

学位論文題名

超伝導体におけるトポロジカルヴォルテックスの発見

学位論文内容の要旨

実空間のトポロジーは物性に影響を与える重要なパラメータとなりうることが示唆されている。例えば、リング状の電荷密度波系では円環電流が存在することによりピン止めポテンシャルが抑制されることが報告されている。また、第 II 種超伝導体の渦糸状態にもトポロジーの影響が現れることが示唆されている。通常バルクの第 II 種超伝導体では磁束量子を一単位とするヴォルテックスが侵入しアブリコソフ格子と呼ばれる三角格子を組むが、向き付け不可能であるメビウスストリップ状の第 II 種超伝導体では半整数ヴォルテックスの存在が理論的に示唆されている。これに対し、系のサイズが小さい第 II 種超伝導体では幾何学的な形状が境界条件として渦糸状態でのヴォルテックスの侵入や配置の仕方に影響を与えることが報告されており、三角形や正方形の超伝導体で渦糸と反渦糸が同時に存在する状態があることが報告されている。もし、このような幾何学的な形状の影響と同様に、渦糸状態への影響を実空間のトポロジーをパラメータとして定義出来れば、実際に実験系のトポロジーを変化させることで様々な場を作り出すことが出来る可能性がある。実空間のトポロジーの異なる超伝導体を用意できる場として MX_3 系のトポロジカル結晶が発見されている。本研究の目的は、実空間のトポロジーが超伝導体の渦糸状態にどのような影響を与えるのか実験的に明らかにすることである。

本論文は全五章から構成される。

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 TaSe_3 の性質とトポロジカル結晶の特徴について記述した。 TaSe_3 のリング結晶は、その結晶構造と超伝導特性から、トポロジーが超伝導状態に与える影響を調べるのに適していると考えられる。

第二章では TaSe_3 の結晶作成から磁気トルク測定の方法までを述べた。 TaSe_3 は気相輸送法で作成した。この方法では通常針状結晶が得られるが、作成条件を整えることによりリング結晶や 8 の字結晶といったトポロジカル結晶を得ることができる。本研究では、トポロジーの影響を調べるため、電極を付けることによるトポロジーの変化が起きることのない無電極測定であるマイクロカンチレバーを用いた磁気トルク測定を行った。測定サンプルとして大量に作成できたリング結晶の中からきれいな形状の結晶を選び出し、AFM 用マイクロカンチレバーの先端に固定した。測定はマイクロカンチレバーを用いて磁気トルクの変化によるカンチレバーのたわみをピエゾ抵抗の変化として読み取った。微小な変

化をとらえるためホイートストンブリッジ回路を用い、ロックインアンプを使用して電圧変化を測定した。また、トポロジー効果を調べるために集束イオンビーム装置を用いてトポロジーチェンジした結晶についても同様の測定を行った。

第三章では TaSe_3 リング結晶の磁気トルク測定を行った。また、比較実験として、典型的な第 II 種超伝導体である NbSe_2 のバルク結晶の磁気トルク測定も行った。測定は ^3He 冷却器を使用し、最低温度 0.38K で行った。 TaSe_3 、 NbSe_2 共に超伝導転移温度以下でのみ、外部磁場の変化に対する磁気トルクの変化が見られた。典型的な第 II 種超伝導体である NbSe_2 バルク結晶では外部磁場が増加するにつれて磁気トルクが単調増加した後、ある磁場を境に単調減少するという変化が見られた。この結果から磁気トルクを磁化に変換したものから典型的な第 II 種超伝導体の H-M カーブに対応するデータが得られた。これに対して、 TaSe_3 リング結晶では外部磁場が増加するにつれて磁気トルクが振動することを発見した。この特徴的な結果は径や太さの異なる複数のリング結晶で再現した。また、磁気トルクの振動が見られたリング結晶において集束イオンビーム装置を用いてトポロジーチェンジした結晶で同様の磁気トルク測定を行ったところ、磁気トルクの振動は見られず、 NbSe_2 バルク結晶と同様の単調な変化を示すことを発見した。

第四章では複数の TaSe_3 リング結晶の磁気トルク測定で観測された磁気トルクの振動についての解釈を行った。まず、発見した磁気トルクの振動のピーク位置をプロットしたところ、各サンプルについて一定の周期で振動していることがわかった。次に、この周期ごとにヴォルテックスが結晶に侵入していると考え、侵入するヴォルテックスの本数を見積もったところ、一度に数百本のヴォルテックスが侵入していることがわかった。この結果と、リング結晶のトポロジー、結晶構造からリング結晶に侵入するヴォルテックスはアブリコソフ格子を組むのではなく、数百本のヴォルテックスが一つにまとまったシリンダーヴォルテックスを形成していると考えられる。さらに、自由エネルギーの観点からこのシリンダーヴォルテックスの振る舞いを考察した。リング結晶の場合、侵入するヴォルテックスの数が増えると結晶中に留まるよりも穴の部分に抜けたほうがエネルギー的に安定である。以上から、今回観測した磁気トルクの振動は、シリンダーヴォルテックスのリング結晶への侵入とリング結晶の穴の部分への通過の繰り返しを観測したと考えている。

第五章では本論文の研究成果を総括した。

以上、本研究は TaSe_3 リング結晶を用いて、超伝導体の渦糸状態におけるトポロジーの影響を明らかにすることを目的とし、磁気トルクの周期的な振動からリング結晶にはトポロジカルな渦糸であるシリンダーヴォルテックスが繰り返し侵入することを発見した。我々の研究結果は、実空間トポロジーの操作により渦糸の種類を変更することができる可能性を示唆している。渦糸を粒子に対応させて考えると、実空間トポロジーの操作により反粒子に対応する反渦糸を超伝導体内に発生させることが出来る可能性がある。このことからトポロジーを介して固体物理から素粒子物理に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 明 楽 浩 史
副 査 准教授 市 村 晃 一

学位論文題名

超伝導体におけるトポロジカルヴォルテックスの発見

実空間のトポロジーは物性に影響を与える重要なパラメータとなりうることが示唆されている。例えば、リング状の電荷密度波系では円環電流が存在することによりピン止めポテンシャルが抑制されることが報告されている。また、第 II 種超伝導体の渦糸状態にもトポロジーの影響が現れることが示唆されている。通常バルクの第 II 種超伝導体では磁束量子を一単位とするヴォルテックスが侵入しアブリコソフ格子と呼ばれる三角格子を組むが、向き付け不可能であるメビウスストリップ状の第 II 種超伝導体では半整数ヴォルテックスの存在が理論的に示唆されている。これに対し、系のサイズが小さい第 II 種超伝導体では幾何学的な形状が境界条件として渦糸状態でのヴォルテックスの侵入や配置の仕方に影響を与えることが報告されており、三角形や正方形の超伝導体で渦糸と反渦糸が同時に存在する状態があることが報告されている。もし、このような幾何学的な形状の影響と同様に、渦糸状態への影響を実空間のトポロジーをパラメータとして定義出来れば、実際に実験系のトポロジーを変化させることで様々な場を作り出すことが出来る可能性がある。実空間のトポロジーの異なる超伝導体を用意できる場として MX_3 系のトポロジカル結晶が発見されている。本研究の目的は、実空間のトポロジーが超伝導体の渦糸状態にどのような影響を与えるのか実験的に明らかにすることである。

本論文は全五章から構成される。

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 TaSe_3 の性質とトポロジカル結晶の特徴について記述した。 TaSe_3 のリング結晶は、その結晶構造と超伝導特性から、トポロジーが超伝導状態に与える影響を調べるのに適していると考えられる。

第二章では TaSe_3 の結晶作成から磁気トルク測定の方法までを述べた。 TaSe_3 は気相輸送法で作成した。この方法では通常針状結晶が得られるが、作成条件を整えることによりリング結晶や 8 の字結晶といったトポロジカル結晶を得ることができる。本研究では、トポロジーの影響を調べるため、電極を付けることによるトポロジーの変化が起きることのない無電極測定であるマイクロカンチレバーを用いた磁気トルク測定を行った。測定サンプルとして大量に作成できたリング結晶の中からきれいな形状の結晶を選び出し、AFM 用マイクロカンチレバーの先端に固定した。測定はマイクロカンチレバーを用いて磁気トルクの変化によるカンチレバーのたわみをピエゾ抵抗の変化と

して読み取った。微小な変化をとらえるためホイートストンブリッジ回路を用い、ロックインアンプを使用して電圧変化を測定した。また、トポロジー効果を調べるために集束イオンビーム装置を用いてトポロジーチェンジした結晶についても同様の測定を行った。

第三章では TaSe_3 リング結晶の磁気トルク測定を行った。また、比較実験として、典型的な第 II 種超伝導体である NbSe_2 のバルク結晶の磁気トルク測定も行った。測定は ^3He 冷却器を使用し、最低温度 0.38K で行った。 TaSe_3 、 NbSe_2 共に超伝導転移温度以下でのみ、外部磁場の変化に対する磁気トルクの変化が見られた。典型的な第 II 種超伝導体である NbSe_2 バルク結晶では外部磁場が増加するにつれて磁気トルクが単調増加した後、ある磁場を境に単調減少するという変化が見られた。この結果から磁気トルクを磁化に変換したもとの典型的な第 II 種超伝導体の H-M カーブに対応するデータが得られた。これに対して、 TaSe_3 リング結晶では外部磁場が増加するにつれて磁気トルクが振動することを発見した。この特徴的な結果は径や太さの異なる複数のリング結晶で再現した。また、磁気トルクの振動が見られたリング結晶において集束イオンビーム装置を用いてトポロジーチェンジした結晶で同様の磁気トルク測定を行ったところ、磁気トルクの振動は見られず、 NbSe_2 バルク結晶と同様の単調な変化を示すことを発見した。

第四章では複数の TaSe_3 リング結晶の磁気トルク測定で観測された磁気トルクの振動についての解釈を行った。まず、発見した磁気トルクの振動のピーク位置をプロットしたところ、各サンプルについて一定の周期で振動していることがわかった。次に、この周期ごとにヴォルテックスが結晶に侵入していると考え、侵入するヴォルテックスの本数を見積もったところ、一度に数百本のヴォルテックスが侵入していることがわかった。この結果と、リング結晶のトポロジー、結晶構造からリング結晶に侵入するヴォルテックスはアブリコソフ格子を組むのではなく、数百本のヴォルテックスが一つにまとまったシリンダーヴォルテックスを形成していると考えられる。さらに、自由エネルギーの観点からこのシリンダーヴォルテックスの振る舞いを考察した。リング結晶の場合、侵入するヴォルテックスの数が増えると結晶中に留まるよりも穴の部分に抜けたほうがエネルギー的に安定である。以上から、今回観測した磁気トルクの振動は、シリンダーヴォルテックスのリング結晶への侵入とリング結晶の穴の部分への通過の繰り返しを観測したと考えている。

第五章では本論文の研究成果を総括した。

以上、本研究は TaSe_3 リング結晶を用いて、超伝導体の渦糸状態におけるトポロジーの影響を明らかにすることを目的とし、磁気トルクの周期的な振動からリング結晶にはトポロジカルな渦糸であるシリンダーヴォルテックスが繰り返し侵入することを発見した。著者の研究結果は、実空間トポロジーの操作により渦糸の種類を変更することができる可能性を示唆している。渦糸を粒子に対応させて考えると、実空間トポロジーの操作により反粒子に対応する反渦糸を超伝導体内に発生させることが出来る可能性がある。このことからトポロジーを介して固体物理から素粒子物理に提言できる可能性がある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。