

論文審査の結果の要旨

氏名 見上 敬洋

近年、超高速ポンプ・プローブ分光技術の進展により、光照射された電子系の非平衡ダイナミクスが注目を集めている。特に強相関電子系やトポロジカル絶縁体表面への光照射実験では、レーザー光によって誘起される金属-モット絶縁体転移、トポロジカル転移などが理論・実験の両面から活発に研究されている。一方、光誘起相転移現象の微視的理解は未だ十分ではなく、理論の構築が急務となっている。先行研究において、1バンド系の ac 外場下の電子相関効果がフロケ理論に基づいた非平衡動的平均場理論 (Floquet-DMFT) によって議論されたが、現実の物質では多バンド効果が重要となる。本学位請求論文では、Floquet-DMFT 法が多バンド系への拡張が行われ、 $d-p$ 模型およびハニカム格子ハバード模型に適用した結果がまとめられた。

本論文は英語で6章からなる。まず第1章で強相関電子模型および光照射の実験状況が簡単にまとめられたあと、第2章と第3章で Floquet-DMFT 法が多バンド系への拡張が議論された。まず第2章では、Keldysh 非平衡グリーン関数法が導入され、時間依存外場下での多バンド系の動的平均場理論が定式化された。数値ソルバーとしては自己無撞着摂動論が採用され、励起された電子を緩和させるためにフェルミオン熱浴が導入された。第3章では、特に周期外場下での電子状態が議論され、フロケ理論を基にした動的平均場理論および線形応答理論が定式化された。

引き続き第4章と第5章では、具体的な多バンド模型に対して Floquet-DMFT 法による計算が実行され、円偏光の振動外場照射下の電子相関効果が議論された。まず第4章では銅酸化物高温超伝導体の有効模型である $d-p$ 模型が考察された。光子のエネルギーが十分小さい時には、フェルミ面付近にキャリアが励起され、フェルミ分布に類似の非平衡分布が実現することが示された。これは光によって系の有効温度が上昇することを意味する。光子のエネルギーがバンド幅と同程度以上になると、バンド間で選択的な光励起が生じ、非平衡分布関数が高エネルギー側で増大する現象(反転分布)が観測される。それに伴い、対応する振動数でプローブ光に対する光学伝導度が負になり、利得が生じることが示された。また光子のエネルギーが大きくなると、バンド幅が抑制され、Zhang-Rice 一重項バンドなどの $d-p$ 模型特有の構造が消失することが示された。このように本論文では、強い振動外場の影響として、(1)サイト間ホッピングの繰り込みによるバンド幅の変化と(2)非平衡分布関数の変化の二種があること、外場の強度やバンド構造に応じてその変化の度合いが決まること、などが示された。これらの結果は、光照射下の非平衡電子状態を理解するための基礎理論として、価値あるものと判断される。

第5章では、ハニカム格子ハバード模型が考察された。ハニカム格子の強束縛模型は、グラフェンの有効モデルとしてよく知られており、バンド分散には2つのディラック点を有する。クーロン相互作用がないとき、円偏光外場によって2つのディラック点に異なる符号のギャップが開き、トポロジカル相転移が生じることが先行研究で知られている。本研究では、さらにクーロン相互作用によって誘起されるモット絶縁体との関連が議論された。光子のエネルギーが十分大きい時には、バンド幅が有効的に小さくなることにより金属からモット絶縁体への転移が得られた。さらにトポロジカル転移を調べるためにホール伝導度が計算され、モット絶縁体への転移とは別にトポロジカル転移が存在することがわかった。光子のエネルギーがバンド幅と同程度以下になると、光誘起のホール伝導度が複雑な挙動を示すことが示され、これは光子の吸収・放出によって生じるサイドバンド由来の光誘起ベリー曲率と電子の非平衡分布関数の兼ね合いで決まることが議論された。特に最後の結果は、これまでの先行研究では見出されなかった現象であり、興味深い結果である。

最後の第6章では得られた結果と今後の展望がまとめられた。

以上、各章の紹介と共に本論文で得られた知見を解説した。本論文は、外場照射下の非平衡電子相関係、特に多バンド系についての手法開発・応用を含む包括的な理論研究である。銅酸化物高温超伝導体やグラフェンでの実験との比較には、いくつかの課題が残されており、また手法の詳細(特にフェルミ熱浴)についても考察の余地が残されている。しかし、初めて非平衡多バンド相関電子系を取り扱った理論研究として、十分な価値を有すると評価された。特にハニカム格子において、外場誘起のサイドバンド構造と非平衡分布関数の兼ね合いでホール伝導度の符号が決まる現象は新しい知見である。今後の多バンド系での非平衡現象を考える基礎理論として、本論文は価値あるものと判断される。以上の評価により、審査員全員が学位論文として十分なレベルにあり、博士(理学)の学位を授与できると判断した。