

# ミュー粒子を使って超伝導電子ペアの状態を解明

## 隣接する超伝導体の作る落とし穴に警鐘

### 概要

最近注目度が増している量子物質とは、日常的なスケールでの性質が量子力学効果から創発する物質で、超伝導体はその最たる例です。中でも銅酸化物高温超伝導体など、標準的な理論の枠では説明できない「非従来型超伝導体」が、現代の基礎研究の中心対象です。ルテニウム酸化物で約30年前に発見された超伝導も非従来型の典型例です。長年、電子ペアが磁石のような性質を保って量子情報を電気抵抗ゼロで運べる、スピン三重項超伝導という画期的な状態が実現していると考えられてきました。ところが最近の核磁気共鳴の実験から以前の結論をくつがえす結果が明らかになったため、ほかの実験手法で検証することが重要となっていました。

京都大学・高等研究院の豊田理研-京大連携拠点 (TRiKUC) の松木久和特定助教 (現、京都大学化学研究所・助教)・前野悦輝連携拠点教授、スイスのパウル・シェラー研究所 (PSI) のルステム・カサノフ博士、東京大学物性研究所の湯池宏介大学院生らの研究グループは、ミュー粒子を使った磁気共鳴の実験に新しい手法を導入することで、ルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導はスピン一重項で矛盾なく説明できることを確認しました。その過程で、超伝導体についてのこれまでの多くのミュー粒子実験の手法に思わぬ落とし穴があったことを明らかにしました。ミュー粒子ビームを効率よく照射するために複数の超伝導単結晶試料を並べた場合、マイスナー効果を示す隣接試料からの漏れ磁場が大きな信号を生んでいたのです。本研究によって、原子核とは相補的に、ミュー粒子を使った磁気共鳴による超伝導体の研究がさらに発展すると期待されます。本研究成果は2026年2月9日に米国物理学会刊行の学術誌フィジカル・レビュー・レターズ誌にオンライン掲載されます。

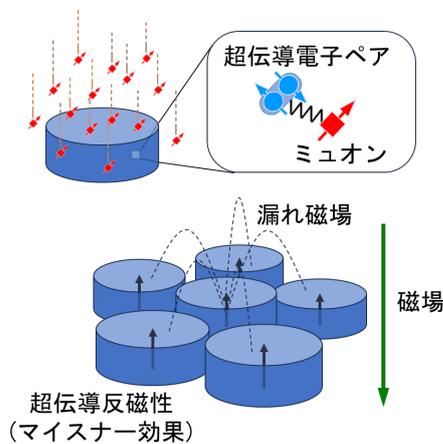


図1: 超伝導体の内部に打ち込んだミュー粒子による電子ペアの状態の測定原理。複数の試料を並べた場合、漏れ磁場による問題点が発生する

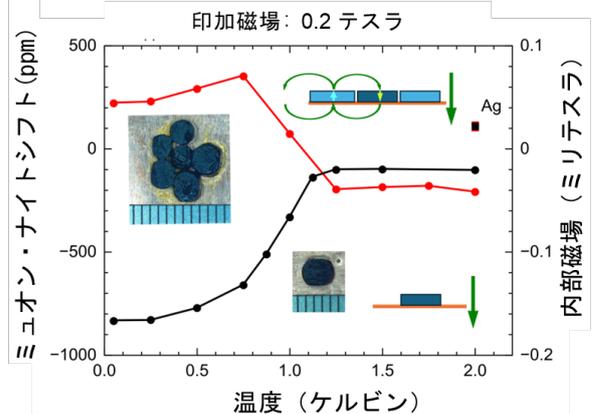


図2: 従来の実験手法の落とし穴。複数の結晶を並べた場合 (赤)、本来とは逆向きの信号が発生する。結晶を1個だけ使うこと (黒) で正しい信号が得られる。

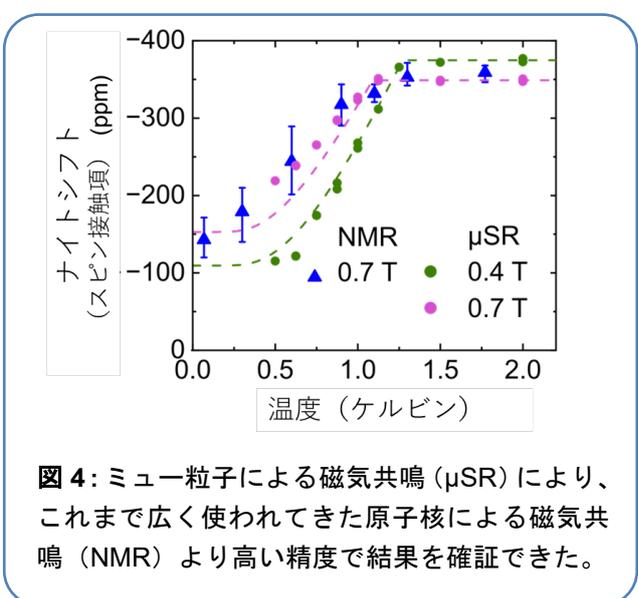
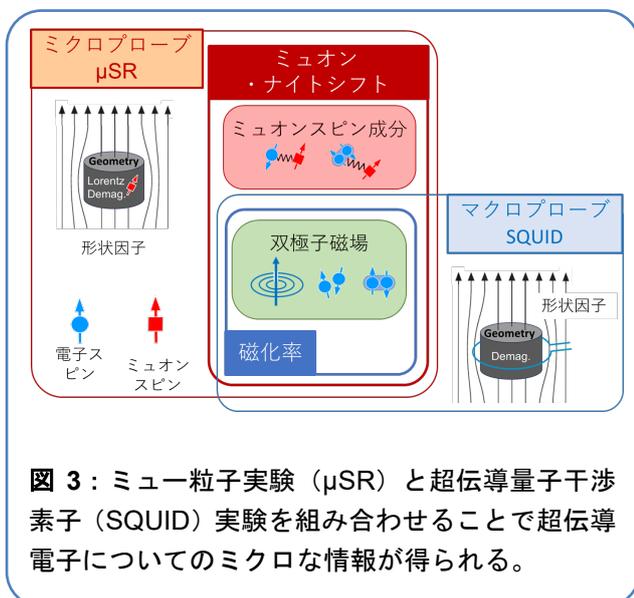
## 1. 背景

ルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導は 1994 年に前野らによって発見され、銅酸化物高温超伝導体と同じ結晶構造で量子物質に典型的な非従来型の超伝導を示します。常伝導状態の性質は実験的にも理論的にも詳細にわたり理解できており、極めて純良な試料結晶も作れることから、超伝導基礎研究の重要な対象となってきました。しかし、超伝導状態の対称性は依然として未解明であり、研究者の間で長年議論が続いています。2019 年になって、超伝導電子ペアのスピンの状態を調べる核磁気共鳴 (NMR) で、それまでの結論をくつがえす展開がありました。その後の新しい視点での様々な研究成果にもかかわらず、基本的な超伝導状態、つまり超伝導秩序変数の対称性はいまだに明らかになっていません[1, 2]。現在は、過去に電磁パルスによる発熱が問題となった NMR と相補的な方法でスピン状態の確認ができるか、超伝導状態で内部磁場が発生する時間反転対称性の破れは電子ペアの磁氣的性質によるものなのか、超音波の音速変化とひずみを加える実験の間での矛盾点はいかに理解できるのか[3]、などについて研究が進められています。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、電子に似た素粒子ミュー粒子 (ミューオン、ミュオン) を超伝導体中に打ち込んでの磁気共鳴 ( $\mu\text{SR}$ ) によって、超伝導電子ペアのスピン状態を決定することに成功しました。京都大学で育成したルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の純良単結晶を使い、スイスの大型加速器施設 PSI で 2022 年から稼働を始めた新型  $\mu\text{SR}$  装置で、超伝導体の内部に生じるごくわずかな磁場の変化を調べました。この変化は「ミュオン・ナイトシフト」と呼ばれ、物質の中で電子がどのようにペアを作って超伝導状態になるのかを知る重要な手がかりになります。以下に述べるように、これまで問題視されていなかった盲点を回避し、さらに超伝導量子干渉素子 (SQUID) での測定結果と合わせる新しいプロトコルを導入することで、超伝導状態に入るとナイトシフトが減少することが明確になりました。この結果により、ルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導がスピン重項で矛盾なく説明できることを確認しました。

新型  $\mu\text{SR}$  装置では、磁場の精密測定に用いる銀の標準試料と超伝導体試料の信号を独立に測定できるようになり、試料内の磁場変化の検出精度が格段と向上しました。その結果、これまでしばしば使われてきた「小さな結晶を複数並べて信号強度を増す方法」に深刻な落とし穴があることを明らかにしました。隣接する結晶の超伝導マイスナー効果による漏れ磁場が印加磁場と同じ方向に加わり、実際には存在しない正の信号として測定結果に現れてしまうのです (図 1、2)。そこで本研究では、単一の結晶だけを用いて測定を行い、さらに同じ試料に対してマイクロ測定であるミュオン・ナイトシフトと通常のマクロ測定による直流磁化率を組み合わせることで、ミュー粒子と電子のスピン同士の相互作用による信号だけを抽出することができました (図 3)。その結果、最近の NMR による結果と合致する結果を様々な磁場の下で高い精度で明らかにしました (図 4)。



- [1] Y. Maeno, A. Ikeda & G. Mattoni, “*Thirty years of puzzling superconductivity in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>*”, Nature Physics **20**, 1712–1718 (2024). DOI: 10.1038/s41567-024-02656-0
- [2] Y. Maeno, S. Yonezawa & A. Ramires “*Still Mystery after All These Years --Unconventional Superconductivity of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>--*”, Journal of the Physical Society of Japan **93**, 062001-1-45 (2024). DOI: 10.7566/JPSJ.93.062001
- [3] G. Mattoni, T. Johnson, A. Ikeda, S. Paul, J. Bobowski, M. Sigrist, Y. Maeno, “*Direct evidence for the absence of coupling between shear strain and superconductivity in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>*”, Nature Communications. **17**, 700 (2026). DOI: 10.1038/s41467-025-67307-1

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究によって、原子核を用いる NMR とは相補的な手法として、ミュー粒子を使った  $\mu$ SR による超伝導体の研究がさらに発展すると期待されます。今回明らかになった、従来見過ごされてきた技術的問題点は、実験精度の向上とともに超伝導体に限らず、磁性体の研究でも注意が必要になります。非従来型超伝導体の基礎研究は、量子物質に対する新しい実験技術や理論の進展に直接結びついています。NMR では、電気抵抗が極めて小さな超伝導体では発熱の効果が問題になる可能性もあるため、 $\mu$ SR による超伝導の研究は今後、その相補的役割が益々重要となるでしょう。ルテニウム酸化物の超伝導体については、次のターゲットとして、外部からの磁場を排除した状態でのミュー粒子実験によって、時間反転対称性の破れた超伝導状態を理解するテーマに挑みます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究プロジェクトは、以下の資金の支援を受けて実施されました。

- 日本学術振興会 科学研究費補助金・基盤研究 (KAKENHI) Nos. JP22H01168, JP23K22439, JP24H01659, JP25K17346
- 京都大学教育研究財団 研究活動推進助成および豊田理研スカラ制度
- 東京大学物性研究所共同研究：ISSPkyodo-202501-GNBXX-0116

### <研究者のコメント>

非従来型の超伝導状態を完全に理解することは、現代の物理学でも極めて挑戦的なテーマになっています。そのよりどころとなる実験結果にも、専門家の間ですら意識されていなかった意外な技術的落とし穴がありうることを痛感しました。長年研究されてきた問題の解決には粘りと地道な努力が必要です。ルテニウム酸化物の超伝導については、残された重要な問題点が鮮明になっているので、一つ一つ解き明かして最終解決を目指します。(前野)

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Muon Knight shift as a precise probe of the superconducting symmetry of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>

(Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>の超伝導対称性を明らかにする高精度ミュオン・ナイトシフト)

著者：Hisakazu Matsuki, Rustem Khasanov, Jonas A. Krieger, Thomas J. Hicken, Kosuke Yuchi, Jake S. Bobowski, Giordano Mattoni, Atsutoshi Ikeda, Ryutaro Okuma, Hubertus Luetkens, and Yoshiteru Maeno

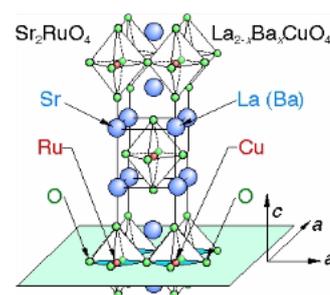
掲載誌：Physical Review Letters **136**, DOI : 10.1103/sgcz-9rc7

### <用語解説>

- ミュー粒子 (ミュオン、ミュオン)：電子と同じく素粒子の一種であるレプトンに分類される粒子です。電荷は電子と同じですが、質量は電子の約 207 倍と重く、平均寿命は約 2.2 マイクロ秒です。その後、電子 (または陽電子) とニュートリノに崩壊します。近年では、ミュー粒子が物質を高い透過力で通り抜ける性質を利用した「ミュー粒子透視 (ミュオグラフィ)」技術が発展し、ピラミッドや火山、原子炉などの巨大構造物の内部を、レントゲン撮影のように非破壊で可視化する手法として注目

されています。

- **ミュー粒子による磁気共鳴 ( $\mu$ SR)** : ミュー粒子 (ミュオン) のスピンの回転 (Rotation) や緩和 (Relaxation) を利用した実験手法です。磁場中では、ミュー粒子のスピンの特定の周波数で歳差運動を行います。この性質を利用して、物質中に打ち込まれたミュー粒子が感じる磁場の強さや不均一性、さらには磁場の揺らぎの時間スケールなどを、スピンの回転周波数や整列状態の時間変化として観測します。本研究では、正の電荷をもつミュー粒子を超伝導体に照射し、ミュー粒子の崩壊によって放出される陽電子の分布を解析することで、超伝導電子ペアのスピンの状態に関するミクロな情報を明らかにしました。
- **超伝導量子干渉素子 (SQUID)** : ジョセフソン接合を組み込んだ超伝導リングを用いた、極めて高感度な磁気センサーです。脳や心臓が発する微弱な磁場を測定する脳磁計・心磁計をはじめ、磁性材料の研究、地震計、さらには量子コンピュータにおける量子ビットの制御など、幅広い分野で利用されています。SQUID は、超伝導体に特有の量子化現象により、リングを貫く磁束が整数倍で変化する性質を持つことを利用しています。このため、リング両端間を流れる電流が磁束に応じて周期的に変化し、極めて小さな磁場の変化を高い精度で検出することができます。超伝導体や磁性材料の研究では、磁場や温度を精密に制御できる測定装置に、SQUID と接続された超伝導コイルを組み込んだシステムが広く用いられています。
- **非従来型超伝導** : 超伝導とは、金属中の電子が低温で電気抵抗ゼロの状態になる現象で、1911年にオランダの物理学者カメリン・オネスによって発見されました。超伝導が起こる温度は超伝導臨界温度 ( $T_c$ ) と呼ばれ、 $T_c$  以下では電子が互いにペアを形成し、ボース・アイシュタイン凝縮に類似した量子凝縮状態になります。この仕組みを説明する理論は、提唱者の名前にちなみ BCS 理論と呼ばれ、長年にわたって超伝導の標準理論として受け入れられてきました。一方、電子ペアの性質や相互作用が BCS 理論の枠組みでは十分に説明できない超伝導は「非従来型超伝導」と呼ばれます。代表的な例として、銅酸化物高温超伝導体、セリウムやウランを含む重い電子系物質の超伝導、鉄系超伝導体、そしてルテニウム酸化物超伝導体などが知られています。
- **ルテニウム酸化物超伝導体** : 銅酸化物高温超伝導体と同じ結晶構造を持ち、銅元素がルテニウム元素に置き換わった超伝導体です (図)。電子同士の強い相互作用や、多数の電子バンドが関与する電子構造をもち、超伝導臨界温度  $T_c$  は 1.5~3.5 ケルビンと低いものの、現代の「機能性量子物質」に求められる特徴を兼ね備えた非従来型超伝導体であるため、特に基礎研究の対象として注目されています。



- **スピン一重項電子ペア** : 電子は大きさ  $1/2$  のスピンと呼ばれる量子力学的な性質を持ちます。スピン一重項電子ペアとは、2つの電子のスピンの打ち消し合い、合成されたスピンのゼロとなるペアのことです。古典的な描像では、スピンの反平行に並んだ状態として理解することができます。一方、2つの電子のスピンの平行にそろったスピン三重項電子ペアからなる超伝導体も理論的に予測され、実験的な候補も複数報告されていますが、現時点では決定的に確認された例はありません。なお、スピン一重項電子ペアであっても、2つの電子が連星のように互いの周りを公転する状態をとる場合には、非従来型超伝導に分類されます。