

# 人工超格子によるらせん型超伝導状態の創出とその検出に成功

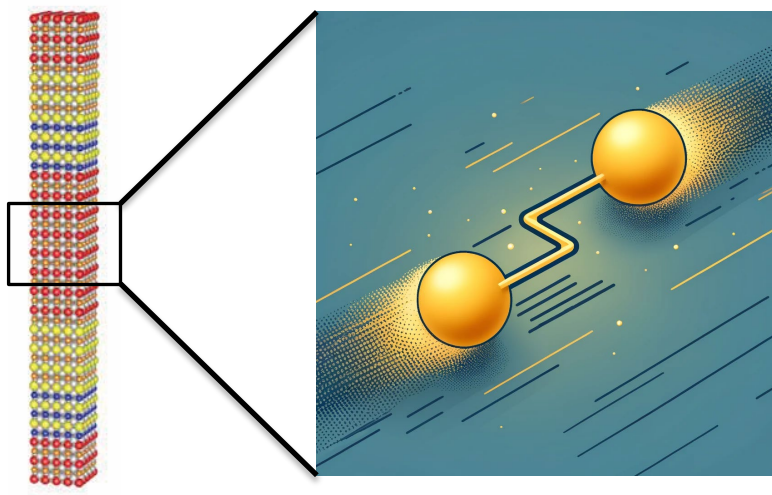
## —有限運動量の電子対を持つ超伝導—

### 概要

京都大学大学院理学研究科の浅場智也 特定准教授、成塚政裕 同博士課程学生（2020年3月卒業）、浅枝寛人 同修士課程学生（2023年3月卒業）、小菅優揮 同修士課程学生（2024年3月卒業）、池森駿 同修士課程学生、末次祥大 同助教、笠原裕一 同准教授（現九州大学教授）、幸坂祐生 同教授、寺嶋孝仁 同教授、大同暁人 同助教、柳瀬陽一 同教授、松田祐司 同教授の研究グループは、3種類の希土類化合物を積層構造させた三色人工超格子においてらせん型超伝導状態が実現している証拠を発見しました。

超伝導は電子が対を組むことによって生じますが、通常の超伝導体では電子対の重心運動量はゼロとなっています。これに対し、らせん型超伝導は電子対が有限運動量を持つ特殊な状態です。しかし、その直接的な証拠はこれまで見つかっていませんでした。本研究グループは、らせん型超伝導状態を実現・観測するために、希土類化合物を原子数層ずつ積層させた人工超格子構造を作製し、非相反伝導と呼ばれる現象を調べました。その結果、低温・高磁場領域において、超伝導電子対が有限の運動量を持った状態が起こっている直接的な証拠を発見しました。本研究は、これまで自然界に存在することが知られていなかった新しい超伝導状態を人工的に作り出し、さらにその検出にも成功したという大きな意義を持つことから、今後の新しい超伝導状態の発見につながるものです。

本研究成果は、2024年5月8日（日本時間）に英国科学誌「Nature Communications」に掲載されました。



人工超格子で創出する、運動量を持つ超伝導電子対

## 1. 背景

超伝導は物質の電気抵抗がゼロになることを特徴とする、自然界で最も劇的な物理現象の一つです。この現象の理解は 1957 年、バーディーン、クーパー、シュリーファーによって確立された BCS 理論によって大きく進展しました。BCS 理論は、通常は反発する二つの電子に引力がはたらきクーパーペアという電子対を形成することで超伝導を実現するというものです。この電子対形成は、普通は逆向きのスピン（注 1）および運動量を持つ二つの電子の間で起こるといのが BCS 理論の枠組みです。しかしながら、すべての超伝導体が BCS 理論に完全に従うわけではなく、例えば、銅酸化物高温超伝導体（注 2）は超伝導電子対が有限の角運動量を持っており、またある種のウラン化合物では同じ向きのスピン同士で電子対形成が起こるスピン三重項超伝導体（注 3）が実現されています。BCS 理論に従わない例の一つであるらせん型超伝導（注 4）は、電子対の重心運動量がゼロではないという点で BCS 理論に当てはまらない超伝導で、その実現と検証が長年待ち望まれてきました。しかし、らせん型超伝導の実現には強いスピン軌道相互作用（注 5）と空間反転対称性（注 6）の破れ、そして高い超伝導上部臨界磁場（注 7）を必要とするなど非常に厳しい環境下でしか実現されないこと、そして実現しても超伝導電子対の重心運動量を直接測定することが難しいことから、その決定的な証拠は得られていませんでした。

## 2. 研究手法・成果

本研究の鍵となる手法は 2 点あります。

1 点目は実験試料です。希土類化合物超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  は、高い上部臨界磁場や大きなスピン軌道相互作用などから、らせん型超伝導を実現するシステムとして多くの条件を満たすために注目されてきましたが、結晶の対称性が高くラシュバ軌道相互作用（注 8）を持たないことが最大の難点でした。そこで研究チームは、 $\text{CeCoIn}_5$ 、 $\text{YbCoIn}_5$ 、 $\text{YbRhIn}_5$  の 3 つの化合物を原子一層レベルでコントロールし、交互に積層させた三色超格子構造を作製しました。超格子とは、本来の結晶構造の周期より長い周期を持つ構造が形成された結晶格子です。人工的には異なる結晶を積層させることで、周期の長い多層構造を作ります。このような自然界には存在しない人工的な超格子構造により、ラシュバ軌道相互作用を  $\text{CeCoIn}_5$  に導入することが可能となりました。

2 点目は、測定手法です。最近の理論的予測により、らせん型超伝導状態が消失する近傍において、非相反伝導（注 9）と呼ばれる効果が観測されることが提案されました。これは、従来測定が難しかった超伝導クーパーペアの運動量に関する理解を深める手法であり、近年の超伝導研究において注目されています。この手法を三色超格子の試料に用いることで、らせん型超伝導の証拠を掴むことができるのではないかと本研究グループは考えました。

本研究では、 $\text{CeCoIn}_5$  三色超格子の非相反測定を行いました。その結果、実際に低温高磁場で非相反伝導効果が増強される結果が得られました。さらに、非相反伝導は磁場や電流の面内角度に依存すること、および 2 つの化合物による二色超格子ではこのような非相反伝導効果の増強は見られないことがわかりました（図 1）。これらは、三色超格子の非相反伝導効果が外因的な要素によるものではなく、超伝導電子対の運動量に由来していることを示します。以上の結果は、低温高磁場領域においてクーパーペアが有限運動量を持っている、すなわち、らせん型超伝導状態が実現している可能性が高いことを示しています。

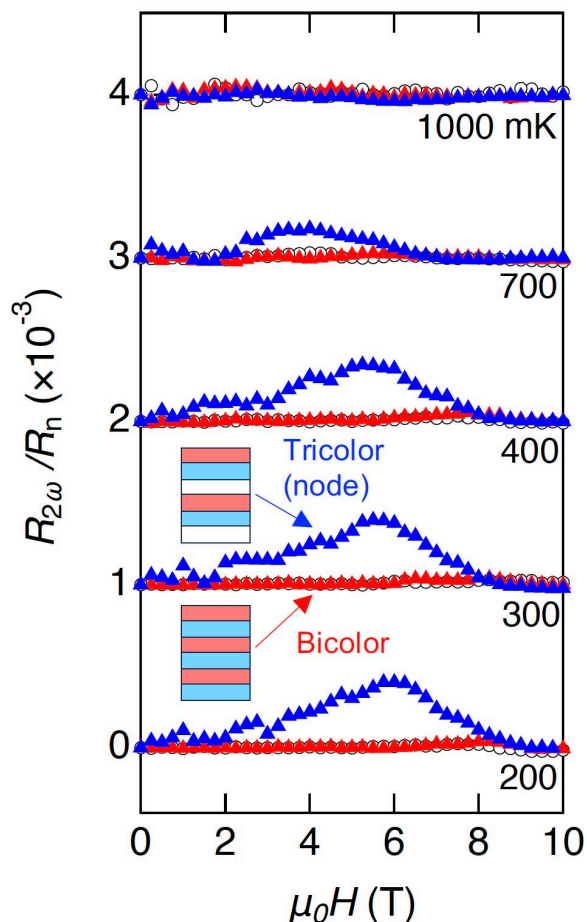


図1 三色超格子（青）および二色超格子（赤、白）の非相反伝導の磁場依存性。三色超格子では非相反伝導が生じているのに対し、二色超格子ではそのような信号が見られない。

### 3. 波及効果、今後の予定

今回の結果は、数十年以上前に提案されていたものの未だに実験的確認の得られていなかった、従来の超伝導理論を超えた有限運動量を持つ電子対による超伝導状態の創発を示しており、今後さらなる風変わりな超伝導状態の実現へと期待がかかります。重い電子系の三色超格子自体は数年前から実現していましたが、非相反輸送測定という新しい測定手法の発展により、今回のブレイクスルーがもたらされました。理論的には、らせん型超伝導状態から完全ダイオード効果（注 10）などが実現できる可能性があり、今後のさらなる発展が期待されています。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は JST さきがけ（課題番号：JPMJPR2252）、CREST（課題番号：JPMJCR19T5）、JSPS 科学研究費補助金（18H05227, 18H03680, 18H01180, 21K13881）、新学術領域研究「量子液晶」の支援を受けて行われました。

## <用語解説>

### 1. スピン

電子は電荷とともに、スピンと呼ばれる角運動量を持ち、磁石の性質も持っている。

### 2. 銅酸化物超伝導体

1986年にジョージ・ベドノルツとアレックス・ミュラーによって発見された、銅と酸素を主成分とする超伝導体。それまでBCS理論で考えられていた超伝導転移温度の限界をはるかに超える物質が次々と見つかり、大きな反響があった。

### 3. スピン三重項超伝導体

同じ方向のスピンを持つ電子が、スピン三重項と呼ばれるペアを組むような超伝導状態。

### 4. らせん型超伝導体

特殊な超伝導状態のひとつ。ラシュバ軌道相互作用（用語解説7.）が存在する物質では、スピンのらせん型構造を持つような電子構造が実現し、それらの電子がペアを組むため、このような名前となっている。

### 5. スピン軌道相互作用

電子のスピンと電子の動き（軌道角運動量）との相互作用のこと。一般的に、原子番号が大きいほどスピン軌道相互作用も大きいといわれている。

### 6. 空間反転対称性

ある点を基準として他の要素の座標を反転させたときに、もとの状態と一致するような点が存在すること。例えば、正方形は重心を基準とした空間反転対称性があるが、正三角形はそのような点がなく空間反転対称性を破っている。

### 7. 上部臨界磁場

第二種超伝導体というタイプの超伝導体において、超伝導状態が完全に消失する磁場。

### 8. ラシュバ軌道相互作用

空間反転対称性が一軸方向に破れている際に生じる、スピン軌道相互作用を起源とする相互作用。電子スピンの相互作用し、上述したようならせん型の電子構造（フェルミ面）を生じさせる。

### 9. 非相反伝導

電流を流す方向によって、物質の抵抗値が異なること。ダイオードなどはその典型例であるが、単一の物質の多くでは、対称性により非相反伝導はゼロである。

### 10. 完全ダイオード効果

電流がある方向に流れる時には有限の抵抗を持つ一方、ある方向に流れる時にはゼロ抵抗を示すような効果。理想的なダイオードであり、究極の電子回路部品のひとつ。

### <研究者のコメント>

本研究で扱った希土類超格子は、世界でも本研究グループ以外には報告例がない、最先端の技術が駆使された試料です。しかし、そのような試料を使っても、らせん型超伝導状態のような特殊な状態の観測は難航していました。そんな難しい状況が、理論的な提案によって一気に進行したのは印象的で、実験と理論の協力が研究の発展には欠かせないのだと改めて感じさせられます。(浅場)

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Evidence for a finite-momentum Cooper pair in tricolor d-wave superconducting superlattices

(d波超伝導三色超格子における有限運動量クーパー対の証拠)

著者：T. Asaba, M. Naritsuka, H. Asaeda, Y. Kosuge, S. Ikemori, S. Suetsugu, Y. Kasahara, Y. Kohsaka, T. Terashima, A. Daido, Y. Yanase, and Y. Matsuda

掲載誌：Nature Communications

DOI：https://doi.org/10.1038/s41467-024-47875-4