

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 : 若月 良平

空間反転対称性が破れた物質の示す代表的な現象は絶縁体における強誘電性である。一方、金属や超伝導体では物質内部に電場が存在しないために、絶縁体ほど空間反転対称性の破れが顕著には現れないが、それでもスピン軌道相互作用によって、各  $k$  点におけるスピン分裂の結果、電気磁気結合が生じる。

その最も顕著な例は、トポロジカル絶縁体における表面状態である。バルク状態が非自明なトポロジーによって特徴づけられるトポロジカル絶縁体では、バルク・エッジ対応の原理によって、ギャップのない表面状態が現れる。表面では反転対称性が破れており、スピン状態は、その運動量によって一意的に決まっている。(スピン・運動量ロック)ここに磁性不純物等をドーピングすると、磁気秩序が現れるとともに時間反転対称性の破れに伴いギャップが生じ、そのギャップ中にフェルミエネルギーがあると系は量子化異常ホール状態となる。この磁気秩序状態におけるスピントクスチャーの問題は、現在研究が進んでいる最先端の問題であるが、若月氏はそれに理論的にアプローチした。まず、表面一枚に磁性が存在する場合につき、その磁壁構造の安定性を考察した。その際、バルク状態とコンシステントに扱うために、有限幅のサンプルの数値的対角化を行い、種々の磁壁構造のエネルギーをフェルミエネルギーの位置を変えながら調べた。その結果、フェルミエネルギーの位置によって、ネール壁、ブロッホ壁、ネール壁と順にその構造が変化することを見出した。特に、電子ドーピングと正孔ドーピングの間でネール壁の回転の向きが反転することを示し、それが表面状態のスピン回転方向の反転に起因するジャロシンスキー・守谷相互作用の反転に由来することを結論付けた。また、磁性不純物とホストの2種類の原子との相互作用の違いによって、表面スピンの有効ハミルトニアンが、イジング的になったりハイゼンベルグ的になったりすることも見出し、現実の Cr ドーピングの系は後者に対応すること、正孔バンドを形成する Te 原子と強く相互作用することを結論付けた。

さらに進んで、磁性不純物が試料全体、および試料の上半分にドーピングされた場合の、磁気構造の安定性を解析し、後者の場合に正孔をドーピングするとスキルミオン構造が安定化することを見出し、実験結果を再現した。

もう一つの興味深い系は空間反転対称性の破れた超伝導体である。この系も、盛んに研究されており、スピン一重項とスピン三重項のパリティ混合に伴う特異な現象(例えばパウリ限界を大きく超えた上部臨界磁場など)が調べられている。一方で、輸送現象に現れる非相反性はようやく最近実験が出始めたところで、その理論的研究は進んでいなかった。若月氏は、この問題に超伝導揺らぎによるパラ伝導度の計算を、電場に対して非線形応答にまで拡張することでアプローチした。まず、イジング的なスピン分裂

をした  $\text{MoS}_2$  のバンド構造から出発し、ギンツブルク・ランダウの自由エネルギーの表式を導出し、外部磁場の下で波数について3次の項が存在することを見出した。これを用いて、時間依存ギンツブルク・ランダウ理論によるパラ伝導度の計算を行い、常伝導状態に比べて、フェルミエネルギーと転移温度の比の3乗に比例する巨大なファクターだけ非相反性が増大することを見出した。この結果は、 $\text{MoS}_2$  における実験を半定量的に説明している。さらに、ラシュバ型のスピン軌道相互作用を持つ超伝導体に対しても、この解析を拡張し、ここではスピン一重項とスピン三重項のパリティ混合がやはり非相反性をもたらすことを見出した。

本論文は6章からなり、以下に述べる構成を持つ。

第1章、Introductionは導入部で、まずトポロジカル絶縁体、そこでの量子化異常ホール効果、磁気スキルミオン、非相反電気抵抗効果、超伝導ゆらぎによる電気伝導、 $\text{MoS}_2$  などの遷移金属ダイカルコゲナイド、など論文の基礎となる内容が概観され、最後に論文の構成が述べられている。第2章 Domain wall in magnetically doped topological insulators では、トポロジカル絶縁体表面磁性状態における磁壁構造の解析について述べられている。まずハミルトニアンを定義し、その有効理論を導出した後、磁壁とそこでのカイラルエッジチャンネルの数値的解析を行っている。エネルギーや電荷分布の計算結果を、解析的な理論を援用して議論している。第3章、Skyrmion in magnetically doped topological insulators では、第2章の計算を、磁気スキルミオンへと拡張した解析を行っている。トポロジカルホール抵抗の実験結果をレビューしたあと、スキルミオンのエネルギーの計算結果を示し、正孔ドープ系に上半分に磁性不純物をドープした場合のみにスキルミオンが現れることを見出した。これは実験結果と良く対応している。第4章、Magnetochiral anisotropy in transition metal dichalcogenide superconductorsでは、遷移金属ダイカルコゲナイド超伝導体の非相反電気抵抗を解析している。まずモデルを提示し、常伝導状態での非相反伝導を議論したあと、ギンツブルク・ランダウ自由エネルギーの導出、超伝導揺らぎによる電流の計算を示し、 $\text{MoS}_2$  における実験結果との比較を行っている。第5章、Magnetochiral anisotropy in Rashba superconductorsでは第4章の計算をラシュバ相互作用の場合に拡張した解析を示している。バンド交差点よりもフェルミエネルギーが上の場合だけに非相反性が現れること、いろいろな電場、磁場の方向依存性を示すこと、などが見いだされている。第6章、Summary では、論文全体のまとめと、今後の展望が述べられている。

今回得られた成果は、反転対称性の破れた金属や超伝導体における現象の理論的解析を通じて、物性科学・物理工学の今後の発展に大きく寄与すると期待され、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。