

カゴメ金属で起きる自発回転する不思議な電子状態 ～ナノスケールの永久ループ電流の機構を明らかに～

- ・カゴメ格子金属では、電子が減衰せずに回転運動を続けるループ電流秩序^{注1)}という、極めて不思議な量子相が実現する。
- ・本研究では、ループ電流秩序の発現機構を場の量子論^{注2)}に基づき解明し、カゴメ格子金属の多重相転移^{注3)}の統一的理解を得た。
- ・高温超伝導体のループ電流の解明や、将来的に高温超伝導機構の解明も期待される。

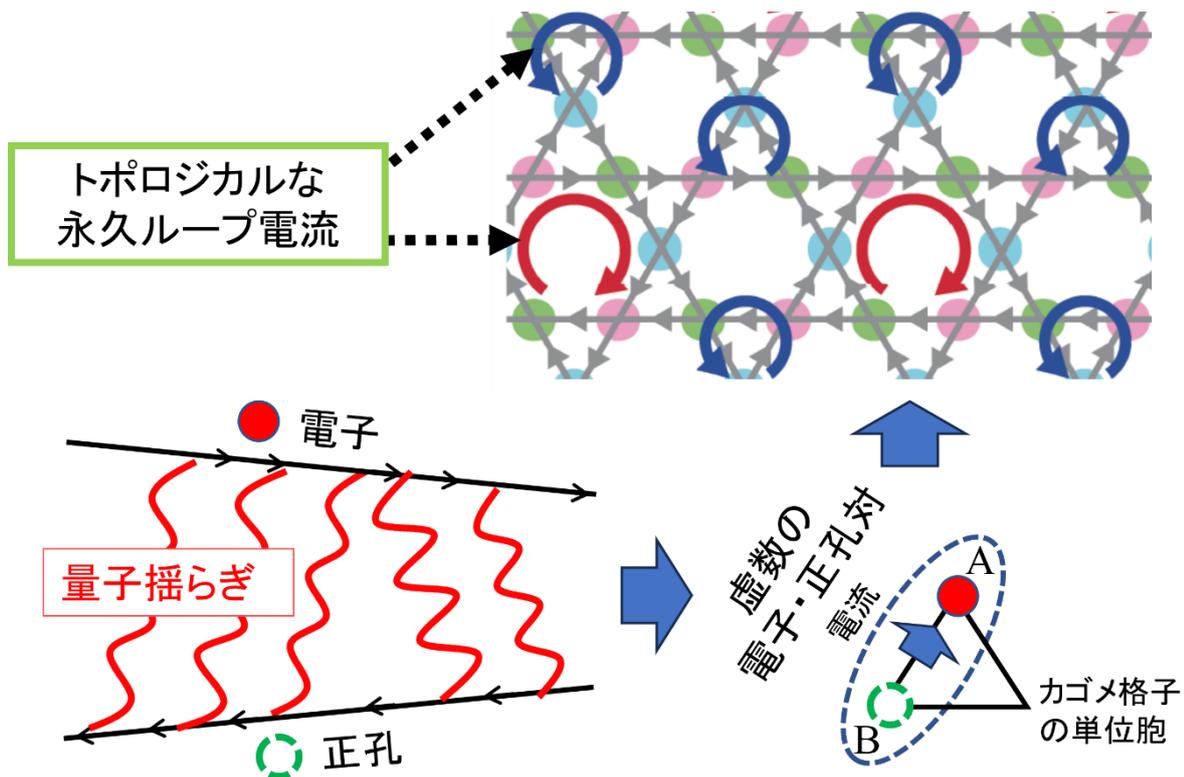
【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科の 山川 洋一 講師、紺谷 浩 教授の研究グループは、国立大学法人 京都大学基礎物理学研究所の 田財 里奈 助教とともに、カゴメ格子構造^{注4)}の金属化合物で創発する新奇な相転移—ナノスケールのループ電流秩序—を解明する理論を発見しました。

2019年に発見されたカゴメ格子金属 AV_3Sb_5 ($A=Cs, Rb, K$) は幾何学的フラストレーション^{注5)}を有する新種の超伝導体ですが、そこではナノスケールのダビデ星型パターンを伴う電荷秩序や超伝導など、実に多彩な電子状態が実現します。中でも「ループ電流秩序」は、ナノスケールの電流が減衰せず流れ続ける、極めて不思議な電子状態です。しかし永久電流を伴う状態が安定して存在できる理由は未解明でした。

本研究では、カゴメ金属のループ電流秩序の理論機構を、場の量子論に基づき解明しました。フラストレーションにより増大した電子の量子揺らぎ(不確定性原理^{注6)}に基づく電子の運動)が糊となり、電子と正孔(電子の空孔)が特殊な束縛状態を組むことを見出しました。驚くべきことに、この束縛状態の振幅は虚数となり、自由電子への有効磁場を与えるため、永久ループ電流が流れます。本研究は、カゴメ金属の多重相転移を理論的に解明し、様々な金属への応用が期待されます。

本研究成果は、2023年11月29日にイギリス科学誌「Nature Communications」に掲載されました。



【研究背景と内容】

水が温度や圧力によって気体、液体、固体と姿を変える現象は、相転移と呼ばれます。金属中の電子も相転移を示し、電子の磁化(スピン)が一方向に揃った強磁性、電子が凍った絶縁体、その逆に電子が対を組んで電気抵抗が完全にゼロになる超伝導が、古くから知られています。量子力学に従い粒子と波の 2 面性を有する電子は、実に多彩な相転移を示します。最近では鉄系高温超伝導体^{注7)} や銅酸化物高温超伝導体^{注8)} において、電子状態が自発的に回転対称性を破る電子液晶が普遍的に観測され、大変注目を集めています。金属電子の相転移は、基礎科学から応用に至る幅広い側面から興味を集め、最近新発見が相次ぐ物理学における中心的課題の一つです。

2019 年に発見されたカゴメ格子金属 CsV_3Sb_5 は、幾何学フラストレーションを有する新種の超伝導体です。そこではナノスケールのダビデ星型パターンを伴う電荷秩序や超伝導、電子液晶など、実に多彩な相転移が競合して出現するため、世界的な注目を集めています。その中でも「ループ電流秩序」はとりわけ大きな興味を集めています。これはナノスケールのループ電流が減衰せず金属中を流れ続ける極めてユニークな量子相です(図 1)。ループ電流秩序は 1988年にフレデリック・ダンカン・マイケル・ホールデンが理論的に提唱した「磁場を必要としないホール効果を示すチャーン絶縁体」(2016 年ノーベル賞)の金属版であり、長年実現が期待されていたものです。カゴメ格子金属のループ電流は、数年間で様々な実験的証拠が集まっています。しかしながら、永久電流を伴う量子相が安定に存在できる理由や、電流秩序相の発現機構は何かなど、根源的な謎が山積していました。

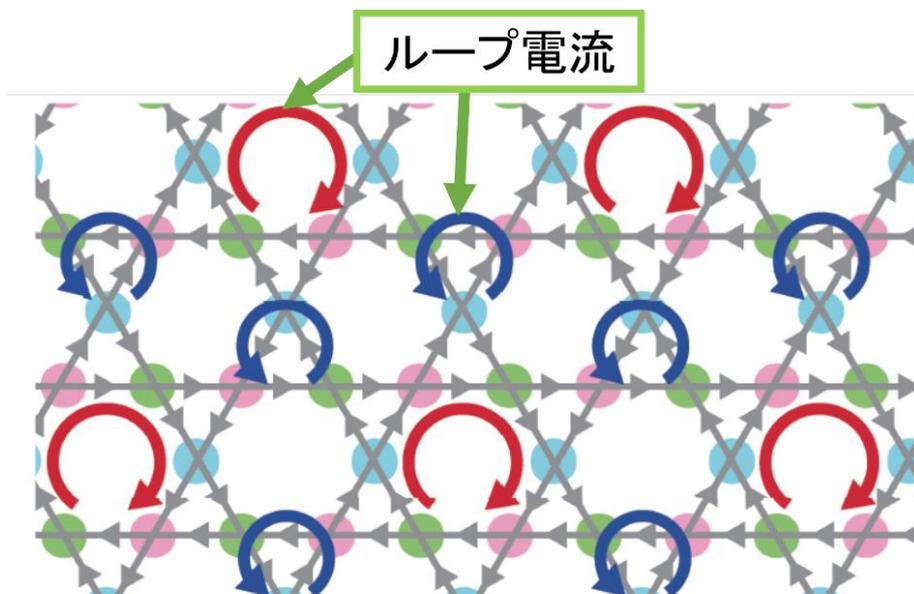


図 1 カゴメ格子金属における永久ループ電流。矢印が電流の向きを表す。ホールデンが予言したチャーン絶縁体の金属版である。自由電子がトポロジカルな有効電場を感じる結果、ナノスケールのループ電流が流れる。

本研究では、カゴメ金属のループ電流秩序の理論機構を、最先端の場の量子論を構築することで、解析しました。カゴメ金属の幾何学フラストレーションに由来する電子の量子揺らぎ(遅い電子の振動)が糊となり、電子と正孔の束縛状態を生じることを見出しました。束縛状態が生じる量子力学的過程(ファイマン図形)を、図2に示します。正孔とは“電子の空孔”ですが、場の量子論では“負の時間へと運動する電子”として記述されます。赤の波線で表された電子の量子揺らぎは、ここでは「ダビデ星型電荷秩序」の揺らぎ(不確定性原理に基づくゼロ点振動)です。電子と正孔が量子揺らぎのキャッチボールを繰り返す結果、電子と正孔が束縛状態を作ります(図 2)。これは、超伝導における電子・電子対と類似しています。電子・正孔対は電荷をもたないため超伝導は生じませんが、電子のトポロジカルな性質を変えます。ゆえに金属状態を一変させるポテンシャルを秘めています。

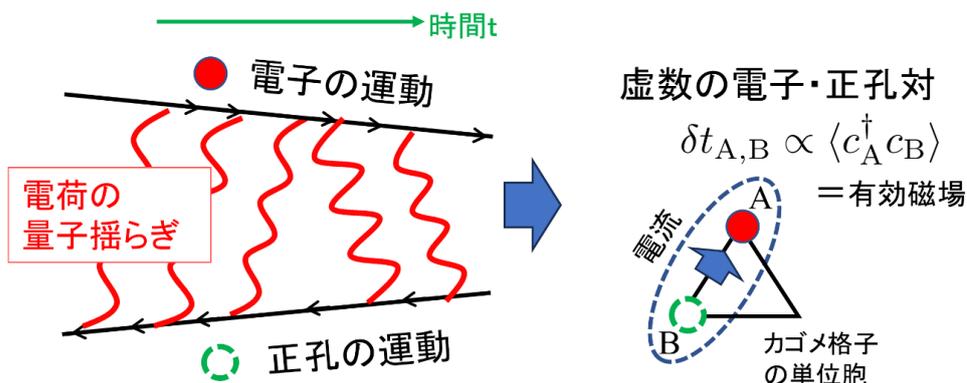


図 2 本研究で見出した“電荷揺らぎ交換電流秩序機構”の量子力学的過程(ファイマン図形)。本機構で導かれる虚数の電子・正孔対 δt は、自由電子に対する有効磁場を与えるため、減衰しない永久ループ電流が生じる。

驚くべきことに、カゴメ金属の電子・正孔対の振幅(図 2 の δt)は虚数でした。虚数の δ

t は、金属自由電子に対して有効磁場として働きます。この結果、ナノスケールのループ電流が減衰することなく流れ続けます(図 2)。量子力学の世界では状態がとびとびになるため、電流が摩擦により減衰しないことが許されるのです。本研究が見出した「電荷揺らぎ交換電流秩序機構」により、電流秩序というきわめてユニークな量子状態が生じる現実的機構が、はじめて明らかになりました。(ホールデン(1988)では微視的機構は研究されませんでした。)ループ電流秩序は、これまで銅酸化物高温超伝導体における異常金属相の候補としても盛んに研究されてきましたが、今なお未解明問題です。本理論は、高温超伝導体の未解明問題の研究にも役立つと考えられます。

本理論により導かれるカゴメ格子金属の状態相図を図 3 に示します。横軸は電子相関の逆数です。右側の弱相関領域ではループ電流秩序が高温で生じ、左側の弱相関領域ではダビデ星型の電荷秩序が高温で生じます。中間結合領域では電流秩序と電荷秩序が共存し、現実の V 系カゴメ金属は、この中間領域に存在すると考えられます。大変興味深いことに、電流秩序と電荷秩序の共存状態は、自発的に回転対称性を破った電子ネマティック秩序になることがわかりました。(図 3 には書かれていませんが、電荷・電流秩序温度よりさらに低温で、超伝導が生じます。)図 3 の状態相図に基づき、カゴメ金属で実現するループ電流相・ダビデ星型秩序相、ネマティック秩序相、超伝導が競合するユニークな電子状態を理解することが出来ます。

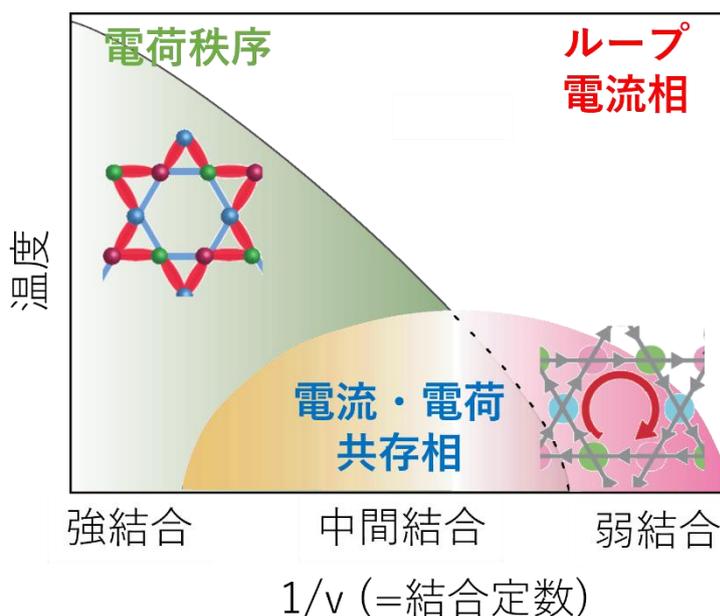


図 3 本理論で得られたカゴメ格子金属の状態相図。中間結合領域では、ループ電流秩序と電荷秩序が共存する。

【成果の意義】

カゴメ格子超伝導体はダビデ星型電荷秩序や超伝導などの新奇電子状態の宝庫です。その中でも「ループ電流秩序」はひととき注目を集めていますが、その発現機構は未解明でした。本研究で発見した「電荷揺らぎ交換電流秩序機構」の理論により、電流秩序の正体は“虚数の電子・正孔対 δt ”であり、自由電子への有効磁場を与えるため、永久ループ電流が流れます。本研究は、カゴメ金属の多重相転移に対する包括的理解を与えます。

ループ電流はマクロな電流として取り出すことは出来ませんが、ループ電流秩序は“磁場を必要としないホール効果”や“軌道強磁性”を伴い、微小な外部磁場や一軸歪で制御可能です。この外場に対する敏感性を応用したデバイスが可能かもしれません。

ループ電流秩序はかつてホールデンが理論的に提唱した「磁場を必要としないホール効果を示すチャーン絶縁体」の金属版であり、銅酸化物高温超伝導などで、長年実現が期待されていたものです。本研究は、この重要な未解明問題に対する大きな進歩を与えるものです。

本研究は、2019年度から始まった文部科学省 新学術領域研究「量子液晶の物質科学」の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注1)ループ電流秩序:

電子相関によって時間反転対称性を破った電子・正孔秩序が生じたとき、ループ電流が流れる。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多数の有力な実験的観測が報告されている。

注2)場の量子論:

多電子の量子力学的状態を効率よく記述する理論。場の理論に基づき、ファイマンにより創始されたファイマン図の理論や、ウィルソンにより創始されたくりこみ群理論が展開される。

注3)多重相転移:

相転移は、温度や圧力を変えることで巨視的な性質(相)が変化する現象を指す。金属電子では磁性相、電荷秩序相、超伝導相などが代表的な量子相である。多重相転移は複数の相が共存・競合する状態であり、新奇量子状態が実現する面白い舞台となる。

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一方で、電荷やスピンの強い量子揺らぎが発達し、新規な電子物性の舞台である。

注5)幾何学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、幾何学フラストレーションと呼ばれる。このとき電子の粒子・波動の 2 面

性が強調されて、新奇な電子状態が生まれやすい。

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重性をあわせ持ち、不確定性原理と呼ばれる。

注7)鉄系高温超伝導体:

2008年に細野・神原により発見された鉄化合物の高温超伝導体。電子ネマティック秩序相に隣接して高温超伝導相(s波)が実現するが多い。

注8)銅酸化物超伝導体:

1986年にベドノルツ・ミュラーにより発見された高温超伝導体。電荷秩序相に隣接して高温超伝導相(d波)が実現する。

【論文情報】

雑誌名: Nature Communications

論文タイトル: Charge-loop current order and Z_3 nematicity mediated by bond order fluctuations in kagome metals

著者: 田財里奈(京都大学)、山川洋一(名古屋大学)、紺谷浩(名古屋大学)

DOI: 10.1038/s41467-023-42952-6

URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-42952-6>