

## 「隠れた秩序」内で発現するカイラル $d$ 波超伝導

ウラン化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  は 17.5 K で「隠れた秩序」と呼ばれる正体不明の 2 次相転移を起こし、そのメカニズムは四半世紀に渡って世界中で研究されている。本研究ではその秩序相内で起きるエキゾチック超伝導 ( $T_c = 1.4$  K) に焦点を当て、極低温比熱の温度・磁場・磁場方位依存性から超伝導ギャップが水平ラインノードを有するユニークな構造をしていることを明らかにした。この結果により、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  がカイラル  $d$  波型というこれまでに例のないタイプの超伝導体であることが決定的となった。

ウラン化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  は 17.5 K で磁気や構造の明確な変化を伴わない正体不明の 2 次相転移を示す。この相転移は「隠れた秩序」と呼ばれ、そのメカニズムは固体物理学における難解な問題の一つとなっている。興味深いことに、「隠れた秩序」という特殊な環境下にもかかわらず低温 1.4 K で超伝導が発現する。この超伝導は従来型とは異なることが明らかになっており、エキゾチックな対形成メカニズムが期待されている。そのメカニズムを解明する上で、電子間の引力相互作用と密接に関連する超伝導ギャップ対称性の特定は欠かせない。 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  のギャップ対称性に関して、低温で上部臨界磁場が強く制限されること、超伝導状態で時間反転対称性の破れが示唆されること、比熱や熱伝導率などの熱力学量が低温で温度の冪乗に比例することなどを基に大変珍しい  $k_x(k_x + ik_y)$  型のスピン重項カイラル  $d$  波超伝導の可能性が提案されている。一方で、このカイラル  $d$  波超伝導は水平ラインノードとポイントノードを有するユニークなギャップ構造 (図 1 左挿入図) をとることが期待されるが、複数あるバンドのうち重いバンドにおいて前者の兆候が先行研究の熱力学測定で観測されず、未解決の問題となっていた。

最近、東京大学物性研究所のメンバーを中心とする研究グループは、高純度の  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  単結晶試料を用いて極低温比熱の温度・磁場・磁場方位依存性を詳細に調べ、重いバンドの超伝導ギャップに水平ラインノードが存在していることを明らかにした。この結果により  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  がカイラル  $d$  波型というこれまでに例のないタイプの超伝導体であることが決定的となった。本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 3 月号に掲載された。

一般に、超伝導ギャップを超えて励起される準粒子の量は低温比熱測定から検出することができる。低エネルギーの準粒子励起は超伝導ギャップ構造に大きく依存するため、低温比熱の温度・磁場依存性から超伝導ギャップがゼロとなるノードの有無を、磁場方位依存性からそのノードの位置を特定することが可能である。本研究では、ギャップ構造を決定する上で障壁となる不純物散乱効果や熱励起効果を抑えるために、高純度な単結晶試料を用いて極低温まで角度分解磁場中比熱測定が行われた。その結果、先行研究では見られなかったギャップノードの存在を支持する比熱の  $H^{1/2}$  的振る舞いがいずれの磁場方向でも明確に観測され (図 1 左)、さらに  $ac$  面内回転磁場中で比熱が結晶構造を反映した単純な 2 回対称の振動ではなく肩構造を伴う特徴的な磁場方位依存性を示すことが明らかとなった (図 1 右)。また、カイラル  $d$  波超伝導を仮定した微視的理論に基づく計算結果 (図 1 右挿入図) との比較により、この肩構造が水平ラインノードの存在によって生じていることが示された。これら一連の研究結果により、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  はカイラル  $d$  波超伝導体であることが結論づけられている。

超伝導が様々なメカニズムで起き得ることは現在では周知の事実であり、その個々のメカニズム

を解き明かしていくことが転移温度の高い超伝導体の開発にも繋がっていく。本研究で結論づけられた  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  のカイラル  $d$  波超伝導はこれまでにない全く新しいタイプの超伝導であり、なぜ「隠れた秩序」の中で発現したのか、そのメカニズムを今後明らかにしていくことで超伝導研究の更なる発展が期待される。

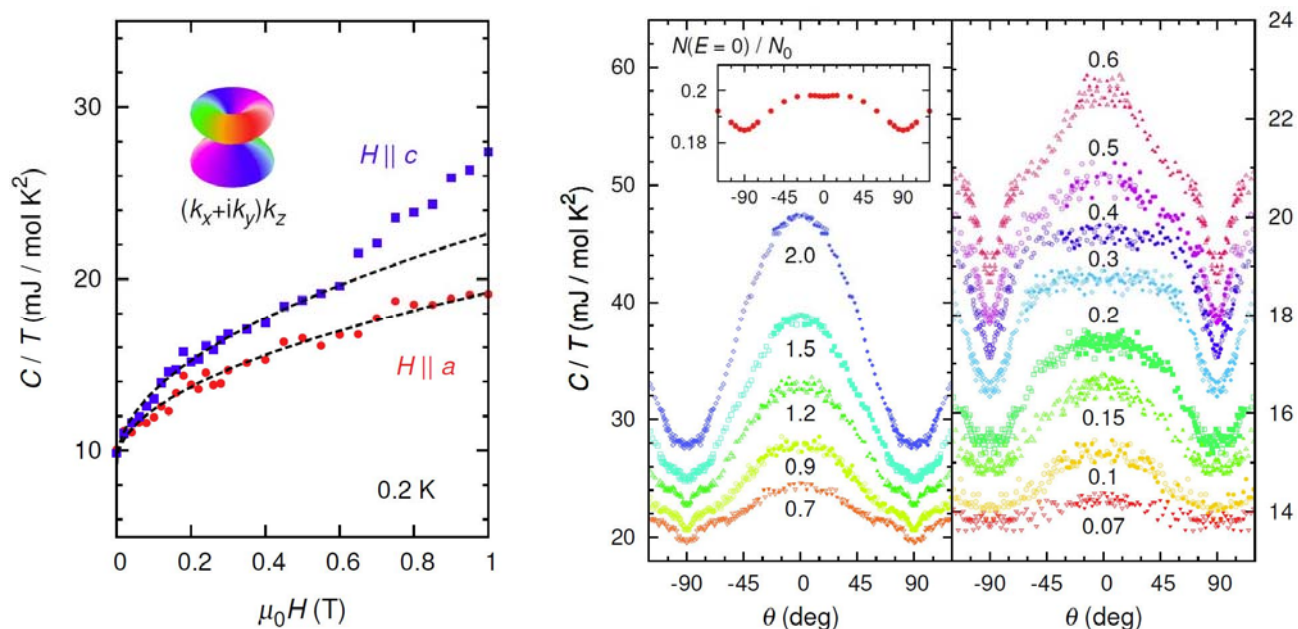


図 1. (左)  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の低温比熱の磁場依存性。挿入図はカイラル  $d$  波超伝導のギャップ構造。(右)  $T = 0.2 \text{ K}$  において様々な磁場下で測定した比熱の  $ac$  面内磁場方位依存性 (磁場の単位はテスラ)。挿入図はカイラル  $d$  波超伝導を仮定した微視的理論計算による準粒子状態密度 (低温比熱に対応) の角度依存性。計算結果は低磁場 (例えば  $0.3 \text{ T}$ ) での実験結果を良く再現している。

## 原論文

Evidence for chiral  $d$ -wave superconductivity in  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  from the field-angle variation of its specific heat

Shunichiro Kittaka, Yusei Shimizu, Toshiro Sakakibara, Yoshinori Haga, Etsuji Yamamoto, Yoshichika Onuki, Yasumasa Tsutsumi, Takuya Nomoto, Hiroaki Ikeda, and Kazushige Machida: *J. Phys. Soc. Jpn* **85**, 033704 (2016)

問合せ先： 橘高 俊一郎 (東京大学物性研究所)  
 榊原 俊郎 (東京大学物性研究所)  
 町田 一成 (岡山大学)