

令和3年8月31日

東北大学材料科学高等研究所
東北大学金属材料研究所
東京大学大学院工学系研究科
茨城大学
岩手大学

「トリプロン」がスピン流を伝搬することを実証 —極小スピン回路などでの活用に期待—

【発表のポイント】

- ◆トリプロンと呼ばれる準粒子がスピン流を伝搬することを実証した。
- ◆スピンが二個ずつ強く結合した状態（ダイマー状態）における相互作用によってスピン流が伝搬されることがわかった。
- ◆スピン流を活用できる物質がさらに拡張され、スピントロニクスの研究にさらに促進されることが期待される。

【概要】

東北大学金属材料研究所の Yao Chen 博士課程学生（当時）と、東京大学大学院工学系研究科／東北大学材料科学高等研究所の齊藤英治 教授らを中心とする研究グループは、茨城大学大学院理工学研究科理学野の佐藤正寛 准教授、東京大学大学院総合文化研究科の塩見雄毅 准教授、東北大学金属材料研究所の藤田全基 教授、南部雄亮 准教授、Yifei Tang 博士課程学生、岩手大学理工学部の大柳洸一 助教、東京大学物性研究所益田隆嗣 准教授らと共同で、トリプロンと呼ばれる準粒子（注1）がスピン流（注2）を伝搬することを実証しました。

電子の磁気的な性質である「スピン」の流れをスピン流と呼びます。スピン流は電子の電荷の流れである電流と対比され、電流では不可能であった省電力による情報伝達や情報処理、エネルギー変換などに利用できるため、次世代のエレクトロニクスの候補「スピントロニクス（注3）」の重要な要素と期待されています。従来、スピン流はその磁気的な性質から金属や磁石などが主な研究対象とされてきましたが、近年、磁気秩序を持たない「量子スピン系（注4）」と呼ばれる物質群において従来と全く異なるスピン流の存在が明らかになってきました。

「量子スピン系」と呼ばれる物質群の中の「ダイマースピン系（注5）」と呼ばれる物質群において、トリプロンがスピン流の担い手となることがわかりました。本研究によって、スピン流を活用できる物質がさらに拡張され、スピントロニクスの研究にさらに促進されることが期待されます。

本研究成果は、英国科学雑誌「Nature Communications」に2021年8月31日午前10時（英国時間）にオンライン掲載されました。

【研究の背景】

スピン流は、電子の電荷の流れである電流と対比され、次世代の情報記憶媒体での活用などに期待が寄せられています。磁石におけるスピン流の担い手として、強磁性体中の素励起にあたるマグノン（注6）が非常に精力的に調べられてきました。また、最近ではスピン相関があるにもかかわらず、長距離秩序のない量子スピン液体と呼ばれる状態でのスピノンという素励起による新たなスピン流の担い手が発見され、この発見は、スピン流の概念を「量子スピン系」と呼ばれる物質群に拡張することとなりました。量子スピン系の中にはスピン液体（注7）の他に、ダイマースピン系と呼ばれる物質群があります。ダイマースピン系では磁気的な相互作用の強弱が交代することによって、スピンの2個ずつ強く結合するダイマー状態（スピン対）と呼ばれる状態を形成します。この系では最も低いエネルギーの状態では多数のスピン対がともにスピンを持たない一重項からなります。このような巨視的なスピンを持たないダイマースピン系においても、有限温度ではゆらぎとして、スピン1の素励起である準粒子「トリプロン」が絶えず発生しています。トリプロンはダイマー間相互作用によって隣に移動することができます。このことから、トリプロンもスピン流の担い手となりえると考えられますが、これまでトリプロンによってスピン流が生成できるかは確認されていませんでした。

【研究内容】

本研究では、ダイマースピン系の物質の中で、 CuGeO_3 という物質に注目しました。 CuGeO_3 の中ではスピンを担う銅(Cu)イオンが1次元の鎖状に並んでいます（図1）。高温では銅イオンが等間隔で、スピン液体の特性を示します。温度を下げると、銅イオンが自発的に変位し、交換相互作用が交代するスピンドイマー相になります。ダイマー相においてはトリプロンが励起することがこれまでの研究によって明らかになっていました。

実験では、 CuGeO_3 の鎖方向と垂直な面に白金(Pt)を製膜し、鎖方向に熱の勾配を加えました（図2）。トリプロンは熱により生成され、熱の勾配に沿って運動し、スピン流として伝搬します。こうして生成されたスピン流を、隣接するPt膜を通し、電圧として検出することに成功しました。この電圧の符号はスピン流が運ぶスピンの向きに依存し、スピンの向きが逆になれば電圧の符号も逆になります。強磁性体中のマグノンは、一様に揃った磁化を減らすような素励起ですが、最低エネルギーのトリプロンは磁化を増やす方向に励起することが明らかとなりました。つまり、マグノンで生成されるスピン流とトリプロンで生成されるスピン流は逆のスピン方向を持つことが明らかとなったのです。さらに測定では、トリプロンのスピン流は CuGeO_3 に不純物を混入することや、熱勾配の印加方向をスピン鎖と垂直の方向へ変えることで大きく抑制されることもわかりました。また、理論計算によっても、トリプロンとマグノンが互いに逆向きのスピンを運ぶこと、実験で観測された信号の外部磁場と環境温度の依存性も不純物の影響と結晶格子の振動を取り入れると理論的にこの現象が説明できることがわかり、トリプロンはスピン流の担い手になれると結論づけました。

【今後の展望】

本研究により、ダイマースピン系の物質においてもトリプロンによってスピンの流が生じることが明らかとなったことから、スピンの流の担い手として、新たな材料が候補に加わったといえます。これにより、スピントロニクス研究がさらに促進されることが期待されます。

研究支援

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト、科学研究費補助金、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業CREST 研究領域名「情報担体を活用した集積デバイス・システム」研究課題「非古典スピン集積システム」などの一環で得られました。

発表雑誌

雑誌名：「Nature Communications」

論文タイトル：Triplon current generation in solids

著者：Yao Chen, Masahiro Sato, Yifei Tang, Yuki Shiomi, Koichi Oyanagi, Takatsugu Masuda, Yusuke Nambu, Masaki Fujita, & Eiji Saitoh

DOI 番号：10.1038/s41467-021-25494-7

参考図

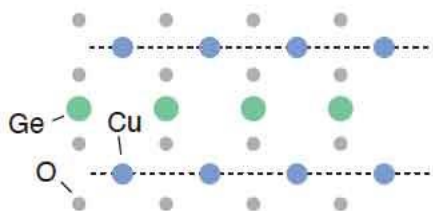


図1：CuGeO₃の結晶構造。銅イオンは点線上に鎖状に並んでいる。

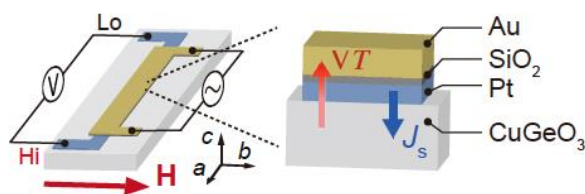


図2：今回の実験セットアップ図。

用語解説

注1) 準粒子

物質の内部で生じる物理量の変化（揺らぎ）が、物質中で粒子のようにふるまう現象のこと。結晶を構成する原子の位置の揺らぎに対応したフォノン、磁石を構成するスピンの揺らぎに対応したマグノンなど様々なものがあり、トリプロンも準粒子の一つ。

注2) スピン流

電子の磁氣的性質である「スピン」の流れのこと。

注3) スピントロニクス

電子の磁氣的性質であるスピンを利用して動作する全く新しい電子素子（トランジスタやダイオードなど）を研究開発する分野のこと。

注4) 量子スピン系

スピンのもつ量子力学的な特徴（ゆらぎなど）が顕著に表れる系であり、物質中で生じる量子力学のもつ不思議な性質を調べるのに適した系とされている。

注5) ダイマースピン系

磁氣的な相互作用の強弱が交代することによって、スピンの2個ずつ強く結合するダイマー状態（スピン対）と呼ばれる状態をとる系のこと。

注6) マグノン

磁石の内部で整列したスピンの向きの揺らぎのこと。物質中で、粒子のようにふるまう。

注7) スピン液体

スピン相関があるにもかかわらず、長距離秩序がないスピン状態。スピン同士はお互いの向きを知っているものの、スピンの向きが全て同じであったり、互い違いになったりと、秩序を持たない。

問い合わせ先

【研究に関すること】

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻／東北大学材料科学高等研究所 (WPI-AIMR)
教授 齊藤 英治 (さいとう えいじ)

【広報に関すること】

東北大学材料科学高等研究所 (WPI-AIMR) 広報戦略室

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

東京大学大学院工学系研究科 広報室

茨城大学広報室