

鉄系超伝導で超伝導状態を「光で作る」ことに成功

1. 発表者：

鈴木 剛（東京大学物性研究所 特任研究員）

岡崎 浩三（東京大学物性研究所 准教授）

辛 埴（研究当時：東京大学物性研究所 教授、現在：東京大学特別教授）

2. 発表のポイント：

- ◆鉄系超伝導体 FeSe に光を照射することで、転移温度以上で常伝導状態から超伝導状態（光誘起超伝導）にすることに成功しました。
- ◆東京大学物性研究所で開発された、高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光装置を用いることによって、詳細な電子状態を解明しました。
- ◆光で超伝導状態を作れることを実証したことにより、今後、デバイス開発への応用を通して、エネルギー問題解決への糸口に繋がることを提示しました。

3. 発表概要：

東京大学物性研究所の鈴木剛特任研究員、岡崎浩三准教授、辛埴教授（研究当時）らの研究グループは、東京大学大学院新領域創成科学研究科の芝内孝禎教授、京都大学大学院理学研究科の松田祐司教授らとの共同研究で、鉄系超伝導体（注1）FeSeについて、高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光装置（注2）を用いて非平衡状態（注3）における電子構造を直接観測しました。その結果、超短パルスレーザー（注4）を照射することで超伝導状態（光誘起超伝導）が生じることを発見しました。

本研究成果は、東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センターに建設された高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光装置が、光誘起超伝導の研究のために極めて有用な装置であることを示すと共に、光誘起超伝導の研究に鉄系超伝導という新しい舞台を提示しました。今後は、光誘起超伝導を利用したデバイス開発が精力的に行われ、エネルギー問題などの様々な技術課題解決への一翼を担うことが期待されます。

4. 発表内容：

① 研究の背景

2018年にノーベル物理学賞が与えられたチャープパルス増幅に代表されるように、近年、超短パルスレーザー技術が目覚ましく進歩してきたことにより、光で物質の性質（物性）を制御する試みがなされるようになってきています。光照射によって電気を通さない絶縁体を電気を通す金属にする、もしくは有限の電気抵抗を持つ金属を電気抵抗ゼロの超伝導体にするなど、性質を自在に制御出来るようになれば、非常に高速に動作するスイッチの実現など、様々な応用の可能性が考えられます。このような中、ごく最近、銅酸化物高温超伝導体（注5）において、転移温度よりも高い温度で、光照射によって超伝導状態が実現することが報告されており、世界中から広く注目を集めています。しかし、光照射により作り出される超伝導（光誘起超伝導）の報告例はほとんど銅酸化物に限られており、さらに電子構造の直接観察のような直接証拠と呼べるものはありませんでした。

② 研究内容

東京大学物性研究所の鈴木剛特任研究員、岡崎浩三准教授らの研究グループは、圧力や元素置換により転移温度が顕著に変わる鉄系超伝導 FeSe を測定試料として選び、本研究グループによって開発された高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光装置を用いて、光照射後の非平衡状態における電子構造の直接観測を行いました。図 1 左に測定概念図を示します。本研究では、ポンプ光により非平衡状態にした後、プローブ光によりそれを観測するという手法を用いています。

絶縁体、金属、超伝導などの物質の性質は原子の並び方で決まり、原子間の距離が少し変わるだけで性質が大きく変わることがあります。本研究グループは、FeSe に光を照射することでわずかに Fe と Se の間の距離を変えることに成功し（図 1 右）、これによって金属状態から超伝導状態へと変えることに成功しました。通常、本物質は転移温度 10 K (0 K = -273°C) で超伝導状態となることが知られていますが、本研究では転移温度以上の 15 K で超伝導状態を確認しました。

さらに、この超伝導状態の継続時間を調べるため、電子の性質を決めるバンド構造を調べました。FeSe は、電子と正孔の 2 種類のバンドから成り、光を照射することでそれぞれのシフトしていることが分かり（図 2 左）、超伝導状態が 800 ピコ秒間（1 ピコ秒 = 1 兆分の 1 秒）実現していることが分かります。これは、銅酸化物よりも 10 倍以上長いという、超伝導において大変好ましい特徴を持つことも分かりました。また、このバンド構造の直接観測から超伝導の特徴である超伝導ギャップ（注 6）を発見しました（図 2 右）。

③ 社会的意義・今後の予定

本研究で報告した鉄系超伝導における光誘起超伝導は、光による物性制御の観点からは非常に魅力的であることから、今後、光誘起超伝導を用いたデバイスなどが加速的に開発されることが期待されます。例えば、図 3 に示したように光によって超伝導状態が実現できることから、コンピュータの集積回路素子に用いることで発熱が抑えられ、より大規模な演算が行えるようになります。または、太陽電池に組み込むことで、太陽光で照射された半導体から得られる電気を、同様に太陽光が照射されて超伝導となった送電線で運ぶことで、電力コストを大幅に下げることが可能となります。このように、本研究成果である「光」による「超伝導」の実現は、加速する情報化社会やエネルギー問題など、将来の技術課題解決への重要な糸口になることが期待されます。

本研究は、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。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*Communications Physics*

論文タイトル：Photoinduced possible superconducting state with long-lived disproportionate band filling in FeSe

著者：Takeshi Suzuki*, Takeshi Someya, Takahiro Hashimoto, Shoya Michimae, Mari Watanabe, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Nobuhisa Ishii, Jiro Itatani, Shigeru Kasahara, Yuji Matsuda, Takasada Shibauchi, Kozo Okazaki*, and Shik Shin*

DOI 番号 : 10.1038/s42005-019-0219-4

6. 問い合わせ先 :

【研究内容に関すること】

東京大学物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター
特任研究員 鈴木 剛 (すずき たけし)

TEL : 04-7136-3367 FAX: 04-7136-3383

E-mail : takeshi.suzuki@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター
准教授 岡崎 浩三 (おかざき こうぞう)

TEL : 04-7136-3355 FAX: 04-7136-3383

E-mail : okazaki@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学特別教授

辛 埴 (しん しぎ)

TEL : 04-7136-3380 FAX: 04-7136-3383

E-mail : shin@issp.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL : 04-7136-3207

E-mail : press@issp.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説 :

(注1) 鉄系超伝導体

2008年に東京工業大学の細野秀雄教授らにより発見された超伝導を示す Fe 化合物の総称。超伝導転移温度が銅酸化物高温超伝導体に次いで高く、そのメカニズムの解明がさらなる高温での超伝導の実現につながると期待され、盛んに研究されている。

(注2) 高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光装置

超短パルスレーザーをアルゴンなどの希ガスに集光すると、集光したレーザーの奇数倍の振動数 (∞ エネルギー) を持つ光が発生する。これを高次高調波という。超短パルスレーザーを用いることで、まずポンプ光と呼ばれる光で物質を非平衡状態にし、その緩和過程においてプローブ光と呼ばれる光で物質の電子状態などを観測する実験手法をポンプ-プローブ法と呼ぶが、この手法を物質中の電子のバンド構造を直接観測できる角度分解光電子分光という測定手法に応用したものを時間・角度分解光電子分光と呼ぶ。本研究グループは、東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センターに、プローブ光として高次高調波レーザーを用いることが出来る高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光装置を建設した。(図1左)

(注3) 熱平衡状態と非平衡状態

物質中の電子などが取り得る状態の中でエネルギーが最低のものを基底状態、それよりもエネルギーが高い状態を励起状態と呼ぶが、外部から物質に熱やエネルギーを与えると励起状態を占める割合が高くなる。逆に、多数の電子が励起状態を占めている場合、光や熱を放出する

ことによって、物質中の電子は外部にエネルギーを放出してよりエネルギーの低い状態を占めるようになる。外部から物質に与えるエネルギーと物質から外部に放出されるエネルギーが等しく釣り合っている状態を熱平衡状態という。この時、励起状態を占める割合は一定となり、その割合から温度は定義される。超短パルスレーザーによって瞬間的に物質にエネルギーを与えると、その釣り合いは保たれなくなり、物質からエネルギーが放出されるようになる。このような状態を非平衡状態と呼ぶ。

(注4) 超短パルスレーザー

パルス幅が 100 fs (10 兆分の 1 秒) 程度のパルスレーザー。高次高調波を発生できる超短パルスレーザーは、2018 年のノーベル物理学賞受賞の対象となったチャープパルス増幅という技術によって実現された。この技術により、電子が光のエネルギーを吸収することによって実現される非平衡状態である、光励起状態からの緩和過程を観測することができるようになった。

(注5) 銅酸化物高温超伝導体

1986 年にベドノルツとミュラーによって発見された銅と酸素を含む超伝導体の総称。この発見により 2 人は 1987 年のノーベル物理学賞を受賞した。この発見により超伝導の転移温度の記録が短期間のうちに著しく上昇し液体窒素の沸点 (-195.8 °C、77 K) も超えるきっかけとなった。

(注6) 超伝導ギャップ

通常、物質の運動はある時刻における「位置」と「速さ」で記述される。しかしながら、量子力学の世界においては、電子の運動における「位置」と「速さ」を同時に決定することができず、電子の状態は「速さ」に対応する「運動量」と電子の自転の方向に対応する「スピン」で決まる。低温で「運動量」と「スピン」が反対向きの 2 つの電子がペアとなることで、電気抵抗がゼロになる超伝導状態となる。この電子のペアを作るには「のり」が必要だが、この「のり」の強さが「超伝導ギャップ」である。

8. 添付資料：

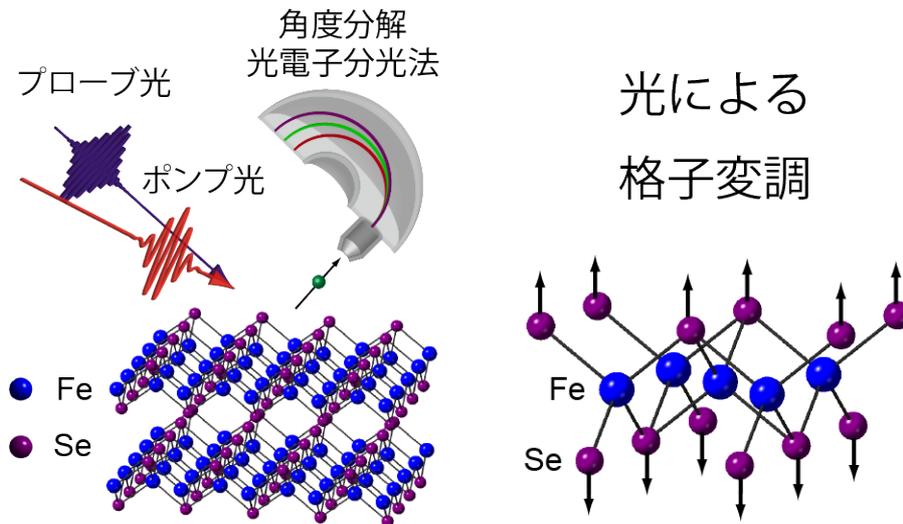


図1 高次高調波レーザー時間・角度分解光電子分光法の概念図（左）と光による格子変調（右）。光照射によって、Se原子が上下方向に移動しFeとの間隔が広がる。この格子変調が超伝導状態を誘起している。

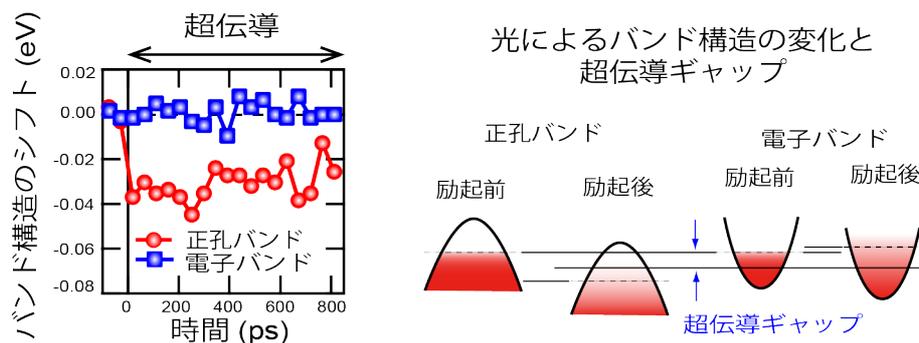


図2 バンド構造変化（左）と超伝導ギャップの模式図（右）
 左）ポンプ光を照射した瞬間を時刻0とした時の経時変化。正孔バンドは光照射直後に0.04eV低くなる一方で、電子バンドはほぼ変わらないことから、超伝導状態の特徴である超伝導ギャップが存在していることが分かり、その状態が800ピコ秒（ps）間継続していることが分かる。

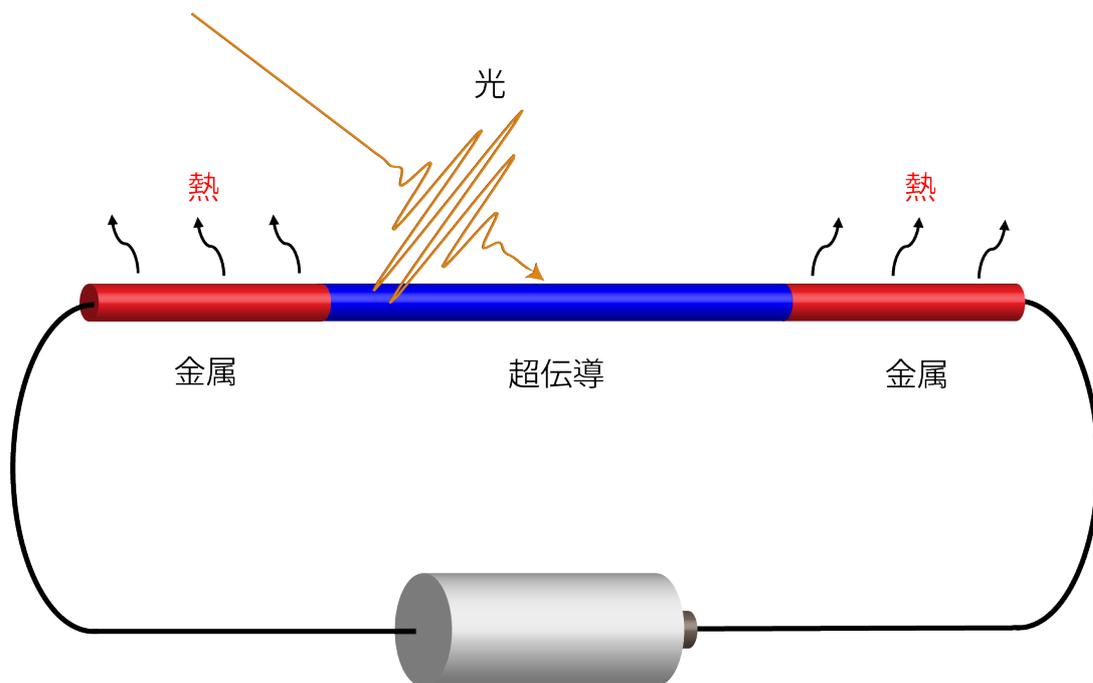


図3 光誘起超伝導のイメージ図。光誘起超伝導を利用したデバイス化により発熱が抑えられる。