

トポロジカル超伝導の実現へ向けた新しい物性制御法の開拓

[1] 要旨

近年、物質のトポロジカルな性質に注目した研究が盛んに行われているが、トポロジカル超伝導に関しては未だ確立した候補物質がほとんどないのが現状である。本論文は空間反転対称性をもたない線ノード超伝導体に超伝導電流を流すことで、モノポールチャージに保護された点ノードをもつワイル超伝導が実現しうることを明らかにした。このような超伝導電流による物性制御法の提案は、トポロジカル超伝導を実現するための新たな指針を与えるものである。

[2] 本文

超伝導は、特定の金属や化合物などを非常に低い温度へ冷却したときに電気抵抗が急激にゼロになる現象である。その顕著な特性は今日では超伝導コイルとして応用されており、医療機器であるMRI装置や、磁気浮上式リニアモーターカーなどに用いられている。超伝導は電子が2つずつのペア(クーパー対)を形成することで起こるが、そのペアは物質によって様々な形状(対称性)をとることが知られている。現在実用的に使われている超伝導体は s 波、すなわち丸い等方的なクーパー対をもつものがほとんどであるが、近年では非 s 波の「異方的超伝導体」も重要な研究対象として認識されている。例えば、1987年のノーベル物理学賞の受賞テーマとしても名高い銅酸化物高温超伝導体と呼ばれる物質群は、線状の節(ノード)を有する d 波のクーパー対をもった異方的超伝導体であると考えられている。

このような異方的超伝導の中でも特に、この十数年ほどで急速に研究が発展しているのが「トポロジカル超伝導」である。トポロジカル超伝導は、マヨラナ状態と呼ばれる特殊な表面状態をもつことが知られており、この状態の制御が可能になれば次世代の量子コンピュータの実現にも繋がると考えられている。ところが、実際にトポロジカルな性質を示すことが実験的に確認されている超伝導体はほとんどないのが現状である。このような背景から、トポロジカル超伝導状態を実現するためのセットアップをさらに開拓していくことが求められている。

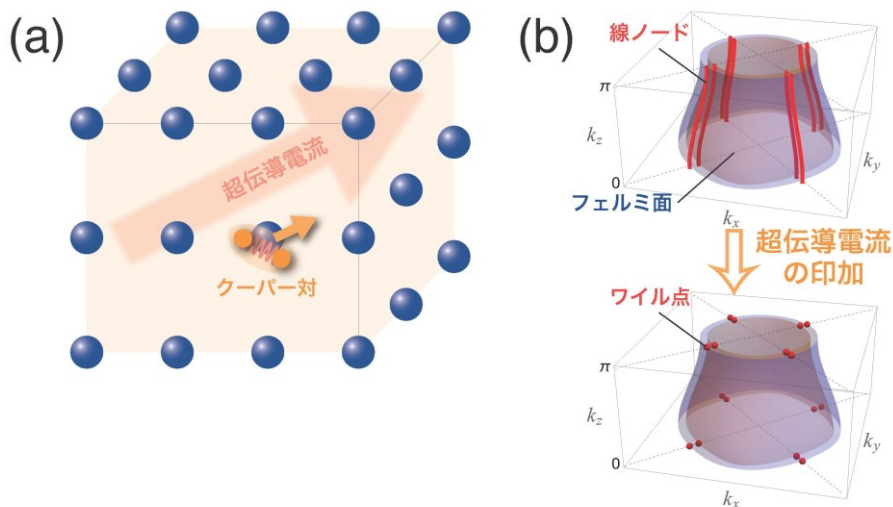


図 1. (a)電流が流れている超伝導体の概念図。(b)超伝導電流によるノード構造の変化。線ノードからワイル点への変化が見られる。

最近、理化学研究所開拓研究本部と東京大学大学院理学系研究科の共同研究グループは、超伝導の量子状態を制御するための手段の一つとして電流が有用であることに気づき、電流が流れている状態をクーパー対が非ゼロの重心運動量をもつ状態として表現することで理論的な解析を行った[図 1(a)]。結果、特に空間反転対称性をもたない線ノードをもつ超伝導体に電流を流すことで、トポロジカル超伝導の一種であるワイル超伝導が実現しうることを明らかにした。この成果は、JPSJ の 2022 年 7 月号に掲載された。

ワイル超伝導は、モノポールチャージと呼ばれるトポロジカル数に保護された点状のノード(ワイル点)をもつ超伝導である。通常、超伝導のノード構造は各々の超伝導体に固有の情報であり、その形状が大きく変化することはない。しかし上記の結果は、外からかけた電流と空間反転対称性の破れに伴うスピン軌道相互作用の協奏によって、線ノードから点ノードへの変形がもたらされることを示している[図 1(b)]。これに付随して、超伝導のもつトポロジーも大きく変化する。実際、これらの点ノードはモノポールチャージをもつワイル点であり、その間を繋ぐようにしてフェルミアークという表面状態が現れることが確かめられている。また、論文中では候補物質の例として CeRhSi_3 や CeIrSi_3 などの超伝導体が検討されている。

本研究成果は、超伝導電流をトポロジカル超伝導実現のための新たな方向性として提示するものであり、このような制御法によって発現する表面状態を利用した量子計算やデバイスへの応用など、今後の研究の展開が期待される。

原論文 (2022 年 6 月 3 日公開済)

[Supercurrent-Induced Weyl Superconductivity](#)

Shuntaro Sumita and Kazuaki Takasan: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 074703 (2022).

<情報提供：角田 峻太郎（理化学研究所 開拓研究本部）>