

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	兔子尾 理貴
論文題目	Anomalous electron hydrodynamics in noncentrosymmetric materials (空間反転対称性が破れた物質中における異常電子流体力学)		
(論文内容の要旨)			
<p>流体力学は多体系のマクロなダイナミクスを記述する非常に強力な理論手法として広く知られている。特に近年、その手法は水などの高い対称性をもつ古典的な流体の記述を超えて、高エネルギー物理学におけるクォーク・グルーオンプラズマのカイラル輸送現象から、生物物理学におけるアクティブカイラル流体のダイナミクスに至るまで、幅広い物理現象に応用され、その有用性が再認識されつつある。</p> <p>他方、結晶中の電子ダイナミクスを記述する上で、このような「流体力学」的な枠組みを用いようという試みはこれまであまり行われてこなかった。その主な原因は、ほとんどの結晶中の電子ダイナミクスでは電子運動量が急速に散逸されるために、運動量保存則を基礎としたNavier-Stokes方程式のような流体方程式を適用できないという点にある。しかし、ごく近年実現した、極めて移動度の高い超純度金属 (グラフェン、PdCoO₂ など) や様々な半金属物質では、特定の温度領域において運動量散逸的な散乱が強く抑制され、かつ電子-電子散乱を通して局所平衡状態が実現した結果、粘性効果などを伴う流体力学的な電子ダイナミクスが実現していることが明らかになった。このような温度領域は「流体力学領域」と呼ばれており、近年、理論・実験の両面から強く関心を集めている。その中でも特に興味深いのは、結晶格子による対称性の低下に伴い通常の流体では起こりえないような特殊な流体フローや異方的な粘性係数が現れる点である。こういった結晶対称性の効果とそれに伴う量子幾何学的な効果について理解を深めることは、電子系の流体力学を特徴付ける上で極めて重要なプロセスであるといえる。</p> <p>上記の背景の下、本学位論文で兔子尾氏は空間反転対称性が破れた物質中における異常電子流体力学の定式化とその応用に関する研究を行った。重要な成果は (1) 空間反転対称性が破れた系に対して電子流体力学の定式化をしたこと (2) 得られた流体力学方程式を応用して量子幾何学効果がどのように表面プラズモンの性質に与えるかを解明したことである。</p> <p>まず、空間反転対称性が破れた物質における電子流体力学の定式化を行った。その結果として、結晶対称性の低下とそれに伴う幾何学的効果によって、これらの物質群ではクォーク・グルーオンプラズマに類似した新しいクラスの電子流体が実現することを明らかにした。得られた方程式を詳しく解析することによって、非対称ポアズイユ流と異常表面電流という、実験的に検証可能な新しい流体力学現象を理論的に予言した。これらの成果は博士論文の第3章にまとめられている。</p> <p>さらに、得られた流体力学理論を出発点として量子幾何学的な効果と表面プラズモンの協奏による新奇現象について詳しく解析した。具体的には、プラズモン共鳴と光回折ゲートによる近接場の効果によって、量子非線形ホール効果が非常に広い周波数領域に渡って劇的に増強されることを理論的に示した。また、より一般的な状況下においてベリー曲率双極子由来の光電流と光吸収エネルギーとの間にある種の普遍的な関係式を見出した。さらに、振動磁場によって誘起される付加的な駆動力を考慮することによって、新しい光電流の発生メカニズムも提案した。以上の結果は、主として博士論文の第4章にまとめられている。</p> <p>本研究は、近年注目されている層状のWTe₂やひねり二層グラフェンといった、二次元的な量子材料とも密接に関連しており、それらを活用した高感度・広帯域テラヘルツ光検出器に繋がると期待される。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年の実験技術の進展と理論研究の発展に支えられ、電子流体力学の研究が急速に進んでいる。もともと、流体力学は多体系のマクロなダイナミクスを記述する理論手法として広く知られている。最近、この理論が幅広い物理現象に応用されている。中でも、固体電子系に対する応用は著しい進展を見せている。結晶中にある電子系では運動量が散逸されるために、運動量保存則を基礎とした流体方程式とは相性が悪く、そのダイナミクスを流体力学で記述することはあまり行われてこなかった。しかし、グラフェンなどのたいへん移動度の高い超純度金属では、ある温度領域で散逸的な散乱が抑制され、流体力学的な電子ダイナミクスが実現していることが明らかとなり、これに関する研究が近年急速に進展している。その中でも特に興味深いのは、結晶格子に起因する幾何学的効果が物理現象にどのような影響を与えるかという問題である。このような結晶対称性に起因する幾何学的効果について理解を深めることは電子系の流体力学を確立する上でも重要である。

このような背景の下、本学位論文は、空間反転対称性が破れた物質中における異常電子流体力学の定式化とその応用に関する研究成果をまとめたものである。中心的な結果は[1]空間反転対称性が破れた物質における電子流体力学の定式化と[2]流体力学理論を用いた表面プラズモンに対する量子幾何学的効果の解明である。以下、博士論文の流れにそって各項目に分けて結果を説明する。

まず、第1章では電子流体力学の基礎と近年の実験の急速な進展について述べている。特に、いくつかの特徴的なエネルギースケールによる階層構造を整理することで流体力学領域を分かり易く説明している。

第2章では、流体力学領域における外場に対する応答の非局所性と、以下の議論（第4章の成果）で重要となるプラズモニクスに関する説明と最近の研究の進展をまとめている。

第3章では、本論文の第一の中心的な成果をまとめている。まず、空間反転対称性を持たない系を対象として、電子流体力学の基礎方程式を導いている。低い結晶対称性に起因する幾何学的効果により、このような系でクオーク・グルーオンプラズマに類似した新奇な電子流体が実現することを理論的に予言したことは重要な成果である。また、得られた電子流体方程式を応用し、実験的に検証可能な流体力学現象として非対称ポアズイユ流と異常表面電流を提案している。

第4章では、第3章で定式化した流体力学方程式を用いて、表面プラズモンに対する量子幾何学的な効果を詳しく解析している。中でも、プラズモン共鳴と光回折ゲートによる近接場の協奏により、広い周波数領域において量子非線形ホール効果が大きく増強されることを示したことは高く評価される。また、ベリー曲率双極子に起因する光電流と光吸収エネルギーとの間の普遍関係式を明らかにしたこと、さらに振動磁場による駆動力を考慮することで新しい光電流の発生メカニズムを提案したことも、当該分野の理論研究における重要な成果である。

以上の結果は、電子流体力学において非自明な性質に関して新たな知見をもたらすものである。特に、空間反転対称性が破れた物質における電子流体力学の定式化を行ったこと、その結果として幾何学的効果によって新しいクラスの電子流体が実現することを明らかにした点は新しく、凝縮系物理分野において重要な意義を持つ。また、実験的に検証可能な新しい流体力学現象を理論的に予言した点も高く評価される。本研究で明らかにされた現象や概念は、当該分野のさらなる研究を促すものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。