

学位論文題名

Discovery of Majorana Fermions in Sr_2RuO_4 superconductors

(Sr₂RuO₄ 超伝導体におけるマヨラナフェルミオンの発見)

学位論文内容の要旨

素粒子物理の現象を表す理論的構造と固体物理の現象を表す理論的構造が同じ普遍数理構造を持つことが示唆されている。例えば、素粒子のパイオンの崩壊確率は、量子的対称性の破れ(カイラルアノマリー)によって説明される。このとき理論形式にトポロジカル項(チャーン・ポントリアーギン項)が付く。また、最近固体物理の2次元電子系グラフェンにおいて量子ホール効果が発見された。これらの現象は全く異なるエネルギースケールで起こり、一見関連しない。しかし、グラフェンは単位格子のA格子とB格子から2成分擬スピノール表記ができ、相対論的な量子力学の場として扱える。グラフェンにおける量子ホール効果はパリティアノマリーとして理論形式にトポロジカル項(チャーン・サイモン項)が付くことで説明可能である。以上のように次元の違いはあるものの素粒子物理と固体物理においてトポロジカル項に関する普遍数理構造が明らかになってきた。

現在、ニュートリノはその質量の発見によりマヨラナフェルミオンであることが有力視されている。しかし、まだ確定はしていない。果たしてマヨラナフェルミオンは自然界に実在するだろうか。マヨラナフェルミオンとは、粒子と反粒子が同一視される粒子で、実数場のみで記述される。素粒子物理において、パリティの破れたニュートリノの発見は現在の標準理論の構築に大きな奇与をはたしている。もしマヨラナフェルミオンが実在すれば、トポロジカル項に関する普遍数理構造から素粒子物理の未解決問題を解決できる可能性がある。これに対し、いくつかの固体物理系においてマヨラナフェルミオンの観測が示唆されている。本研究の目的は、実験室で固体物理系を用いてマヨラナフェルミオンを探索することである。

本論文は全六章から構成される。

第一章では、序論として、本研究の背景と目的を述べた。さらに、今回用いた Sr_2RuO_4 超伝導体のカイラル単ドメインによる電子輸送測定の実験結果の必要性を記述した。ミリメートルサイズの大きな単結晶では、クーパ対の内部自由度によるドメイン構造が試料に形成され、 Sr_2RuO_4 の本質的な現象が平均化され観測できない可能性がある。

第二章では、超伝導の発見から今日までのその後の発展について簡単に振り返った。特に、本研究で用いる Sr_2RuO_4 がスピン三重項およびカイラル p 波超伝導体であると示唆している実験結果について記述した。また、大きな Sr_2RuO_4 単結晶で既に報告されている電子輸送測定の結果をまとめた。

第三章では、 Sr_2RuO_4 単結晶作成から電子輸送測定の方法までを述べた。 Sr_2RuO_4 は固相反応

法によって作成した。この作成法ではミリメートルサイズの大きな単結晶を作成する事は困難であるが、マイクロメートル程度の Sr_2RuO_4 であれば十分作成できる。作成した Sr_2RuO_4 を 2-プロパノール溶液中で分散させ、表面が酸化膜でコーティングされたシリコン基板上に滴下した。結晶性の良い試料に電極を作製するために組成分析および菊池線回折パターンの実験結果から良質な単結晶を選び出した。電子ビームリソグラフィーを使って試料に電極パターンを描画し、金電極を作製した。試料と電気的接触を取るために電子ビームを試料上の電極に局所的に照射し、接触抵抗を大幅に減少させることに成功した。

第四章では、マイクロサイズの Sr_2RuO_4 単結晶における電子輸送測定を行った。測定は希釈冷凍機を使用し、最低温度 60mK まで行った。電気抵抗の温度特性から Sr_2RuO_4 の超伝導転移 ($T_c \approx 1.6 \text{ K}$) が観測された。次に、各温度で電流-電圧特性を測定した。ここで一般的な電流-電圧特性では、発生電圧 V が電流 I に対して奇関数となる。すなわち $V(+I) = -V(-I)$ である。驚くべきことに、 T_c 以下の Sr_2RuO_4 の電流-電圧特性は、電圧 V が電流 I に対して偶関数となることを発見した。これは、パリティの破れた電流-電圧特性である。この異常な結果は、交流測定や複数の試料において再現した。また、 ab 面に垂直に磁場を印加すると +450Oe 付近で、発生電圧 V が正から負へ反転することを発見した。

第五章では、パリティの破れた電流-電圧特性の起源に関する解釈を行った。まず、我々が測定した試料サイズは 1~10 μm であり、これまでに報告されているカイラル単ドメインサイズと同程度であることから単ドメインに由来する現象を観測していると考察した。外部磁場 $H = +450\text{Oe}$ を印加したとき、最も伝導率が上昇し、超伝導の振る舞いを示した。この結果よりクーパー対の時間反転対称性が破れ、自発的な磁場が生じていると解釈できる。また、外部磁場印加において発生電圧 V の正負が反転していることから、単ドメインのカイラリティを操作していると考えられる。次に、カイラル単ドメイン上で電圧発生の起源を考察した。カイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 において試料端ではギャップレスの励起が可能である。また、その時励起される準粒子がマヨラナフェルミオンであると理論的に指摘されている。我々のパリティの破れた電流-電圧特性の結果は、試料端でのマヨラナフェルミオンの励起を観測したと考えている。

第六章では、本論文の研究成果を総括した。

以上、本研究はマイクロサイズの Sr_2RuO_4 単結晶を用いて、固体物理系におけるマヨラナフェルミオンの探索を目的とし、パリティの破れた電流-電圧特性から試料端で励起されたマヨラナフェルミオンを観測することに成功した。素粒子物理と固体物理の普遍数理構造から、我々の実験結果から素粒子物理へ提言できる可能性がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丹 田 聡
副 査 教 授 田 中 啓 司
副 査 講 師 浅 野 泰 寛
副 査 教 授 網 塚 浩 (理学研究院)
副 査 教 授 矢 久 保 考 介

学 位 論 文 題 名

Discovery of Majorana Fermions in Sr_2RuO_4 superconductors

(Sr_2RuO_4 超伝導体におけるマヨラナフェルミオンの発見)

素粒子物理の現象を表す理論的構造と固体物理の現象を表す理論的構造が同じ普遍数理構造を持つことが示唆されている。例えば、素粒子のパイオンの崩壊確率は、量子的対称性の破れ(カイラルアノマリー)によって説明される。このとき理論形式にトポロジカル項(チャーン・ポントリヤージン項)が付く。また、最近固体物理の2次元電子系グラフェンにおいて量子ホール効果が発見された。これらの現象は全く異なるエネルギースケールで起こり、一見関連しない。しかし、グラフェンは単位格子のA格子とB格子から2成分擬スピノール表記ができ、相対論的な量子力学の場として扱える。グラフェンにおける量子ホール効果はパリティアノマリーとして理論形式にトポロジカル項(チャーン・サイモン項)が付くことで説明可能である。以上のように次元の違いはあるものの素粒子物理と固体物理においてトポロジカル項に関する普遍数理構造が明らかになってきた。

現在、ニュートリノはその質量の発見によりマヨラナフェルミオンであることが有力視されている。しかし、まだ確定はしていない。果たしてマヨラナフェルミオンは自然界に実在するだろうか。マヨラナフェルミオンとは、粒子と反粒子が同一視される粒子で、実数場のみで記述される。素粒子物理において、パリティの破れたニュートリノの発見は現在の標準理論の構築に大きな寄与をはたしている。もしマヨラナフェルミオンが実在すれば、トポロジカル項に関する普遍数理構造から素粒子物理の未解決問題を解決できる可能性がある。これに対し、いくつかの固体物理系においてマヨラナフェルミオンの観測が示唆されている。本研究の目的は、実験室で固体物理系を用いてマヨラナフェルミオンを探索することである。

本論文は全六章から構成される。

第一章では、序論として、本研究の背景と目的を述べた。さらに、今回用いた Sr_2RuO_4 超伝導体のカイラル単ドメインによる電子輸送測定の必要性を記述した。ミリメートルサイズの大きな単結晶では、クーパ対の内部自由度によるドメイン構造が試料に形成され、 Sr_2RuO_4 の本質的な

現象が平均化され観測できない可能性がある。

第二章では、超伝導発見から今日までのその後の発展について簡単に振り返った。特に、本研究で用いる Sr_2RuO_4 がスピン三重項およびカイラル p 波超伝導体であると示唆している実験結果について記述した。また、大きな Sr_2RuO_4 単結晶で既に報告されている電子輸送測定の結果をまとめた。

第三章では、 Sr_2RuO_4 単結晶作成から電子輸送測定の方法までを述べた。 Sr_2RuO_4 は固相反応法によって作成した。この作成法ではミリメートルサイズの大きな単結晶を作成する事は困難であるが、マイクロメートル程度の Sr_2RuO_4 であれば十分作成できる。作成した Sr_2RuO_4 を 2-プロパノール溶液中で分散させ、表面が酸化膜でコーティングされたシリコン基板上に滴下した。結晶性の良い試料に電極を作製するために組成分析および菊池線回折パターンの実験結果から良質な単結晶を選び出した。電子ビームリソグラフィを使って試料に電極パターンを描画し、金電極を作製した。試料と電気的接触を取るために電子ビームを試料上の電極に局所的に照射し、接触抵抗を大幅に減少させることに成功した。

第四章では、マイクロサイズの Sr_2RuO_4 単結晶における電子輸送測定を行った。測定は希釈冷凍機を使用し、最低温度 60mK まで行った。電気抵抗の温度特性から Sr_2RuO_4 の超伝導転移 ($T_c \approx 1.6$ K) が観測された。次に、各温度で電流-電圧特性を測定した。ここで一般的な電流-電圧特性では、発生電圧 V が電流 I に対して奇関数となる。すなわち $V(+I) = -V(-I)$ である。驚くべきことに、 T_c 以下の Sr_2RuO_4 の電流-電圧特性は、電圧 V が電流 I に対して偶関数となることを発見した。これは、パリティの破れた電流-電圧特性である。この異常な結果は、交流測定や複数の試料において再現した。また、 ab 面に垂直に磁場を印加すると +450Oe 付近で、発生電圧 V が正から負へ反転することを発見した。

第五章では、パリティの破れた電流-電圧特性の起源に関する解釈を行った。まず、我々が測定した試料サイズは 1~10 μm であり、これまでに報告されているカイラル単ドメインサイズと同程度であることから単ドメインに由来する現象を観測していると考察した。外部磁場 $H = +450\text{Oe}$ を印加したとき、最も伝導率が上昇し、超伝導の振る舞いを示した。この結果よりクーパー対の時間反転対称性が破れ、自発的な磁場が生じていると解釈できる。また、外部磁場印加において発生電圧 V の正負が反転していることから、単ドメインのカイラリティを操作していると考えられる。次に、カイラル単ドメイン上で電圧発生の起源を考察した。カイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 において試料端ではギャップレスの励起が可能である。また、その時励起される準粒子がマヨラナフェルミオンであると理論的に指摘されている。我々のパリティの破れた電流-電圧特性の結果は、試料端でのマヨラナフェルミオンの励起を観測したと考えている。

第六章では、本論文の研究成果を総括した。

以上、本研究はマイクロサイズの Sr_2RuO_4 単結晶を用いて、固体物理系におけるマヨラナフェルミオンの探索を目的とし、パリティの破れた電流-電圧特性から試料端で励起されたマヨラナフェルミオンを観測することに成功した。素粒子物理と固体物理の普遍数理構造から、我々の実験結果から素粒子物理へ提言できる可能性がある。よって工学博士の授与に値する。