

# スピン液体における量子テレポーテーション現象を 解明—トポロジカル量子計算の実現へ道

基礎工学研究科 物質創成専攻

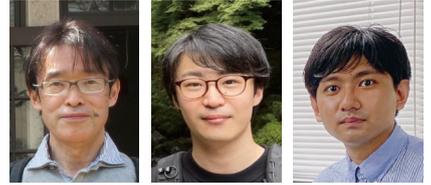
教授 藤本 聡

博士後期課程 高橋 雅大

特任助教（現：東京大学特任講師）山田 昌彦

 Researchmap <https://researchmap.jp/satoshi-fuji-osaka>

 Researchmap <https://researchmap.jp/mgyamada>



## 研究の概要

量子スピン液体と呼ばれる特殊な磁性状態に存在するマヨラナ粒子の量子もつれを利用した、量子テレポーテーション現象を理論的に解明しました。マヨラナ粒子とは元々、素粒子分野で提唱された未発見の素粒子で、その反粒子がもとの粒子と同じという性質を持ちます。近年、キタエフ物質と呼ばれる磁性絶縁体のスピン液体状態において、マヨラナ粒子と同じ性質を持つ粒子が現れることが理論的に予言されました。さらにそれが強い量子もつれを持つことから誤り耐性のある量子計算への応用が期待されています。しかしながら、キタエフ物質におけるマヨラナ粒子の強い量子もつれを実験的に検証する方法がこれまで知られていませんでした。本研究では、物質中のマヨラナ粒子の量子もつれを介して、遠く離れた2つの電子スピンの間に情報をやりとりする量子テレポーテーション現象が起こることを解明し、さらにこの現象が電氣的に測定可能であることを示しました。

## 研究の背景と結果

キタエフ物質と呼ばれる特殊な磁性絶縁体でマヨラナ粒子が現れることは2006年に理論的に提案されましたが、2009年に具体的な候補物質が発見されることにより、世界中で活発に、磁性体中のマヨラナ粒子の探索研究が行われるようになりました。近年、候補物質の塩化ルテニウムの研究によって、マヨラナ粒子が存在する間接的な証拠が積み上げられてきました。また、物質中のマヨラナ粒子は、トポロジカル量子コンピュータ実現のワイルドカードになると期待されています。従来の量子コンピュータは、一般に、外部環境からのノイズに非常に敏感で、量子情報をいかにしてノイズから保護するかが重要な課題となっています。他方、マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子コンピュータは量子情報を保護する機構を内在的に保有するため、上記の課題を根本的に克服できると考えられています。したがって、将来の理想的な量子コンピュータの開発に向けて、物質中のマヨラナ粒子の発見は重要な転換点となります。

今回の研究では、量子もつれ状態を作るマヨラナ粒子が、外部磁場がある場合、磁性絶縁体上にある点状格子欠陥に束縛される性質があることを利用し、複数の点欠陥がある場合についてマヨラナ粒子が現れるモデルを理論的に考察しました。その結果、点欠陥に強く束縛されたマヨラナ粒子の量子もつれを反映した量子テレポーテーション現象が、点欠陥に隣接した電子スピン間に現れることを解明し、相対距離に依存しないことを定量的に評価しました。次に電子スピンの量子テレポーテーション現象が走査型トンネル顕微鏡を用いた電気伝導度測定によって検出可能であることを数値シミュレーションによって示しました。この方法を用いることによって、キタエフ物質中のマヨラナ粒子の量子テレポーテーションを実験的に検証することが可能になり、トポロジカル量子計算の実現に向けて一歩前進することができます。

## 研究の意義と将来展望

本研究では物質中のマヨラナ粒子の量子もつれ状態を観測する方法を明らかにしました。今後、本研究で理論的に提案した電気伝導度測定を行うことで、候補物質塩化ルテニウム等の特殊な磁性絶縁体中のマヨラナ粒子を検出できると期待されます。また、点欠陥に束縛されたマヨラナ粒子は環境ノイズに対して耐性を持つ量子ビットの構成要素になるため、トポロジカル量子コンピュータの実現に向けて、重要なステップとなります。



図1

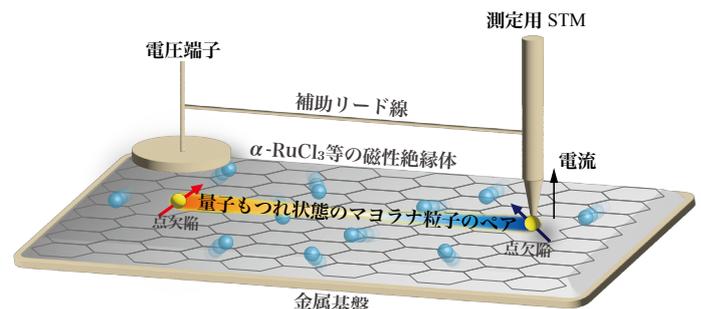


図2

特許

論文

参考URL

キーワード

Takahashi, Masahiro; Yamada, Masahiko; Fujimoto, Satoshi et al. Nonlocal spin correlation as a signature of Ising anyons trapped in vacancies of the Kitaev spin liquid. *Physical Review Letters*. 2023, 131, 236701-1-6. doi: 10.1103/PhysRevLett.131.236701

量子テレポーテーション、トポロジカル量子コンピュータ、スピン液体、マヨラナ粒子