

磁石に浸み込む超伝導電子ペアを実現

— スーパー・スピントロニクスへの布石 —

概要

電子には、電気を運ぶ「電荷」と磁性を担う「スピン」の性質があります[図 1 (a)]。超伝導は、ある温度以下で電気抵抗が完全にゼロになってしまう現象で、超伝導物質内で電子 2 個ずつがペアをすることで引き起こされます。超伝導の電子がエネルギーの損失なく電気を運ぶ際に、「スピン」の情報も運ぶことができると素晴らしいことです。ところが、これまで知られているほとんどの超伝導体では、ペアをすることで電子の「スピン」は打ち消されていました。理学研究科のシャーバズ・アンワー博士、米澤進吾助教、前野悦輝教授らの研究グループは、ルテニウム酸化物の特別な超伝導体と組み合わせることで、スピンの揃った強磁性金属の中に超伝導ペアを作ることに成功しました。電子スピンに基づく情報を利用することは、「スピントロニクス」として磁気ヘッドや磁気メモリーなどに広く応用されていますが、今回の発見は、超伝導電子を使った「スーパー・スピントロニクス」の分野を切り拓く基礎となるものと期待できます。

本成果は Nature Publishing Group の発行するオンライン誌 Nature Communications に 2016 年 10 月 26 日に掲載されました。本研究は、ソウル国立大学のテウォン・ノウ教授のグループ、日本女子大の石黒亮輔准教授らとの共同研究です。アンワー博士は日本学術振興会の外国人特別研究員です。本研究は、主に科学研究費補助金「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（代表者：京都大学 川上則雄教授）の支援を受けて行われました。

1. 背景

電子の持つ「スピン」の情報を利用することは、「スピントロニクス」として磁気メモリーなどに広く応用されています。通常の金属や磁性体の中の電子を用いるかわりに超伝導電子を使うことができれば、エネルギー損失のないスピントロニクス素子ができる可能性があります。ところが、これまで知られているほとんどの超伝導体では、ペアをすることで電子の「スピン」は打ち消されています[図 1 (b)]。

そもそも超伝導の性質を機能性素子として利用するには、小さな電流・電圧でその振舞が変化することが必要で、何らかの「接合」を含む構造が有利です。そのような「超伝導接合素子」は実際、精密磁気測定装置、電圧の標準、脳磁計、地震計などに広く応用されています。超伝導体と常伝導金属の接合では、超伝導電子ペアが金属に浸み込む「超伝導近接効果」が起こって敏感な超伝導状態を創り出せるため、超伝導素子にも使われてきました。もし、スピンの揃った強磁性体（磁石）の中に、超伝導近接効果によってスピンの揃った電子ペアができれば、スピン情報も制御できる素子が作れそうです。しかし、普通の超伝導体を使う場合、[図 2 (a)]に示すように、電子ペアのスピンを組み替える必要があるので、複雑な磁性体の界面構造が必要でした。それでも約 10 年前から、そのような素子で磁石の中に数十ナノメートル以上まで深く浸みこむ電子ペアが観測されるようになりました。アンワー博士は、そのような研究分野で実績のあるパイオニア研究者のひとりです。このような超伝導現象は、スピンの消えた電子ペアのままで数ナノメートル程度のごく短距離だけ強磁性体に浸み込む従来の現象と区別して、「長距離近接効果」と呼ばれています。

スピンの揃った電子ペアを強磁性体の中に作る新しい方法として、スピンの揃った電子ペアをもつ「ス

ピン三重項超伝導」[図 1 (c)]を使う方法が考えられます。この方法では電子ペアのスピンの組み替えは必要なく、磁石の中と同じ向きのスピンだけを濾しとればよいのです[図 2 (b)]。そのため、素子の構造が単純になるだけでなく、効率もスピン情報の維持性も画期的に向上すると期待されます。スピン三重項超伝導体として完全に証明された例はまだないのですが、前野らが約 20 年前に発見したルテニウム酸化物超伝導体は、その最有力候補の一つとして現在も世界的に活発な研究が進められています。この超伝導体は、ペアの電子同士の軌道回転運動のためにトポロジカルな性質も合わせ持つと考えられています。

2. 研究手法・成果

この研究では、ルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 と強磁性金属 SrRuO_3 の接合素子[図 2 (c)、図 3]で、超伝導ペアが強磁性体の中に十分深く浸みこむことを明らかにしました。磁場をかけて強磁性体のスピンの向きを揃えて磁性の乱れを排除しても強い近接効果が維持されることも確認しました。超伝導体と強磁性金属の単純な構造の接合素子での長距離近接効果の観測は世界で初めてのことです。この成果は、ルテニウム酸化物超伝導体が従来の電子ペアと異なる「スピン三重項電子ペア」による超伝導であるという結論をさらに強固にするものでもあります。

本研究は国際共同研究によるものです。理学研究科のアンワー博士・米澤助教・前野教授らのグループが作ったルテニウム酸化物超伝導体の単結晶に、ソウル国立大学のグループが強磁性体薄膜を蒸着し、石黒准教授・アンワー博士らが素子構造に加工したものを用いて、京都大学で詳しい性質を測定しました。

3. 波及効果、今後の予定

今後、強磁性体のスピンの方向を変えることで、長距離近接効果の強さを制御できるような条件を探る予定です。現在、強磁性体の上に薄い絶縁膜や普通の超伝導体膜を付けた素子構造で、スピン三重項超伝導の浸み込みをより確かにする実験を進めています。また、この現象には超伝導電流とは別にスピンの流れ、すなわち「超スピン流」を伴っていることが理論的に予想されていますので、それをどのように観測するのも今後の課題です。トポロジカル超伝導を利用して超伝導スピンを制御できる素子ができると、量子コンピューティングへの実現へ向けた基礎概念の一つにもなると考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

この研究は、以下のプロジェクトによる支援を受けました。

- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(H27-31 年度) (JSPS KAKENHI Grant Numbers JP15H05852, JP15H05853, JP16H00995)。
- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」(H22-26 年度) (JSPS KAKENHI Grant Numbers JP22103002)。
- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤 B (H26-28 年度) (JSPS KAKENHI Grant Number JP26287078)
- ・ 韓国基礎科学研究院補助金 IBS-R009-D1。
- ・ 京都大学 英語論文校閲支援制度「みがき」。



<論文タイトルと著者>

タイトル: Direct penetration of spin-triplet superconductivity into a ferromagnet in Au/SrRuO₃/Sr₂RuO₄ junctions

著者: M. S. Anwar, S. R. Lee, R. Ishiguro, Y. Sugimoto, Y. Tano, S. J. Kang, Y. J. Shin, S. Yonezawa,

D. Manske, H. Takayanagi, T. W. Noh, and Y. Maeno

掲載誌: Nature Communications (DOI: 10.1038/NCOMMS13220, Vol, 7, Article number 13220, 2016年10月26

日オンライン掲載)

<図と説明>

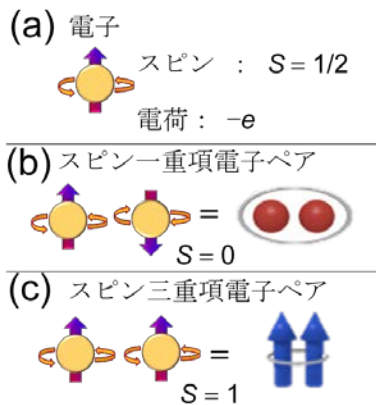


図 1. (a) 電荷 $-e$ とスピン S を持つ電子。
 (b) 従来の超伝導のスピン一重項電子ペア。
 (c) スピン三重項電子ペア。

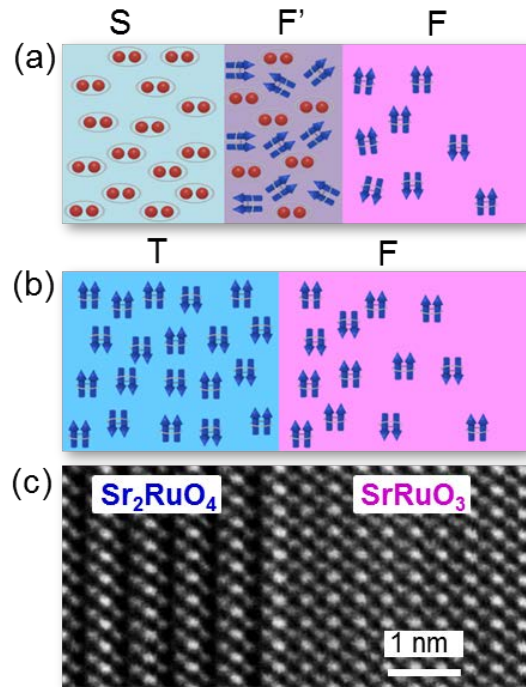


図 2. (a) 従来の超伝導体(S)から強磁性体(F)への近接効果。中間に別の性質の強磁性体(F')が必要。
 (b) スピン三重項超伝導体(T)から強磁性体(F)への直接的近接効果。
 (c) 超伝導体(左)と強磁性体(右)との接合断面の電子顕微鏡写真。明るい点がルテニウム原子の像。

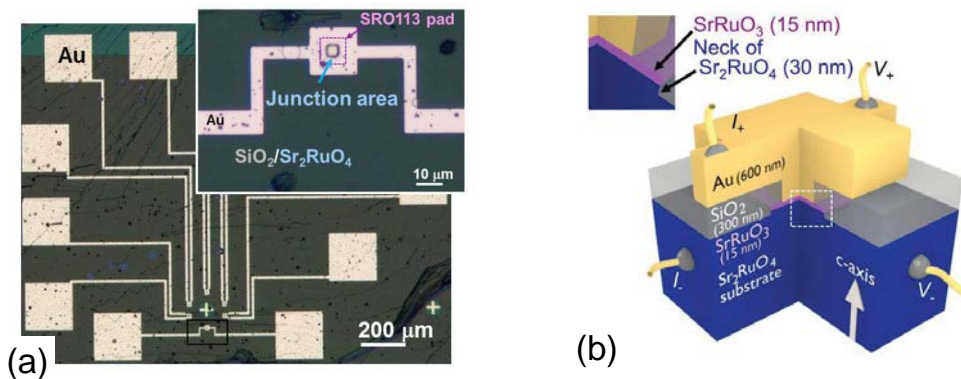


図 3. (a) 超伝導体・強磁性体接合素子の顕微鏡写真。右上は 6 個の素子のうち一つの拡大写真。
(b) 素子の立体構造を示す概念図。Nat. Commun. より。

<用語説明>

【スピントロニクス】 固体中の電子の持つ電荷だけでなくスピンの情報も機能性素子に応用する分野。素子の典型例として、電気抵抗がスピンの方向に大きく依存する巨大磁気抵抗（2007 年ノーベル物理学賞）を利用したハードディスクのヘッドがあげられる。

【超伝導近接効果】 超伝導体と接合した金属の中に、超伝導電子ペアが浸みこむ現象。

【スピン三重項超伝導】 ほとんどの超伝導体では、電子ペアは合成スピン 0 の「スピン一重項」状態にある。これに対して、合成スピンの 1 の「スピン三重項」電子ペアからなる超伝導をいう。電荷とともにスピンも超流動状態になることから、従来の超伝導体にはない現象も予想されている。スピン三重項の「原子ペア」は、液体ヘリウム 3 の超流動で実現していることが証明されている（1996 年および 2003 年ノーベル物理学賞）。一方、スピン三重項超伝導体の存在は、まだ完全に証明された例がないが、ルテニウム酸化物やウラン化合物で有力候補の超伝導体が知られている。

【トポロジカル超伝導】 量子力学的波動関数の位相にねじれが生じており、ゼロではないトポロジカル不変量を持つ状態の超伝導の総称。電子ペアの軌道回転運動の方向が揃った「カイラル超伝導」や、最近、米澤らが発見した「ネマティック超伝導」などが例として挙げられる。