

光照射された強相関電子系の説明

辻 直人(物理学専攻、博士課程)、岡 隆史(物理学専攻、助教)、
青木秀夫(物理学専攻、教授)

「強相関電子系」と呼ばれる一連の物質群は、物質中の電子が非常に強くクーロン斥力相互作用をする「電子相関」の効果により、予想もしないような性質が発現する。その代表例が銅酸化物高温超伝導体である。そこでは、結晶中で原子一つあたりに電子が一つ占める状態では、電子同士が斥力により互いに避けあおうとするため、電子は動けなくなり電気の流れない絶縁体(モット絶縁体)となる(図1左)。そこに別種の元素を混ぜる(化学ドーピングと呼ばれる)方法により電子の数を増やしてやると電子は動けるようになり(図1右上)、低温では電気抵抗なしの超伝導状態に転移する。別の例では、マンガン酸化物において、やはり電子の数を制御することで、動けるようになった電子の磁気的な相関により絶縁体から強磁性状態にすることができる。このような性質をもつ物質が遷移金属酸化物の中から次々に見つかっており、20 年以上にわたって物性物理学の主要なテーマとしてそのメカニズムが解明されてきた。

ところが近年になり、「光」(レーザー)を当てることによって強相関電子系の物性を制御しようという全く新しい試みがなされるようになった。絶縁状態に光を当てると、電子と正孔(電子が空席になっている所)のペアが生成され、電子が動けるようになる(図1右下)。動けるようになった電子を介して強相関物質の性質を変えられないかというのが「光誘起相転移」のアイデアである。実際、実験では、励起するための光(ポンプ光)を当てた後に別の光(プローブ光)を当てて電子系の性質を観測するポンプ・プローブ分光という手法により観測されている。この分光法の時間分解能が向上したことで相まって様々な強相関物質で実験され、光誘起相転移が実現できることが示されてきた。この光誘起相転移は超高速光スイッチングなどの応用も視野に、将来が非常に期待されている。

そこで、どのような光をどのような物質に当てたらどんな性質が発現するかを知ることが重要になる。光を当てると電子はエネルギーを吸収し励起され、光を当てていないときの落ち着いた状態(平衡状態)からはずれた「非平衡状態」に行く。平衡状態では電子がエネルギーの低い準位から順番に詰まって分布する(図2左)が、非平衡状態では多数の電子がどのように分布するかを決める一般的な物理法則が知られていないために、強相関電子系の光励起状態、特に非平衡分布は未解明であった。辻(博士課程)、岡助教、青木教授の理論グループは、この困難な問題に対して理論的に計算することに世界に先駆けて成功し、強相関電子系の典型的なモデルに適用して解析した。図2中央に示したものが、計算により得られた非平衡分布の様子である。平衡分布とは異なり、単調ではなく波打った特徴的な構造が現れている。波打ちの間隔は光の周波数を反映している。また、ポンプ・プローブ分光により観測される光学伝導度スペクトルを計算し、光を当てると絶縁状態が金属に変わる現象(光学伝導度において、プローブ光周波数のゼロ近傍に正のピークが発達することから分かる)や、「負の光学伝導度」(図2右、反転分布とよばれる、非平衡に特有な状態に

対応)といった非平衡現象が、ポンプ光の周波数に応じて現れることがわかった。この結果は、物質の性質を光の周波数を変えることによって制御できる可能性を示している。

青木教授のグループでは、電子相関現象のメカニズム解明の逆問題として、望みの性質をもった物質を理論的に設計する「電子相関物質設計」を提唱してきた。今回の研究成果により、「光を用いた物性設計」という考え方に道筋をつけたことになる。つまり、これまで設計材料として考えられてきた結晶構造や結晶を構成する原子の種類だけでなく、光照射という外部刺激を物質に与えることで望みの性質を生み出そうということである。結晶構造や原子の種類を変えるには化学的・物理的に物質を作り変えねばならないが、光は周波数・強度を外部から変化させることができる制御性をもつという利点がある。この光を用いた物性設計という指針が、物性物理学の新たな地平を切り開くことを期待したい。

本研究は、*Physical Review Letters* **103**, 047403 (2009)に掲載された。

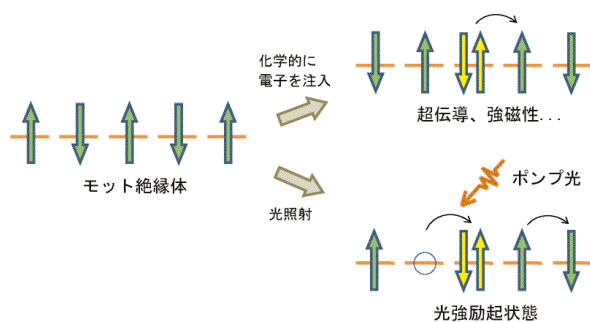


図1. 強相関電子系の相転移の概念図。

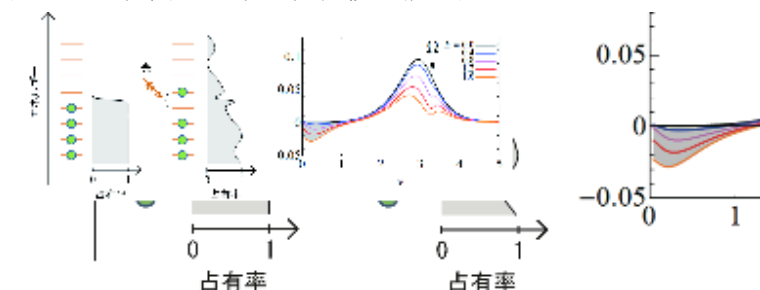


図2. 物質中の電子の平衡分布 (左) と非平衡分布 (中央). (右): 計算により得られた光学伝導度スペクトルの例. プローブ光周波数 ν のゼロ近傍に負のピークが現れることがわかる.