



東北大学



平成26年12月4日

報道機関各位

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)  
東北大学 大学院理学研究科

## 高温超伝導を担う電子の、異常な秩序状態を観測 -超伝導機構の解明に手掛かり-

### <概要>

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) の高橋隆教授、谷垣勝己教授、および同大学院理学研究科の中山耕輔助教らの研究グループは、新型鉄系高温超伝導体のモデル物質である鉄セレンにおいて、超伝導を担う電子が、異常な秩序状態を形成することを初めて明らかにしました。この発見は、鉄系高温超伝導体の超伝導機構を解明する鍵になると期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌 Physical Review Letters に、平成26年12月5日 (米国東部時間) 付けでオンライン掲載されます。

### <背景>

2008年に、東京工業大学の細野教授のグループによって、鉄を含む化合物で高温超伝導が発見されたのを契機に、類似の物質が次々と発見され、2008年の末には超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が 56 K<sup>注1)</sup> まで上昇しました。その後も世界的規模で研究が進められてきましたが、しばらく  $T_c$  の最高値は更新されない状況が続いていました。しかし最近になって、単体では  $T_c$  が 8 K の鉄系超伝導体の一種である鉄セレンという物質が大きな注目を集めています。それは、ある酸化物上で鉄セレンを極限 (原子3個分の厚さ) まで薄くすることで、これまでの鉄系超伝導体における  $T_c$  の最高値だけでなく、産業応用に向けた重要な目安となる液体窒素温度 (77 K) をも越える高温超伝導の可能性が報告されたためです。この高温超伝導の母体となる鉄セレンは、鉄系超伝導体の中で最も単純な結晶構造 (図1) を持つことから、超伝導機構の解明に向けた基礎科学的な面でも、モデル物質として期待を集めています。高温超伝導が起こる起源を解明するためには、超伝導を担う電子の状態を調べるのが重要ですが、高品質の鉄セレン結晶を作成することが極めて困難であったため、この物質の電子状態はこれまで明らかになっていませんでした。

## <研究の内容>

本研究グループは、鉄セレンの高品質単結晶の育成に成功し、外部光電効果<sup>注2)</sup>を利用した角度分解光電子分光<sup>注3)</sup> (図2)という実験手法を用いて、鉄セレンから電子を直接抜き出して、そのエネルギー状態を高精度で調べました。その結果、超伝導が発現するよりも高い温度(110K)で電子のエネルギー状態に大きな変化が起こり(図3)、伝導面(図1右図)を縦方向に動く電子と横方向に動く電子で、動きやすさに違いが生じることを明らかにしました。さらに、このような異常な状態が、鉄セレンの結晶構造の変化が起こる温度(約90K)よりも高い温度(110K)で起こっていることも明らかにしました。これは、電子軌道の変化が、結晶構造の変化という外的要因によらず、自発的に引き起こされている可能性が高いことを示しています。鉄セレンでは、高温超伝導をはじめとする興味深い超伝導特性が報告されていますが、今回の研究によって、その背後に異常な秩序状態が存在することが明らかになりました。

## <今後の展開>

今回の研究によって、鉄系超伝導体のモデル物質である鉄セレンでは、比較的高い温度で、電子の動きやすさに縦方向と横方向で違いが生じることが分かりました。超伝導発現の基盤となる電子状態が確立したことで、超伝導機構の解明に向けた研究が進むと考えられます。また、異常な秩序状態と高温超伝導との関係を明らかにすることで、更に高い $T_c$ を持つ物質設計の指針が得られると期待されます。我々は現在、原子レベルで厚さや構成元素の種類を制御した超伝導体薄膜の開発を進めており、電子状態の研究を通して得られた設計指針に基づき、原子レベルで制御した薄膜を作成することで、更に高い $T_c$ を持つ物質の発見が期待できます。

---

本成果は、JSPS 科研費の基盤研究(S)「超高分解能スピン分解光電子分光による新機能物質の基盤電子状態解析」(研究代表:高橋 隆)や若手研究(B)「角度分解光電子分光による鉄系超伝導体の超伝導ギャップ対称性と擬ギャップ相図の解明」(研究代表:中山耕輔)などの助成を受けたものです。

## <用語解説>

注1) K (ケルビン)

温度を表す単位です。通常使われる単位である $^{\circ}\text{C}$ (摂氏)とは、次の式で関係付けられます。

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$$

これまでの鉄系超伝導体の最高 $T_c$ である56 Kは $-217^{\circ}\text{C}$ 、液体窒素温度の77 Kは $-196^{\circ}\text{C}$ にあたります。

### 注2) 外部光電効果

物質に紫外線やX線を入射すると電子が物質の表面から放出される現象です。物質外に放出された電子は光電子とも呼ばれます。この現象は、1905年に、アインシュタインの光量子仮説によって理論的に説明されました。アインシュタインは、この業績でノーベル賞を受賞しています。

### 注3) 角度分解光電子分光

結晶の表面に高輝度紫外線を照射して、外部光電効果により結晶外に放出される電子のエネルギーと運動量を同時に測定することで、物質中での電子の状態を観測する実験手法です。最近その分解能が急速に向上し、超伝導になっている電子も観測できるようになりました。

### <参考図>

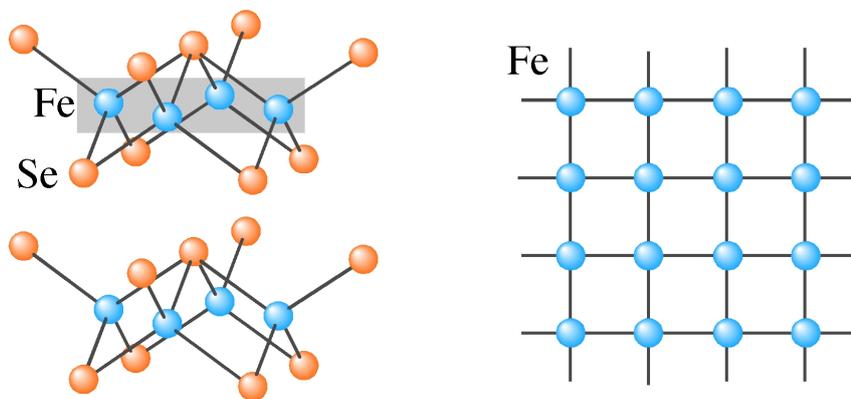


図1 鉄セレンの結晶構造

左図が三次元的な構造。右は鉄原子からなる二次元伝導面を上から見た図。

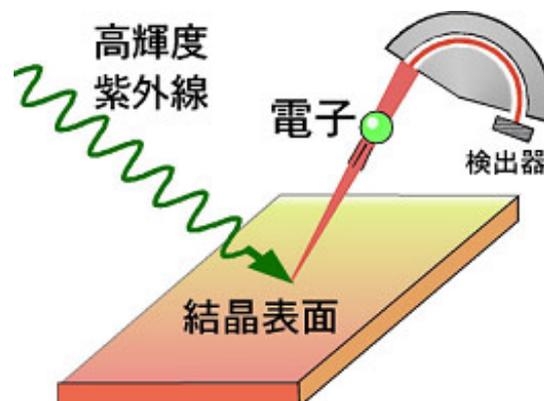


図2 光電子分光の概念図

物質に高輝度紫外線を照射して出てきた光電子のエネルギー状態を精密に測定する。

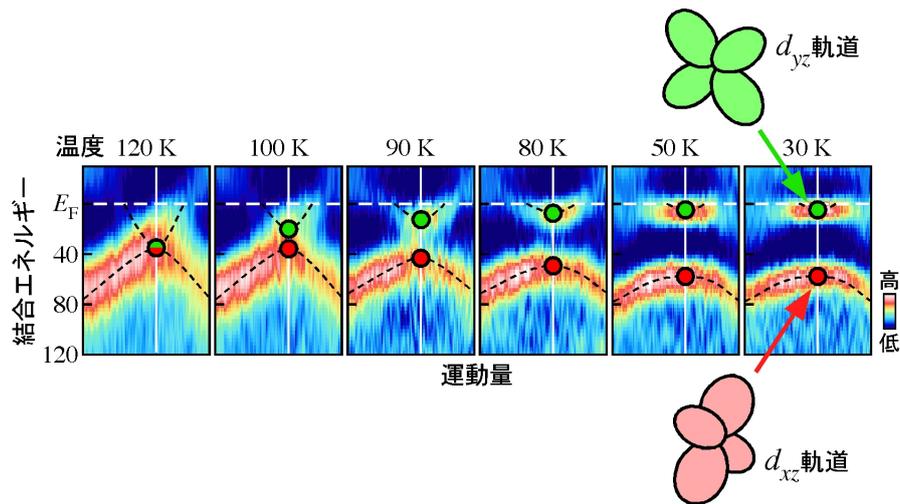


図3 角度分解光電子で決定した鉄電子のエネルギー状態の温度変化

$d_{yz}$  軌道にいる鉄電子と  $d_{xz}$  軌道にいる鉄電子のエネルギー（それぞれ図中の緑と赤の丸印）が、高温（120 K 以上）では通常予想される通り等しくなっているものの、温度が下がるにつれて差が生じる。結果として、低温では  $d_{xz}$  軌道がエネルギー的に安定となる。このようなエネルギー変化が鉄原子中の電子の運動に変化をもたらす起源となる。

#### <論文情報>

“Reconstruction of Band Structure Induced by Electronic Nematicity in an FeSe Superconductor”

K. Nakayama, Y. Miyata, G. N. Phan, T. Sato, Y. Tanabe, T. Urata, K. Tanigaki, and T. Takahashi

Physical Review Letters, in press.

#### <お問い合わせ先>

##### <研究に関すること>

高橋 隆

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 教授

Tel : 022-795-6417

E-mail : t.takahashi@arpes.phys.tohoku.ac.jp

中山 耕輔

東北大学 大学院理学研究科 助教

Tel : 022-795-6477

E-mail : k.nakayama@arpes.phys.tohoku.ac.jp

##### <報道担当>

中道 康文

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 広報・アウトリーチオフィス

Tel : 022-217-6146

E-mail : outreach@wpi-aimr.tohoku.ac.jp