

# 纏(もつ)れ結晶に起因した「超伝導反強磁性」状態を発見

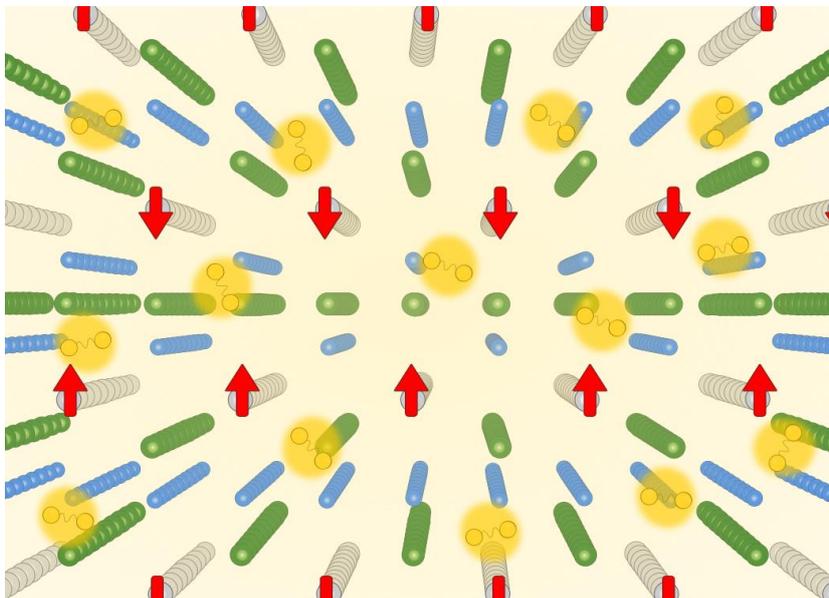
## 概要

京都大学大学院理学研究科の木船茉悠 修士課程学生(研究当時)、尾方司貴 同修士課程学生、金城克樹 同博士課程学生、真砂全宏 同博士課程学生(現：島根大学総合理工学部助教)、谷口貴紀 同博士研究員(現：東北大学金属材料研究所助教)、北川俊作 同助教、石田憲二 同教授の研究グループは、ドイツのマックス・プランク研究所(MPI)ドレスデンのグループと共同で、局所的に空間反転対称性が破れた<sup>1</sup>結晶に起因した超伝導<sup>2</sup>相内部で実現する特殊な反強磁性<sup>3</sup>状態を発見しました。

近年、特殊な結晶構造が生み出す超伝導状態や磁気状態に注目が集まっています。CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>は、結晶構造自身は空間反転対称性をもっていますが、超伝導や磁氣的性質に重要なセリウム原子サイトでは空間反転対称性が破れている特殊な結晶構造(纏れ結晶<sup>4</sup>)を有しています。このような結晶では、結晶構造に起因した2種類の超伝導状態が実現することが理論的に指摘されていましたが、ごく最近、MPIドレスデンのグループが理論と比較可能な超伝導状態を発見しました。

本研究グループは、CeRh<sub>2</sub>As<sub>2</sub>に対して核四重極共鳴<sup>5</sup>実験を行い、あらたに、超伝導相の内部に反強磁性転移が存在することを発見しました。反強磁性と超伝導が共存する物質ではほとんどの場合、反強磁性転移後に超伝導になる、“反強磁性超伝導”状態であり、本物質で実現している“超伝導反強磁性”状態はごくまれです。本成果により纏れ結晶の物質では、特異な超伝導に加え、特異な磁気状態を示すことも明らかになりました。今後、この“超伝導反強磁性”と2種類の超伝導がどのように関係しているかを研究していく予定です。

本成果は、2022年2月3日(現地時間)にアメリカ物理学会が発刊する「Physical Review Letters」誌にオンライン掲載されました。



超伝導状態を背景に反強磁性が現れる“超伝導反強磁性”状態のイメージ図。

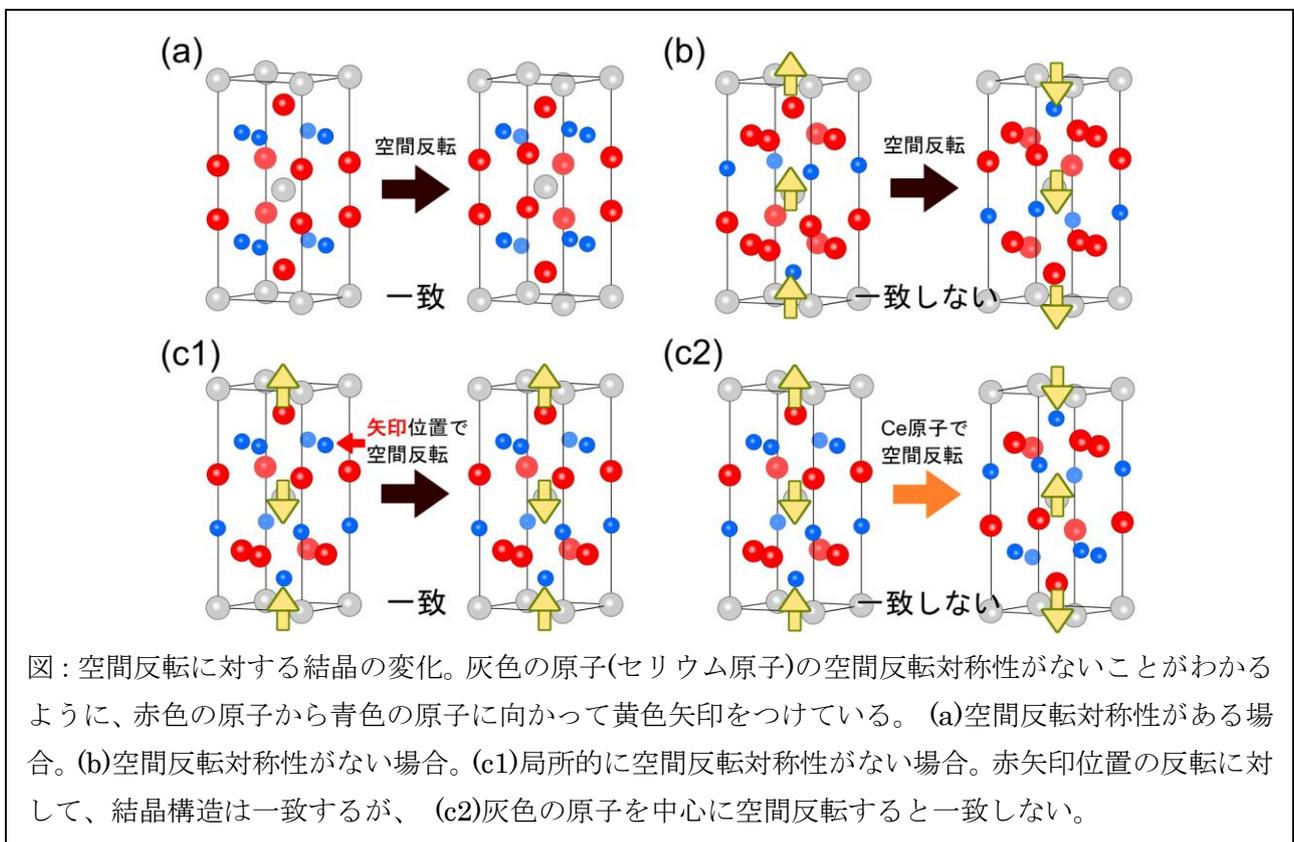
## 1. 背景

近年、特殊な結晶構造でのみ実現する超伝導状態や磁気状態に注目が集まっています。結晶構造の分類方法には色々ありますが、超伝導や磁性にとって大事な対称性の1つに空間反転に対する対称性があります。

空間反転、つまり上が下になって、左が右になるあべこべの世界になったときでも結晶構造がもともとと同じものは、「空間反転対称性がある」といいます(図の(a))。空間反転対称性がある結晶構造をもつ超伝導体では、偶パリティ<sup>6</sup>のスピナー重項超伝導状態、もしくは奇パリティのスピナー三重項超伝導状態のどちらかが実現します。

一方、空間反転対称性がない結晶(図の(b))での超伝導では偶パリティと奇パリティが混ざった超伝導状態になります。ただし、どちらの場合も、原則一つの超伝導体につき、一つの超伝導状態であることに変わりありません。

その原則が破れているのが、本研究の対象物質である  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  です。 $\text{CeRh}_2\text{As}_2$ (図の(c1)および(c2))は、結晶構造自身は空間反転対称性をもっていますが、超伝導や磁気的性質に重要なセリウム原子を中心に空間反転をすると一致しない、つまり、セリウム原子サイトでは空間反転対称性がない結晶構造をもっています。別の見方をすると、結晶構造中に特殊な対称操作で結びつく2種類のセリウムが存在していることを意味しています。このような特殊な結晶構造を「縫(もつ)れ結晶」と呼ぶこともあります。縫れ結晶をもつ  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  では、2つのセリウム原子が別の超伝導状態になることが可能なため、2つの原子が同じ位相<sup>7</sup>をもつ偶パリティ超伝導状態と、2つの原子で異なる位相をもつ奇パリティ超伝導ペア密度波状態との2種類が現れることが理論的に提案されています。また、この2種類の超伝導状態は磁場をかけることで移り変わります。実際に、つい最近、MPI ドレスデンのグループは  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  において2つの超伝導相の存在を実験で確認しました。このように縫れ結晶に起因した特異な超伝導状態をもつ  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  では、その磁気状態についても特異である可能性がありましたが、その性質はこれまで詳しく調べられていませんでした。



## 2. 研究手法・成果

本研究グループは、 $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  に対して核四重極共鳴実験を行い、あらたに、超伝導相の内部に反強磁性転移が存在することを発見しました。反強磁性と超伝導が共存する物質ではほとんどの場合、反強磁性転移した後に超伝導を示す、"反強磁性超伝導"状態で、本物質で実現している "超伝導反強磁性"状態の報告はごくまれです。この特異な磁気状態は、超伝導と同様、縫れ結晶に起因したものであると考えられます。

## 3. 波及効果、今後の予定

本研究で明らかになった特異な磁気状態は、縫れ結晶に起因した特異な超伝導状態と関係していると考えられ、今後、この特徴を生かした新たな超伝導デバイスの開発につながる可能性があります。 $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  の超伝導は発見から日が浅く不明な点も多いため、今後のさらなる研究によって、特異な超伝導状態、磁気状態の詳細を解明していく予定です。

## 4. 研究プロジェクトについて

本研究は日本学術振興会 科学研究費補助金（課題番号：JP15H05745、JP17K14339、JP19K03726、JP16KK0106、JP19K14657、JP19H04696、JP19H00646、JP20H00130）の支援を受けて行われました。

また、寒剤（液体ヘリウム 液体窒素）の使用に関して、京都大学環境安全保健機構低温物質管理部門の大きな支援を受けて実施されました。

### <用語解説>

注1 **空間反転対称性の破れ**：3次元の空間座標(x, y, z)を(-x, -y, -z)に変換する操作のことを空間反転操作と呼び、この操作を行ったときに元の状態と変わらないことを「空間反転対称性がある」といいます。

また、空間反転操作によって元の状態から変わることを「空間反転対称性が破れている」といいます。

注2 **超伝導**：電気抵抗がゼロとなり、完全反磁性を示す状態のこと。

注3 **反強磁性**：隣り合う電子が持つ磁石(スピン)が互いに反平行に整列する状態のこと

注4 **縫(もつ)れ結晶**：結晶中では、それぞれの原子は並進操作(平行移動)または回転操作、鏡映操作、空間反転操作によって他の原子と結びついています。物質によっては、並進操作と回転操作(らせん移動)、または並進操作と鏡映操作(グライド移動)の組み合わせによってのみ他の原子と結びつくものが存在します。そのような物質のことを非共型結晶、または縫れ結晶と呼びます。

注5 **核四重極共鳴**：原子核の性質を使って、電子の状態を調べる測定方法。電気抵抗や磁化率測定と異なり、磁気的な性質や電氣的性質のわずかな変化も敏感に測定できる利点がある。

注6 **パリティ**：空間反転対称性がある結晶の場合、空間反転操作後の超伝導波動関数は偶(もと同じ)か、奇(もとのものにマイナス1をかけた状態)かのいずれかになります。これをパリティと呼びます。

また、電子の入れ替えに対して波動関数が奇になる制限から、偶パリティの場合、スピン一重項超伝導(電子の入れ替えに対して奇)、奇パリティの場合、スピン三重項超伝導(電子の入れ替えに対して偶)になります。

ここで、スピン三重項超伝導は数万種類ある超伝導体の中でも 10 種類以下しかないとても珍しい超伝導状態です。

注7 **超伝導の位相**：超伝導状態では、すべての電子の波動関数を 1 つの位相(波における特定の位置、山とか谷とかのこと)で表すことができます。通常の超伝導状態では、全体の位相が揃った状態になりますが、奇パリティ超伝導ペア密度波状態では位相が波のようにセリウム原子ごとに変化します。

#### <研究者のコメント>

複数の超伝導相や"超伝導反強磁性"状態など  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  ではこれまでの超伝導にはなかった特殊な状態がたくさん見つかっています。さらなる研究によって、この特殊な結晶でおきる特殊な超伝導状態、磁気状態をさらに明らかにしていきたいです。(北川)

#### <論文タイトルと著者>

タイトル：Observation of antiferromagnetic order as odd-parity multipoles inside the superconducting phase in  $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  ( $\text{CeRh}_2\text{As}_2$  の超伝導相内部に存在する奇パリティ多極子としての反強磁性秩序の観測)

著者：Mayu Kibune †, Shunsaku Kitagawa †, \*, Katsuki Kinjo, Shiki Ogata, Masahiro Manago, Takanori Taniguchi, Kenji Ishida, Manuel Brando, Elena Hassinger, Helge Rosner, Christoph Geibel, and Seunghyun Khim († : equal contribution、\* : 責任著者)

掲載誌：Physical Review Letters DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.057002>

#### <お問い合わせ先>

北川俊作(きたがわ しゅんさく)

京都大学大学院理学研究科・助教

Twitter : @QM\_phys\_kyoto

YouTube : [https://www.youtube.com/channel/UC29mFGKxSkn0lrj03\\_xyrHg](https://www.youtube.com/channel/UC29mFGKxSkn0lrj03_xyrHg)