

## 自身の反粒子に等しい奇妙なマヨラナ粒子、物質の中での確認に大きく前進 ～量子コンピュータなどの実現に期待～

配布日時：平成27年10月21日14時  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

### 概要

1. 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（WPI-MANA）の川上 拓人特別研究員と古月 暁主任研究者のグループは、今年1月に中国の研究グループによって報告された特殊な超伝導状態に関する実験結果がマヨラナ粒子の存在証拠になっていることを理論的に示しました。
2. マヨラナ粒子は1937年にイタリアの理論物理学者E. マヨラナによって予言されたもので、フェルミ粒子<sup>1)</sup>でありながら、自身の反粒子と同一です。素粒子としてのマヨラナ粒子は80年近く経った今でも確認されていませんが、近年、トポロジカル超伝導体<sup>2)</sup>と呼ばれる特殊な材料の準粒子励起<sup>3)</sup>がマヨラナ粒子として振舞うことが理論的に指摘されました。しかし、エネルギーがゼロで、電気的に中性等のユニークな性質ゆえ、物質の中でマヨラナ粒子を捕らえることが難しく、その存在確認に向けて国際的な競争が繰り広げられています。
3. 本研究グループは、今年1月に報告された実験研究の物理的諸条件を精査し、超伝導準粒子励起について大規模かつ高精度な理論解析を行い、実験結果と照らし合わせることによって、マヨラナ粒子がトポロジカル超伝導体の量子渦<sup>4)</sup>の中で捕らえられていることを理論的に示しました。さらに、マヨラナ粒子の量子力学的な特性を利用して、実験精度を上げる具体的な方法も提示しました。
4. 自身の反粒子に等価なマヨラナ粒子の集団としての振る舞いは電子や光子と異なり、強靱な量子計算機の構築に使えらると思われています。また、エネルギーがゼロになっているマヨラナ粒子のダイナミクスも非常にユニークで、さまざまな新規量子機能の創成に役立ちます。従って、マヨラナ粒子の高い精度での確認は物質・材料の科学と技術の新展開に非常に大きな波及効果をもたらすと期待されます。
5. 研究成果は、米国物理学会の論文誌 *Physical Review Letters* 誌にて近日中にオンラインで掲載される予定です。

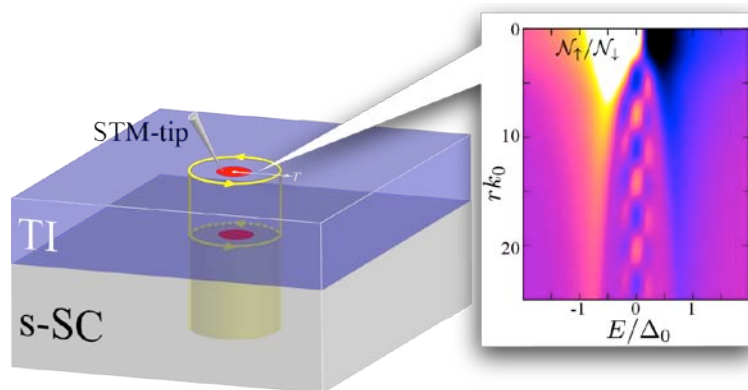


図1、トポロジカル超伝導体の量子渦に局在するマヨラナ粒子の模式図と理論計算による超伝導準粒子励起密度分布。

## 研究の背景

粒子と反対の電荷を持つ以外は、質量やスピン等の性質において全く同じ反粒子が存在することは、電子を含むフェルミ粒子と呼ばれる一群の素粒子の特徴です。1928年にP.A.M. ディラックによって理論的に予言された電子の反粒子である陽電子の存在は、1932年にC.D. アンダーソンによって実験的に確認され、その間、数年しか掛かりませんでした。ほぼ同じ時期に、E. マヨラナは反粒子が自身に等しい、電荷中性のフェルミ粒子の存在を提案しました。マヨラナ粒子と呼ばれるようになったこの粒子の存在は、80年近く経った今でも確認されていません。近年、トポロジカル超伝導体の準粒子励起がマヨラナ粒子として振る舞うことが理論的に指摘され、その確認に向けて国際的な競争が繰り広げられています。

今年になって上海交通大学の実験グループが、従来型のs波超伝導体基盤の上に3次元トポロジカル絶縁体<sup>2)</sup>薄膜を成長させ、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて、超伝導量子渦の中心部で大きなゼロエネルギー準粒子励起密度を観測しました。実験装置の解像度や欠陥による影響が絡んでいる可能性もあって、マヨラナ粒子の存在如何について確実な結論に至らなかったものの、非常に注目すべき実験結果です。

## 研究内容と成果

本研究グループは、図1に示された従来型s波超伝導体とトポロジカル絶縁体のヘテロ構造について、Bogoliubov-de Gennes方程式<sup>3)</sup>を解くことによって、準粒子励起を解析しました。この結果、トポロジカル絶縁体薄膜が厚い場合、図2aに示されたように、マヨラナ粒子が薄膜の上下の表面に局在していることを確認しました。一方で、トポロジカル絶縁体薄膜が薄ければ、超伝導量子渦全体に伝導電子状態が現れ(図2b)、マヨラナ粒子が掻き消されています。さらに、量子渦の中心から計った距離とエネルギーの関数として準粒子励起密度を評価し、実験的に観測されたパターンと一致することを確認しました。以上の結果から、マヨラナ粒子が実験で捕らえられていたと結論づけられます。

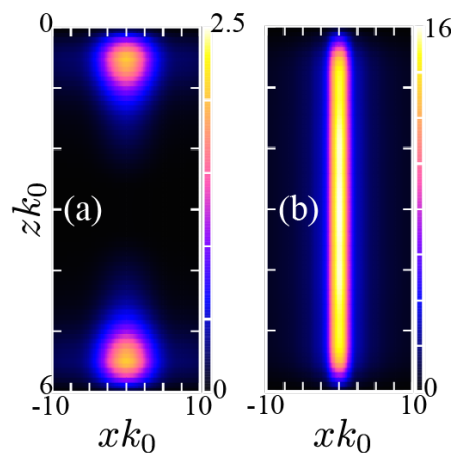


図2、(a): 厚いトポロジカル絶縁体薄膜でのマヨラナ粒子の空間分布。量子渦は $x=0$ に位置し、膜厚(縦)方向を貫いている。(b): 薄いトポロジカル絶縁体薄膜での有限エネルギー準粒子励起の空間分布。空間座標はトポロジカル絶縁体表面状態から決まる波長 $k_0^{-1}$ で規格化されている。

超伝導準粒子励起の波動関数にスピン上向きと下向きの成分が含まれていますが、今までに報告されていたSTM測定結果ではその両方からの寄与が混ざっているため、ゼロエネルギーマヨラナ粒子を一つの量子状態として取り出せていませんでした。本研究グループは、図3に示されたように準粒子励起波動関数の空間分布がスピン状態とエネルギーによって異なるため、スピン上向きと下向きの状態密度の比にチェッカーボード模様(図1参照)が現れることを理論的に解明しました。今後、スピン分解STMの使用による、マヨラナ粒子のより高い精度での実験観測が期待されます。

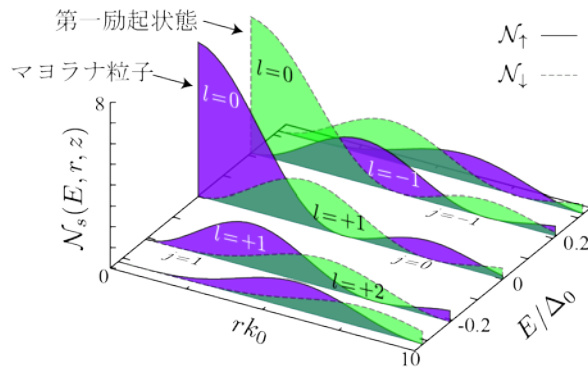


図3、準粒子励起のスピン上向き（紫）と下向き（緑）成分の波動関数。

今回の理論解析を行うに当たって、広い材料体積とエネルギー範囲において、波動関数を正確に計算する必要がありました。本研究グループは世界的に見てもごく限られた研究者しか習得できていない優れた計算技法と豊富なスーパーコンピュータ資源を駆使して、精度の極めて高い計算結果を得ることに成功し、今回の研究成果につながりました。

### 今後の展開

物質中のマヨラナ粒子の確認に向けて繰り広げられている世界的な競争の背景には、それを使えば強靱な量子計算が実現できることが挙げられます。量子計算は、量子波動関数の重ね合わせを利用して莫大な情報を驚異的な速さで処理でき、多くの重要な分野での応用が期待されています。しかし、今までに試みられた実装方式では、量子状態は壊れやすいため、大規模な量子計算の実現には至っていません。マヨラナ粒子は電気的中性で、環境からの影響を受けにくい特徴を持っています。マヨラナ粒子を単一の量子状態として確認し、その効率的な操作方法を確立できれば、それを利用した量子計算の実現に向けた研究開発が加速されます。物質・材料の科学と技術の新展開に計り知れない波及効果が期待されます。

### 掲載論文

題目： Evolution of Density of States and a Spin-Resolved Checkerboard-Type Pattern Associated with the Majorana Bound State

著者： Takuto Kawakami and Xiao Hu

雑誌： Physical Review Letters

掲載日時： 近日中にオンライン掲載予定

## 用語解説

### (1) フェルミ粒子

電子のようにスピン 1/2 の粒子のこと。フェルミ粒子には反粒子が存在し、反対の電荷を持つ以外、質量やスピン等の性質は全く同じである。一方で、光子等整数スピンを持つものはボーズ粒子で、自身の反粒子と同じである。マヨラナ粒子はフェルミ粒子でありながら、自身の反粒子に等しい、奇妙な素粒子である。マヨラナ粒子は、反物質の存在とも関連し、宇宙の生い立ちに関わるとされている。

### (2) トポロジカル超伝導、トポロジカル絶縁体

スピン軌道相互作用によって、電子の波動関数に特異な位相幾何学的性質を持ち、ユニークな表面特性を示す一連の物質がある。トポロジカル絶縁体はサンプルの内部は絶縁的で、その表面に電子のスピンと運動量が互いに束縛され、非磁性欠陥からの散乱を受けない金属的状态を持つ。トポロジカル超伝導体の内部は超伝導状態で、その表面に線型なエネルギー分散関係を持つ準粒子状態が現れる。トポロジカル超伝導体を実現するために、トポロジカル絶縁体と従来型 s 波超伝導のヘテロデバイスが提案されている。

### (3) 超伝導準粒子励起、Bogoliubov-de Gennes 方程式

超伝導は電子のクーパ対の凝縮体であり、単一電子は基底状態になっている超伝導状態より高いエネルギーを持ち、そのエネルギー差は超伝導ギャップ関数と呼ばれる。しかし、磁場や欠陥等で超伝導が局部的に抑制された場所では、超伝導ギャップ関数より低いエネルギーを持つ束縛された量子状態が現れる。これらの状態は電子と正孔の線型結合からなり、準粒子と呼ばれる。特殊な条件の元では励起エネルギーがゼロになり、その準粒子がマヨラナ粒子として振る舞う。超伝導準粒子状態を定量的に解析する方法が Bogoliubov-de Gennes 方程式と呼ばれ、BCS 理論を空間的に非一様な場合に拡張したものになっている。

### (4) 量子渦

超伝導や超流動等のマクロな量子状態のトポロジカル励起。物理量の一価性から、量子渦の廻りに一周すれば、量子波動関数の位相の変化が  $2\pi$  になることが要請される。超伝導の量子渦は量子化された磁束を伴う。

## 本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)

主任研究者 古月 暁

TEL: 029-860-4897

E-mail: HU.Xiao@nims.go.jp

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp