

鉄系高温超伝導体に姿を現した新しい超伝導機構

2008年に東京工業大学の細野秀雄氏らによって発見された鉄系超伝導体は、その超伝導転移温度 T_c が銅酸化物以外で初めて 50K を超え、さらなる High- T_c 物質の探索と超伝導メカニズムの解明を目指して活発に研究が進められている。鉄系超伝導体の母物質は、tetragonal から orthorhombic への構造転移とストライプ型反強磁性転移を示すが、電子やホールがドーピングされると両者はともに抑制・消失し、超伝導が出現する。超伝導メカニズムとして、この磁性揺らぎを起源とする s_{\pm} 波超伝導（電子のフェルミ面とホールのフェルミ面の間で超伝導ギャップ関数が符号反転する超伝導状態）が多くの研究者により提案されてきた。 s_{\pm} 波超伝導はフルギャップである点は実験と対応するものの、鉄原子を多量の不純物で置換しても超伝導が維持される T_c の不純物効果の実験は説明がつかない。さらに最近の超音波実験で、構造転移温度 T_S および超伝導転移温度 T_c まで続く弾性定数 C_{66} モードの巨大なソフト化が観測され、磁性揺らぎとは異なる新しい超伝導メカニズムの可能性が高まっていた。

最近、新潟大学の柳有起・山川洋一・安立奈緒子・大野義章氏らの研究グループは、 C_{66} モードに対応する格子と電子軌道との結合効果を取り入れたモデルを提案し、この格子-軌道結合によって軌道が一方向に揃う強軌道秩序が tetra-ortho 構造転移を伴って実現すること、また、ドーピングによって軌道秩序（構造転移）が抑制・消失すると、軌道揺らぎを起源とする符号反転を伴わない s_{++} 波超伝導が実現することを明らかにした（図 1）。 s_{++} 波超伝導は、 T_c の不純物効果も含めて実験とコンシステントである。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2010 年 12 月号に掲載された。

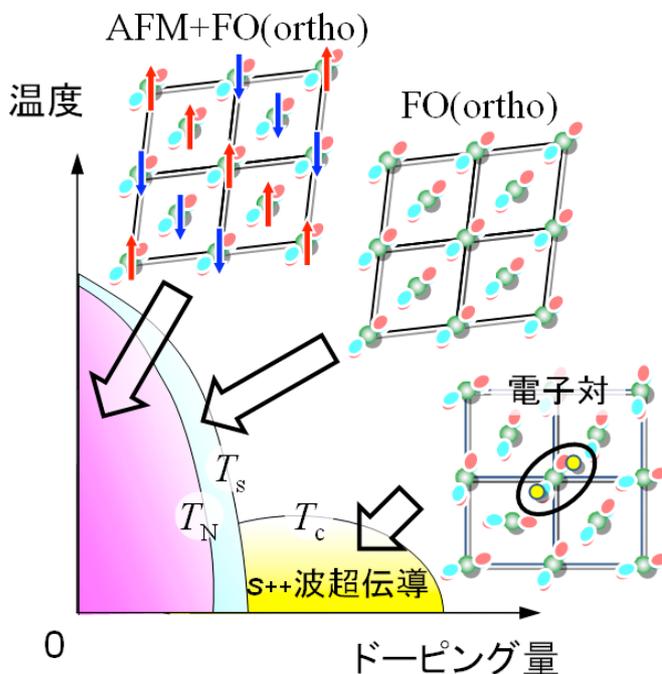


図 1. 鉄系超伝導体の相図（概念図）。AFM はストライプ型反強磁性、FO(ortho)は orthorhombic 歪みを伴った強軌道秩序を表す。

鉄系超伝導体は、伝導を担う Fe-Pnictogen 面が 2 次元正方格子を形成する点では銅酸化物超伝導体の CuO₂ 面と類似しているが、Cu の 1 つの *d* 軌道が O の *p* 軌道と混成して 1 つのフェルミ面を形成する銅酸化物とは異なり、Fe の多数の *d* 軌道が Pnictogen の *p* 軌道と混成して多数の電子フェルミ面とホールフェルミ面を形成し、多軌道・多バンドの特徴を持つ。これまでの新潟大学グループの研究で、第一原理計算の複雑なバンド構造を良く再現する 2 次元 16 バンド *d-p* 模型に基づき *d* 電子間のクーロン相互作用の効果を RPA (乱雑位相近似) により考慮した結果、クーロン相互作用の増大とともにストライプ型反強磁性と強軌道秩序に対する揺らぎが共に増大し、反強磁性相近傍で実現する *s*_± 波超伝導に加えて、強軌道秩序相の近傍で *s*₊₊ 波超伝導が実現することが示されていた。本研究ではさらに、orthorhombic 歪みと軌道揺らぎの間の電子格子相互作用を考慮することにより、強軌道秩序が tetra-ortho 構造転移を伴って実現し、その転移温度 *T*_S が反強磁性転移温度 *T*_N より高くなることが示された (図 1)。これにより、鉄系超伝導体の実験の相図 (ドーピングされたときは常に *T*_S > *T*_N) と弾性定数 C₆₆ モードのソフト化を再現するとともに、このとき実現する超伝導は軌道揺らぎを媒介とする *s*₊₊ 波超伝導であることが結論された。

磁性を起源とする超伝導 (銅酸化物など) は、磁性のエネルギーがフォノン (通常の BCS 型超伝導の起源) のエネルギーに比べて大きく High-*T*_c が実現する可能性がある一方、ギャップ関数が符号変化するために、符号変化のない BCS 型 *s* 波超伝導とは対照的に不純物によって容易に壊される。実際、銅酸化物超伝導体は、*T*_c が高いにもかかわらず僅か数%の不純物によって超伝導が消失する。本研究で示された軌道起源型の超伝導は、そのエネルギーが磁性と同様に大きく High-*T*_c が実現可能であると同時に、ギャップ関数が符号変化しないため不純物に対する強靱性をも示す。まさに、BCS 型と磁性起源型の良いとこ取りの超伝導といえる。さらに、軌道起源型の超伝導は、BCS 型を導く電子格子相互作用と磁性起源型を導くクーロン相互作用の両者が協力しあって発現するため、より高い *T*_c が実現する可能性がある。本研究で構築された手法を物質設計へと応用することにより、今後の High-*T*_c 物質探索の指針となることが期待される。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) No.12, p. 123707

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/79/123707> (12 月 10 日公開済)

<情報提供：大野義章 (新潟大学自然科学系)、柳有起 (新潟大学自然科学系)、

山川洋一 (新潟大学自然科学系)、安立奈緒子 (新潟大学大学院自然科学系) >