

4つの新規超伝導の発見: カゴ状構造を持つ $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr}=\text{Ti}, \text{V}, \text{Nb}, \text{Ta}$)

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻 電子物性研究室

$\text{RT}_2\text{Al}_{20}$ 化合物群は、近年の物性研究により、希土類 R イオンが持つ $4f$ 電子が関与した多彩な強相関電子物性が発現することがわかり、脚光を浴びています。 $R=\text{Sm}$ では、磁場の影響を受けない特徴をもつ非従来型の重い電子状態や秩序状態が見出されました[1,2]。 $R=\text{Pr}$ において、 Pr イオンの結晶場基底状態は、非磁性 2 重項となっており、磁気双極子モーメントは持たないが、電気四極子モーメントを持っています。この四極子自由度による近藤効果（四極子近藤格子の形成）、四極子秩序、四極子の関与が期待される超伝導などが見出され、四極子物性の重要な研究の舞台となっています[3-5]。これらの電子物性を理解するためには、 $4f$ 電子を含まない $\text{LaT}_2\text{Al}_{20}$ 化合物群の電子状態を理解することが重要です。我々は、 $\text{LaT}_2\text{Al}_{20}$ 化合物群の単結晶を育成し、基礎物性測定を行いました。その結果、新たに4つの超伝導を発見しました[6]。

電気抵抗率、比熱、交流磁化率の温度依存性を図1に示します。約 1 K 以下の低温領域で、超伝導が発現している証拠が見つかりました。電気抵抗がゼロになり、交流磁化率はマイスナー効果（完全反磁性）をとらえています。比熱には明瞭なジャンプが見られ、BCS 理論で理解できる振る舞いを示しています (α model と呼ばれる現象論的な理論曲線で良く説明できます)。交流磁化率 χ' の磁場依存性を見ると、 $\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$ だけが他とは異なり、箱型の振る舞いをしています。また、differential paramagnetic effect (DPE) と呼ばれる $\chi' > 0$ のピーク構造が、超伝導と常伝導の相境界に見られます。これらの特徴から、 $\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$ は、金属間化合物では非常に稀な、混合状態を持たない第一種超伝導体であることが示唆されます。

$\text{LaT}_2\text{Al}_{20}$ の結晶構造を見ると、それぞれの La イオンが、16 個の Al で形成されたカゴ構造の中央に位置することがわかります（一つのカゴ構造を図2に示す）。 La と Al の原子間距離から、 La と Al のそれぞれのイオン半径を引けば、両者の間の隙間が求まります。これを guest free space (d_{GFS}) と名付けます。これまでに報告されている $\text{RT}_2\text{Al}_{20}$ 超伝導体について、超伝導転移温度 T_c とこの

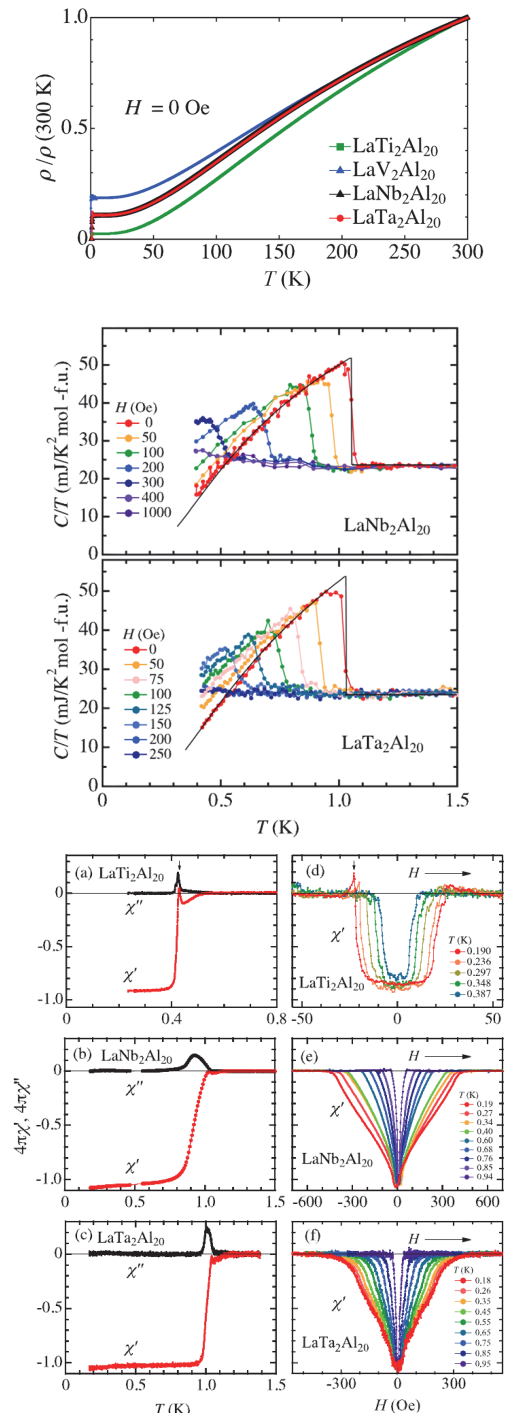


図1 電気抵抗率、比熱、交流磁化率の温度依存性。

隙間の関係を図2にプロットしました。この図の中で、これらは右上がりの帯となるグループを形成しており、隙間が大きくなると T_c が増大していることがわかります。カゴ構造の中でイオンが非調和巨大振幅振動する振る舞いは、ラトリング (rattling) と呼ばれます。クーパー対を形成する電子間引力にラトリングが効いていることが示唆されます。我々は、これらのグループと比較するため、X線を用いた単結晶構造解析により4つの超伝導体の結晶構造を調べました。その結果、隙間がほとんどゼロの状態、Laイオンがカゴ内に内包されていることがわかりました。図2に示すように、4つの超伝導体は縦に並ぶグループを形成しており、カゴ内の隙間とは別の要因が T_c を決定していることがわかりました。3d電子を持つ $T=Ti, V$ よりも、4d, 5d電子を持つ $T=Nb, Ta$ の方が高い T_c を示しています。d電子のスピ軌道相互作用の強さの相違が、 T_c の違いをもたらしているのかもしれませんが。

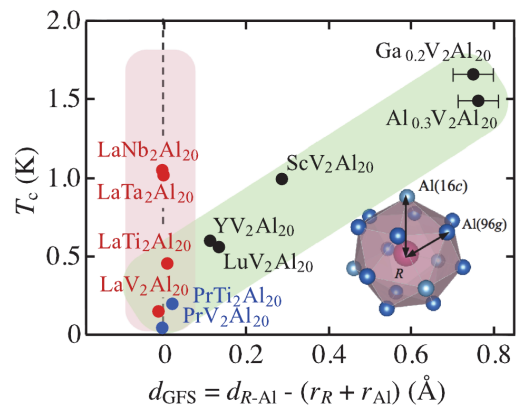


図2 超伝導転移温度とカゴ内原子の隙間の関係。 RT_2Al_{20} 超伝導体は、2つのグループに分類できることがわかる。

参考文献

- [1] R. Higashinaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 093703 (2011).
- [2] A. Yamada *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 123710 (2013).
- [3] A. Sakai and S. Nakatsuji, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 063701 (2011).
- [4] T. Onimaru and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 082002 (2016).
- [5] R. Higashinaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 103703 (2017).
- [6] A. Yamada *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033707 (2018).