

論文の内容の要旨

本博士学位請求論文（以下、本論文とする）では、定常電流の流れる非平衡定常状態における正負荷電粒子の束縛状態の寿命の電場依存性をゲージ・重力対応の手法を用いて解析している。解析の結果、本論文で扱う系が負性微分電気伝導を示す状態では、電場の印加とともに束縛状態の寿命が長くなることを見出している。また束縛状態が安定となる極限では系の電気伝導度がゼロになるという解析結果から、この系では束縛状態の電離で供給された正負電荷が電流を担っていることも結論している。これらの解析により、本論文で扱う系においては、電場の印加により正負荷電粒子対の電離が抑制されキャリアの生成が減少することで負性微分電気伝導が発現することを論じている。

非平衡状態における巨視的物理量の期待値の計算は現代物理学における挑戦的課題の一つである。本論文が論じる系は、定常電流が流れる非平衡定常状態にあるが、そのパラメータ領域は印加電場と電流密度が線形の関係にはない非線形領域を扱っている。このような系における物理量の計算手法として、本論文ではゲージ・重力対応を用いている。ゲージ・重力対応とは、超弦理論から提案される対応原理であり、ある種の非可換ゲージ理論を高次元の曲がった時空上の古典重力理論に置き換える対応関係である。この置き換えにより、非可換ゲージ理論を曲がった時空上の場の古典論に対応させ、非線形領域における電気伝導度などの物理量を一般相対性理論の手法により計算している。

本論文で扱う非線形電気伝導は負性微分電気伝導である。これは、系に流れる電流が電場の印加とともに減少する現象であり、広い範囲の強相関絶縁体において見られる非線形電気伝導現象である。負性微分電気伝導の発現メカニズムについては多くの研究がなされているが、電極から電極へのバリステックな電気伝導を扱う研究が多く、荷電粒子の多体効果や熱浴を構成する粒子との相互作用を考慮した非バリステックな電気伝導の視点で負性微分電気伝導のメカニズムを明らかにする研究はまだ発展途上である。本論文ではゲージ・重力対応を用いることで、非バリステックな電気伝導を行う系の負性微分電気伝導に関する解析を行っている。一般相対性理論の手法における解析では非線形微分方程式を解く必要があり、数値計算が用いられている。

本論文で報告している主要な成果としては、（１）定常電流の流れる非平衡定常状態における正負荷電粒子の束縛状態の寿命の電場依存性の計算結果、（２）開放系におけるカイラル対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンモードの分散関係の計算結果である。

（１）の解析により、負性微分電気伝導が発現する領域では束縛状態が電場の印加とともに安定化することを見出しており、電場の印加により束縛状態の電離が抑制されてキャリアの供給が減少することが負性微分電気伝導のメカニズムであることを論じている。

論文審査の結果の要旨

【論文の主題と当該分野における位置づけ】

本博士学位請求論文（以下、本論文とする）は熱浴と相互作用する荷電粒子多体系における非線形電気伝導現象をゲージ・重力対応の手法を用いて解析した論文である。具体的には、保存電荷を担う粒子（荷電粒子）と熱浴を非可換ゲージ理論の枠組みで構成し、これをゲージ・重力対応により 10 次元の超重力理論に置き換えて、一般相対性理論による解析を行っている。一般に、線形応答を超えた非線形領域での物理量の解析は挑戦的な課題であるが、ゲージ・重力対応を応用して非線形電気伝導のメカニズムを探る研究は新たな試みであり、当該分野において新たな研究の方向性を開拓する研究であると言える。

【論文の構成】

本論文の構成は以下の通りである。1 章では本論文の概要をまとめている。2 章では本論文で用いるゲージ・重力対応について基礎事項をまとめている。3 章では具体的な解析に用いる D3-D7 モデルについて基礎事項をまとめるとともに、本論文の主眼とする負性微分電気伝導と擬正規モードの複素エネルギー固有値に関してまとめている。本論文における独自の研究結果は 4 章以降に記載されている。4 章では D3-D7 モデルにおいて、荷電粒子の束縛状態に対応する擬正規モードの複素エネルギー固有値を求め、束縛状態の寿命の電場依存性に関する解析結果を詳細に報告している。5 章では擬正規モードの複素エネルギー固有値を求める解析の応用として、開放系における自発的対称性の破れに伴う南部・ゴールドストーンモードの分散関係を求めている。付録 A、付録 B では解析の基本となる D7-ブレーン上のモードに関する運動方程式と、擬正規モードの振る舞いに関して詳細にまとめている。

【論文の独自性や成果】

本論文で報告している主要な結果としては、(1) 定常電流の流れる非平衡定常状態における正負荷電粒子の束縛状態の寿命の電場依存性の計算結果、(2) 開放系におけるカイラル対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンモードの分散関係の計算結果である。本論文の結論としては、(1) の解析結果より負性微分電気伝導の発現する領域では印加電場の増大とともに荷電粒子束縛状態が安定化することを見出している。またこれにより、荷電粒子束縛状態の電離によるキャリアの供給が電場の印加とともに抑制されることが、この系の負性微分電気伝導の発現の原因となっていることを論じている。

【論文の評価・論文の課題】

本論文におけるこれらの成果は博士学位請求論文として十分な内容を有している。計算により得られた束縛状態の寿命と非線形電気伝導の関係は新たな知見である。本論文の今後の課題としては、実際の物質における実験を提案し、実験事実との比較を行っていくことが挙げられる。今後、非線形電気伝導を含め非平衡系の電荷輸送に関する研究を進めるにあたり、本論文は重要な位置づけを占めており、この意味でも本論文は博士学位請求論文として十分な内容を持つものと結論する。