

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 中河西 翔

固体電子におけるトポロジーは、量子ホール効果の発見を契機にその理解が進んで来た。近年では、さらにその観点から相対論的スピン軌道相互作用が再考されるようになり、低温・高磁場といった極限的な状況に限らずとも、広範な状況における数々の現象でトポロジーが本質的な役割を果たすことが認識されてきている。その代表例がトポロジカル絶縁体であるが、その考え方が超伝導体、超流動体へも拡張され、現在では「トポロジカル周期律表」と呼ばれる一般的な分類学が確立している。その中でも、トポロジカル超伝導体では、マヨラナフェルミオンと呼ばれる、自分と自分の反粒子が一致するという著しい特徴を持つ粒子が出現することが予想されており、その発現機構と検出方法に関する理論的提案、および実験的探索が精力的に行われている。

これらの背景の下、中河西氏はトポロジカル超伝導およびマヨラナフェルミオンを発現させる人工構造の理論的提案と、マヨラナフェルミオンが示すスピン関連現象に着目し、1. 2層ラシュバ系におけるヘリカルトポロジカル超伝導、2. 磁性体・超伝導体接合系におけるカイラルトポロジカル超伝導、および、3. ヘリカルマヨラナフェルミオンのスピン自由度、に関する理論的研究を行い、以下の顕著な成果を得た。

1. については、2枚のラシュバ系が混成によって相互作用し、それによって生じたエネルギーギャップの中にフェルミエネルギーがあるときには、現実的な相互作用の領域でヘリカルトポロジカル超伝導が出現することを明らかにした。2. については、母体の超伝導ギャップの中に現れる束縛状態（ス波状態）が重なり合って作るギャップ内超伝導が磁性体のスピン配置にどのように依存するかを定式化し、その例としてスキルミオン結晶配置の場合には、p波カイラルトポロジカル超伝導が実現することを示した。3. については、ヘリカル超伝導体上に置いたナノワイヤの端にヘリカルマヨラナフェルミオンが現れること、それがイジング的なスピンを持つこと、そしてそのスピンの間の相関を電氣的に制御できること、を明らかにした。

本論文は英文によって執筆され、以下の5章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章は、Introductionとして、1.1 トポロジー概念の導入、1.2 量子ホール効果とベリー位相の説明、1.3 トポロジカル周期律表、1.4 トポロジカル超伝導、1.5 マヨラナフェルミオン、の順で説明している。特に1.4では1次元のp波トポロジカル超伝導体のキタエフ模型、現実物質におけるトポロジカル超伝導探索、ヘリカル超伝導などが解説されている。1.6では本論文の目的と構成が述べられている。

第2章は、2層ラシュバ系におけるヘリカルトポロジカル超伝導の理論が記述されている。背景となったLaAlO₃/SrTiO₃界面における2次元電子系とその超伝導が概観された後、そ

これを2層系に拡張した模型が提示される。点群の対称性によるペアリング状態の分類のあと、それぞれの秩序パラメーターの感受率の計算が行われ、最も高温で起きるペアリングの同定から相図を得た。そして、それぞれの状態に対するトポロジカル指数が議論され、最も現実的と思われる相互作用に対してはヘリカル超伝導が起きることが結論された。さらに、この状態に対して、実際に有限系のタイトバインディング模型の数値的対角化により、ヘリカルマヨラナエッジチャンネルが存在することを確かめた。

第3章は、通常のs波超伝導体に磁気モーメントを結合させた模型を考察した。1つの磁気モーメントの場合には、束縛状態がギャップ内に出現することが知られており「斯波状態」と呼ばれる。これが周期的に並んだ場合には、ギャップ中にさらに別の超伝導が生じることになる。しかも、その超伝導のペアリング状態は母体s波とは異なりスピン偏極したp波で、しかも磁気モーメントの配置に依存することを、有効模型の範囲で示した。これに基づき、実際にタイトバインディング模型の数値的対角化により、1次元ヘリックスの場合にはキタエフ模型と同様のp波トポロジカル超伝導が(3.3.1節)、2次元ヘリックスの場合にはノードを持つ2次元p波超伝導が(3.3.2節)、スキルミオン結晶の場合にはp+ipのカイラルトポロジカル超伝導が(3.3.3節)、それぞれ出現することを明らかにした。これらの状態に対して、揺らぎや乱れに対する安定性、最近の実験との関連について議論している。

第4章は、時間反転対称性をもつマヨラナフェルミオンの理論について述べている。まず、ヘリカル超伝導体上に置いたナノワイヤのグリーン関数を導出し、その端にマヨラナフェルミオンが2つずつ現れることを見出した。その上で、これらの計4つのマヨラナフェルミオンに対する有効理論を構築し、それがイジングスピンによって表現できることを示し、このイジングスピンの間の非局所的相関が系のフェルミオン数の偶奇によって決まることを見出した。これにより、ゲート電圧により非局所スピン相関を制御する方法を提案している。

第5章は、全体のまとめと今後の研究の方向について述べられている。

以上本論文は、トポロジカル超伝導に関する上記3つのテーマについて、理論の立場から実験をも意識した最前線の研究を行い、新たな側面を見いだしたものであり、本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。