

学位論文題名

Topological rigidity

(トポロジカル剛性)

学位論文内容の要旨

秩序にとって、その秩序が張る空間のトポロジーは重要である。なぜなら、トラスや向き付け不能なメビウスの帯のようなトポロジー的に非自明な (単連結でない) 空間上では、部分的秩序はできるが大域的秩序が出来るかどうかかわからず、秩序形成自体が自明ではなくなる可能性があるからである。(これまでの秩序を扱う物理では、熱力学的極限系を考慮しており、無限系を扱うので境界条件や有限サイズ効果といった問題は陽に議論されてこなかった。)

さらに秩序に伴う一般化された剛性は、空間のトポロジーに大きく影響を受ける可能性がある。一般化された剛性とは、秩序状態が秩序パラメータの位相部分を空間的に変化させないようにする性質である。トポロジー的に非自明な空間上においても、秩序はその空間上で最もエネルギーが低くなるように形成されるため、空間のトポロジーを変化 (トポロジーチェンジ) させた場合に、秩序自身がかつての空間のトポロジーの情報を記憶していて、そのトポロジーを維持しようとする剛性が内在している可能性がある。以上のような通常の一般化された剛性とは異なる、トポロジー的に非自明な空間上の秩序に新しい剛性 (トポロジカル剛性) が存在することを提案し、その仮説を実証することが、本研究の目的である。

本論文は全四章から構成される。

第一章では、序論として、研究の背景とトポロジカル剛性の提案を行った。さらに、今回用いたリング結晶とトポロジーチェンジの手法についての導入を行った。本研究では、 NbSe_3 、 TaSe_3 のリング結晶上に張る二つの秩序、結晶と電荷密度波 (CDW) のトポロジカル剛性を実験的に研究した。トポロジカル剛性は系の空間のトポロジーを変えたときに現れる時に顕著に現れると考えられるため、リング結晶を切断し、リングからリングではない両端の存在する空間にトポロジーチェンジさせることで、結晶と CDW のトポロジカル剛性を調べた。切断には収束イオンビームを用いることで、微小なサイズのリング結晶を切断のダメージを最小に抑えた。

第二章では、結晶のトポロジカル剛性をトポロジーチェンジの手法を用いて調べた。結晶の一般化された剛性は、結晶の体積を変えないように加えたひずみ (せん断ひずみ) に対し応力が生じる性質である。通常の結晶では、ひずみがない状態が安定であるが、リング結晶を始めとするトポロジカル結晶は、そのトポロジーの拘束条件のため、内部にトポロジー的に決まるひずみエネルギーやトポロジカル欠陥を蓄えていると考えられる。収束イオンビームによる切断 (トポロジーチェンジ) は結晶を拘束条件から開放し、結晶は最も安定な形状に変化する。切断後の結晶がどのような形状を採るかを観察し、トポロジカル剛性の存在可能性を調べた。厚み $1 \mu\text{m}$ 以上のリングでは、切断しても平均曲率半径はほとんど変わらないが、厚み $1 \mu\text{m}$ 以下では劇的に開くことを発見した。しかし、完全に針状結晶のような直線形になった結晶はなかった。そのため、リング結晶には有限な

曲率を維持しようとする性質が内在していると言える。細いリングの形状解析から、切断後の曲率は一定ではなく場所に依存していること、また切断したリングがサイクロイド曲線になることを発見した。さらに、 θ をせん断ひずみとして、 $\text{曲率} \times \cos \theta = \text{const.}$ が一定値となっている事がサイクロイドになる条件であることがわかった。この結果は、リング結晶において $\text{曲率} \times \cos \theta = \text{const.}$ が新しくトポロジカルな項として系を記述していると考えられる。

第三章では、CDW のトポロジカル剛性について調べた。CDW は低次元電子系において波数 $2k_F$ の電子密度の疎密波を形成する秩序状態である。CDW に空間的な位相差を与えると、それを打ち消すように CDW のスライディング伝導 (集団並進運動) が生じる。すなわち CDW の一般化された剛性はスライディング伝導であるため、CDW のトポロジカル剛性は電気伝導測定により調べられると考えられる。本研究では、トポロジカルな空間上の CDW として、典型的な CDW 導体 NbSe_3 リング結晶上のリングを用いた。リング結晶においても、通常の針状結晶と同じく低温で 2 回の金属 - CDW 転移を示す ($T_{C1} = 145 \text{ K}$, $T_{C2} = 57 \text{ K}$)。CDW のスライディングは結晶の不純物や境界によってピン止めされるため、低電場では CDW 系は絶縁体 (強誘電体) のように振舞う。したがって、交流伝導度の測定が CDW の剛性を調べる上で有用であると考え、CDW の分極が観測できるラジオ周波数領域での電気伝導測定を行った。トポロジー依存性のみを観測するために、まずリングで交流電気伝導を測定してから、収束イオンビームでリングを切断して再び同じ測定を行い、両者を比較した。その結果、電気伝導度の周波数依存性に差が生じていること、その原因はリングの方が切断リングの CDW のピン止め効果が小さくなっていることがわかった。この結果は、リングを単なる並列回路とみなすモデルや、CDW のひずみエネルギーを取り入れたモデルでは説明がつかず、リングにおいては CDW の環流が誘起されていることを示している。

閾値以上の直流バイアス下で、ピン止めがはずれ CDW がスライディングしていると CDW のコヒーレントがより高くなるので、環流の効果を顕著に観測できる可能性がある。そこで、CDW のスライディングに伴う狭帯域ノイズ (信号) と外部交流電場との干渉により直流電流電圧特性に現れるステップ構造 (Josephson 接合の Shapiro ステップと形式的に同じなので、CDW の Shapiro ステップと呼ばれる) を、リング結晶と通常の針状結晶で比較した。ラジオ周波数領域の交流電場と直流電場を同時にリング結晶に印加し電流電圧特性を測定した結果、通常の Shapiro ステップと、Shapiro ステップとは異なる緩やかなステップを観測した。さらに交流電圧が直流しきい電圧より十分高い場合、緩やかなステップが直流電流の正負に対して非対称になることを発見した。また、Shapiro ステップの形状が非対称になっていることも発見した。緩やかなステップと非対称性は、通常の針状結晶では見られない。この結果は、磁場 0 の測定にもかかわらず、CDW 環流の右回りと左回りのカイラル対称性が破れていることを示している。

以上のリングの測定は全て 2 端子測定を行っており、端子間に印加された電場は環流を流す方向を向いていないにもかかわらず、リングに環流が流れている可能性が示された。環流の発生は、CDW にリングのトポロジーを維持したまま流れようとするトポロジカル剛性の存在によるものであると考えられる。

第四章では、結晶と CDW の実験結果により得られたトポロジカル剛性に関する知見をまとめた。以上、トポロジーチェンジの方法を用いた実験により、リング結晶上の秩序 (結晶と CDW) において、リングトポロジーのトポロジカル剛性が存在することを示した。この概念は、結晶や CDW だけでなく液晶、超伝導、強磁性などの他の秩序にも普遍的に適用可能であると考えられる。また、このトポロジカル剛性の概念は、秩序パラメータが定式化されていない宇宙や生命などの非平衡での秩序においても、一般的に使える有用な概念である可能性がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丹 田 聡

副 査 教 授 折 原 宏

副 査 助 教 授 小 田 研 (理学研究院)

学 位 論 文 題 名

Topological rigidity

(トポロジカル剛性)

秩序にとって、その秩序が張る空間のトポロジーは重要である。なぜなら、トーラスや向き付け不能なメビウスの帯のようなトポロジー的に非自明な(単連結でない)空間上では、部分的秩序はできるが大域的秩序が出来るかどうかかわからず、秩序形成自体が自明ではなくなる可能性があるからである。(これまでの秩序を扱う物理では、熱力学的極限系を考慮しており、無限系を扱うので境界条件や有限サイズ効果といった問題は陽に議論されてこなかった。)

さらに秩序に伴う一般化された剛性は、空間のトポロジーに大きく影響を受ける可能性がある。一般化された剛性とは、秩序状態が秩序パラメータの位相部分を空間的に変化させないようにする性質である。トポロジー的に非自明な空間上においても、秩序はその空間上で最もエネルギーが低くなるように形成されるため、空間のトポロジーを変化(トポロジーチェンジ)させた場合に、秩序自身がかもとの空間のトポロジーの情報を記憶していて、そのトポロジーを維持しようとする剛性が内在している可能性がある。著者は、以上のような通常的一般化された剛性とは異なる、トポロジー的に非自明な空間上の秩序に新しい剛性(トポロジカル剛性)が存在することを提案し、その仮説を実証することを目的に研究を行った。

著者は、トポロジカル剛性が発現する系として NbSe₃、TaSe₃ のトポロジカル結晶に着目し、トポロジカル結晶上で定義される結晶と電荷密度波の2つの秩序に対して、その剛性を実験的に研究した。結晶の剛性では、リング結晶を切断し、リングからリングではない両端の存在する空間にトポロジーチェンジさせることで、トポロジカル剛性を調べた。切断には収束イオンビームを用いて、微小なサイズのリング結晶を切断のダメージを最小に抑えた。通常の結晶では、ひずみがない状態が安定であるが、リング結晶を始めとするトポロジカル結晶は、そのトポロジーの拘束条件のため、内部にトポロジー的に決まるひずみエネルギーやトポロジカル欠陥を蓄えていると考えられる。収束イオンビームによる切断(トポロジーチェンジ)は結晶を拘束条件から開放し、結晶は最も安定な形状に変化する。切断後の結晶がどういう形状を採るかを観察し、トポロジカル剛性の存在可能性を調べた。厚み 1 μm 以上のリングでは、切断しても平均曲率半径はほとんど変わらないが、厚み 1 μm 以下では劇的に開くことを発見した。細いリングの形状解析から、切断後の曲率は一定ではなく場所に依存していること、また切断したリングがサイクロイド曲線になることを発見した。さらに、 θ をせん断ひずみとして、 $\text{曲率} \times \cos \theta = \text{const.}$ が一定値となっている事がサイ

クROIDになる条件であることがわかった。この結果は、リング結晶において曲率 $\times \cos \theta = \text{const.}$ が新しくトポロジカルな項として系を記述していると考えられる。

さらに電荷密度波 (CDW) のトポロジカル剛性について調べた。CDW は低次元電子系において波数 $2k_F$ の電子密度の疎密波を形成する秩序状態である。CDW に空間的な位相差を与えると、それを打ち消すように CDW のスライディング伝導 (集団並進運動) が生じる。すなわち CDW の一般化された剛性はスライディング伝導であるため、CDW のトポロジカル剛性は電気伝導測定により調べられると考えられる。本研究では、トポロジカルな空間上の CDW として、典型的な CDW 導体 NbSe₃ リング結晶上のリングを用いた。リング結晶においても、通常の針状結晶と同じく低温で 2 回の金属 - CDW 転移を示す ($T_{C1} = 145 \text{ K}$, $T_{C2} = 57 \text{ K}$)。CDW のスライディングは結晶の不純物や境界によってピン止めされるため、低電場では CDW 系は絶縁体 (強誘電体) のように振舞う。したがって、交流伝導度の測定が CDW の剛性を調べる上で有用であると考え、CDW の分極が観測できるラジオ周波数領域での電気伝導測定を行った。トポロジー依存性のみを観測するために、まずリングで交流電気伝導を測定してから、収束イオンビームでリングを切断して再び同じ測定を行い、両者を比較した。その結果、電気伝導度の周波数依存性に差が生じていること、その原因はリングの方が切断リングの CDW のピン止め効果が小さくなっていることがわかった。この結果は、リングを単なる並列回路とみなすモデルや、CDW のひずみエネルギーを取り入れたモデルでは説明がつかず、リングにおいては CDW の環流が誘起されていることを示している。

閾値以上の直流バイアス下で、ピン止めがはずれ CDW がスライディングしていると CDW のコヒーレントがより高くなるので、環流の効果を顕著に観測できる可能性がある。そこで、CDW のスライディングに伴う狭帯域ノイズ (信号) と外部交流電場との干渉により直流電流電圧特性に現れるステップ構造 (Josephson 接合の Shapiro ステップと形式的に同じなので、CDW の Shapiro ステップと呼ばれる) を、リング結晶と通常の針状結晶で比較した。ラジオ周波数領域の交流電場と直流電場を同時にリング結晶に印加し電流電圧特性を測定した結果、通常の Shapiro ステップと、Shapiro ステップとは異なる緩やかなステップを観測した。さらに交流電圧が直流しきい電圧より十分高い場合、緩やかなステップが直流電流の正負に対して非対称になることを発見した。また、Shapiro ステップの形状が非対称になっていることも発見した。緩やかなステップと非対称性は、通常の針状結晶では見られない。この結果は、磁場 0 の測定にもかかわらず、CDW 環流の右回りと左回りのカイラル対称性が破れていることを示している。

以上のリングの測定は全て 2 端子測定を行っており、端子間に印加された電場は環流を流す方向を向いていないにもかかわらず、リングに環流が流れている可能性が示された。環流の発生は、CDW にリングのトポロジーを維持したまま流れようとするトポロジカル剛性の存在によるものであると考えられる。

これを要するに、著者はトポロジカルに非自明な空間における秩序の新しい性質、トポロジカル剛性を提案し、結晶、電荷密度波の秩序において、新しい剛性の性質が現れることを実験的に示した。この成果は、秩序の概念の拡張に大きく寄与すると考えられる。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。