

NMR から見た鉄系超伝導体における超伝導対称性

— Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ のフルギャップ超伝導 —

2008年2月、東工大細野グループによって鉄ヒ素化合物 LaFeAs(O_{1-x}F_x)系 (La1111) で新高温超伝導現象 (超伝導転移温度: 26 K) が発見されて以来、鉄系高温超伝導現象のメカニズムの解明に向けて数々の実験および理論研究が世界中を巻き込んで進行している。これまでに多くの関連物質が合成され、最高転移温度 56 K が報告されており、銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い転移温度が実現している。発見以来 20 数年を経た銅酸化物高温超伝導体の超伝導転移温度は伸び悩んでいるため、室温超伝導の実現に向けて新型鉄系超伝導体の将来性・発展性に大きな期待がかけられている。また、鉄は身近でありふれた材料のため低コスト・大量生産に向いており、鉄系室温超伝導が実現できれば電気抵抗ゼロの性質を利用した、地球環境にやさしい省エネシステムの構築が容易になると期待される。

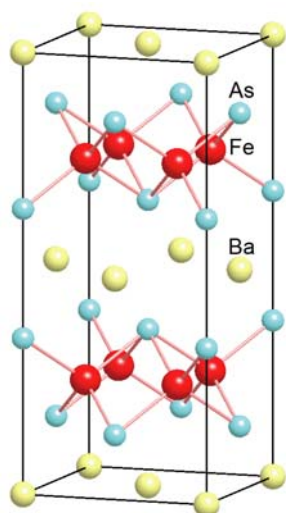


図1 : BaFe₂As₂ の結晶構造 (Ba122 型)

超伝導を担う FeAs 層と Ba 層が交互に積層している。K 置換 (ホールドープに相当) は Ba サイトで行われる。母物質 BaFe₂As₂ は反強磁性体 (ネール点: 約 140K) だが、K を 40% 置換することで超伝導が発現する。最大転移温度 38K。

鉄系超伝導発現機構の解明には、超伝導ギャップの対称性を知ることが極めて重要である。超伝導状態下で、超伝導ギャップはフェルミ面上に形成される。従来型の BCS 超伝導体 (単体の金属など) ではフェルミ面上全体にギャップが開く s 波対称 (フルギャップ) を持っており、銅酸化物高温超伝導体では超伝導ギャップ構造に節 (ラインノード) が存在する d 波対称 (ラインノードギャップ) が実現している。鉄系超伝導体 La1111 型では、核磁気共鳴法 (NMR) の核スピン格子緩和率 ($1/T_1$) の測定から、超伝導転移温度以下で $1/T_1$ がコヒーレンスピーク (s 波の重要な特徴) を示さず、 T^3 に近い温度依存性を示すことが報告された。この結果は、通常、ラインノードギャップの存在を示している。それに反して、Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ (結晶構造は図1参照) における角度分解光電子分光法 (ARPES) やミュオンスピン共鳴法 (μ SR) からはフルギャップが観測された。以上のように、超伝導対称性やエネルギーギャップ構造について実験的な問題点が存在していた。

最近、大阪大学と産業技術総合研究所の研究者からなるグループは、これらの問題点を解明するために、Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ の Fe-NMR 測定を行い、超伝導状態における $1/T_1$ の測定から $1/T_1 \propto T^5$ の振る舞いを初めて観測した (図2参照)。これは、Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ においてラインノードギャップの存在を否定し、フルギャップの可能性を示唆する重要な結果である。この結果は、日本物理学会が発行する英文誌「Journal of the Physical Society of Japan」の 2009 年 10 月号に掲載される。

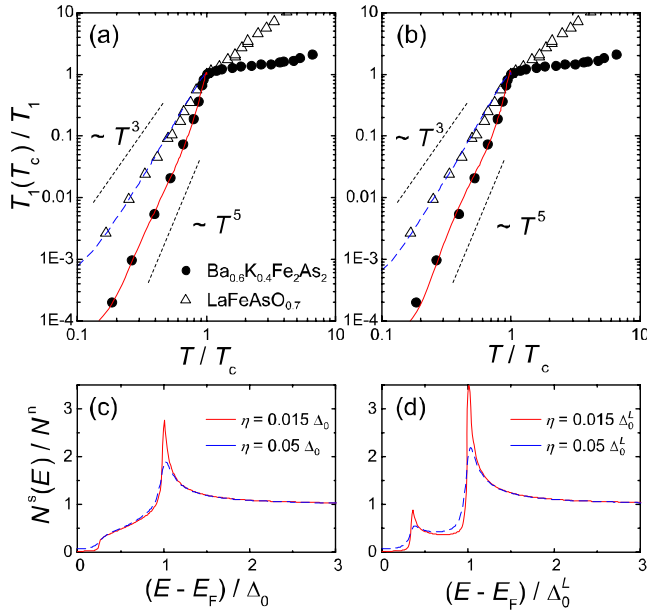


図 2 : (上図) Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ と LaFeAsO_{0.7} における核スピン格子緩和率の温度依存性。実線、破線はフィッティング曲線。それぞれのフィッティング結果は、下図の状態密度に基づいて計算された。(下図) マルチギャップを考慮した s 波超伝導ギャップの状態密度図。

鉄系超伝導体の超伝導対称性については、マルチギャップ s±波対称性（2つのバンドが大きさの異なる節のないフルギャップをもち、それらの秩序変数が+、-の逆符号をもつ）が理論的に提唱されている。この理論モデルは鉄系超伝導現象を説明する有力な候補の1つと考えられ、実際、理論曲線（実線）と実験データ（黒丸）が図2に比較されているように、両者はよく一致している。図2(c)と(d)の状態密度にはARPESで確認されたマルチギャップの特性が考慮されている。この理論モデルによる計算結果と実験結果は、 $1/T_1 \propto T^3$ の振る舞いを示すLa1111系についても、エネルギーギャップの大きさと不純物散乱効果を変えることで、理論曲線（点線）と実験（白三角）は互いによく一致している。このことは、鉄系超伝導体では共通の超伝導対称性をもつことを示唆している。さらにBa_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂は、強結合超伝導体であることも明らかになり、比較的高い超伝導転移温度 ($T_c = 38$ K) を持っていることと密接に関係していると考えられる。

本研究の系統的なFe-NMR測定から、鉄系超伝導体ではフルギャップの超伝導対称性をもつことを示す結果が得られた。これは、鉄系超伝導発現機構の解明に向けて重要な手がかりになるものとして、多くの研究者の注目を集めている。今後、関連物質において系統的な測定を行うことで、鉄系超伝導体の普遍的なメカニズムが明らかになっていくものと期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 10, p. 103702

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/103702/> (9月25日公開済)

<情報提供: 八島光晴、椋田秀和、北岡良雄 (大阪大学大学院基礎工学研究科)>

なお、Fe系超伝導体に関する石田憲二氏らによる解説“To What Extent Iron-Pnictide New Superconductors Have Been Clarified: A Progress Report”がJPSJのInvited Review Papers欄に掲載されており、これまでのNMR研究について詳細に記述されている。どなたでもアクセスできるので、ご参照いただきたい。