OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Majorana Spectroscopy of Topological Superconductors
Author(s)	鄭, 従真
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/107064
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　　名　　（ 鄭 従真 ）	
論文題名	Majorana Spectroscopy of Topological Superconductors (トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ分光)

論文内容の要旨

本論文は、トポロジカル超伝導体に現れるマヨラナ準粒子状態の検出と、それを用いたマヨラナ分光の基盤構築を目的とする理論研究である。トポロジカル超伝導体では、クーパー対の波動関数の非自明な運動量空間構造に起因して、表面にマヨラナ状態と呼ばれる特殊な電子状態が現れる。しかし、トポロジカル超伝導の明確な実現、すなわちマヨラナ状態の確実な検出は、現在も重要な未解決課題である。特に、単なるスペクトル構造ではなく、マヨラナ状態に固有の性質を捉える実験的指標が求められている。

トポロジカル超伝導体の有力な候補として、本論文ではスピン三重項超伝導体UTe_2を主対象とする。UTe_2では、結晶対称性から複数の超伝導対称性が候補となるが、実験的に示唆される対称性は互いに必ずしも整合しておらず、超伝導対称性の同定は現在も議論の的となっている。本論文では、各候補の超伝導対称性がトポロジカル結晶超伝導として特徴づけられることを示す。さらに、マヨラナ状態の存在や性質が、表面方位と超伝導対称性に密接に結びつくことを明らかにする。

次に、電気的測定と磁気的測定の双方からマヨラナ状態を検出する手法を理論的に提案する。第一に、超伝導チップを用いた走査トンネル顕微鏡測定に着目し、アンドレーエフ分光およびショットノイズ測定がマヨラナ表面状態の検出に有効であることを示す。さらに、既存実験との比較を通じて、UTe_2の超伝導対称性に対する重要な示唆を得る。第二に、核磁気共鳴測定を用いて、マヨラナ状態に固有のイジング磁気応答を検出できることを示す。トポロジカル超伝導体と金属薄膜からなるヘテロ接合系において、近接効果により誘起される奇周波数クーパー対を介して、マヨラナ状態の磁気応答を増強できることを明らかにする。

以上の結果は、UTe_2におけるトポロジカル超伝導の理解を深めるとともに、マヨラナ分光に基づく超伝導対称性同定の具体的方針を与えるものである。本論文で提案した手法は、UTe_2に限らず、広くトポロジカル超伝導体の実験的同定に応用可能である。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　鄭　従真　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主査　教授	藤本　聡
	副査　教授	井澤　公一
	副査　教授	石渡　晋太郎
	副査　教授	水島　健（大阪公立大学大学院理学研究科）

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、トポロジカル超伝導体に現れるマヨラナ準粒子状態の検出方法の開拓と、それを用いたマヨラナ分光（マヨラナ状態の検出を通して超伝導対称性を同定する）の理論的基盤の構築を目的とするものである。トポロジカル超伝導の研究においては、新しい仕組みの量子計算への応用が期待されるマヨラナ状態の検出が最重要課題であり、本論文はこの問題に対する新しいアプローチを理論サイドから開拓するものである。特にトポロジカル超伝導体の有力候補物質であるUTe2を対象としてミクロなモデル計算と、対称性に基づく包括的な議論によって研究を進めている。全体は以下の通り３部構成となっている。

(1) UTe2で実現するマヨラナ表面状態のタイプを結晶対称性とクーパーペア対称性で分類。
(2) 対称性で許される全てのクーパーペア対称性に対して、マヨラナ粒子状態がトンネル分光にいかなる特徴を生ずるかを理論的に明らかにした。
(3) マヨラナ状態の特徴的な磁気応答を結晶対称性との関連で明らかにし、それを用いたマヨラナ状態の磁気的検出方法を提案。

上記の(1)では、UTe2の持つ擬2次元的フェルミ面上で実現する奇パリティ超伝導状態が、結晶対称性によって守られたトポロジカル超伝導状態となり、その対称性を反映したマヨラナ表面状態を持つことが明らかにされた。次に(2)では、最近のs波超伝導チップを用いたSTM実験に触発され、s波超伝導チップとトポロジカル超伝導体の間のトンネル分光にマヨラナ表面状態の特徴がいかに現れるかについて研究を行っている。

最後の(3)の磁気応答の研究においては、UTe2の試料表面に通常金属薄膜を蒸着した系において、近接効果によって、奇周波数s波超伝導状態が通常金属側に深く染み込むことを用いて、マヨラナの磁気応答を金属側で増強することを狙ったものである。詳細なモデル計算によって、マヨラナ状態が金属側に深く染み出すことが確認され、その特徴的な磁気応答が、核磁気緩和率やナイトシフトの温度依存性に現れることが明らかにされた。以上の結果は将来のUTe2におけるマヨラナ状態の実験探索において重要な意義を持つ成果であると言える。

審査委員会では、上述の通り、本論文の学術的価値が非常に高いことを全員一致で認めた。 以上の理由により、博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。