

BiS₂系超伝導体における超伝導対称性の解明

近年、首都大の水口らにより二次元 BiS₂層を有する新規超伝導体が発見された。この BiS₂系超伝導体の中には超伝導転移温度が 10 K を超える物質もあり、そして結晶構造と電子構造の鉄系超伝導体との類似性から、その超伝導発現機構に興味を持たれている。今回、我々は BiS₂系超伝導体 NdO_{0.71}F_{0.29}BiS₂の超伝導ギャップ構造を決定するため、低エネルギーの準粒子励起に敏感な測定手法である熱伝導率測定を 100 mK の極低温まで行った。測定の結果、ゼロ磁場での残留熱伝導率と磁場依存性が、超伝導ギャップ構造にノードを持つ超伝導体から期待される値よりも圧倒的に小さいことから、ノードを持たないフルギャップ超伝導であることを明らかにした。さらにこの系は残留電気抵抗率が大きく、不純物による対破壊効果が弱いという事実を加味することにより、通常の *s* 波超伝導であると結論付けた。この結果は、BiS₂系超伝導体の超伝導発現機構を決定する上で非常に重要な結果であると考えられる。

近年、首都大の水口らのグループにより、二次元 BiS₂層を有する新規超伝導体 Bi₄O₄S₃ と LnO_{1-x}F_xBiS₂ (*Ln* はランタノイド) が発見された。この系の結晶構造は、超伝導を担う BiS₂層と絶縁ブロック層である LnO 層が交互に積層した層状構造をとる (図 1(a))。BiS₂系超伝導体は母物質が半導体であり、絶縁ブロック層の酸素を一部フッ素に置換することにより超伝導が発現し、これまで報告されている最高の超伝導転移温度は LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ の 10.6 K である。また、この系の電子状態として、二次元の円筒状フェルミ面を持つことがバンド計算により示されており、(π, π)方向の良いネステイングが存在すると考えられている。特に $x < 0.5$ の低ドーピング領域では、フェルミ面は小さな電子面のみで構成されることが知られている(図 1(b))。このように、BiS₂系超伝導体は結晶構造や電子構造における、鉄系高温超伝導体との類似性から、その超伝導電子対形成が磁気揺らぎ等の非従来型の機構によって起こるかどうかに興味を持たれている。ここで、超伝導ギャップ構造は対形成機構に密接に関係しているため、ギャップ構造の決定は超伝導発現機構を決定する上で非常に重要である。

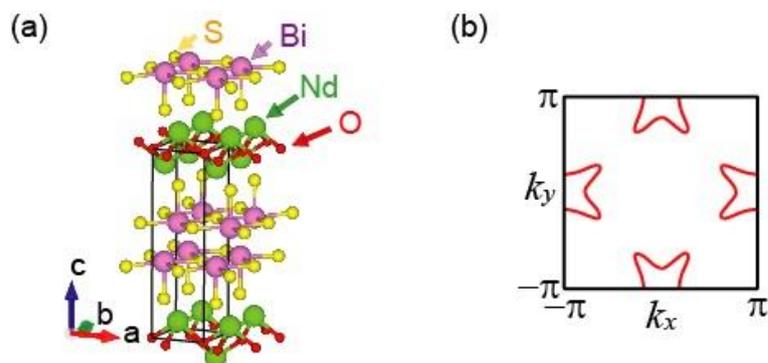


図 1. (a)NdOFBiS₂ の結晶構造. (b) $x < 0.5$ におけるフェルミ面.

実際、BiS₂系超伝導体においては、これまで *s* 波、*s*_±波、*p* 波、*d* 波などの様々な超伝導対称性が理論的に提案されている。実験的には磁場侵入長の測定が、Bi₄O₄S₃ と LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ に対しては μ SR により、NdO_{1-x}F_xBiS₂ に対してはトンネルダイオード発振器により行われている。しかしながら、前者では多結晶試料を用いていること、後者では極低温における Nd³⁺の局在磁気モーメントによる寄与が大きいことから、超伝導電子密度の正確な温度変化の見積もりは出来ていない。このように、BiS₂系超伝導体の超伝導ギャップ構造の決定的な実験研究は、未だ行われていないと考えられる。

最近、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻と山梨大学クリスタル科学研究センターのメンバーを中心とする研究グループは、BiS₂系超伝導体 NdO_{0.71}F_{0.29}BiS₂ の超伝導ギャップ構造を決定するため、単結晶試料の熱伝導率測定を 100 mK の極低温まで行った。その結果、超伝導ギャップ構造にノードを持たない通常の *s* 波超伝導であることを明らかにした。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 2016 年 7 月号に掲載された。

熱伝導率測定は低エネルギーの準粒子励起に非常に敏感なプローブであり、また、常磁性状態の局在磁気モーメントの影響を受けないことから、超伝導ギャップ構造を決定する上で非常に強力な実験手法である。一般にラインノードを持つ超伝導体の場合、不純物周りにおけるアンドレーエフ束縛状態の形成により、ゼロ磁場においても絶対零度でフェルミエネルギー上に有限の残留状態密度が存在し、有限の残留熱伝導率 $\kappa_0/T(T \rightarrow 0)$ が現れる。また、ノードを持つ超伝導体に磁場 *H* をかけると渦糸が侵入し、渦糸周りの超伝導電流により準粒子のエネルギースペクトルはドップラーシフトを受け、その結果準粒子状態密度はラインノードの場合 $H^{1/2}$ に、ポイントノードの場合 $H \log H$ に比例して増大するため、熱伝導率は低磁場で急激に増大する。これに対し、等方的なギャップを持つ超伝導体の場合は、低磁場で準粒子は渦糸の内部に局在し熱を運ばないため、熱伝導率は磁場依存性を示さない。したがって、極低温熱伝導率の測定により、ノードの有無を知ることが出来る。

本研究における熱伝導率測定の結果、ゼロ磁場で残留熱伝導率は極めて小さく、さらに、低磁場において残留熱伝導率も殆ど磁場に依存せず、ノードから期待される磁場依存性とは大きく異なる振る舞いを見せた(図 2)。これらの結果は、NdO_{0.71}F_{0.29}BiS₂ は、超伝導ギャップ構造にラインノードもポイントノードも持たないフルギャップ超伝導体であることを示している。最後に、この系における超伝導対称性について議論する。フルギャップかつ図 1(b)のフェルミ面の構造を考慮すると、超伝導対称性の候補としては従来型の *s* 波と、フェルミ面間でギャップが符号反転する非従来型の $d_{x^2-y^2}$ 波対称性の可能性が残る。ここで、この系の残留電気抵抗率は 500 - 800 $\mu\Omega\text{cm}$ と大きく、ここから見積もられる平均自由行程はコヒーレンス長とほぼ同程度となることがわかった。一般に、フェルミ面間でギャップが符号反転する超伝導体の場合においては、このような状況では超伝導は消失すると考えられるが、NdO_{0.71}F_{0.29}BiS₂ は 5 K という高い超伝導転移温度を持つ。以上より、NdO_{0.71}F_{0.29}BiS₂ は超伝導波動関数に符号の反転をとらなない通常の *s* 波超伝導であると結論することが出来る。

本研究の結果は、BiS₂系超伝導体の超伝導発現機構を決定する上で非常に重要な結果であると考えられる。

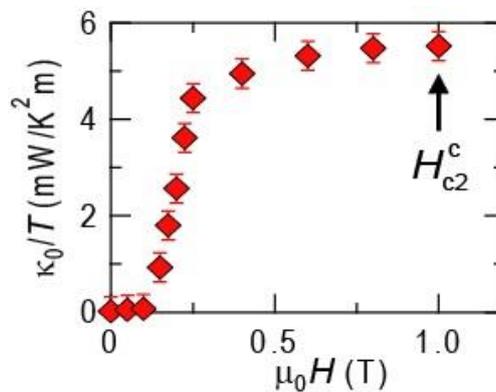


図 2. 残留熱伝導率の磁場依存性.

原論文

[Conventional *s*-Wave Superconductivity in BiS₂-Based NdO_{0.71}F_{0.29}BiS₂ Revealed by Thermal Transport Measurements](#)

[Takuya Yamashita, Yoshifumi Tokiwa, Daiki Terazawa, Masanori Nagao, Satoshi Watauchi, Isao Tanaka, Takahito Terashima, Yuji Matsuda: J. Phys. Soc. Jpn. **85** \(2016\) 073707.](#)

問合せ先：山下 卓也（京都大学大学院理学研究科）

松田 祐司（京都大学大学院理学研究科）