

学 位 論 文 題 名

電荷密度波の運動とトポロジカル欠陥

－斜方晶 TaS_3 における可塑的流動現象と量子トンネル効果－

学位論文内容の要旨

近年、表面や界面における非平衡ダイナミクスに大きな関心が寄せられている。それは現象そのものに対する興味という以上に、たとえば非平衡系における時空間のパターン形成や、そこに潜む普遍性の解明に大きな示唆を与えているからである。さらに、この問題は電子系、とりわけ本研究で取り上げた電荷密度波や第二種超伝導体中の磁束格子、ウィグナー結晶などの周期構造を持つ系のダイナミクスに対して新しい視点をあたえるという展開を見せている。

これまでの上述のような周期的構造をもつ系の集団運動の記述は系の重心運動の自由度に対して行なわれてきた。この取り扱いには系に乱れの存在しない場合には有効であったが、現実の系には乱れによる効果が存在し、それによって引き起こされる複雑なダイナミクスは記述できなかった。それに対し、Balents と Fisher はこの系を多自由度をもつ複雑な系としてとらえ直すという新しいアプローチによって記述しようと試みた。特に乱れの影響が強い場合には、系に加えられる駆動力によってトポロジカルな欠陥（例えば、結晶における転位のような欠陥）が生成され、それがダイナミクスに対して本質的な役割を果たす事が示唆されている。つまり、新しい運動状態として、もとの空間的な周期性が破壊された塑性変形による流動状態が実現されると考えられる。しかし、今日に至るまでそのような運動状態が系に加えられる駆動力の関数として実現するという事は確認されていない。さらに、電子系において特有の量子効果がその運動にどのような影響を及ぼすのかという興味深い問題が存在する。

そこで本研究では電荷密度波の運動状態を電場の関数として詳細に観測し、トポロジカルな欠陥の生成による可塑的流動状態の存在を検証する事、またトポロジカル欠陥の量子生成が及ぼす系のダイナミクスへの影響を検証する事を主題とした。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の大きな背景となっている界面の非平衡ダイナミクスと電子系の輸送現象との関わりを述べ、その中で電荷密度波系のダイナミクスが果たす役割と研究の意義と述べた。

第 2 章では、まず電荷密度波の基本的な発生のメカニズムや簡単なモ

デルによる運動論と過去に得られている知見を述べた。更に、トポロジカルな欠陥の発生によって生じる新しい流動状態の存在とその性質について、界面のダイナミクスとの関連から述べた。また、極低温においてトポロジカルな欠陥が量子生成される可能性があるため、そのときの電荷密度波のダイナミクスを巨視的量子トンネル現象という視点から論じ、最後に本研究の実験的指針を示した。

第3章では実験方法を述べた。とくに電荷密度波の運動にともなって発生する電流振動信号の測定には、微小信号の測定技術が不可欠であるので詳細に実験技術を記述した。また、極低温の実現に希釈冷凍器を用いたため、関連の低温技術についても言及した。さらに絶縁体状態の試料の測定方法について、測定環境の構築、使用するべき周辺材料の選定なども含めて記述した。

第4章では実験結果を比較的高温領域 (77.3 K 付近) と極低温 (50 mK 付近) とにわけて掲載し、データ解析および考察を記述した。液体窒素温度付近で得られた電流 - 電圧特性および電流振動信号の電場依存性から、電荷密度波のゆっくりとした運動がトポロジカルな欠陥の生成による可塑的な流動状態であることを確認し、温度 - 電場平面における電荷密度波の運動状態図を提唱した。また、極低温領域では温度依存性のない非線形伝導現象を観測し、それがトポロジカル欠陥の量子生成によるトンネル現象である可能性を発見した。

最後に第5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。

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 武 藤 俊 一
副 査 助 教 授 丹 田 聡

学 位 論 文 題 名

電荷密度波の運動とトポロジカル欠陥

—斜方晶 TaS_3 における可塑的流動現象と量子トンネル効果—

近年、表面や界面における非平衡ダイナミクスに大きな関心が寄せられている。それは現象そのものに対する興味という以上に、非平衡系における時空間のパターン形成や、そこに潜む普遍性の解明に大きな示唆を与えているからである。さらに、この問題は電子系、とりわけ本研究で取り上げた電荷密度波や第二種超伝導体中の磁束格子、ウィグナー結晶などの周期構造を持つ系のダイナミクスに対して新しい視点をあたえるという展開を見せている。

従来、周期的構造をもつ系の集団運動の記述は系の重心運動の自由度に対して行なわれてきた。この取り扱いには系に乱れの存在しない場合には有効であったが、現実の系には乱れによる効果が存在し、それによって引き起こされる複雑なダイナミクスには有効でなかった。それに対し、Balents と Fisher はこの系を、多自由度をもつ複雑な系としてとらえ直す新しいアプローチによって記述しようと試みた。特に乱れの影響が強い場合には、系に加えられる駆動力によってトポロジカルな欠陥（例えば、結晶における転位のような欠陥）が生成され、それがダイナミクスに対して本質的な役割を果たす事が示唆されている。つまり、新しい運動状態として、もとの空間的な周期性が破壊された塑性変形による流動状態が実現されると考えられる。しかし、現在までそのような運動状態が系に加えられる駆動力の関数として実現することは確認されていない。さらに、電子系においては、特有の量子効果がその運動にどのような影響を及ぼすのかという興味深い問題が存在する。

本論文はこのような背景のもとで、電荷密度波の運動状態を電場の関数として詳細に観測し、トポロジカルな欠陥の生成による可塑的流動状態の存在を検証する事、またトポロジカル欠陥の量子生成が及ぼす系のダイナミクスへの影響を検証する事を主題としたものである。本論文は全体として全4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、本研究の大きな背景となっている界面の非平衡ダイナミクスと電子系の輸送現象との関わりを述べ、その中で電荷密度波系のダイナミクスが果たす役割と研究の意義と述べた。

第2章では、まず電荷密度波の基本的な発生のメカニズムや簡単なモデルによる運動論と過去に得られている知見を述べた。更に、トポロジカルな欠陥の発生によって生じる

新しい流動状態の存在とその性質について、界面のダイナミクスとの関連から述べた。また、極低温においてトポロジカルな欠陥が量子生成される可能性があるため、そのときの電荷密度波のダイナミクスを巨視的量子トンネル現象という視点から論じ、最後に本研究の実験的指針を示した。

第 3 章では本研究遂行上、最適な試料である斜方晶 TaS_3 単結晶の特色を結晶構造、電荷密度波特性を中心に説明し、本実験方法について述べた。とくに電流振動信号の測定には、微小信号の測定技術が不可欠であるので詳細に実験技術を記述した。また、極低温の実現に希釈冷凍器を用いたため、関連の極低温技術について言及した。さらに絶縁体状態の試料の電圧、電流測定方法について、測定環境の構築、使用するべき周辺材料の選定なども含めて記述した。

第 4 章では実験結果を比較的高温領域 (77.3 K 付近) と極低温 (50mK 付近) とにわけて掲載し、データ解析および考察を記述した。液体窒素温度付近で得られた電流 - 電圧特性および電流振動信号の電場依存性から、電荷密度波のゆっくりとした運動がトポロジカルな欠陥の生成による可塑的な流動状態であることを確認し、温度 - 電場平面における電荷密度波の運動状態図を提唱した。また、極低温領域では温度依存性のない非線形伝導現象を観測し、それがトポロジカル欠陥の量子生成によるトンネル現象である可能性を発見した。

最後に第 5 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、電荷密度波の運動における可塑的流動状態の存在を明らかにし、それによる新しい運動状態図を提唱するとともに、極低温領域ではトポロジカル欠陥による量子トンネル現象を発見し、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。