

鉄系超伝導体における新しい電子構造の発見

— 超伝導と共存する未知の秩序相 —

1. 発表者

下志万貴博（研究当時：東京大学大学院工学系研究科 助教）

石坂 香子（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

辛 埴（東京大学物性研究所 教授）

2. 発表のポイント

- ◆高いエネルギー分解能を有するレーザー光電子分光法を用いて、超伝導状態と共存する新奇な電子秩序の観測に成功
- ◆超伝導相を覆う広い温度及び組成領域において秩序相を発見
- ◆超伝導機構の理解へとつながり、さらに高い超伝導転移温度を示す物質の探索に結び付く成果

3. 発表概要

東京大学大学院工学系研究科の下志万貴博助教、石坂香子准教授と東京大学物性研究所の辛埴教授らは、鉄系超伝導体において、超伝導が発現する温度の近傍で出現する新しい電子秩序相を発見しました。また本秩序相は超伝導を阻害しない共存関係にあることも分かりました。

超伝導は物質を超伝導転移温度 (T_c) 以下に冷却すると電気抵抗が消失する現象です。ゼロ抵抗（電気抵抗が消失する現象）という性質を活かした強力な電磁石は磁気浮上式リニアモーターカーや核磁気共鳴画像法として既に応用されています。もし室温程度で超伝導が実現すれば、エネルギー損失のない送電線などの利用が期待されており、 T_c を高めるための研究が行われています。2008 年に発見された鉄系超伝導体は、銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い T_c を示す物質群として基礎科学そして応用面からも注目されてきました。室温に迫る高い T_c を実現するためには、超伝導を担う電子の構造を詳細に調べる必要があります。

本研究では、エネルギー分解能に優れたレーザー光電子分光法（注1）を用いて鉄系超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ における電子のバンド構造（注2）を観測し、超伝導と共存する新奇な電子秩序相の存在を明らかにしました。今後、本研究成果を基に、鉄系超伝導体の複雑な超伝導機構の理解、さらにはより高い超伝導転移温度を示す物質の探索に結び付くことが期待されます。

本研究成果は2017年8月25日(米国東部時間)に米国科学誌「Science Advances」で公

開されました。

本研究は、科学研究費基盤研究（S）（No. 25220707）、科学研究費基盤研究（B）（15H03687）および文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」、「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」の助成を受けました。

4. 発表内容

<研究の背景と経緯>

超伝導材料を用いた送電線やリニアモーターカーなどの技術開発が進む一方、より高い温度で超伝導を示す物質の開発を目指した基礎研究も盛んに行われています。2008年に発見された鉄系超伝導体は、銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度を示すことから室温超伝導体の候補として注目を集めています。更に高い超伝導転移温度を実現するためには、超伝導機構を解明することが必須です。超伝導発現のメカニズムは超伝導が発現する温度近傍で起こる電子秩序と密接な関りがあります。これまでの研究で電子の持つスピン（注3）が秩序化を引き起こすことが知られていました。この秩序状態は温度の上昇によって消失してしまいますが、秩序が消失するよりも更に高い温度領域においても電子が不安定な振る舞いを示すことが報告されており、広い温度範囲にわたるバンド構造の精査が求められていました。

<研究の内容>

バンド構造の周期性は電子の秩序化を反映します。しかし鉄系超伝導体は複数の電子軌道（注4）をもつため、これまでバンド構造の理解が困難でした。本研究では、世界最高のエネルギー分解能を有するレーザー光電子分光装置を用い、鉄系超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ のバンド構造を各軌道に分離して観測しました（図1）。その結果、最も高い T_c を示す K 濃度の超伝導状態において結晶格子の2倍周期を持つ未知の電子構造を見出しました。更に高温および K の高濃度領域においても同様の周期性を観測し、超伝導相を覆う新奇な電子秩序相の存在を明らかにしました（図2）。これまで K の低濃度領域におけるスピン秩序は超伝導と競合することが知られていましたが、今回明らかになった秩序状態は超伝導と共存関係にある点が大きく異なります。これは、秩序形成の起源の一つとして、軌道整列の寄与が考えられます。

<今後の展開>

本研究により、相図上に広く分布する新奇な秩序相の存在が示されました。今後、秩序形成の起源を特定し、超伝導への寄与を調べることが重要になります。本研究成果を基に、鉄系超伝導体の複雑な超伝導機構の理解、さらにはより高い超伝導転移温度を示す物質の探索に結び付くことが期待されます。

5. 発表雑誌

雑誌名：Science Advances

論文タイトル：Antiferroic electronic structure in the nonmagnetic superconducting state of the iron-based superconductors

著者 : T. Shimojima, W. Malaeb, A. Nakamura, T. Kondo, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Ishida, M. Nakajima, S. Uchida, K. Ohgushi, K. Ishizaka, S. Shin
DOI : 10.1126/sciadv.1700466

6. 問い合わせ先

<研究に関すること>

理化学研究所 創発物性研究センター

下志万 貴博 (しもじま たかひろ)

TEL: 048-462-1111 (Ext:6376), FAX: 048-462-4703,

E-mail: takahiro.shimojima@riken.jp

東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター

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) レーザー光電子分光法

光電子分光法とは光を物質に照射し、真空中に飛び出す電子のエネルギーと角度を測定する手法である。物質固有のバンド構造や超伝導ギャップの大きさを観測することができる。特に光源として真空紫外レーザーを用いる場合をレーザー光電子分光法と呼ぶ。単色性に優れたレーザー光源を用いる本手法は高いエネルギー分解能が得られるために超伝導ギャップのような小さなエネルギースケールを対象とした観測に適している。さらに直線偏光レーザーを用いることでそれぞれの電子軌道を選択的に観測することができるという利点がある。

(注2) バンド構造

固体中の電子は原子核による周期的な電場を感じ、取り得るエネルギーが帯状(バンド)の領域に限られている。エネルギーバンドへの電子の入り方により、物質固有の電気伝導性や光学特性が決定される。

(注3) 電子スピン

スピンは電子の自転のような運動から生ずる磁性の源である。スピンには上向きと下向きの2つの状態がある。

(注4) 電子軌道

電子軌道は量子力学において波動関数で記述され、原子核の周りに電子がどの位置にどれだけの確率で存在するかを表す。方位量子数に依存した特徴を示し、 s, p, d 軌道などと分類される。銅酸化物超伝導体では銅の $3d$ 軌道のうち x^2-y^2 軌道のみが、鉄系超伝導体では鉄の $3d$ 軌道のうち全ての軌道成分 ($z_x, y_z, x_y, x^2-y^2, 3z^2-r^2$) が伝導に寄与している。

8. 添付資料

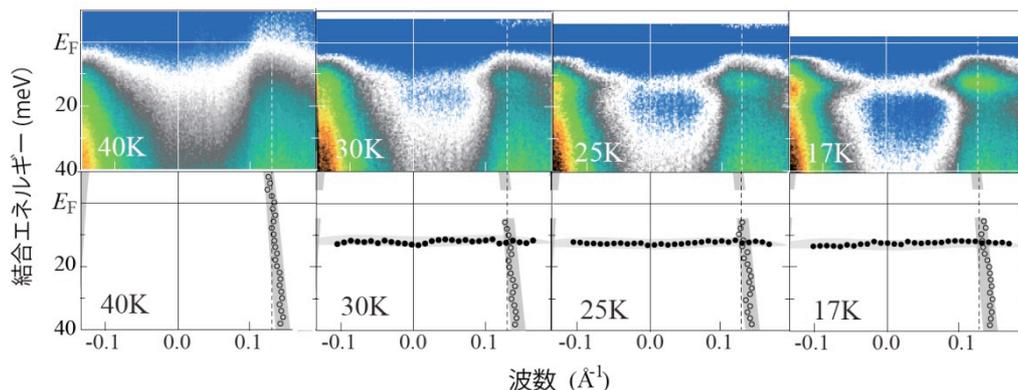


図 1 :

レーザー光電子分光により観測した $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($x = 0.41$) のバンド構造の温度依存性 (上段) とその模式図 (下段)。降温に伴い成長する平坦な強度が、バンド構造の周期性の変化を示している。

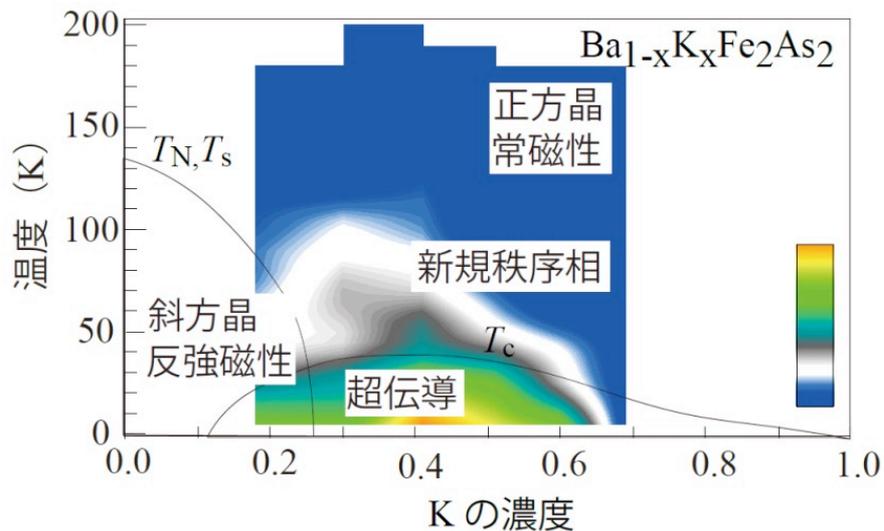


図 2 :

図 1 のバンド構造における平坦強度の分布を示した相図。カラースケールにより電子秩序形成を定量的に示している。