HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	異常な超伝導近接効果の数理構造［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	池谷, 聡
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13199号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/69931
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Satoshi_Ikegaya_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　池谷 聡

審査担当者　主　査　准教授　浅野 泰寛
副　査　教　授　矢久保 考介
副　査　教　授　丹田 聡
副　査　教　授　戸田 泰則
副　査　准教授　鈴浦 秀勝

学位論文題名

異常な超伝導近接効果の数理構造
(Physics of flat-band zero-energy states at a dirty surface of a nodal topological superconductor)

異方的超伝導体は近年の超伝導現象物理学における主要な研究対象である。超伝導は、低温において電子間に引力がはたらき、2 つの電子が対を形成することで発現する。異方的超伝導体とは、電子対の形成に寄与する引力相互作用に異方性がある場合に発現する超伝導体の総称であり、銅酸化物高温超伝導体、有機物超伝導体、重い電子系超伝導体などがその具体例に数えられる。異方的超伝導体の最も重要な性質は、超伝導体表面 (界面) に Andreev 束縛状態とよばれるギャップレス (ミッドギャップ) 準粒子束縛状態が現れることである。Andreev 束縛状態に起因する物理現象の劇的な異常は、1990 年代から今日に至るまで、超伝導現象物理学の枠組みの中で地道な研究が続けられている。さらに、最近になって、Andreev 束縛状態の発現が異方的超伝導体のもつトポロジカルに非自明な性質と本質的に関連していることが指摘され、異方的超伝導体の物理は 2010 年以降多くの研究者が参入する研究分野となっている。

大多数の異方的超伝導体は、超伝導ギャップが Fermi 面上で消失する点 (ノード) を有する。このようなノードを持った異方的超伝導体 (ノーダル超伝導体) における Andreev 束縛状態は Fermi 準位直上で高度に縮退しているため、低エネルギーの電磁気学的現象に劇的な影響を及ぼすことが知られている。量子力学の教えるところによると、量子状態の縮退は量子系のもつ対称性の帰結である。ノーダル超伝導体は、結晶性が高く並進対称性が上手く定義できるときに発現し、その結果多重縮退した Andreev 束縛状態がその表面に現れる。この事実は、Andreev 束縛状態の縮退が並進対称性によって守られていることを示唆する。しかしながら、実験をする際には、試料表面や接合界面において不純物ポテンシャルを完全に取り除くことは不可能である。言い換えれば、超伝導体の表面では不可避的に並進対称性が破れている。したがって、現実のノーダル超伝導体においては、Andreev 束縛状態はその高い縮退度を保てず、さらには劇的な物理現象も観測できないかもしれないのである。このことから、Andreev 束縛状態のポテンシャルの乱れに対する頑強性や脆弱性を記述する理論が求められていた。

以下に本論文の主要な結果をまとめる。

第 2 章において著者は、ノーダル超伝導体のポテンシャルの乱れた表面における Andreev 束縛状態の縮重度を記述する「指数」を定義している。その指数はノーダル超伝導体のもつカイラル対称性とよばれる特殊な離散対称性に着目した解析から導出される。また、Atiyah-Singer 指数定理

にもとづく考察から、その指数がノーダル超伝導体のトポロジカルに非自明な性質と関連したトポロジカル指数の一種であることを明らかにしている。

第 3 章では、「指数」を露わに反映した物理量の量子化現象の存在を明らかにしている。本論文では、ノーダル超伝導体である p 波、d 波、f 波超伝導体と金属との接合系における微分コンダクタンスを数値的に調べている。その結果、接合金属における不純物散乱が強い極限で、零バイアス微分コンダクタンスが量子化し、量子化値が「指数」で特徴付けられる事を明らかにしている。さらに、カイラル対称性に着目した解析から、このコンダクタンスの量子化現象が接合系に存在する共鳴状態に起因することを証明している。

第 4 章では、カイラル対称性に着目した金属/超伝導体接合における議論を Josephson 接合系に拡張している。p 波超伝導体/金属/p 波超伝導体接合において不純物擾乱に対して頑強な分数 Josephson 効果が示されることは、現象論的研究から既に知られていた。著者は、この分数 Josephson 効果を担う高度に縮退した共鳴状態が、カイラル対称性によって守られていることを証明し、その発現機構に微視的理論にもとづく理解を与えている。

第 5 章では、半導体薄膜に近接効果誘起超伝導ペアポテンシャルと Zeeman ポテンシャルを導入することで発現する人工超伝導体の輸送現象について調べている。その結果、この人工超伝導体において、実効的な p 波対称性の超伝導秩序に起因する劇的な量子輸送現象が示されることを明らかにしている。

これを要するに著者は、Andreev 束縛状態の乱れたポテンシャルに対する縮退安定性を評価する理論的手法を確立し、また頑強な Andreev 束縛状態の存在を反映した物理現象の存在を予言している。これらの知見は、Andreev 束縛状態の示す劇的な物理現象に関する実験研究の進展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。