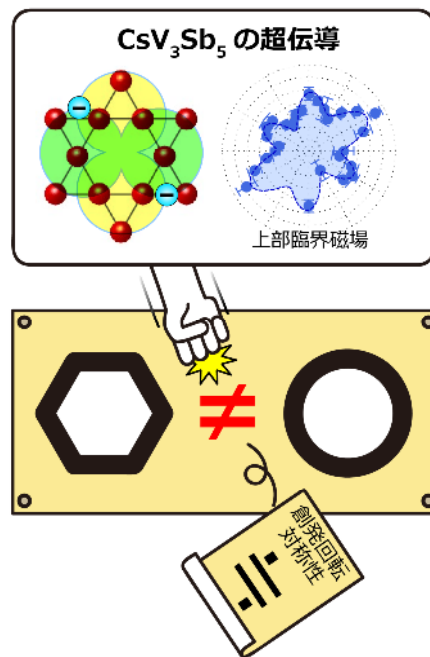


超伝導の世界でも、六角形と円は違うのだ

— 「創発回転対称性」の破れを発見 —

概要

超伝導の世界においては、「六角形型の結晶構造（六方晶）を持つ超伝導物質では、六角形構造を反映する超伝導の性質が極めて観測しづらい」という「創発回転対称性」と呼ばれる性質があります。この「六角形であるにもかかわらず円のような性質が観測されてしまう」性質は非常に強力なもので、1980年代に提唱されて以降、この性質が破れる明確な観測例は知られていませんでした。京都大学大学院工学研究科 米澤進吾 教授、福島和実 大学院理学研究科修士課程学生（研究当時）、小畑慶人 同修士課程学生（研究当時）、大学院工学研究科博士課程学生 山根聡一郎、高等研究院 前野悦輝 教授らの研究グループは、バナジウム化合物 CsV_3Sb_5 において、超伝導が破壊される磁場である上部臨界磁場の方向依存性を超精密に測定しました。その結果、上部臨界磁場が六方晶の結晶構造を反映した明確な振動を示すことを観測し、「創発回転対称性」が破れていることを発見しました。このことは、 CsV_3Sb_5 において極めて特異な超伝導が実現していることを示唆しており、この新種の超伝導状態の基礎・応用両面の研究展開に向けた重要な基礎付けとなります。本研究結果は、2024年4月11日にイギリスの国際学術誌「Nature Communications」にオンライン掲載されました。



概念図: 新奇超伝導体 CsV_3Sb_5 の超伝導上部臨界磁場が 60 度周期の振動を示すことを発見し、「超伝導の世界では六角形と円がほぼ同じ」という創発回転対称性が破れていることを初めて実証しました。

1. 背景

超伝導とは、ある温度以下で物質の電気抵抗が完全に消失する現象のことです。超伝導は電子がクーパー対というペアを作ることによって生じます。いくつかの超伝導体では奇妙な性質を持つクーパー対が超伝導を担っていると考えられており、それらは非従来型超伝導体¹と呼ばれて注目されています。これまでにない性質を持つ「新種」のクーパー対を発見することは、超伝導の基礎研究の大きな目標の一つであり、超伝導の新規応用に向けても大事な意味を持っています。

超伝導の基本的な性質、特に磁場中での性質は、超伝導基礎理論の一つであるギンツブルグ-ランダウ (GL) 理論²によって説明されます。この GL 理論によると、六角形を基本とする結晶構造 (六方晶³) の物質では、六角形を反映した超伝導特性の出現が強く抑制されると予想されています。つまり、六角形構造は無視され、角のない円のような性質しか示せないということです。この「超伝導の世界においては六角形 ≒ 円」であるという性質は「創発回転対称性 (Emergent rotational symmetry)⁴」と呼ばれ、1980 年代に提唱されました。これは日常感覚からすると妙な感じもしますが、じつは超伝導において非常に強力な性質で、少くとも普通でない性質を持つクーパー対であってもこの性質は保たれます。実際、創発回転対称性が明確に破れている観測例はこれまでに知られていませんでした。

2. 研究手法・成果

セシウム-バナジウム-アンチモン化合物 CsV₃Sb₅ は 2019 年に発見された六方晶物質です。参考図表 1(1) に示すように、この物質ではバナジウム原子がカゴメ格子⁵という珍しい構造を形成しており、実際にその構造に起因する興味深い性質が発現していることから、世界的に激しい研究競争が行われています。この物質は絶対温度 2.8 ケルビン以下で超伝導を示し、その新奇的な性質が注目されています。

京都大学大学院工学研究科 米澤進吾 教授らの研究グループは、中国・北京工科大学の Zhiwei Wang 教授らのグループと共同で、CsV₃Sb₅ の超伝導状態の基礎的性質を明らかにするため、磁場方向を精密に制御しながら超伝導状態における比熱を測定する研究を行ってきました。比熱は不純物や表面などの影響を受けず、超伝導の本質的な振舞いを明らかにするのに適した強力なプローブです。本研究では、超伝導が壊れる磁場である上部臨界磁場 H_{c2} を比熱の変化から特定し、 H_{c2} の磁場方向依存性を精密に測定することで、創発回転対称性について検証しました。創発回転対称性が成り立つ場合、参考図表 1(2) のように振動のない等方的な H_{c2} が観測されると期待されます。しかし、実際は参考図表 1(3) に示すように、 H_{c2} のカゴメ格子面内における磁場方向変化が 60 度周期の振動を示すことを見出しました。これはまさに創発回転対称性で禁止されていた、六角形の性質を反映した振動です。さらにこの振動の温度変化などを詳細に観測・解析することで、この物質において確かに創発回転対称性が破れていることを明確にしました。この結果は、40 年前に提唱された創発回転対称性を破る「新種」の超伝導が CsV₃Sb₅ において実現していることを示しています。

3. 波及効果、今後の予定

CsV₃Sb₅ では、六方晶カゴメ構造に起因した興味深い超伝導が議論されていますが、実験結果の解釈は様々に統一的理解には至っていません。本研究は全く新しい方法でこの物質の超伝導の新奇性を示したものです。この物質では、「二成分超伝導⁶」という二種類のクーパー対が混じったような状態 (参考図表 2) が実現している可能性が指摘されています。もしそのような超伝導が実現しており、さらにいくつかの条件がクリアされていれば、観測された創発回転対称性の破れを説明できます。

二成分超伝導は、クーパー対の混ざり方によってさまざまな新奇的な性質を示すといわれており、例えばクー

パー対が自転して自発磁化を持つ「カイラル超伝導」や、クーパー対が自発的にある方向にそろって「ネマティック超伝導」が実現する可能性もあります。どのような二成分超伝導が実際に実現しているかを調べていくことが今後の重要な課題の一つです。

二成分超伝導実現は基礎だけでなく応用面でも注目されており、ある種のカイラル超伝導を量子計算素子に使うという可能性も提唱されています。本研究では、二成分超伝導の可能性を新しい方法で示すことに成功しました。これは、今後のより詳細な研究への重要な足掛かりとなるだけでなく、二成分超伝導の応用に向けても重要な成果であると考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究を行うにあたり、日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号 JP20H05158、JP22H04473、JP23H04861、JP20F20020、JP17H06136、JP22H01168）、日本学術振興会の Core-to-Core Program（課題番号 JPJSCCA20170002）、日本学術振興会の二国間交流事業（JPJSBP120223205）、公益財団法人京都大学教育研究振興財団の研究活動推進助成、京都大学の研究費獲得支援事業いしずえ（2020 及び 2023 年度）、および公益財団法人村田学術振興・教育財団の研究助成の支援を受けました。本研究で用いた実験装置（とくに比熱測定装置）の一部は京都大学理学研究科研究機器開発支援室に作製いただいたものです。また、実験に用いる液体ヘリウムなどの寒剤供給について、京都大学低温物質管理部門のサポートを受けました。

<用語解説>

1. 非従来型超伝導

最もシンプルな超伝導理論の範疇で説明できないような性質を持つ超伝導のこと。例えば、超伝導クーパー対を特徴づける位相という量が特殊な方向変化を持つようになる「p 波」や「d 波」の超伝導などがこれまでに見つかっています。

2. ギンツブルグーランダウ（GL）理論

超伝導の基礎理論の一つ。特に、磁場中での超伝導の性質を記述するのに適しています。なお、この理論の提案者の一人であるギンツブルグは、この功績により 2003 年ノーベル物理学賞を受賞しました。なお、ランダウは別の業績で以前にすでにノーベル物理学賞を受賞しています。）

3. 六方晶

正六角形を基本とする結晶構造。より厳密には、結晶構造のうち、全体を 60 度回転させたときに元の構造と重なるものを指します。正六角形は、空間を敷き詰めることのできる正多角形のうち辺の数が最も多いものであり、そのことが創発回転対称性と深く関係しています。

4. 創発回転対称性

六方晶における GL 理論によって導かれる、「六方晶においては 4 次までの GL 理論の式の形が、結晶がない場合、つまり円対称な場合、とまったく同じである」という性質。1980 年代の非従来型超伝導の研究の中で提唱されました。このため、GL 理論に従う超伝導特性（例えば上部臨界磁場）は六方晶の性質を反映しないことになり、一見期待してもいいような 60 度周期の性質は実は現れないこととなります。より厳密には、高次の項の寄与で 60 度周期性が現れる場合もあるので、温度変化などの詳細な吟味も必要です。

5. カゴメ格子

イスラエルの国旗のシンボルを無限に並べたような、六角形と三角形からなる格子（参考図表 1(1)）。日本古来の竹カゴの網目に似ていることから、国際的に「籠目」格子（Kagome lattice）と呼ばれています。カゴメ格子を持つ物質は、様々な興味深い性質を示すと予言されており、以前から物性科学において注目されています。

6. 二成分超伝導

2種類のクーパー対が重なり合っ一つの超伝導を出現させている状態（参考図表 2）。非従来型超伝導の一種ですが、その中でも特に珍しく興味深い超伝導状態です。特に、重なり合い方が複素数的であると、「カイラル超伝導」という、自発磁性を持つ超伝導となり、トポロジカル量子計算への応用等にもつながりえます。

<研究者のコメント>

この実験は、磁場の強さだけでなく方向も制御しながら行う必要があります、通常の実験に比べて非常に時間がかかります。その中で、当時修士課程の学生たちが非常に粘り強く研究してくれました。初めて 60 度周期の振動が見えたときは目を疑うほど驚きました。超伝導研究の長い歴史の中でも初めての「新種」超伝導の発見を論文として報告することができてほっとしています。

<論文タイトルと著者>

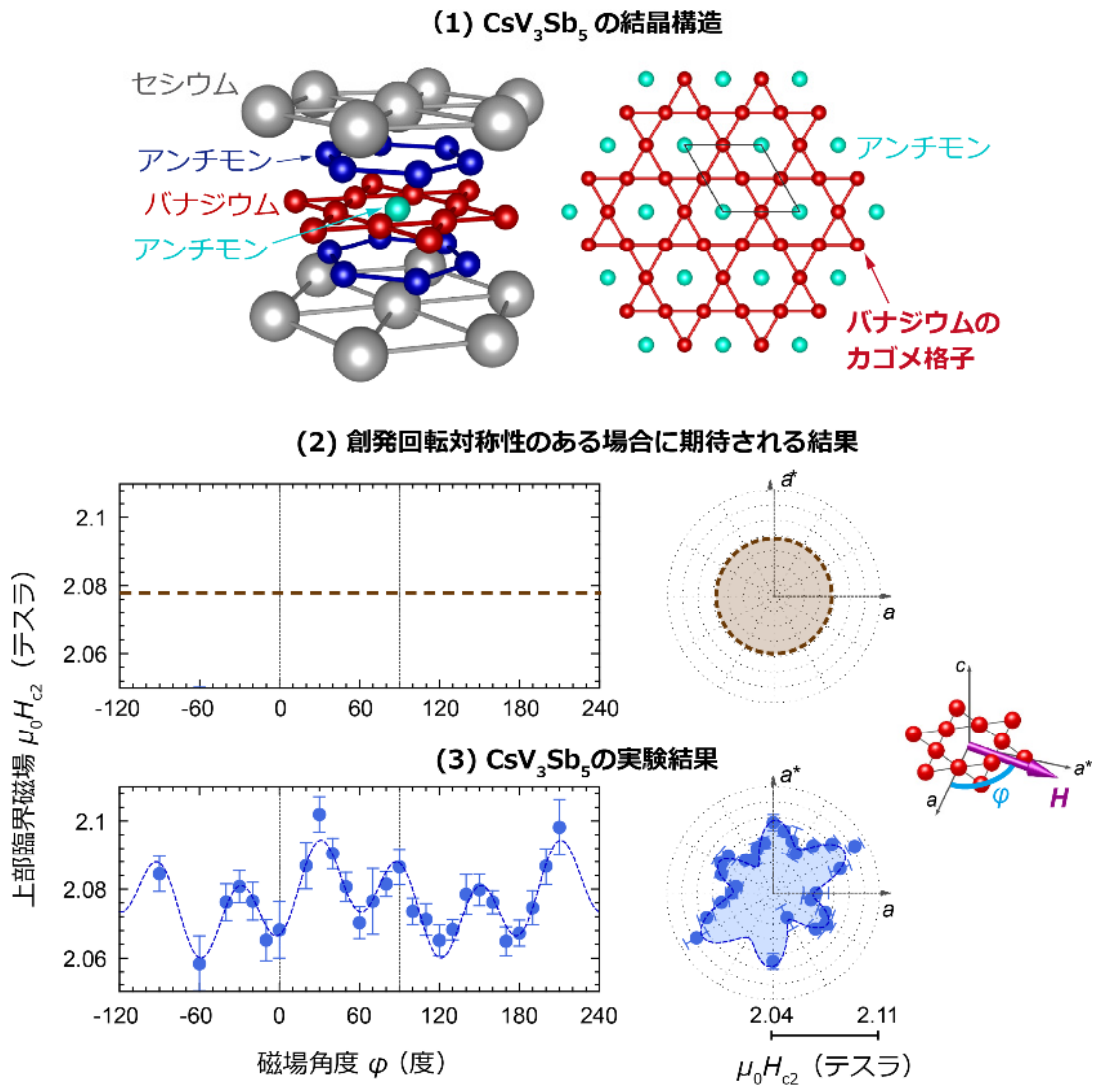
タイトル：Violation of Emergent Rotational Symmetry in the Hexagonal Kagome Superconductor CsV_3Sb_5
(六方晶カゴメ超伝導体 CsV_3Sb_5 における創発回転対称性の破れ)

著者：Kazumi Fukushima, Keito Obata, Soichiro Yamane, Yajian Hu, Yongkai Li, Yugui Yao, Zhiwei Wang,
Yoshiteru Maeno, Shingo Yonezawa

掲載誌： *Nature Communications*

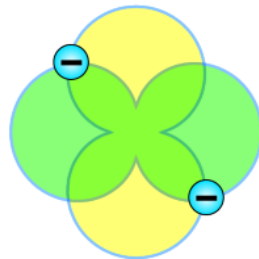
DOI： 10.1038/s41467-024-47043-8

< 参考図表 >



参考図表 1: 本研究成果の概略図。(1) バナジウムのカゴメ格子をもつ六方晶化合物 CsV₃Sb₅ の結晶構造。(2) 通常、創発回転対称性がある場合に期待される上部臨界磁場 H_{c2} の磁場角度 ϕ 依存性。(3) 実際の実験結果。六方晶の結晶構造を反映した 60 度周期の振動が観測され、創発回転対称性が破れていることを示しました。

二成分超伝導の電子対 (クーパー対)



参考図表 2: 二成分超伝導の模式図。縦 (黄色) と横 (緑色) の二種類の超伝導が重ね合わさってできているのが二成分超伝導であり、その混ざり方によってさまざまな興味深い性質を示します。