

令和7年3月6日



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY



千葉大学
CHIBA UNIVERSITY

UTokyo



国立大学法人福井大学
国立大学法人東北大学
国立大学法人千葉大学
国立大学法人東京大学
国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

幻のマヨラナ粒子をスピントロニクスで捉える ～スピン流を用いて観測、実用的な量子計算の実現に期待～

本研究成果のポイント

- ◆量子スピン液体に現れるマヨラナ粒子をスピン流によって観測する方法を提案
- ◆マヨラナ粒子がスピン流にもたらす効果を大規模な数値計算によって解明
- ◆スピン流が量子スピン液体を応用したトポロジカル量子計算の鍵となる可能性を開拓

概要

現在の量子コンピュータが直面している誤り耐性(注1)の実現という課題を、物質中に現れるマヨラナ粒子(注2)と呼ばれる特殊な粒子を用いて解決する方法が有力視されています。しかし、この粒子は電子と違って電荷を持たないため電気的操作が難しく、決定的な制御法はまだ発見されていません。

福井大学大学院工学研究科の加藤康之准教授、東北大学大学院理学研究科の那須譲治准教授、千葉大学大学院理学研究院の佐藤正寛教授、東京大学大学院理学系研究科の大久保毅特任准教授、東京大学物性研究所の三澤貴宏特任准教授、東京大学大学院工学系研究科の求幸年教授らのグループは、スピントロニクス分野(注3)でよく用いられる温度差によってスピン(注4)を流すスピンゼベック効果(SSE)(注5)と呼ばれる現象を用いて、量子スピン液体(QSL)(注6)状態に現れるマヨラナ粒子の新しい検出手法を理論的に提案しました。この効果によって生じるスピン流(注7)の磁場・温度依存性に、マヨラナ粒子に特徴的な振る舞いが現れることを発見しました。この成果は、スピントロニクスによるマヨラナ粒子探査の可能性を示すだけでなく、スピン流によるマヨラナ粒子制御の可能性を示唆しており、実用的な量子計算の実現にも寄与すると期待されます。

この研究成果は、3月6日午前0時（日本時間）に国際科学誌「Physical Review X」に掲載されました。

〈研究の背景と経緯〉

実用的な量子コンピュータの実現は、様々な社会的課題を解決する可能性を秘めています。しかし、現在の量子コンピュータには高いエラー率があることが問題視され

ています。その有力な解決策として、誤り訂正技術の必要性が浮き彫りになってきています。誤り耐性のある量子計算に関しては、ボース粒子やフェルミ粒子とは異なる、2次元空間でのみ現れるエニオン粒子(注8)の操作によって実現するトポロジカル量子計算(注9)と呼ばれる方法が提案されており、多くの注目を集めています。QSLは、磁性体に現れる特異な量子もつれ状態であり、特に磁場中のKitaev量子スピン液体(KSL)(注10)は潜在的なトポロジカル量子計算のプラットフォームとして注目されています。KSLにおけるマヨラナ粒子は、磁場中でエニオン粒子となることが知られています。そのため、マヨラナ粒子を安定的に生成、制御、観測する方法を確立することは、基礎学理だけでなく、量子コンピュータへの応用を含めた重要な課題とされています。

〈研究の内容〉

本研究では、スピントロニクス分野で発展を遂げているSSEに関する実験技術に注目しました。SSEは、磁性体中で熱勾配によってスピン流が生成される効果であり、近年では磁性体中の低エネルギー励起を観測する手法の一つとして確立しつつあります。これまでも、1次元QSLに特有なスピノン(注11)と呼ばれる励起に関する研究が報告されています。

本研究では2次元QSLの代表例の一つであるKSLにおいて、SSEでマヨラナ粒子を捉えることができるかどうかを調べました。1次元QSLにおけるスピノンがスピン角運動量を有するのに対し、2次元KSLにおけるマヨラナ粒子はスピン角運動量を持たないため、マヨラナ粒子がスピン流生成に寄与するか否かは未解明の問題でした。そこで研究グループは、スピントロニクスにおけるトンネルスピン流理論(注12)と、高精度の数値計算が可能な密度行列くりこみ群法(注13)および時間依存変分原理(注14)を組み合わせ、理論的にこの問題に挑みました。

その計算の結果、磁場中KSLにおいてマヨラナ粒子によるSSEが発現することを見いだしました。一般的な強磁性体ではほとんどのスピンが磁場方向に沿って上向きである一方、低エネルギー励起であるマグノン(注15)は下向きスピンを有します。KSLではそれとは異なり、スピン間の相互作用係数の正負によってマヨラナ粒子が帯びるスピンの向きが変わることが明らかになりました(図1)。このことから、スピン流の観測によりKSLの種類の判定が可能であることがわかりました。さらに、生じるスピン流の磁場の方向依存性にも、マグノンによるものとは全く異なる振る舞いが現れることも見いだしました。また、SSEのスピン流の大きさが典型的な強磁性体のものと比較して十分観測できる強さになることも予測しました。

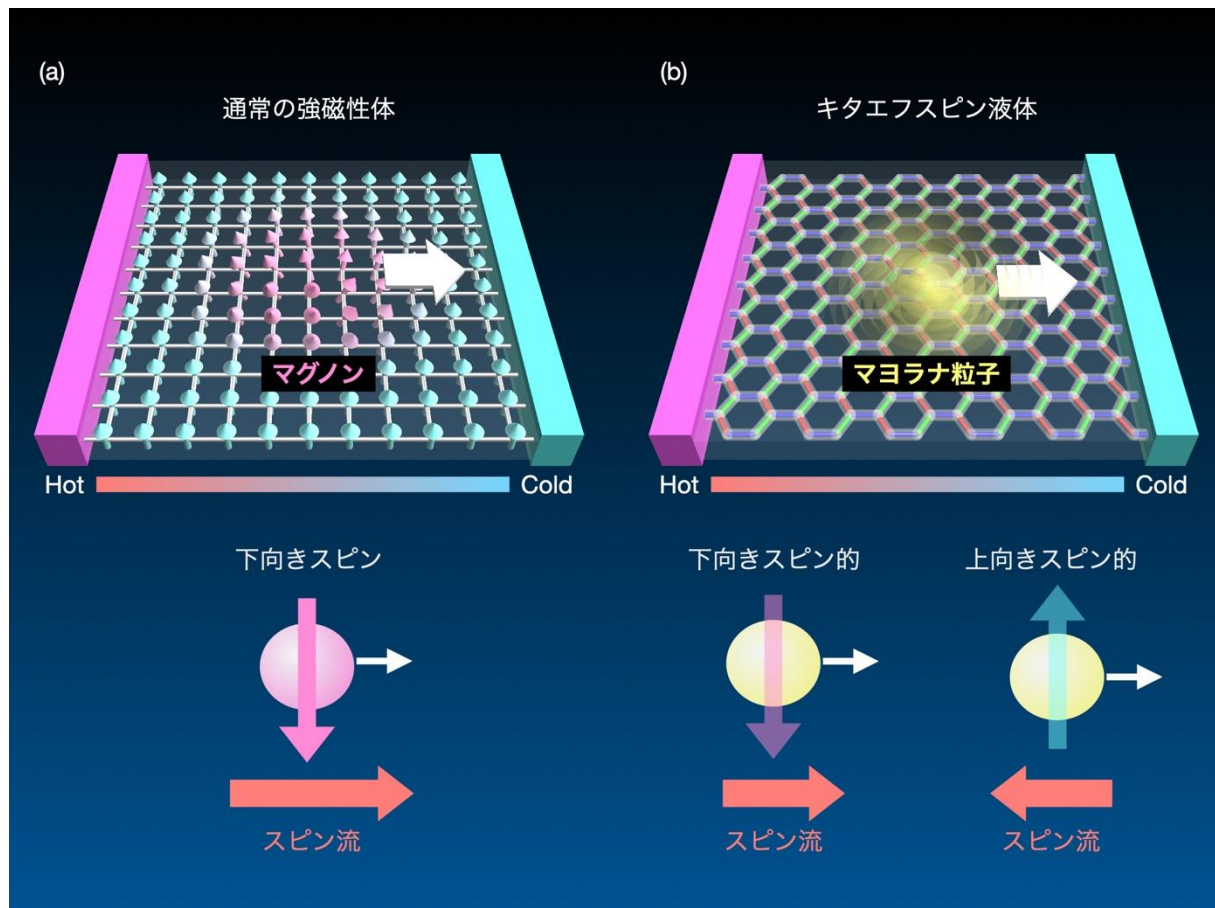
〈今後の展開〉

本研究で得られた結果は、KSLにおけるマヨラナ粒子とスピン流とが結合することを明確に示しています。つまり、スピン流を利用したスピントロニクス分野の手法は、トポロジカル量子計算への応用において、エニオン粒子を操作するための有望なアプローチであることを意味しています。このことからスピン流によるマヨラナ粒子生成や制御といった試みに発展していくことが期待されます。また、磁性体に現れる特異な量子もつれ状態に対して、中性子散乱実験に代表される既存の実験手段に加えて、よりコンパクトな実験装置で実現可能なSSEを用いた実験の開拓が見込まれます。QSLは磁性の基礎研究分野、SSEは磁性の応用であるスピントロニクス分野で、それぞれ重要な研究対象として活発に研究されています。本研究は、この近くて遠い二つの分野を結びつけ、新しい学際的な研究の広がりを促進する可能性があります。

本研究は、科研費（JP19H05825、JP20H00122、JP20H01830、JP20H01849、JP22H01179、JP22K03509、JP22H04480、JP22H05131、JP23H04576、JP23K22450、JP23H03818、JP24K00563）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR18T2、JPMJCR24R5）、同 共創の場形成支援プログラム（JPMJPF2221）、National Natural Science Foundation of China(12150610462)の助成、および東京大学物性研究所による計算資源の助成により行われました。

〈参考図〉

図 1：スピントラネポート効果。通常の強磁性体においては、熱勾配により、白矢印で示すように温度が高い方から低い方へとマグノンが流れることでスピントラネポートを生じます(a)。Kitaev量子スピ液体に現れるマヨラナ粒子は、スピン角運動量を持たないにもかかわらず、同様に温度が高い方から低い方へと流れてスピントラネポートを生じることが明らかとなりました(b)。マグノンは下向きスピンを有し、スピントラネポートに寄与します。一方、マヨラナ粒子は、スピン間の相互作用係数の正負に応じて、上向きスピンまたは下向きスピンの性質を帯びるため、スピントラネポートの向きも変化することが見いだされました。



〈用語解説〉

（注 1）誤り耐性

量子計算に用いる量子ビットは、外部の影響を受けやすく、エラーが頻繁に発生します。これらのエラーを訂正し、正確な結果を維持する性能を誤り耐性と呼びます。誤り耐性を実現するために、精力的に研究が進められています。

（注 2）マヨラナ粒子

粒子と反粒子が同一である中性フェルミ粒子の一種で、E. マヨラナによって理論的に予言されました。素粒子物理学では、ニュートリノがマヨラナ粒子である可能性が議論されています。物性物理学の分野では、マヨラナ粒子は準粒子として、トポロジカル絶縁体と超伝導体の界面、キタエフ量子スピン液体（注 10）、半導体ナノワイヤーなどに現れると考えられています。

（注 3）スピントロニクス分野

スピントロニクスとは、巨大磁気抵抗効果のハードディスクドライブへの応用に代表されるように、電子の電荷とスピン（注 4）の両方を活用し、磁気とスピンの相互作用を利用して新しい電子デバイスの発見を目指す技術分野です。プラチナなどのスピン軌道結合の強い金属を用いたスピン流（注 7）の観測法の発見を契機に、スピン流の利用に関する研究が活発に行われるようになっていきます。

（注 4）スピン

量子力学の基本的な概念であり、電子などの素粒子が持つ角運動量のことを指します。粒子が持つ電荷が電気の基となるのに対し、スピンは磁気の基となります。例えば、電子のスピンは上向きと下向きの二つの状態を取ることができます。この性質は、磁気共鳴画像法 (MRI) やスピントロニクスといった技術に応用されています。

（注 5）スピンゼーベック効果 (SSE)

スピンゼーベック効果とは、スピントロニクスの一環として、熱勾配によってスピン流が生成される現象を指します。スピン流の高精度検出が可能になり、スピンゼーベック効果に関する研究が加速的に進められています。

（注 6）量子スピン液体 (QSL)

P. W. アンダーソンによって提唱された概念で、磁性体中のスピンが長距離にわたって量子もつれを形成し、絶対零度においても秩序化しない特異な量子状態を指します。量子スピン液体はしばしば、スピンの自由度が分裂したように振る舞う分数励起と呼ばれる特徴を有しています。

（注 7）スピン流

スピンが移動する現象を指します。通常の電流が電子の電荷の移動によって生じるのに対し、スピン流は電子が移動しなくても生じ、絶縁体でも定義されます。例えば、磁性絶縁体では、スピン流はマグノン（注 15）によって運ばれます。

（注 8）エニオン粒子

特定の条件下でのみ現れる特別な粒子で、2次元空間に存在し、位置を交換するとその履歴を波動関数に記憶するというユニークな性質を持っています。この特性を利用した、安定な量子計算の実現が望まれています。

（注 9）トポロジカル量子計算

トポロジカル量子計算とは、物質の形状や構造が変わっても変わらない性質である物質のトポロジーを利用して、周辺環境からの擾（じょう）乱によるエラーから量子状態を保護し、維持する仕組みを持つ量子計算法です。A. キタエフによって提案された量子磁性体のモデルがそのプラットフォームとなり、低エネルギー状態のマヨラナ粒子を制御することで量子計算が実現されます。

（注 10）キタエフ量子スピン液体 (KSL)

A. キタエフによって提案された量子スピン液体です。この状態に磁場を印加すると、マヨラナ粒子がエニオン粒子として振る舞うことから、トポロジカル量子計算への応用が期待されています。そのため、この状態を実現する候補物質が多く提案され、実証実験が盛んに行われています。

（注 11）スピノン

1 次元量子スピン液体に現れる特別な粒子で、分数化したスピンを持つ素励起です。これらのスピノンは、中性子散乱や核磁気共鳴と呼ばれる実験手法を用いて、その存在が確認されています。

（注 12）トンネルスピン流理論

スピンゼーベック効果の実験で観測されるスピン流の結果を説明するために使用される理論です。この理論は、スピン軌道結合が強い金属と対象の磁性体の界面における角運動量の受け渡しを説明します。これにより、典型的な強磁性体のスピンゼーベック効果の実験結果だけでなく、1 次元量子スピン液体のスピノンを介した複雑な実験結果も説明することができます。

（注 13）密度行列くりこみ群法

量子多体系の基底状態や低エネルギー状態を解析するための数値計算法です。この手法は、変分法に基づいた数値最適化を用いて、対象の状態の波動関数を行列積状態と呼ばれる高表現能力を有する形式で得ることができます。特に 1 次元系では高精度の計算が可能であることが知られていますが、最近では 2 次元系への適用も進んでいます。

（注 14）時間依存変分原理

シュレーディンガー方程式に基づく波動関数の時間発展を扱う変分原理です。この原理を用いた数値計算により、高精度な時間発展の計算が可能になります。この手法は行列表積状態にも適用可能で、本研究では、行列表積状態の時間発展を利用して、トンネルスピン流理論の解析に必要な局所的な動的帯磁率と呼ばれる物理量を計算しています。

（注 15）マグノン

典型的な磁性体中の低エネルギー励起の一種です。これは、原子のスピンが集団的に振動する現象であり、スピン角運動量を持つ量子力学的な粒子として振る舞います。マグノンは、磁性材料内でスピン角運動量だけでなく、エネルギーや情報を効率的に伝達する役割を果たすことがわかっており、そうした特性が注目されています。

〈論文タイトル〉

“Spin Seebeck Effect as a Probe for Majorana Fermions in Kitaev Spin Liquids”

(日本語タイトル:「マヨラナフェルミオン探索のためのKitaevスピン液体のスピンゼーベック効果」)

〈著者〉

Yasuyuki Kato, Department of Applied Physics, University of Fukui

Joji Nasu, Department of Physics, Tohoku University

Masahiro Sato, Graduate School of Science, Chiba University

Tsuyoshi Okubo, Institute for Physics of Intelligence, The University of Tokyo

Takahiro Misawa, The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

Yukitoshi Motome, Department of Applied Physics, The University of Tokyo

加藤 康之 (福井大学 大学院工学研究科 准教授)

那須 譲治 (東北大学 大学院理学研究科 准教授)

佐藤 正寛 (千葉大学 大学院理学研究院 教授)

大久保 毅 (東京大学 大学院理学系研究科 特任准教授)

三澤 貴宏 (東京大学 物性研究所 特任准教授)

求 幸年 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

〈発表雑誌〉

「Physical Review X」(フィジカル レビュー エックス)

日本時間 3 月 6 日午前 0 時 (米国東部標準時 3 月 5 日午前 10 時) に掲載

DOI 番号 : 10.1103/PhysRevX.15.011050

〈お問い合わせ先〉

(研究に関すること)

加藤 康之 (かとう やすゆき)

国立大学法人福井大学 大学院工学研究科

(報道担当)

国立大学法人福井大学 経営企画部 広報課