OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Engineering and Braiding Non-Abelian Anyons in Topological Superconducting Systems
Author(s)	三野, 巧
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92217
rights	
Note	

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　（三野　巧）	
論文題名	Engineering and Braiding Non-Abelian Anyons in Topological Superconducting Systems （トポロジカル超伝導系における非可換エニオンのエンジニアリングと組み紐操作）

論文内容の要旨

本論文では、マヨラナ多体効果と非エルミート性の協奏によって創発される新規量子物性やエニオンの探索について論述する．

エニオンは、従来の統計性とは異なる統計性に従う新奇な粒子である．交換操作によって任意の位相因子を獲得する可換エニオンや行列因子を獲得する非可換エニオンの二種存在する．この交換操作は、組み紐群によって特徴づけられることから組み紐操作やBraidingと呼ばれている．非可換エニオンの例として、分数量子ホール系やトポロジカル超伝導体などに現れるマヨラナ準粒子が存在する．マヨラナ粒子は粒子と反粒子が同一視される中性粒子であり、近年観測に向けて理論実験の両面から盛んに研究されている粒子である．またマヨラナ多体問題は、物性、素粒子や宇宙といった物理学全体を包括する要素を含んでいる．さらに量子コンピュータへの応用も盛んに行われており、領域を横断する学際分野の一つとして確立されている．

他方でトポロジカル物質の分類理論を、非エルミート系に拡張され非エルミートトポロジカル相が提案されている．非エルミートトポロジカル相では、PT対称性の破れに伴うスペクトル転移や非エルミート表皮効果といった非エルミート系特有の現象が存在する．非エルミート性により新たな相や現象が発現すると期待される．マヨラナ多体効果と非エルミート性の協奏により新たなマヨラナの物理が創発されると予想される．

我々は非エルミートマヨラナ系として散逸を伴った1次元トポロジカル超伝導接合系を提案し、それがPT対称性を持つYang-Lee模型と呼ばれる非エルミート量子スピン系と等価であることを解析的に示した．Yang-Lee模型は臨界点に非可換エニオンを誘起する模型でもある．次に提案した系の安定性を定量的に議論し、系のパラメータ制御により安定化することを得た．

本研究内容を発端とし、非エルミートマヨラナ系の相図解明に向けた研究が発展すると期待される．

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（三野　巧）			
論文審査担当者	（職）		氏　名
	主査	教　授	藤本　聡
	副査	教　授	山本　俊
	副査	教　授	石渡　晋太郎

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やその他のトポロジカル量子系で実現する非可換エニオンの非可換量子統計を実証するためのスキームを提案する理論研究に関するものである。非可換量子統計とはボソンでもフェルミオンでもない量子統計であり、量子多体状態が２つの粒子の位置交換操作の順番に依存するという際立った特徴がある。この性質を利用して、非可換エニオンの交換操作によって量子ゲートを実装するトポロジカル量子計算が提案されている。しかしながら非可換量子統計の実験的な実証はこれまでなされていない。これは、これまで理論的に提案されてきた非可換エニオン系が、実験的に実現することが難しく、また、非可換統計を実証する方法も非常に難しいことに起因する。この問題点を克服するため、本論文では、非エルミート量子系で実現するYang-Leeエニオンに着目した。Yang-Leeエニオンは虚数磁場の印加されたイジング・スピン・モデルである量子１次元Yang-Lee モデルの臨界点で実現する。この系では非自明な励起はYang-Lee エニオンのみであるため、エニオンの操作や検出が容易であるという利点があり、この点に着目した点に本研究の独自性がある。しかし他方、この系が非エルミート系であるため、通常の平衡状態の量子系で実現するのが難しいという問題点がある。本論文は、この点を解決するため、電子浴と結合したトポロジカル超伝導ナノワイアの接合系を提案している。１次元トポロジカル超伝導体の端状態に現れるマヨラナ束縛状態を用いて、イジング・スピン系を構築し、さらに超伝導体との間で電子をやり取りする金属の電子浴と結合することによって、虚数磁場を擬似的に実現するという独創的なアイデアを提示している。これによって、非エルミート量子系であるYang-Leeモデルと等価な系を実現する方法を考案している。さらに、この系でYang-Leeエニオンを交換操作し、検出することによって、非可換統計を実証する方法も示している。本論文の結果は、将来の非可換量子統計の実証に向けて重要なステップとなる有益なものと評価される。
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が全員一致で認められた。
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。