

# f 電子系化合物における超伝導

～スーパーコンピュータを用いて超伝導のしくみを探る～

A 兵庫県立大学理学研究科 物質科学専攻, B 量子科学技術研究開発機構,  
C 山口東京理科大学

◎D1 春名 信吾<sup>A</sup>, M2 土井 洸輝<sup>A</sup>, 准教授 野村 拓司<sup>AB</sup>,  
准教授 兼安 洋乃<sup>C</sup>

## キーワード

超伝導, 物性理論, 強相関電子系,  
スーパーコンピュータ



## 研究概要

ある特定の物質を低温にすると、突然物質の電気抵抗がゼロになることがあります。この現象は“超伝導”と呼ばれ、1911年にオンネスによって発見されて以来注目を集め続けている物性物理学における重要な分野の一つです。

超伝導状態では、二つの電子がペアを組み“クーパー対”を形成します。このクーパー対の構造が物質によって多様であり、またその形成機構も様々です。電子は“スピン”と呼ばれる内部自由度を持っているために、クーパー対はスピンの向きが反平行にペアを組む“一重項”と平行にペアを組む“三重項”に分類されます(図1)。

我々はf電子系化合物、特に $UTe_2$ を対象として、クーパー対の構造やクーパー対が形成されるしくみを理論的に研究しています。我々は $UTe_2$ における超伝導状態を調べるにあたって、実験から示唆されている $UTe_2$ の電子状態を上手く再現するモデルを構築しました。 $UTe_2$ は三重項超伝導の候補物質として注目されていますが、構築したモデルを用いて超伝導状態におけるクーパー対の構造を調べたところ、一重項超伝導が実現し得る可能性があることを示しました。さらにそのギャップ構造が図2のようになり、ギャップが非常に小さくなる点が存在することを示しました。ここで言う“ギャップ”とはクーパー対が形成されることにより生じるエネルギー利得です。加えて、このギャップ構造は比熱測定の実験結果と一致することも計算により示しました。

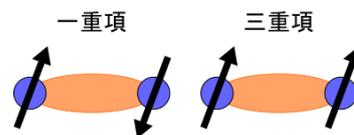


図1. クーパー対の模式図

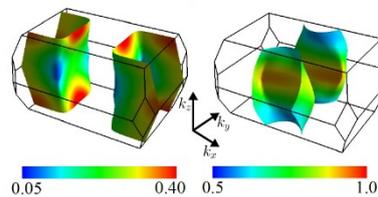


図2. 超伝導ギャップ構造

## アピールポイント

我々が構築した $UTe_2$ のモデルは、6つの電子軌道を考慮に入れており、さらに中性子散乱実験から示唆されていた反強磁性的な磁気揺らぎを再現するモデルとなっています。6つの電子軌道を考慮に入れつつ、中性子散乱実験と一致する磁気揺らぎを再現するモデルはこれまでになかったモデルでした。

超伝導状態を調べるにあたって用いた近似方法は“三次摂動論”と呼ばれ、 $UTe_2$ に対してはこれまで適用されていない近似方法でした。我々が三次摂動論を用いて計算した結果得られた一重項状態の可能性とその発現機構は、先行研究とは異なる新奇な理論です。

また、 $UTe_2$ における重要な問題の一つはギャップ構造の特定です。いくつかの実験結果から予想されるギャップ構造は様々で、ギャップ構造を確定させるに至っていません。しかし、我々が求めた図2のギャップ構造は比熱測定や熱輸送実験・磁場侵入長測定などの複数の実験結果を説明することが可能で、本研究は未解明の $UTe_2$ のギャップ構造に対して一つの可能性を提示できたと考えています。

本研究の一部は学術論文誌に掲載されています(S. Haruna *et al.*, Journal of the Physical Society of Japan **93**, 063701 (2024))。

