

スピン自由度を持つ超伝導の実験的同定

—スピン三重項超伝導多重相における新現象—

概要

京都大学大学院理学研究科の金城克樹 博士課程学生(現：東北大学多元物質科学研究所助教)、藤林裕己同修士課程学生(研究当時)、松村拓輝同修士課程学生、堀文哉同博士課程学生、北川俊作同助教、石田憲二同教授の研究グループ(理学研究科物理学・宇宙物理学専攻物理学第一教室)は、東北大学金属材料研究所、九州大学アイソトープ統合安全管理センター、フランス原子力庁との共同研究から、スピン三重項超伝導体における超伝導スピンの回転を微視的に世界で初めて明らかにしました。

超伝導¹状態は、2つの電子がペアを組むクーパー対と呼ばれる量子力学的な波動状態として理解されます。電子にはスピン²と軌道の自由度があるので、クーパー対も同様にスピンと軌道の自由度を持ちますが、今まで発見されたほとんどの超伝導体はスピンおよび軌道の自由度をもたない状態でした。一方で、スピンまたは軌道の自由度をもつ超伝導状態を考えると、わずかな外部パラメータ³の変化によってさまざまな超伝導状態となる超伝導多重相が期待でき、理論的研究がなされてきました。しかし候補となる超伝導体の観測例は非常に少なく、また超伝導転移温度の低さなどから超伝導多重相に由来する現象の探索は非常に困難でした。

研究グループは、超伝導体 UTe_2 の純良単結晶において超伝導多重相に由来する特徴的な超伝導スピンの回転を、複合極限環境における核磁気共鳴⁴測定法(NMR)を用いることで明らかにしました。今回の結果はこれまで実験的なアプローチが不足していた超伝導多重相において、 UTe_2 が理想的な研究舞台であることを示すとともに、予想しなかった新奇な超伝導状態を示すことを明らかにしました。本研究成果は、2023年7月28日に、国際学術誌「Science Advances」のオンライン版に掲載されました。

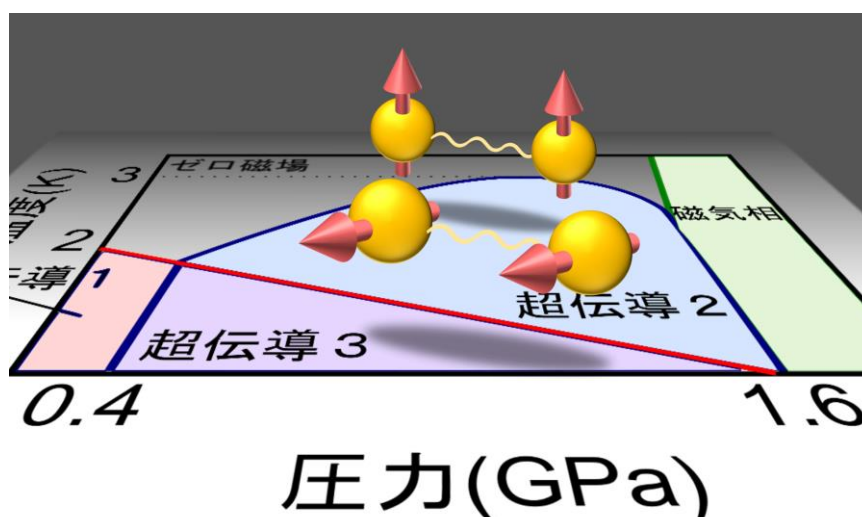


図. 各相での超伝導スピンの状態。超伝導 2 相と超伝導 3 相では超伝導スピンの向きが異なる。

1. 背景

超伝導は発見されて 110 年以上経ちますが、超伝導の基礎特性については今でも新しい発見が続いています。またこの基礎特性は、量子コンピューターへと応用されており、次世代産業の基盤に期待される重要な物理現象です。今までに発見されたほぼすべての超伝導体では、2 つの電子で作られる対状態は、スピンや運動量を持ちません。しかし、ごく一部の超伝導体ではスピンをもつことが理論的、実験的に証明され、物理学の基礎としても、応用としても非常に注目されています。

ウラン系強磁性超伝導体は、小さな磁石であるスピンを持つスピン三重項超伝導体として、また近年ではトポロジカル超伝導体⁵として非常に注目されていましたが、基礎物性の理解という意味では、転移温度が非常に低いことなどの理由から、その解明は難航していました。

UTe₂ はこれらの難点を克服した超伝導体であり、その超伝導は 2018 年に発見されました。UTe₂ は超伝導転移温度が従来の強磁性超伝導体⁶と比較して倍ほど高く、さらに強磁性転移を示しません。これらの点から UTe₂ はスピン三重項超伝導体の研究を進める理想的な物質と考えられてきました。発見以来、多くの研究グループが重点的に研究を行っており、その超伝導性は明らかになりつつあります。

一方で、UTe₂ には強磁性超伝導体にはない非常に多様な相図を示すことが明らかになってきました。UTe₂ は磁場によって異なる超伝導が誘起され、加えて圧力によっても新たな超伝導相を示すことが明らかになりました(図 1)。これらの特徴は、「超伝導多重相」と呼ばれ、スピン三重項超伝導の実現を強く示唆します。今回の研究では、この圧力下の超伝導相について、その特性を研究しました。

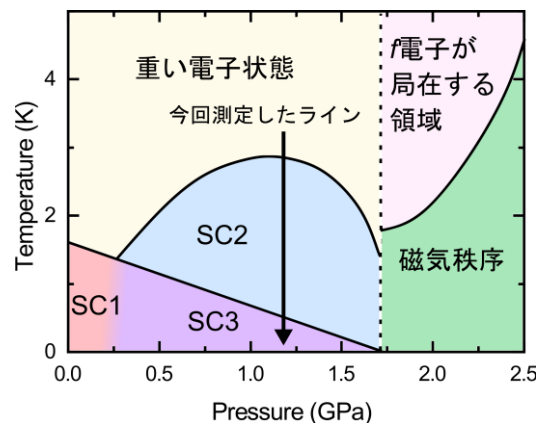


図 1: UTe₂ における温度圧力相図。圧力によって基底状態が超伝導(SC1)⇒超伝導(SC3)⇒磁気状態と変化していく。さらに、SC3 の上部には SC2 という異なる超伝導相が存在している。今回は SC2 の振る舞いを詳しく見るために、1.2 GPa での温度スキャンを行った。

2. 研究手法・成果

本研究グループは、U 系スピン三重項超伝導体 UTe₂ のテルル核(Te)を核磁気共鳴可能な同位体 ¹²⁵Te 核⁷に置換した純良単結晶試料において、12000 気圧という高圧を印加し、超伝導多重相図の振る舞いを解明すべく、¹²⁵Te 核の NMR を行いました。そこで、スピン三重項超伝導に特徴的なスピン磁化率の温度依存性を NMR によってとらえました。上図 SC2 では b 軸にスピンが向いた超伝導が、SC3 では別の方向にスピンが向くことをとらえました。このような超伝導スピンの回転は磁場によって誘起されることは観測されたことはありましたが、温度降下による観測は初めてです。さらに、より低温の SC3 相において、従来の超伝導の枠組みでは説明できない、磁気的な異常を観測しました。今回の結果は、圧力によって 2 つの超伝導相が共存する超伝導状態が実現していることを示唆します。この振る舞いが NMR で観測されたことは初めてであり、UTe₂ の超伝導状態は今まで考えられていたものより、さらに特異であることが示されました。

3. 波及効果、今後の予定

これまで、超伝導多重相図を示す超伝導体はほとんどなく、その転移温度の低さから物性の理解は充分であったとはいえませんでした。一方で、超伝導と類似する物理現象である、超流動を示す³Heではよく研究されていました。³He超流動現象により超流動の物理が解明されたことのように、今回のUTe₂の研究により、UTe₂はスピン三重項超伝導特有の現象を研究する最適な研究舞台を与え、スピン三重項超伝導の理解が今後飛躍的に進むことが期待されます。

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 JP19K03726, JP19K14657, JP19H04696, JP19H00646, JP20H00130, JP20KK0061, JP21K18600, JP22H04933, JP22H01168, JP23H01124）の支援を受けました。また、著者の金城はJST SPRING(JPMJSP2110)、金城、松村、藤林は湯川記念財団望月基金の援助を受けています。

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>

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。

スピン：電子の微視的な自由度の一つ。小さな磁石のようにふるまう。

外部パラメータ：圧力、磁場、温度など、物質内部ではなくてこちらから操作できるようなパラメータのこと。

核磁気共鳴：原子核の性質を使って、物質の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。医療で用いられるMRIはその応用例の一つ。

トポロジカル超伝導体：数学的操作で真空と区分される特異な基底状態を持つ超伝導体群のこと。その表面にはマヨラナ粒子と呼ばれる特殊な準粒子がいることが期待されている。

強磁性超伝導体：強磁性と超伝導が共存する超伝導体群のこと。強磁性とは磁石のこと。

同位体 ¹²⁵Te 核：テルル元素の中で、質量数 125 を持つものこと。

<研究者のコメント>

スピン三重項超伝導は非常に長い間研究されていたにもかかわらず、その実現確率の低さや研究難易度の高さから超伝導多重相図の実態がつかめずにいました。今回のUTe₂の研究からその振る舞いを解明しました。このことによって、理論的なアプローチ、より高度な実験的アプローチを含め、その理解が一層進むことが期待されます。（金城）

<論文タイトルと著者>

タイトル： Superconducting-Spin Reorientation in Spin-Triplet Multiple Superconducting Phases of UTe₂
(UTe₂ のスピン三重項超伝導多重相における超伝導スピンの回転)

著者： K. Kinjo, H. Fujibayashi, H. Matsumura, F. Hori, S. Kitagawa, K. Ishida, Y. Tokunaga, H. Sakai,
S. Kambe, A. Nakamura, Y. Shimizu, Y. Homma, D. Li, F. Honda, and D. Aoki

掲載誌： Science Advances

DOI： 10.1126/sciadv.adg2736