元電子系における基底状態に関心が寄せられている。それは、量子ホール効果やスピン・電荷のストライプ相など新規量子現象が相次いで発見され、その展開が重要視されているためである。一次元電子系の基底状態は、*g*-ology によれば、電荷密度波(CDW)、スピン密度波(SDW)および超伝導であることが示されている。これらの基底状態間の移り変わりは、系の相互作用定数(*g*)の変化による量子相転移として捉えられている。実際に多くの擬一次元導体において、CDW、SDW、超伝導などが観測され、CDW(SDW) - 超伝導の相転移が圧力や磁場によって生じることが知られている。しかしながら、これらの現象は、*g*-ology よりも、むしろ平均場理論に基づいて説明され、圧力や磁場は電子系の相互作用定数を制御するより、次元性を制御する変数として理解されている。

圧力は電子系の一次元性を弱め、磁場は一次元性を強める効果を持つ。実際、圧力により消失した SDW 相が磁場により誘起されている(磁場誘起 SDW)。一方、CDW 系においては、圧力により消失した CDW が磁場によって誘起される磁場誘起 CDW 相は、理論的予測はされているものの、実験的確認は得られていない。CDW 相が消失する臨界圧力において、CDW が磁場によって誘起されるか、という基本的な問題が残されている。

臨界圧力においては、CDW - 超伝導の相転移は低温で実現するため、量子ゆらぎによる量子相転移が期待される。CDW が対角秩序(粒子性)、超伝導が非対角秩序(波動性)であることから、圧力が電子系の次元性だけでなく、粒子性と波動性を制御している可能性もある。さらに臨界圧力近傍の CDW 状態は、CDW 転移温度は低く、CDW の有効質量は軽いことから、CDW 特有の並進運動においても量子効果が期待される。また多数のノーマルキャリアが存在するため、それらと CDW との間の散乱や遮蔽効果も重要と考えられる。従って、臨界圧力近傍は、平均場理論で説明される現象以外に、量子ゆらぎを始めとする量子効果に強く関連した現象が期待され、非常に興味深い。

そこで本研究では、CDW 相と超伝導相が競合する臨界圧力における電子状態を電子輸送現象の実験的研究から明らかにすることを目的としたものである。本論文は全 6 章からなり、その主要な成果は以下のように要約される。

第 1 章では、擬一次元導体の研究の背景について述べた。特に CDW 相と超伝導相の競

合問題の解釈として、平均場近似に基づく Yamaji モデルと一次元系の弱結合理論に基づく g -ology との本質的な違いを指摘し、本研究の位置付けと目的を述べた。また、実験として擬一次元導体 NbSe_3 における低温 CDW 相の臨界圧力近傍を調べることが適切である理由を述べた。

第 2 章では、CDW と g -ology に関する基礎について述べた。更に、Yamaji 理論から得られる知見を述べ、磁場誘起 CDW の可能性を検討した。

第 3 章では、これまでに明らかにされてきた NbSe_3 の物性を圧力効果と磁場効果を中心にまとめた。特に、 NbSe_3 の低温 CDW 相で出現する特有の異常磁気抵抗について詳しく述べ、異常磁気抵抗の観測が臨界圧力近傍の CDW 相の有無を検証する上で、有力な手段となることを指摘した。

第 4 章では、実験方法について述べた。特に低温での高圧発生法と圧力較正法について、超伝導マグネットを用いた強磁場発生、および高圧と強磁場を同時に実現させる多重極限環境技術について述べた。

第 5 章では、実験結果と考察について述べた。電気抵抗の温度依存性、磁気抵抗の温度依存性、および磁場依存性の結果を示し、データの解析を行った。特に磁気抵抗を Kohler の規則の観点から解析を行い、CDW 相の有無の検証、CDW ギャップの温度依存性について詳細に説明した。解析の結果、本実験において磁場誘起 CDW 相は出現しないことを明らかにした。また、磁気抵抗の振る舞いから、従来の臨界圧力以上においても、CDW 相が存在していることを示した。その CDW 状態は、不純物等によりピン止めされた状況とは異なり、微小電場でスライディング可能な Carlson-Goldman モードが実現している可能性を示した。このことは、CDW の運動状態において量子効果とノーマルキャリアによる遮蔽効果が重要な役割を演じていることを示唆している。

最後に第 6 章で本研究から得られた知見を概観し、本研究の持つ意味と役割について総括した。

これを要するに著者は、磁気抵抗の測定から臨界圧力近傍において電荷密度波状態の存在を明らかにするとともに、その運動状態には Carlson-Goldman モードが実現している可能性を提唱し、量子現象に新知見を得たものであり、応用物理学および量子物理工学の進展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。