

# トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子を検出する新たな方法

## [1] 要旨

トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子状態は量子計算への応用が期待され注目されているが、現状ではその存在の決定的な証拠が実験で得られていない。本研究では、非局所コンダクタンスに現れるアハロノフ-ボーム効果によって、マヨラナ粒子状態を検出する新しい方法が提案されている。これは従来の局所コンダクタンス測定と比べて、より信頼できるマヨラナ検出法となることが期待される。

## [2] 本文

トポロジカル超伝導体の試料表面では、1個の電子があたかも空間的に離れた2つの場所に引き裂かれたかのような振る舞い（分数化ともいう）を示すことが理論的に知られており、これによって出現した粒子状態をマヨラナ粒子（より正確にはマヨラナ束縛状態）という。マヨラナ粒子は誤り耐性のある量子計算への応用が期待され、過去約10年の間、国内外で活発に研究が行われている。トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子の探索はこれまで、局所コンダクタンスの量子化値の測定が中心であったが、近年、超伝導体と金属との接合面付近に現れる自明な束縛状態でも似た振る舞いが現れることが分かり、それとの区別が困難であることが明らかになった。このため、従来の局所コンダクタンス測定を越えるマヨラナ束縛状態の新しい検出方法を開拓していくことが重要課題とされている。前述したようにマヨラナ束縛状態の特徴は、電子が「引き裂かれて」出現したことに由来する非局所性にある。例えば1次元トポロジカル超伝導体の両端に現れた2個のマヨラナ束縛状態の間には、元々が1個の電子であったことを反映して何らかの非局所相関が残る。これは自明な束縛状態には無い際立った性質であり、この非局所相関を検出できれば、マヨラナ粒子の確かな証拠となり得る。ところが、この非局所相関は電子数の偶奇が保存しない系では観測量には現れにくいことがこれまでの研究で知られており、実験で実現する上での大きなハードルとなっていた。

最近、大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻の研究グループは、電子数の偶奇が保存しない系であっても、マヨラナ粒子の非局所性（電子の分数化現象）が、アハロノフ-ボーム効果の増強効果として観測可能であることを初めて明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2023 年 5 月号に掲載された。

本研究では1次元トポロジカル超伝導体と金属リード線からなるループ状の接合系（図1）を考え、ループを貫く磁束によるアハロノフ-ボーム効果を非局所コンダクタンス測定によって観測することを提案している。一般に超伝導体と金属との接合界面ではアンドレーエフ散乱が起こる。金属中の電子が、図1に示した2箇所の接合面で連続してアンドレーエフ散乱を受けると、電子は磁束によって生じた位相差を感じ、アハロノフ-ボーム効果が起こる。このアハロノフ-ボーム効果は非局所コンダクタンスの磁束  $\Phi$  についての  $2\pi$  周期依存性として観測できる。しかし、空間的に離れた2点でのアンドレーエフ散乱が連続して起こるには、2つの接合面での束縛状態のエネルギーが近い値であることが必要である。接合面付近の不均一ポテンシャルに由来する自明な束縛状態では、一般にポテンシャルのパラメータ条件が2つの接合面の間で異なるためエネルギーが一致せず、アハロノフ-ボーム効果は起こりにくい。これとは対照的にマヨラナ束縛状態では、上述の分数化現象を反映して、2つの接合面でのマヨ

ラナ状態のエネルギーが厳密に一致し、その結果、強いアハロノフ-ボーム効果が現れる。(図2左) 詳細な計算機シミュレーションによると、自明な束縛状態では、アハロノフ-ボーム効果は界面での不均一ポテンシャルのパラメータに強く依存し、非常に狭いパラメータ領域でのみアハロノフ-ボーム効果が現れる(図2中央)のに対して、マヨラナ束縛状態の場合には、全パラメータ領域で強いアハロノフ-ボーム効果が現れることが確認された(図2右)。この現象は、マヨラナ粒子の量子テレポーテーションのような強い意味での非局所相関とは異なり、電子数の偶奇が保存しない場合でも一般に起こる点が重要である。また、このシナリオではアハロノフ-ボーム効果のパラメータ変化に対する安定性がマヨラナ検出の鍵となり、従来の局所量子化コンダクタンスと比べて、マヨラナ状態と自明な束縛状態との違いがより顕著に現れる。今後、本研究で提案されたような非局所相関の測定によって、トポロジカル超伝導におけるマヨラナ束縛状態の探索に新しい展開が起こることを期待したい。

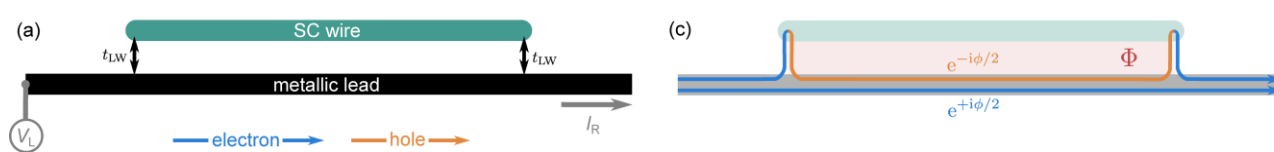


図1. 超伝導細線と金属リード線から成るループ形状接合系。ループの穴を磁束 $\Phi$ が貫く。

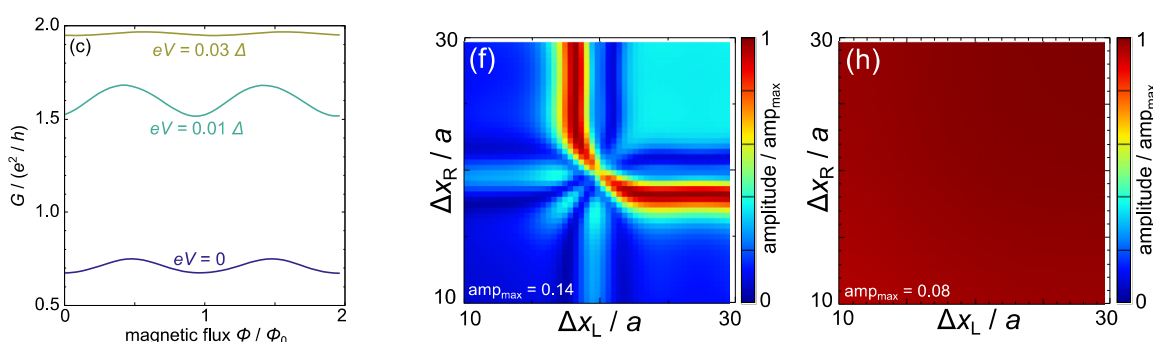


図2. (左) 非局所コンダクタンスの示すアハロノフ-ボーム効果。磁束 $\Phi$ について $2\pi$ 周期を示す。(中央、右) アハロノフ-ボーム効果のパラメータ依存性。中央図は自明な束縛状態の場合、右図はマヨラナ束縛状態の場合を示す。ともに赤色の領域で顕著なアハロノフ-ボーム効果が現れる。

原論文 (2023年4月5日公開済)

[Enhanced  \$2\pi\$ -periodic Aharonov–Bohm Effect as a Signature of Majorana Zero Modes Probed by Nonlocal Measurements](#)

Masayuki Sugeta, Takeshi Mizushima, and Satoshi Fujimoto

J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 054701 (2023).

問合せ先：氏名 藤本 聡 (大阪大学大学院基礎工学研究科 教授)

電話/FAX：06-6850-6440 電子メール：fuji@mp.es.osaka-u.ac.jp

氏名 水島 健 (大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授)

電話/FAX：06-6850-6441 電子メール：mizushima@mp.es.osaka-u.ac.jp