

審査の結果の要旨

氏名 北山 圭亮

近年、量子物質を操作する方法として、レーザー電場を利用した非平衡制御が注目を集めている。これは、最近のコヒーレントなレーザー光源の開発を受けたもので、偏光や波長などを調整することで照射された量子物質のバンド構造や分布などの電子状態を自在に制御することを目標としている。本論文では、時間周期外場中の量子状態を記述するフロケ理論を用いて、特に有機導体に着目し量子物質の光制御の理論について研究を行っている。論文は5章と補遺 A、B からなる。第1章はイントロダクション、第2章は光励起状態の解析的理論、第3章では α -(BEDT-TTF) $2I_3$ の光誘起トポロジカル相転移、第4章では α -(BEDT-TTF) $2I_3$ の非線形光学応答、第5章では本論文のまとめと結論が述べられている。

第1章 イントロダクション では、平衡系および時間周期系における電子状態のトポロジに関する最近の研究を概説している。特に、まず、二次元系では量子ホール伝導度がチャーン数として知られるトポロジカル不変量と関係していることを説明し、時間周期系における量子ホール効果が、非平衡系でありながらもフロケ理論を用いることで平衡系と類似した理論解析を実行できることを説明している。さらに、時間周期系におけるトポロジカル現象、エッジ状態、非線形光学応答、熱化現象、実験研究に焦点を当ててレビューしている。

第2章 光励起状態の解析的理論 では、光駆動系を分析するための2つの方法をレビューしている。最初のアプローチは非線形応答理論である。これは電場についての摂動展開を使い外部光電場の効果を取り入れる理論手法で、後の第4章でシフト電流を研究する時に使用される。二つ目の方法として、時間周期系の波動関数を支配するフロケ理論について説明している。この方法の利点は、摂動理論と比較して、光照射の強度に対して非摂動的な効果について議論できることである。この手法は後の第3章の光誘起トポロジカル相転移、および第4章における直流光電流の非摂動効果を研究する際に適用される。本章では、静的フロケ有効ハミルトニアン of 構築方法をレビューし、その物理的解釈について議論している。また、光駆動タイトバインディングモデルのフロケ有効ハミルトニアンを導出している。

第3章 α -(BEDT-TTF) $2I_3$ の光誘起トポロジカル相転移 では、具体的な物質を対象としそのモデルパラメータを用いることで、現実的なフロケエンジニアリングの研究を実施し

ている。特に有望な物質として本論文では有機塩 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ を取り上げている。この化合物は、バンド構造に傾いたディラックコーンを持っている。第3章では、前章で説明されたフロケ理論を使用して BEDT-TTF 層の伝導電子を記述する光駆動タイトバインディングモデルを分析することにより、3 つのトポロジカル相転移を予言している。具体的には、(1) 円偏光によって誘導されるチャーン絶縁体へのトポロジカル相転移[第 3.2 節]、(2) 線偏光によって誘発されるモノポールの対消滅[第 3.3 節]、および(3) 2 つのディラックコーンの衝突と崩壊を伴う新奇光誘起トポロジカル相転移[第 3.4 節]である。

第4章 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の非線形光学応答 では、レーザー電場が有機塩 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ において誘発する直流光電流を研究している。特にシフト電流[4.2 節]および注入(injection)電流[4.3 節]という二種類の非線形光学応答に焦点をあてている。理論としては 2.1 節で概説された摂動理論を用いて、光駆動された α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における直流光電流を、光の周波数に対する依存性を計算します。さらに、第 2.2 節で詳述されたフロケ理論を用いて、非線形光学応答の非摂動効果の数値計算を実施している。特に電場強度を強くすると光電流が符号を反転させることを予言している。

第5章では本論文の結果の要約と、将来展望が述べられている。

これらの結果により、レーザー電場によりコヒーレントに励起された有機塩 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における非平衡トポロジカル制御と直流光電流の理論を確立することに成功し、さらに、新奇物理現象の予言も与えており、非平衡量子制御の研究に大きな寄与を与えたことは間違いない。よって本論文は、博士論文文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。

なお、本論は望月維人氏、田中 康寛氏、小形正男氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。