

別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 結晶対称性に保護されたマヨラナ準粒子の電気応答と
スピン流の理論

氏 名 山崎 勇樹

論 文 内 容 の 要 旨

トポロジカル物質はバルク電子の幾何学的性質（トポロジー）によって特徴付けられ、その表面に非自明な状態をもつ。その一種であるトポロジカル超伝導体は、通常の超伝導体とは異なり、表面にギャップレスかつ電荷中性の素励起をもつ。これは素粒子である質量が零のマヨラナ粒子と等価な性質をもつため、マヨラナ準粒子と呼ばれている。この状態を用いた安定な量子計算が提案されており、応用の観点からも興味を集めている。

しかしながら、トポロジカル超伝導体表面におけるマヨラナ準粒子を観測できたかどうかについては多くの議論があり、未だ確たる証拠は得られていない。電荷中性のマヨラナ粒子を、外部電磁場により検出・制御することは困難である。一方で、物質中に現れるマヨラナ準粒子は真空中のマヨラナ粒子と比べ、より低い対称性による制約しか受けないため、真空中にはなかった電磁応答が可能となる。マヨラナ準粒子が外場に対してどのように応答するかは基礎学理・実用性の双方から見て、理論的に解明すべき課題である。

この問題に関して、先行研究では、時間反転対称性があるトポロジカル超伝導体（表面マヨラナ準粒子がクラマース対をなす）において、2対のマヨラナクラマース対が、超伝導ギャップの対称性・結晶対称性に依存して、電氣的な外場に対して応答可能なことを示した。しかし、これらの対称性と電気応答との関係は明らかでなく、系統的な理解は得られていない。

そこで申請者は、結晶対称性に保護されたマヨラナ準粒子の電氣的な外場に対する応答を理論的に解析した。その結果、2対のマヨラナクラマース対が示す電気応答を全ての文様群に対して明らかにした。特に、2対のマヨラナクラマース対と結合する歪みテンソルと結晶対称性・超伝導対称性との関係を系統的に示した。さらに、具体的なモデルとしてアンチペロブスカイト超伝導 Sr_3SnO を考え、その表面に現れる2対のマヨラナクラマース対が結晶歪みによってギャップを開くことを示した。次に申請者は、得られた一般論を動的な外場へ拡張することで、マヨラナ準粒子のスピン輸送を議論した。具体的には、時間

反転不変なアンチペロブスカイト超伝導 Sr_3SnO の(001)面において、動的格子歪みによって2対のマヨラナクラーマース対がスピン流を生じることを明らかにした。2対のマヨラナクラーマース対が線形分散をもち、そのフェルミエネルギーが厳密にゼロであることから、緩和時間に依存しないスピン流が生成される。また、磁化によってマヨラナ準粒子にギャップが開いた状況では、スピン流はバンド構造を反映した特徴的な振動数依存性（ピークや跳び）をもつことも明らかにした。

これらの結果は対称性の議論によって導いた系の詳細（パラメーター等）に依らない普遍的な現象であり、電気的な手法によるマヨラナ準粒子の観測や操作・輸送のための理論提案や新しい物理現象の予言を可能とする。