



| | |
|--------------|---|
| Title | Topological magneto-transport phenomena and superconductivity in nodal line semimetal PbTaSe ₂ |
| Author(s) | 横井, 滉平 |
| Citation | 大阪大学, 2022, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/87820 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

| | |
|---|---|
| 氏 名 (横 井 滉 平) | |
| 論文題名 | Topological magneto-transport phenomena and superconductivity in nodal line semimetal PbTaSe ₂ (ノーダルライン半金属PbTaSe ₂ におけるトポロジカル磁気輸送現象と超伝導) |
| <p>論文内容の要旨</p> <p>トポロジカル半金属と呼ばれる物質中では、ニュートリノなどの素粒子と同様の線形なエネルギー分散が交差したバンド構造が実現しており、それに従う伝導電子は特異な量子輸送現象を示す。新規量子現象の開拓を目指し、このようなバンド構造を有する物質の探索が精力的に進められている。その一つとして、近年発見されたのがノーダルライン半金属である。従来のトポロジカル半金属では、線形バンドがゼロ次元の“点”で縮退しているのに対し、この物質ではバンド縮退が一次元である“線”または“リング”上で生じる(ノーダルライン構造)。この電子構造については、理論的な研究がすすめられている一方で、現実の物質中でこの構造が実現しにくいことから、実験的な研究が進んでいなかった。</p> <p>近年、このノーダルライン構造が実現する物質として、PbTaSe₂が発見された。本研究ではその特殊な電子構造に由来する物性を解明するべく、PbTaSe₂の単結晶を合成し、ホール効果やネルンスト効果などの磁気輸送現象の測定を行った。また、本物質では圧力印加により結晶構造が変化し、ノーダルライン構造の数が減少することが理論的に予想されていることから、圧力下での輸送現象の測定も行い、圧力印加前後の物性を比較することで、ノーダルライン構造由来の現象の抽出を試みた。実験の結果、本物質は非磁性でありながらも、他のトポロジカル物質で報告されている、異常ネルンスト効果や異常ホール効果とよく似た磁場依存性を示し、また、それらが構造相転移を機に大きく減少することを明らかにした(図1(a))。このことから、本物質のネルンスト/ホール効果はノーダルライン構造の生むベリー曲率を反映していることが明らかとなった。</p> <p>ノーダルライン電子状態に加えて、超伝導状態もPbTaSe₂の興味深い特性の一つである。本物質では、複数種類存在するフェルミ面ごとに超伝導ギャップサイズが異なる、マルチギャップ超伝導の可能性が議論されている。我々は¹⁸¹Ta核における核四重極共鳴測定を行い(図1(b))、核スピン格子緩和時間(T_1)の温度依存性から求めた超伝導ギャップのサイズが比熱やμSRといった他の実験手法と比べて優位に小さいことを明らかにした(図1(b)の挿入図)。これは、理論計算により小さい超伝導ギャップを持つとされるTa軌道で構成されたフェルミ面の超伝導状態を優先的に観測していることを示唆していると考えられる。</p> <p>本研究により、線ノード構造においても、従来のディラック/ワイル半金属と同様にベリー曲率誘起の異常ネルンスト効果やホール効果が発現することが明らかとなった。¹⁸¹Ta-NQRの結果は、本物質はマルチギャップ超伝導状態であることを示唆しており、測定核種によって、特定のフェルミ面の情報を選択的に得られる可能性を示すものである。電子構造が複雑なPbTaSe₂において、注目するバンドの電子状態を色濃く反映した現象の観測を通して、その本質を明らかにした。</p> | |

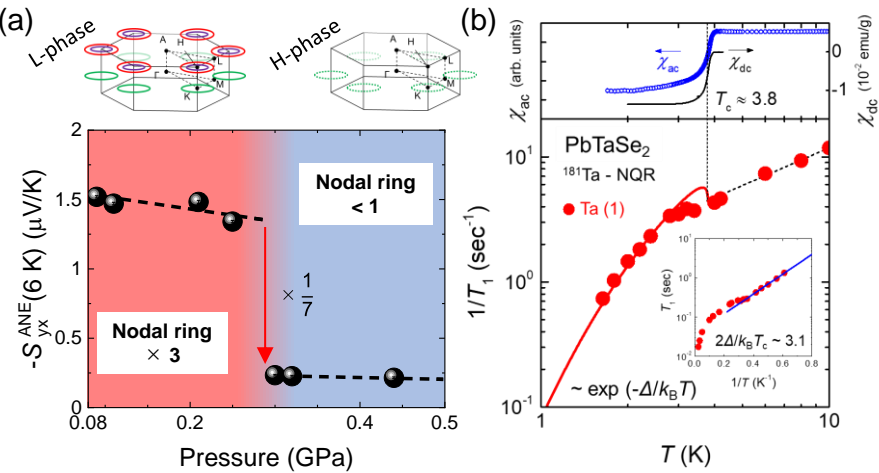


図1 (a)異常ネルンスト係数の圧力依存性。上部は低圧相と高圧相の波数空間におけるノーダルライン構造の模式図。(b)¹⁸¹Ta-NQR測定における核スピン格子緩和率($1/T_1$)の温度依存性。(挿入図) T_1 のアレニウスプロット。超伝導ギャップサイズ $2\Delta/k_B T_c$ が他の実験などよりも小さい値を示した

論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 (横 井 滉 平) | | | |
|-----------------|-----|-----|-------|
| 論文審査担当者 | (職) | | 氏 名 |
| | 主 査 | 教授 | 花咲 徳亮 |
| | 副 査 | 教授 | 黒木 和彦 |
| | 副 査 | 准教授 | 宮坂 茂樹 |
| | 副 査 | 准教授 | 酒井 英明 |
| | 副 査 | 助教 | 村川 寛 |

論文審査の結果の要旨

トポロジーの概念によって従来のバンド構造とは区別される、線形分散が交差したバンド構造を有する物質群はトポロジカル半金属と呼ばれ、その物質中の伝導電子はディラック粒子やワイル粒子の性質を示す。この物質群は、カイラル磁気現象などの特異な物性を示すことから注目を集めており、新たな物質の探索が精力的に進められている。その一つとして、近年発見された線ノード半金属がある。従来のトポロジカル半金属では、線形バンドがゼロ次元の“点”で縮退していたのに対し、この物質群では波数空間において、バンド縮退が一次元である”線、またはリング”上で生じる。この電子構造について理論的に研究が進められていたが、現実の物質で実現しにくいことから、実験的な研究が進んでいなかった。

近年、この線ノード構造が実現する物質として、 PbTaSe_2 が発見された。横井氏は、線ノード構造に由来する電子物性を解明するため、 PbTaSe_2 の単結晶を合成し、ホール効果やネルンスト効果などの磁気輸送現象を中心として測定を行った。本物質において圧力印加により結晶構造が変化し、ノーダルライン構造の数が減少されるという理論予測に着目し、圧力下での輸送現象の測定も行い、圧力印加前後の物性を比較する事によって、ノーダルライン構造由来の現象を抽出する事を試みた。実験の結果、本物質は非磁性であるにも関わらず、他のトポロジカル物質で報告されている、異常ホール効果や異常ネルンスト効果と類似した磁場依存性を見出した。これらの効果が構造相転移によって大きく抑制される事も観測し、ノーダルライン構造が生むベリー曲率に由来した現象である事を明らかにした。

電子状態のトポロジーに加えて、超伝導状態も PbTaSe_2 の興味深い特性の一つである。本物質では、複数存在するフェルミ面ごとに超伝導ギャップサイズが異なる、マルチギャップ超伝導の可能性が議論されていた。横井氏は、超伝導状態の詳細も明らかにするため、 ^{181}Ta 核における核四重極共鳴測定を行った。その結果、超伝導ギャップのサイズが先行研究の実験結果と比べて優位に小さいことを明らかにした。これは、理論計算により小さい超伝導ギャップを持つとされていた Ta 軌道で構成されたフェルミ面を選択的に観測した事を示している。

本研究によって、線ノード構造においても、従来のディラック/ワイル半金属と同様にベリー曲率誘起の異常ネルンスト効果と異常ホール効果が現れる事が明らかにされた。さらに、これらの効果はトポロジカルなバンド構造の変化に非常に敏感である事も示された。また核四重極共鳴測定によって、本物質がマルチギャップ超伝導状態である事を明らかにし、測定核種によって特定のフェルミ面の情報を選択的に得る事ができるという可能性を示した。研究対象の物質は電子構造が複雑であるにも関わらず、特定のバンドの電子状態を色濃く反映した現象を精密に測定する事によって、線ノード半金属の本質を明らかにした。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認める。