



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 8 年 8 月 19 日

岡 山 大 学

高温トポロジカル超伝導を制御する舞台と手法を発見

◆発表のポイント

- ・ トポロジカル超伝導体は次世代量子コンピューターなどへの応用が期待されています。
- ・ 本学の研究グループは、一つの物質において複数のトポロジカル超伝導相を発見しました。
- ・ 本研究成果により、トポロジカル超伝導の基礎的な理解が深まるとともに、次世代量子コンピューターへの応用が加速することが期待されます。

岡山大学大学院環境生命自然科学研究科の小川晟吾大学院生と、その指導教員である同学術研究院環境生命自然科学学域の鄭国慶教授らの研究グループは、高温で実現する超伝導体 $K_2Cr_3As_3$ において複数のスピン三重項状態が実現すること、また磁場や温度でトポロジカル超伝導状態を制御できることを発見しました。本研究成果は 8 月 20 日に米国物理学会速報誌「*Physical Review Letters*」に掲載されます。また、Editors' Suggestion（注目論文）に選ばれ、解説記事も出る予定です。

トポロジカル超伝導体（注 1）は従来の超伝導体とは異なり、その表面や渦糸中心の電子状態が次世代の量子コンピューターに応用できます。一つの物質で複数のトポロジカル相を発見したことで、本研究成果は産業応用に向けての材料基礎を築くものとして注目されています。

◆研究者からひとこと

$K_2Cr_3As_3$ はスピン三重項超伝導体（候補も含め）の中で最高の超伝導転移温度を示し、唯一、ヘリウムの液化温度を上回ります。しかし本物質の単結晶を育成する難易度は極めて高く、安定して大型単結晶を育成できるまでに多くの労力を要しました。また、核磁気共鳴法による精密物性測定と綿密な検証を重ね、ようやく今回の成果を得ることができました。 $K_2Cr_3As_3$ が示す多様な超伝導相は豊かな物理を含んでいることはもちろん、次世代量子デバイスへの応用にも貢献が期待されます。我々は今後も本物質が示す新奇な超伝導状態の解明を目指していきます。



鄭教授（左）と小川大学院生



PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

近年、数学の「トポロジー（位相幾何学）」という概念を用いて新しい物理現象を解き明かす研究が世界中で注目を集めています。例えば「トポロジカル絶縁体（注1）」では、電子の波（波動関数）に一種の「ひねり」があるため、内部は電気を通さない一方で表面だけは電気が流れるという特異な性質を示します。同様に、「トポロジカル超伝導体」では特徴的な表面状態が現れ、さらに磁気の渦（渦糸）の中心には、次世代量子コンピューター（注2）の実現に重要な「マヨラナ粒子（注3）」が現れると期待されることから、世界中で研究開発が活発に進められています。しかし、トポロジカル超伝導体は自然界では極めて稀であり、その詳しい性質はまだ十分に解明されていません。

このような中、「スピン三重項超伝導体（注4）」は、電子対が奇パリティと呼ばれる特殊な対称性を持つことから、トポロジカル超伝導体の有力な候補として注目されています。しかし、その候補物質は現在数種類程度しか知られておらず、多くはウランを含み超伝導転移温度も低いため、実用化には課題がありました。本研究対象である $K_2Cr_3As_3$ （注5）は、スピン三重項超伝導候補の中で最高の超伝導転移温度を示し、さらにウランを含まないことから将来的な応用材料として期待されています。一方で、空気中で容易に劣化するため実験の難易度が高く、その超伝導状態には多くの謎が残されていました。

<研究成果の内容>

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域（大学院環境生命自然科学研究科）低温物性物理学研究室（教授：鄭国慶）の小川晟吾大学院生、三好智己大学院生（研究当時、現四国電力株式会社）、内田早紀大学院生（研究当時、現京セラ株式会社）、俣野和明助教（研究当時、現岡山理科大学准教授）、川崎慎司准教授、及び岡山大学学術研究院教育学域の稲田佳彦教授らの研究グループは、スピン三重項超伝導体 $K_2Cr_3As_3$ に対して核磁気共鳴（NMR）（注6）実験を行い、温度や磁場の変化に伴う超伝導状態の変化を調べました。

その結果、 $K_2Cr_3As_3$ では温度や磁場に応じて三つの異なるスピン三重項超伝導状態が実現することを明らかにしました。高温・低磁場領域では、ヘリシティ（注7）を持つ「ヘリカル超伝導状態」が現れます。この状態では、電子対の対称性は互いに直交する二つの成分を線形に重ね合わせた「らせん状の構造」で表されます。さらに温度を下げると、電子対が「右回り」または「左回り」のカイラリティ（注8）を持つ「カイラル超伝導状態」へと変化します。この状態では、電子対の対称性は複素数（ $A \pm iB$ ）で表され、 $A+iB$ 、 $A-iB$ はそれぞれ右回り、左回りの電子対に対応します。一方、磁場を強くすると、電子対のスピンが磁場方向へ向くことで、高磁場環境に適した一成分の波動関数で記述される超伝導状態へと変化します。このように、温度や磁場に応じて超伝導状態が切り替わる振る舞いは、スピン一重項超伝導体に現れることは無く、スピン三重項超伝導体のみが示しうる特性です。

さらに、これら三つの超伝導状態はいずれもトポロジカル超伝導状態であり、渦糸中心や試料端には「マヨラナ粒子」の出現が期待されます。したがって本研究は、 $K_2Cr_3As_3$ がマヨラナ粒子を実現する有望な候補物質であることを示しました。マヨラナ粒子は、従来の量子ビットよりも環境ノ

PRESS RELEASE

イズに強い量子ビットとして機能すると期待されており、次世代トポロジカル量子コンピューターへの応用が期待されています。本研究成果は、 $K_2Cr_3As_3$ が次世代トポロジカル量子コンピューターの基盤材料となる可能性を世界に先駆けて示したものです。

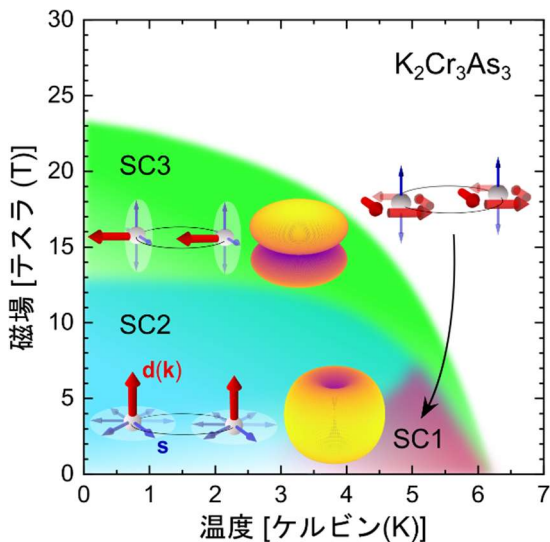


図 1. $K_2Cr_3As_3$ の c 軸磁場下における温度・磁場相図。温度や磁場を変化させることで、性質の異なる 3 つの超伝導状態 (SC1, SC2, SC3) が実現します。相図内のイラストは、各相における超伝導電子対軌動関数の対称性 (黄色) とスピン構造を模式的に表しています。白色の球は電子、青色の矢印は電子スピンの方向、赤色の矢印は電子対のスピン構造を特徴づける物理量「 d ベクトル」の方向を表しています。 $K_2Cr_3As_3$ は約 23 テスラという強磁場下においても超伝導状態を維持するという驚異的な性質を持ちます。これは地磁気 (約 50 マイクロテスラ) の約 46 万倍に相当する磁場です。

<社会的な意義>

本研究は、スピン三重項超伝導およびトポロジカル超伝導の理解を大きく前進させる成果です。さらに、一つの物質中で複数のトポロジカル超伝導状態を温度や磁場によって制御できることを示したことで、将来的なトポロジカル量子コンピューターの材料設計や量子デバイス開発への貢献が期待されます。

■論文情報

論文名: Multiple Phases in $K_2Cr_3As_3$: A Playground for Manipulating Topological Superconductivity

掲載誌: *Physical Review Letters*

著者: 小川晟吾、三好智己、内田早紀、俣野和明、川崎慎司、稲田佳彦、鄭国慶

DOI: <https://doi.org/10.1103/kykd-2nj4>

URL: <https://doi.org/10.1103/kykd-2nj4>

■研究資金

本研究は、科研費 (No. 19H00657, No. 22H04482, No. 26K07015) 及び岡山工学振興会の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

注 1: トポロジカル超伝導体、トポロジカル絶縁体、トポロジカル物質

トポロジー (位相幾何学) は数学の分野の一つであり、形が連続するか否かを議論する学問である。例えば、トポロジーの考えではドーナツとコーヒーカップは同一と考えられるが、ボールは違うものとみなされる。これはドーナツとコーヒーカップは穴が 1 つ空いており連続的に変形するこ



PRESS RELEASE

とが可能であるが、ボールには穴がなくドーナツとは異なるものとみなされるためである。ここでは、穴の数をトポロジカル不変数という。物理的性質をトポロジカル不変数で記述される物質はトポロジカル物質と呼ばれる。トポロジカル超伝導体やトポロジカル絶縁体などが典型例である。

なお、超伝導は金属がある臨界温度を超えて冷却されたときに起こる、電気抵抗がゼロになる現象。超伝導を起こす物質を超伝導体と呼ぶ。超伝導状態にあるときは、電気がエネルギーを失わずに物質の中を流れる。リニア新幹線や医療機器の MRI 等にすでに応用されている。

注 2：量子コンピューター

量子の「重ね合わせ」や「量子もつれ」を利用して演算を行うコンピューター。量子情報の担い手（量子ビット）には、電荷、スピン、磁束、偏光などさまざまな物理量が利用される。しかし、これらの量子ビットは周囲の環境との相互作用によって量子情報が壊れやすいことが課題となっている。一方、トポロジカル量子コンピューターでは、空間的に離れた複数のマヨラナ粒子の組み合わせに量子情報を記録することで、局所的な環境ノイズの影響を受けにくい量子計算の実現が期待されている。

注 3：マヨラナ粒子

自然界には粒子と反粒子が対となって存在し、一般に粒子と反粒子が異なるものである。粒子と反粒子が同一になる特殊な場合があり、その粒子のことをマヨラナ粒子と呼ぶ。イタリアの天才物理学者 E. マヨラナにちなんだもの。

注 4：スピン三重項超伝導

2 つの電子がそのスピン（電子の自転）の向きを同じ方向にして対を作り、それによって起こる超伝導をスピン三重項超伝導という。それに対して、2 つの電子がそのスピンを逆向きにして作った対によって引き起こされる超伝導をスピン一重項超伝導という。現在までに発見された超伝導体は、圧倒的大多数はスピン一重項超伝導体である。

注 5： $\text{K}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$

クロム（Cr）、ヒ素（As）、カリウム（K）から構成される六方晶系の化合物で、スピン三重項超伝導候補物質として知られている。

注 6：核磁気共鳴（NMR：Nuclear Magnetic Resonance）

磁場中に置かれた原子核が、特定の周波数を持つ電磁波（ラジオ波）と共鳴し、そのエネルギーを吸収・放出する現象。超伝導体に対して NMR 測定を行うことで電子対の対称性を調べることができる。

注 7：ヘリシティ

ネジの進行方向と回転方向の組み合わせのように、ある方向に対して右ネジまたは左ネジの対応



PRESS RELEASE

関係を持つ性質をヘリシティという。超伝導状態において、電子対の状態がこのようならせん状の特徴を持つ場合、これをヘリカル超伝導状態と呼ぶ。

注8：カイラリティ

右手と左手のように、鏡に映した状態と元の状態が別物になるとき、その状態はカイラリティを有しているという。超伝導状態において、電子対が右回り、または左回りといった自発的な回転運動の方向性を持つ場合、これをカイラル超伝導状態と呼ぶ。

<お問い合わせ>

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域
(理学部物理学科)

教授 鄭 国慶

(電話番号) 086-251-7813

(FAX) 086-251-7830



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



岡山大学は持続可能な開発目標(SDGs)を支援しています。

