

学位申請論文公開講演会

日時：2026 年 1 月 30 日(金) 10:00~

申請者：井上 大輔 (Sc 研)

場所：理学館 506 号室 およびハイブリッド

接続先の問い合わせ先：紺谷浩教授 [kontani.hiroshi.v4 @ f.mail.nagoya-u.ac.jp](mailto:kontani.hiroshi.v4@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

(_@_は@に置き換える)

題目：Theory of transport phenomena in twisted bilayer graphene and superconductivity
in bilayer nickelate

(ねじれ二層グラフェンにおける輸送現象および二層ニッケル酸化物における超伝導の理論)

主論文の要旨

強相関電子系とよばれる物質群では、強い電子間相互作用に由来する高温超伝導や量子相転移をはじめとする多様な物理現象が実現し、その研究は凝縮系物理学における主要な分野を形成している。特に最近、強相関電子系における新規物質開拓が精力的に進められており、研究の最前線が急速に拡大している。

その代表例として、二枚のグラフェンを魔法角（約 1 度）だけ回転させて貼り合わせた、ねじれ二層グラフェンや、二枚の酸化ニッケル層が重なった、二層ニッケル酸化物高温超伝導体（超伝導転移温度 $T_c \sim 80$ K）が挙げられる。これらの電子系は、特徴的な結晶格子の幾何学構造を反映して、電子質量が特定のエネルギーで発散するファン・ホーベ特異点や、多軌道から構成されるフェルミ面などのユニークなバンド構造を有し、多彩な多体電子状態が発現する舞台を提供している。

主論文の前半では、ねじれ二層グラフェンにおける輸送現象を研究した。この系では、通常の金属的な振る舞いから逸脱した、温度に線形な電気抵抗が観測される。ねじれ二層グラフェンの特徴として、伝導電子がスピン自由度に加えて軌道（バレー）自由度を有し、系全体でスピン・軌道の 4 自由度に関する $SU(4)$ の高次対称性を有する。申請者は、スピンと軌道の揺らぎに由来する自己エネルギーを考慮した計算を行った結果、 $SU(4)$ 対称性に強い電子相関とファン・ホーベ特異点の効果が加わることで、軌道とスピンの絡んだ多自由度の量子相関が協力的に増大する機構を見出し、温度に線形な電気抵抗を定量的に再現した。

主論文の後半では、二層ニッケル酸化物高温超伝導体の多体電子状態を研究した。この系の母物質では、電荷とスピンの秩序が共存した秩序相が観測されているが、異なる自由度の秩序が共存する起源は未解明であった。申請者は、従来の平均場的手法では無視されていた高次の多体効果であるバーテックス補正を考慮した計算を行うことで、電荷自由度とスピン自由度の量子交差相関の発達を見出し、観測される電荷・スピン秩序の共存相を再現した。さらに、電荷・スピン自由度の量子揺らぎが協力して強固なクーパー対形成を媒介することを見出し、高温超伝導が実現する微視的起源を提案した。

本研究では、新規強相関電子系であるねじれ二層グラフェン、及び二層ニッケル酸化物高温超伝導体に対して、従来の平均場的手法を超えた高次多体効果に着目して電子状態を解析した。その結果、これらの系で実現する量子臨界現象や電荷・スピン秩序の共存相、高温超伝導などの物理現象に対して、電子の多自由度（電荷・軌道・スピン）に着目した統一的な理解を与えた。