

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	高三 和晃
論文題目	Nonequilibrium phenomena and dynamical controls in strongly correlated quantum systems driven by AC and DC electric fields (交流・直流電場に駆動された強相関電子系における非平衡現象と動的制御)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年の実験技術の向上 (高強度短パルスレーザー・時間分解測定手法など) に伴い、物質中における興味深い非平衡現象が次々と報告されている。レーザー光などの交流電磁場による光誘起超伝導や光誘起トポロジカル相転移の実現に加え、直流電場を加えたモット絶縁体において電流誘起巨大反磁性が発見されるなど枚挙に暇がない。さらに最近では、非平衡状態を作り出すレーザー光や直流電場・電流を、物性物理における新たな制御パラメータと捉え、非平衡状態を積極的に利用して物性をコントロールする「動的物性制御」と呼べる方向性を目指した研究も精力的に行われている。このような方向性の理論研究は多くの場合、半導体やグラフェンなどの、弱相関係としてよく記述される系を対象に行われてきた。一方で、高温超伝導相や磁気秩序相などに代表される、相互作用に起因する多彩な量子相を発現する強相関係が、物性物理学において特に重要な研究対象となっている。</p> <p>このような背景の下、本学位論文で高三氏は、近年急速に発展している非平衡量子系に関する理論手法 (フロッケ理論など) を活用し、交流・直流電場によって駆動された強相関電子系における非平衡量子現象の理解、及びそれを利用した物性制御の提案に関する研究結果について報告している。本論文は主に、[1] d波超伝導体におけるレーザー誘起トポロジカル超伝導の実現提案 (第2章)、[2] レーザー照射下の重い電子系における近藤効果と量子相転移 (磁気相転移・トポロジカル相転移) の制御 (第3章)、[3] 直流電場・低周波交流電場 (例えばテラヘルツ波) による磁性絶縁体の制御 (第4章)、という3つの部分から構成される。以下、各項目に分けて要約する。</p> <p>[1] トポロジカル超伝導は、量子計算への応用を期待される「マヨラナ粒子」が発現する等の理由から注目を集めているが、その実現例は限られている。本研究では、強相関電子系で実現されるd波超伝導体の薄膜に円偏光レーザーを照射することでトポロジカル超伝導が実現することを明らかにした。薄膜における空間反転対称性の破れと、レーザー駆動の効果を組み入れた有効モデルを導出し、それに基づきレーザー照射下では超伝導ギャップのノード点にギャップが開き、トポロジカルに非自明な超伝導が実現されることを明らかにした。</p> <p>[2] 磁気秩序相やフェルミ液体相といった重い電子系の示す多彩な量子相が、レーザー照射下の非平衡状態でどのように変化するか、その相転移をレーザーで制御することは出来るかを明らかにすべく研究を行なった。レーザー照射下の非平衡定常状態を記述する有効モデルに基づく議論から、c-f混成の空間構造が局所的な場合には、近藤結合は増幅、非局所的な場合には抑制されることが分かり、これを利用して光で磁気相転移を制御することができることを示した。またレーザーの効果によって、くりこまれたバンド構造が変化して、トポロジカル絶縁体相やワイル半金属相が出現することも明らかにした。</p> <p>[3] 磁性絶縁体に直流電場や低周波交流電場を加えた場合、絶縁破壊が起こるまでの領域では局在スピン系としての記述が有効であると考えられる。このような場合、どのように磁性が変化するかを調べた。ハバードモデルに基づく摂動計算から、電場方向の交換相互作用 (反強磁性結合) が増強されることを見出し、これを利用して相互作用の空間異方性を制御できることを明らかにした。この有用性を示すため、フラストレート磁性体と擬次元磁性体を詳しく調べ、電場によって量子スピン液体やハルデイン・ギャップ相 (トポロジカル相) が実現・スイッチングできることを実験的なパラメータや物質も含めて明らかにした。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年の実験技術の進展と理論手法の深化に支えられ、非平衡量子現象は物性物理学における重要なテーマの一つとなっている。平衡統計力学などの確立した理論的枠組みを適用できない非平衡量子現象は、その理論的取扱いが難しく、特に相互作用が重要な役割を果たす強相関係の理解には未だ不十分な点が多い。しかしその一方で強相関物質は、多様な量子相が創発する物性物理学の重要な舞台であり、強相関の理解を深めることは理論的に重要な課題である。このような背景の下、高三氏は以下の3つの側面から強相関係の非平衡現象を調べた [1] 強相関d波超伝導体における光誘起トポロジカル超伝導、[2] レーザーに駆動された重い電子系における近藤効果と量子相転移、[3] 直流電場に駆動された磁性絶縁体における磁気秩序・トポロジカル秩序。以下、各項目に分けて記述する。

[1]では、フロッケ理論に基づいて導出された有効モデルにより、レーザー照射下のd波超伝導体では有効的な磁場が誘起され、超伝導ギャップのノード点に有限のギャップが開くことでトポロジカル超伝導が実現されることを明らかにした。通常の磁場に比べて、レーザー誘起の有効磁場は、ゼーマン分裂を与えるだけでボルテックス(渦)を誘起しないため、超伝導を壊しにくく、有用な手法であると考えられる。d波超伝導は強相関超伝導体で幅広く実現しているため、本提案はトポロジカル超伝導を実現する新たなプラットフォームを切り拓くものとして意義のあるものと言える。

[2]では、周期アンダーソンモデルにフロッケ理論を適用し、光照射下の重い電子系にレーザーが与える効果を系統的に明らかにした。その結果、基本的な電子相関効果である近藤効果へのレーザーの影響を明らかにし、それを利用して強相関特有の相転移(近藤結合の変化による磁気相転移・トポロジカル相転移)が起きることを示した。特に、レーザーで近藤結合を抑制することでRKKY相互作用と近藤効果のバランスを崩して磁気秩序を誘起するという提案は、レーザーが創る非平衡状態であるにも関わらず低温秩序相が誘起されるという点で示唆深い結果であると言える。

[3]では、ハバードモデルの摂動展開にもとづき、直流・低周波交流電場が磁性絶縁体の磁気秩序・トポロジカル秩序に与える影響を明らかにした。シンプルなモデルに基づく解析をベースにしているため幅広いクラスの磁性絶縁体に適用できる点で、電場によって磁性を制御する有用な方法であると考えられる。また、電場誘起スピン液体や電場誘起ハルデイン相などの新しい現象を、候補物質や電場強度も含めて提案しており、実験を行う上での指針を与えるという意義もある。

強相関超伝導体・重い電子系・量子スピン液体などの、電子相関によって多様な物質相が実現するような物質群に対して、フロッケ理論等を利用して非平衡現象や動的物性制御の可能性を示した点は新しく、物性物理における非平衡量子現象の研究において重要な意義を持つ。また本論文には、光誘起トポロジカル超伝導などのこれまで実験的に実現が困難であった物質相に関する現実的な提案も含まれており、実験を遂行する上で必要な指針を与えるという意味も持っている。さらに、近年精力的に研究されてきた交流電場(レーザー光)に関する物性制御の研究に対して、直流電場を利用した研究 [3]は当該分野の新たな方向性を提案するものである。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、平成31年1月18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。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降