



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY



理化学研究所
RIKEN

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2026 年 8 月 7 日

報道機関 各位

カゴメ金属でおきる“自発的に回転するクーパー対” ーカイラル超伝導の機構を解明、量子デバイス設計に新指針ー

【本研究のポイント】

- ・カゴメ金属で観測される自発回転するクーパー対～カイラル超伝導^{注 1)}～の解明に成功。
- ・カゴメ格子上を電子が循環運動する「ループ電流秩序^{注 2)}」がカイラル超伝導を引き起こす。
- ・超伝導ギャップ^{注 3)}の空間変調や不純物による状態変化など、一つの理論で統一的に説明。

【研究概要】

名古屋大学大学院理学研究科の山川 洋一 講師、紺谷 浩 教授は、理化学研究所創発物性科学研究センター／開拓研究所の田財 里奈 理研 ECL 研究ユニットリーダーと共に、カゴメ(籠目)格子構造^{注 4)}の AV_3Sb_5 ($A = Cs, Rb, K$) で観測される特異な超伝導が、電子の「ループ電流秩序」によって自然に生じることを理論的に明らかにしました。

今回、研究チームは、ループ電流秩序と電荷秩序が共存するカゴメ格子模型を用いて超伝導状態を理論的に解析しました。その結果、ループ電流が電子対の向きを選択することで、時間反転対称性^{注 5)}が破れたカイラル超伝導と強い方向依存性を示すネマティック超伝導が自然に実現することを見いだしました。また、超伝導ギャップの 2×2 周期変調や、不純物の導入によって通常の s 波超伝導へと変化する実験結果も、一つの理論で統一的に説明できることを示しました。本研究は、これまで個別に議論されてきた複数の実験結果を、ループ電流秩序を鍵とする一つの理論的枠組みで説明した初めての成果です。

今回の成果は、カゴメ金属における超伝導発現機構の理解を深めるとともに、時間反転対称性が破れた新奇超伝導体の設計や、低消費電力量子デバイスの開発に向けた新たな指針となることが期待されます。

本研究は、2026 年 7 月 27 日付で科学雑誌『Nature Communications』に Article in Press(早期公開版)として公開されました。今後、校正・組版を経た最終版に置き換えられる予定です。

【研究背景と内容】

金属中の無数の電子は量子力学^{注 6)}に従って運動し、さらに互いに強く相互作用することで、超伝導や強磁性など多彩な量子相^{注 7)}を生み出します。こうした新しい量子相の発見と実現は、物性物理学における最重要課題の一つです。最近注目されているのが、独特のカゴメ格子構造を持つ「カゴメ金属」です。三角形の単位格子からなるカゴメ格子は、電子の局在を妨げる幾何学的フラストレーション^{注 8)}という特徴を持ちます。この幾何学的フラストレーションと電子間相互作用が有機的に協奏することで、従来観測されたことのないユニークな量子相が発現することが明らかになり、世界的に注目を集めています。

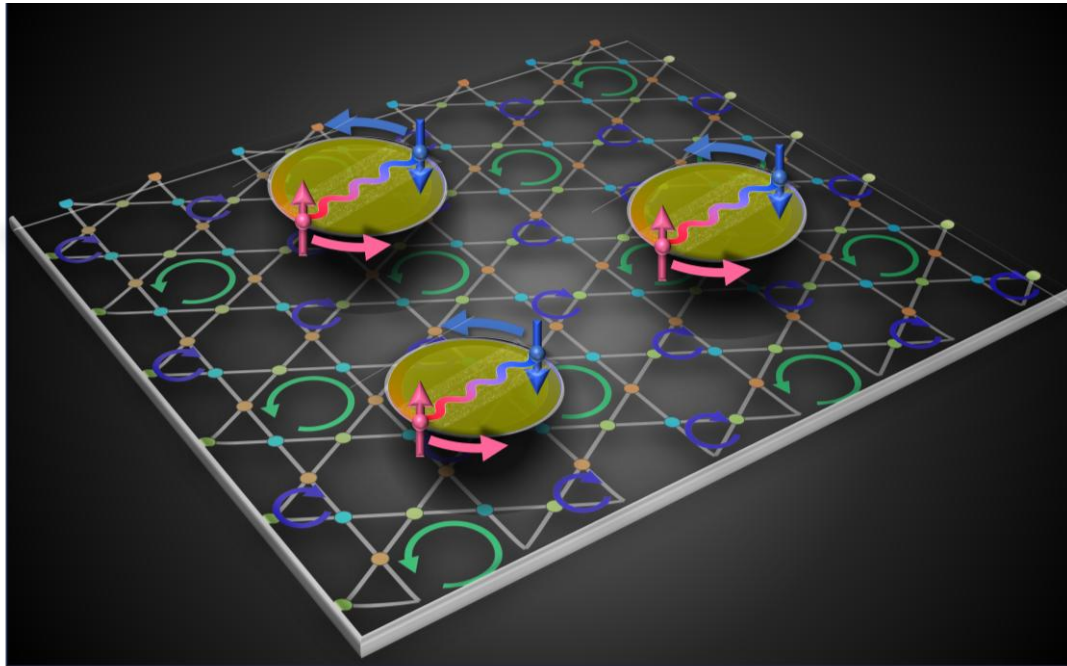


図 1. カイラル超伝導の模式図。カゴメ格子上的のループ電流秩序によって、回転するクーパー対の状態が安定化され、カイラル超伝導が誘起される。

研究チームは、ループ電流状態と電荷秩序を同時に取り入れた理論モデルを構築し、超伝導状態を決定する方程式を数値的に解きました。その結果、ループ電流状態が存在すると、通常は同等である二つの超伝導状態の安定性に差が生じ、一方のみが選択されることを見いだしました。これにより、右回り・左回りの向きを持つ「カイラル超伝導」が自然に実現することが分かりました。

さらに、ループ電流状態と電荷秩序が共存すると、超伝導ギャップの大きさが方向によって大きく変化する「ネマティック超伝導」が生じることを明らかにしました。この結果は、実験で観測されている強い方向依存性を再現します。理論計算では、フェルミ面がほぼ六回対称であっても顕著な異方性が現れることが示されました。

また、超伝導ギャップが結晶中で 2×2 の周期を持って変調する「対密度変調」も自然に現れることを示しました。これは近年の走査トンネル顕微鏡観測で報告されている特徴と整合します。

加えて、少量の不純物を導入すると、カイラル超伝導やネマティック超伝導が抑制され、通常の等方的な超伝導へと変化することを理論的に示しました。この結果は、実験で報告されている「不純物による超伝導状態の変化」を統一的に説明します。

これらの結果から、ループ電流状態がカゴメ金属における特異な超伝導の起源である

可能性が示されました。本研究は、これまで個別に議論されていたカイラル超伝導、ネマティック超伝導、対密度変調、不純物効果を、一つの理論的枠組みで説明することに成功しました。

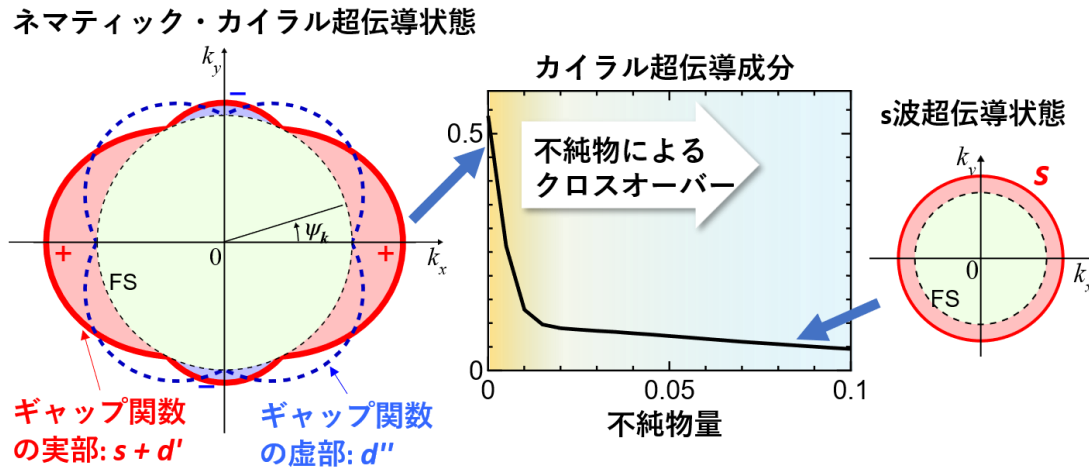


図 2. ネマティック・カイラル超伝導(回転するクーパー対)からs波超伝導(回転が止まったクーパー対)へのクロスオーバー。

【成果の意義】

本研究で提案した理論は、カゴメ金属でこれまで個別に報告されてきたカイラル超伝導、ネマティック超伝導、不純物による超伝導状態の変化などを統一的に理解するための基盤となります。また、本研究で示したループ電流秩序と超伝導の関係は、今後の走査トンネル顕微鏡 (STM) や角度分解光電子分光 (ARPES) などの実験による検証が期待されます。

さらに、本研究で明らかになった「ループ電流が超伝導の対称性を制御する」という機構は、カゴメ金属に限らず、時間反転対称性が破れた超伝導体や他の強相関電子材料にも適用できる可能性があります。本成果は、新奇超伝導体の探索や、超伝導ダイオード効果などの非相反輸送現象を利用した次世代量子デバイスの設計指針につながることを期待されます。

本研究は、2025 年度から始まった文部科学省 学術変革領域研究 (A)「相関設計で挑む量子創発」の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1) カイラル超伝導:

カイラル超伝導とは、電子がペア (クーパー対) を組む際に軌道角運動量を持つ、特殊な超伝導の状態。カイラル状態では「右巻き」と「左巻き」の回転状態が時間を逆向きにすると入れ替わるため、自発的に時間反転対称性を破る。

注 2) ループ電流秩序:

電子相関によって電子の飛び移り積分が位相を持つとき、時間反転対称性が破れて、ナノスケールのループ電流が流れる。F.D.M. Haldane によりハニカム格子に対して導入され、その後銅酸化物超伝導体において長年精力的に研究されてきたが、最近カゴメ金属において有力な実験的観測が報告されている。

注 3)超伝導ギャップ:

超伝導状態で電子を励起するために必要となるエネルギーの隔たり(エネルギーギャップ)。その大きさや方向依存性は、超伝導状態の性質を反映する。

注 4)カゴメ格子構造:

竹籠の網目模様に類似した 2 次元格子構造(図 1)。カゴメ格子金属の強い幾何学フラストレーションにより、単純なスピン秩序や電荷秩序が抑制される。このためカゴメ格子金属では電子相関が強い金属領域が安定化し、新奇な金属量子相の舞台となる。

注 5)時間反転対称性:

時刻の向きを逆転($t \rightarrow -t$)させる操作のことを時間反転と呼ぶ。時間反転により元に戻る状態のことを、時間反転対称性を持つという。ループ電流秩序は時間反転により回転方向が変わるため、時間反転対称性を破っている。

注 6)量子力学:

電子などのミクロな粒子の運動を司る物理法則。電子は粒子としての性質(粒子性)と波としての性質(波動性)という 2 重性を併せもつ。

注 7)量子相:

電子相関の強い金属電子系では、磁気秩序や電荷秩序、超伝導などの豊かな相転移(自発的対称性の破れ)が発現する。電子の量子性が重要な役割を果たすことから量子相と呼ばれる。

注 8)幾何学的フラストレーション:

カゴメ格子が有する三角形構造は、電子の磁気秩序や電荷秩序を著しく抑制する効果があり、幾何学的フラストレーションと呼ばれる。

【論文情報】

雑誌名: Nature Communications 誌

論文タイトル: Nematic and chiral superconductivity emerging within the loop-current phase in kagome metals

著者: 田財里奈(理化学研究所)、山川洋一(名古屋大学)、紺谷浩(名古屋大学)

DOI: 10.1038/s41467-026-75259-3

URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75259-3>