

鉄系超伝導で超伝導状態を「光で作る」ことに成功

附属極限コヒーレント光科学センター 鈴木 剛、岡崎 浩三、辛 埴

1. はじめに

FeSe 結晶は、鉄系超伝導体の中でも最も単純な結晶構造を持ち、さらに、常圧下では超伝導転移温度(T_c)は高々 10 K であるものの[1]、様々な極限条件下で T_c が上昇することから、これまでに多くの研究が実施されてきた。具体的な実現条件として、圧力[2]、単層化[3]、インターカレーション[4]などが用いられてきており、このような外場下における電子・格子状態を詳細に調べることで、「超伝導に対する好条件」が直接得られることが期待されている。そこで、近年の大強度超短パルスレーザー技術の発達に伴い、光電場が新たな外場として注目されている。この方法により、フェムト秒の時間スケールで光励起に伴う試料変化を誘起することが可能であり、さらに測定対象に対して余計な電極接触や形状加工が必要ないなど、従来の方法に比べて試料特性をより検出しやすい重要な特色を備えている。

光励起後の測定方法に注目すると、時間分解光電子分光法は、光励起後の過渡的な電子状態をバンド構造として直接観測できる点で非常に強力な手法であるといえる。さらに、高次高調波技術の発展に伴い、図 1a に示すように、軟 X 線領域に迫る光エネルギーのパルス光を発生させ、プローブ光として用いることができるようになってきた。これにより、Brillouin zone 全域に及ぶ広い運動量空間で測定が行うことが可能になり、特に鉄系超伝導の場合、Brillouin zone の中心(Γ 点、図 1b,e)にある正孔バンドだけでなく、Brillouin zone の端(M 点、図 1b,d)にある電子バンドの情報も得ることができる。

2. 実験結果と議論

このような背景の中、我々は、FeSe 結晶における光励起後の応答を、正孔及び電子バンド構造を直接観測することにより調べるために、高次高調波レーザーを用いて時間分解光電子分光測定を行った[5]。なお、本研究では全て、測定温度は T_c 以上の 15 K で行った。図 2a,b に、 Γ 点と M 点それぞれにおける、光電子スペクトルの時間変化を示している。縦軸のエネルギーは、フェルミエネルギー(E_F)を基準にした値で示している。光励起直後(遅延時間 = 0 ps)に、電子が高いエネルギーまで励起される様子がまず見て取れる。その後、元の状態に緩和していくとともに、よく見ると、光電子強度が時間に対して振動している様子が見て取れる。これをより詳しく見るために、図 2a,b で緑実線で囲った $E-E_F = [0, 1.0]$ eV を積分した時間変化の中で、振動成分のみを抽出したものを図 2c, d に示す。その結果、黒実線で示したように \cos 関数でよくフィットされた。また図 2e, f に、振動成分に対する高速フーリエ変換(Fast Fourier Transformation, FFT)の解析結果を示すが、周波数は 5.3 THz であり、さらに、振幅は励起強度に対して線形に増大することが分かった。これらの観測結果から、本研究で観測された振動は、図 2g に示した A_{1g} コヒーレントフォノンに相当し、さらに、変位励起型であることが分かった。興味深いことに、高圧下における FeSe 結晶では、 T_c が著しく上昇することが報告され

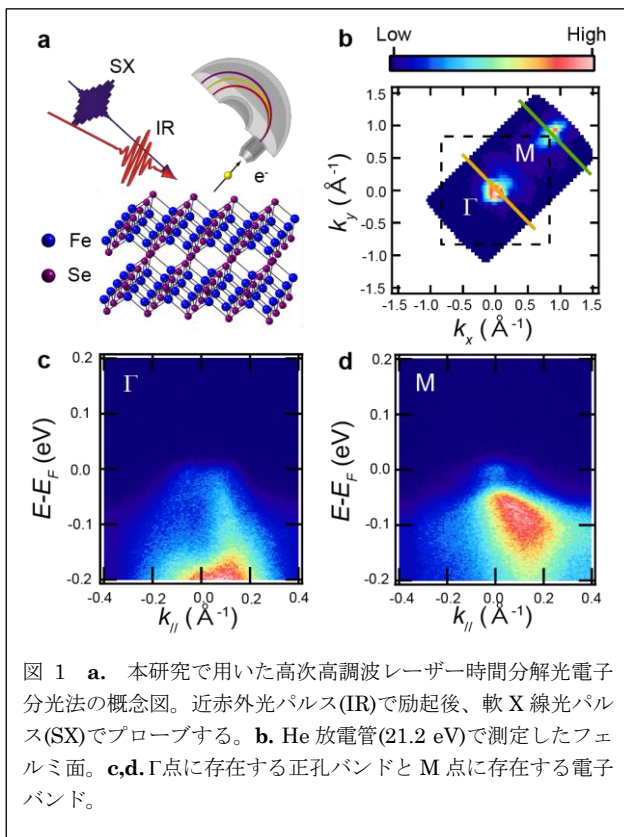


図 1 a. 本研究で用いた高次高調波レーザー時間分解光電子分光法概念図。近赤外光パルス(IR)で励起後、軟 X 線光パルス(SX)でプローブする。b. He 放電管(21.2 eV)で測定したフェルミ面。c,d. Γ 点に存在する正孔バンドと M 点に存在する電子バンド。

誘起に伴う超伝導ギャップが観測され、励起強度の増加と共に増強してくような振る舞いが観測された。今後、他の鉄系超伝導物質を対象にして研究を行っていき、また、他の測定手法による観測を行っていくことで、本研究で見出された光誘起超伝導の兆候が検証されていくことが期待される。

謝辞

本研究は、東京大学物性研究所(鈴木剛、染谷隆史、橋本嵩広、道前翔矢、渡邊真莉、藤澤正美、金井輝人、石井順久、板谷治郎、岡崎浩三、辛埴 各氏)、東京大学新領域(芝内孝禎氏)、及び京都大学(笠原成、松田裕司各氏)の共同研究により行われました。また、文部科学省科学研究費補助金 新学術領域(研究領域提案型)「量子液晶の物性科学」(JP19H05824, JP19H05826)、JSPS 科研費(JP18K13498, JP19H00659, JP19H01818, JP19H00651)、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」(JPMXS0118068681)の助成のもとに行われました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Kasahara, *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **111**, 16309 (2014).
- [2] K. Matsuura, *et al.*, Nat. Commun. **8**, 1038 (2017).
- [3] S. He, *et al.*, Nat. Mater. **12**, 605 (2013).
- [4] M. Burrard-Lucas, *et al.*, Nat. Mater. **12**, 15 (2013).
- [5] T. Suzuki, *et al.*, Communications Physics **2**, 115 (2019).
- [6] S. Kaiser, *et al.*, Phys. Scr. **92**, 103001 (2017).

