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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　池谷 聡

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)

超伝導現象の物理学の分野において、1980 年代は大きな発見が相次いだ時期である。Al や Pb といった金属で発現する超伝導はフォノンを介した電子間引力によって 2 つの電子が対を形成することによって発現し、これはその機構を明らかにした研究者の名を冠して Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 機構と呼ばれている。重い電子系の化合物、有機物伝導体、銅酸化物といった当時の新奇物質で発現する超伝導を担うのが、電子対であることは疑いない。しかし、何が電子間引力を媒介するのかは未だに決着がつかないままである。これら新奇超伝導体の異常な物性を研究する過程で、異方的超伝導という概念が誕生した。超伝導の他にも、Anderson 局在や量子 Hall 効果などの研究が大きく進展したのも 80 年代であり、またトポロジカルに非自明な超伝導に関する研究の黎明期もこの時期に重なる。

異方的超伝導体は、電子対の形成に寄与する引力相互作用が異方性をもつ場合に発現する超伝導体の総称である。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、その表面に現れる事である。Andreev 束縛状態が引き起こす異常な電磁気学的現象は、1990 年代から今日に至るまで、超伝導現象論における主要な研究課題であり続けている。異方的超伝導体の研究に転機が訪れたのは 2000 年代後半であり、ここに至って異方的超伝導体がトポロジカルに非自明な物質群であると認識され始めた。絶縁体や超伝導体のように準粒子の励起にギャップをもつ物質の状態は、Hilbert 空間における波動関数の大域的構造を表すトポロジカル指数によって特徴づけることができる。トポロジカルに非自明な物質 (トポロジカル物質と略称) の物理学の根幹を為す概念であるバルク・境界対応によれば、物質内部の状態に対して定義されたトポロジカル指数が、物質表面におけるギャップレス表面束縛状態の数を与える。つまり、Andreev 束縛状態は、異方的超伝導体がもつトポロジカルに非自明な性質を反映したギャップレス表面束縛状態だったのである。2010 年代に入ると、異方的超伝導体をトポロジカル物質の一種としてとらえる見方がさらに浸透し、異方的超伝導体はトポロジカルに非自明な超伝導体 (トポロジカル超伝導体) とその呼び名を変えた。超伝導体としての性質とトポロジカル物質としての性質とが複雑に絡み合うことで、多彩かつ劇的な電磁気学的性質を獲得するトポロジカル超伝導の理解は、伝統的な超伝導現象の物理学の知見と、新たに勃興したトポロジカル物質の物理学の知見とを相補的に用いることで今も深化している。

超伝導を特徴付ける秩序変数は Fermi 準位近傍における一電子 (準粒子) の励起を良く表しているため、ギャップ関数とも呼ばれている。大多数のトポロジカル超伝導体におけるギャップ関数は、Fermi 面上で超伝導ギャップの消失した点 (ノード) をもつ。このようなノードを持った超伝導体 (ノーダル超伝導体) を特徴づけるトポロジカル指数は、ある工夫のもとで定義される。たとえば、d 次元の超伝導体の場合、$(d-1)$ 次元の波数をある値 k に固定することで、1 次元的な部分 Brillouin 域を見出すことができる。この 1 次元的部分 Brillouin 域における準粒子励起がノードを内包しなければ、その部分 Brillouin 域内の波動関数を用いて 1 次元巻き付き数 $w(k)$ を定義できる。このような部分 Brillouin 域毎に定義されたトポロジカル指数 $w(k)$ が、ノーダル超伝導体のトポロジカルな性質を特徴づけるのである。一般に、1 次元巻き付き数 $w(k)$ は波数 k に関して有限の領域で零でない値 (非自明な値) となる。その帰結として、ノーダル超伝導体の波数 k と平行方向の表面には、波数 k に対して全く分散を持たない Andreev 束縛状態が現れるのである。この分散を持たない Andreev 束縛状態は、Fermi 準位直上で高度に縮退しているため、超伝導接合系の量子輸送現象に劇的な影響を及ぼす。たとえば、金属/超伝導体接合における微分コンダクタンスの零バイアス異常や、Josephson 接合

における低温異常などは、多重縮退した Andreev 束縛状態が接合系に共鳴チャネルを形成することで生じる完全伝導現象の帰結である。

しかしながら実験をする際、試料表面あるいは接合界面においてポテンシャルの乱れを完全に取り除くことは不可能である。即ち、超伝導体の表面は不可避的に「汚れて」いる。ポテンシャルが乱れている場合の問題点は、波数はよい量子数でなくなってしまうために、部分 Brillouin 域における 1 次元巻き付き数 $w(k)$ が定義できなくなってしまうことにある。量子力学の教えるところによると、量子状態の高度な縮退は量子系が保つ高い対称性の帰結である。ポテンシャルの乱れによって並進対称性が破れた結果、トポロジカル指数がうまく定義できなくなるという事実は、Andreev 束縛状態の縮退が並進対称性によって守られていたことを示唆する。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、さらには劇的な輸送現象も観測できないかもしれないのである。トポロジカル超伝導体の研究は理論が先行しているが、物理学はあくまで実証科学である。理論的な予言を実験により検証する事が、トポロジカル超伝導という概念を科学に昇華するために必須なのである。その上で、多重縮退した 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ことは、理論研究に課された重要課題であった。

以下に本研究で得られた主要な結果を示す。

(1) まず、ノーダル超伝導体の汚れた表面における Andreev 束縛状態の縮退度を記述する指数 N_{ZES} を定義した。指数 N_{ZES} は、ノーダル超伝導体がもつカイラル対称性とよばれる特殊な離散対称性の性質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、この指数 N_{ZES} が、乱れのないノーダル超伝導体を特徴づけていたトポロジカル指数 $w(k)$ と密接に関連した、トポロジカル指数の一種であることを明らかにした。本研究の結果、バルク・境界対応をノーダル超伝導体に拡張する処方箋が明らかになった。

(2) 次に、指数 N_{ZES} 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た。本研究では、ノーダル超伝導体である p_x 波、d_{xy} 波、f 波超伝導体と金属の接合系における微分コンダクタンスを調べた。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 $(4e^2/h)|N_{\mathrm{ZES}}|$ という値に量子化する事が分かった。また、カイラル対称性の性質に着目した解析により、このコンダクタンスの量子化現象が接合に形成された N_{ZES} 個の共鳴状態に起因していることを証明した。

(3) 以上の研究から、p_x 波超伝導体や f 超伝導体といったスピン 3 重項超伝導体は零でない指数 N_{ZES} で特徴付けられることが分かった。しかしながら、スピン 3 重項超伝導体は物質科学的に極めて希少であり、多重縮退した Andreev 束縛状態をもつスピン 3 重項超伝導体の具体例は未だに見つかっていない。そこで、強い Dresselhaus 型スピン軌道相互作用をもつ半導体薄膜に Zeeman 場と s 波対称性のペアポテンシャルを導入するで実現する人工的なノーダル超伝導状態に着目し、その輸送特性を調べた。その結果、この人工ノーダル超伝導体が多重縮退した Andreev 束縛状態に起因するコンダクタンスの量子化現象を示すことを明らかにした。さらに、この人工ノーダル超伝導体の低エネルギー励起を記述する有効 Hamiltonian が、p_x 波超伝導体の Hamiltonian とユニタリ同値であることを示した。