

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	安井 勇気
論文題目	Superconductivity in $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ micro-rings ( $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 微小リングにおける超伝導性)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、強相関電子系の典型的な非従来型超伝導体として知られるルテニウムの層状酸化物<math>\text{Sr}_2\text{RuO}_4</math>について、その超伝導状態を磁場中での量子化現象から明らかにする目的で行った研究成果をまとめたものである。</p> <p>第1章の序論では研究の背景と動機、及び本論文の構成が述べられている。続く第2章では、<math>\text{Sr}_2\text{RuO}_4</math>の電子状態と超伝導状態についてこれまで知られた実験事実とその解釈をまとめている。特にスピン三重項カイラル状態の根拠となる核磁気共鳴やミュオンスピン回転の実験結果、未解決の問題、さらに本研究に関連する先行研究について解説している。第3章は、本研究のテーマであるフラクソイドの量子化の解説で、磁束とフラクソイドの違いや、半整数量子化、関連の量子振動などについて、基礎的事項をまとめている。第4章は、本研究における実験方法の記述で、集束イオンビーム (FIB) 装置を用いた微細加工によるマイクロリングの作製方法の詳細と、その電気輸送特性の測定装置・冷却装置について述べている。</p> <p>第5章では、<math>\text{Sr}_2\text{RuO}_4</math>結晶の微小リングの磁気抵抗の量子振動から、Little-Parks振動として知られるフラクソイドの整数量子化が観測できたこと、その再現性、またさらに横磁場も印加することで、スピン三重項超伝導の場合に期待される半整数量子化の観測にも成功したことを述べている。Little-Parks振動については、磁気抵抗振動振幅の定量的解析を行い、実際の実験ではデータを平均化する前の電流反転・磁場反転での個々のデータの吟味の重要性も述べている。また、半整数量子化の観測に関しては、リングの軸に垂直方向の横磁場の大きさと、半整数量子化と解釈される磁場領域の関係性から導かれる解釈の妥当性なども議論している。</p> <p>第6章では、形状のやや異なる微小リングで、Little-Parks振動とは異なる大きな振幅の磁気抵抗振動が観測されること、そして臨界電流も振動することから、微小リングが弱結合を含む超伝導量子干渉素子 (SQUID) として振舞うことを述べている。この原因として、超伝導電子対の軌道角運動によって時間反転対称性の破れたカイラル超伝導状態の特徴である、カイラルドメイン境界がリングの腕に2か所自発的に生じて弱結合となっている可能性を、国際共同研究によるGinzburg-Landau理論の結果とも合わせて議論している。</p> <p>第7章では、本研究による微小リングの磁気振動の量子化からは、<math>\text{Sr}_2\text{RuO}_4</math>の超伝導状態がスピン三重項カイラル状態として理解できると結論している。</p> <p>また付章では、フラクソイド量子化の基本式の導出と、第6章で用いたカイラル<math>p</math>波超伝導状態のエネルギーに対するGinzburg-Landau理論の基本式について記載している。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

ルテニウムの層状酸化物 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ は、強相関電子系の典型的な非従来型超伝導体として、これまで数多くの実験・理論研究の対象となってきた。これまでの実験結果の多くは、スピン三重項電子対の形成による、時間反転対称性の破れたカイラル $p$ 波超伝導状態を支持している。これはトポロジカル超伝導状態でもあることから、最近注目されている。しかしながら、その解釈では説明できない実験結果もあるため、超伝導状態の完全解明を目指したさらなる研究が重要と認識されている。本論文は、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導単結晶を微細加工したマイクロリングを用いて、磁気抵抗の量子振動の観測から超伝導状態の特定するための特徴的な振舞を見出した研究成果をまとめている。

第1章に記載の研究背景と目的は明確で、第2章と第3章では、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のこれまでの基本的実験事実と本研究のテーマである超伝導微小リングでのフラクソイド量子化、特になぜスピン三重項超伝導体では半整数の量子化が可能になるかが簡明に記述されている。

第4章で詳しく記述されている本研究での実験手法は、技術的にも容易なものではない。超伝導単結晶を微細加工して磁束（正確にはフラクソイド）量子化を観測することは、そもそもこれまで文献にはほとんど例が無く、フラクソイド量子化を示すLittle-Parks磁気振動の観測に単結晶で成功したこと自体、成果といえる。これは、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ に対する細かな手作業と最新装置を用いた微細加工技術を組み合わせる、申請者のオリジナルなアプローチで初めて成功したものである。

第5章と第6章が、本研究での主要な成果を記述したものである。第5章で、観測した磁気振動をLittle-Parks振動と同定するには、試料温度の安定性の吟味も含めて、振動磁場周期と振動振幅を注意深く定量評価している。そのうえで、横磁場の付加による半整数量子化を見出した成果（Phys. Rev. B (Rapid Commun.) (2017) に発表）には大きな価値がある。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の微小リングでの半整数磁束量子化は、先行研究で磁気トルクの実験から報告されている。しかし本研究での電気抵抗測定による観測は、トポロジカル超伝導状態を利用したデバイス原理開拓の観点からも制御性・応用性の高い手法と期待できる。

第6章で記述されている、Little-Parks振動とは異なる大きな振幅の磁気抵抗振動は、臨界電流の振動の観測と合わせて、超伝導量子干渉素子（SQUID）の形成と解釈できる。磁気抵抗の振動だけでなく電流や磁場を反転した場合の電圧振動の振舞も注意深く考察されている。微小リングにはSQUIDの形成に必要な2か所の弱結合の成因もいくつか可能性が議論されているが、最も自然な解釈として導入された、カイラル $p$ 波超伝導状態に伴うカイラルドメイン境界の自発的形成メカニズムについては、共同研究による理論モデルから、実験で用いた微小リングの大きさ・形状の領域では起こり得る現象であるという結論も得た。しかし、この理論の簡略性、またリングによってLittle-Parks振動・半整数フラクソイド量子化が起こる場合とSQUIDが形成される場合があるのが、どのパラメーターのつがいに基づくのかなどの理解は、今後の研究の展開を待つ必要がある。

以上のとおり、本研究では $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の単結晶の微小リングを用いて、Little-Parks振動として知られるフラクソイド量子化磁気振動を観測し、その量子化ピークが分裂することも観測した。また、SQUIDとして知られる超伝導臨界電流の振動を観測した。前者はスピン三重項超伝導に特有の半整数量子フラクソイド状態に由来すると理解できる。後者は、カイラル*p*波超伝導状態に起因するドメイン構造の形成として解釈できる。これらは $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のスピン三重項カイラル超伝導状態を支持する新たな成果である。

国際共同研究を含む本研究において、申請者が中心的な寄与をなしたことについても十分な説明が得られた。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_ 月 \_\_\_\_ 日以降