

論文審査の結果の要旨

氏名 大熊 信之

スピン運動量ロッキングとは、Bloch 波動関数のスピンが波数空間で渦やモノポールなどの非自明な構造を持つ現象である。特に、トポロジカル絶縁体の表面状態や Weyl 半金属などのスピン回転対称性が破れた電子系において、その重要性が広く認識されている。これまでの研究では、最も単純な巻き付き数 ± 1 の特異的なスピン構造に主眼が置かれてきたが、より高次の特異性が現れるかどうかは興味深い問題である。また、電子以外のスピンを持つ準粒子に、スピン運動量ロッキングの概念が拡張できるかは未開拓の問題である。本論文は、このような背景のもと、1. マグノン系におけるスピン運動量ロッキングの拡張、2. 空間群の対称性に基づく 3 次元電子系の波数空間のスピン構造の分類、の 2 つのトピックを論じたものであり、英文で 8 章と結論からなる。

第 1 章は序論で、研究背景と目的、および本論文の構成について述べられている。特に、Rashba-Edelstein 効果やスピン電荷変換などの、スピン運動量ロッキングの輸送特性に対する影響を、大熊氏の論文を含む先行研究を踏まえて紹介している。

第 2 章では、磁性体中の準粒子であるマグノンに対する、スピン運動量ロッキングの定式化が述べられている。まず、マグノン系の Bogoliubov-de Gennes ハミルトニアンを用いた定式化についてまとめた後に、このハミルトニアンの 1 粒子状態と Fock 真空を用いて、波数空間におけるマグノンのスピンを定義している。さらに、スピンハミルトニアンの古典的な基底状態がコリニアな場合には、波数空間のスピンは定数となり自明であることを示している。この結果から、波数空間でスピンが非自明な構造をとるためには、基底状態のスピン配位がノンコリニア、あるいはノンコプラナーである必要がある。第 3 章では、1 次元反強磁性体における自明な例と、2 次元カゴメ格子上的反強磁性体における非自明な例を挙げて議論している。特に後者は、Dzyaloshinskii-守谷相互作用や異方性により、古典的な基底状態がノンコリニアになる場合には、波数空間のスピンも巻き付き数 $+1$ や -2 の特異性を持つことが明らかにされている。これらが、1 つ目のトピックの主要結果である。また、スピン運動量ロッキングの起こるマグノン系の候

補物質ジャロサイトや、巻き付き数 -2 の特異性の輸送特性に与える影響について議論されている。

第4・5・6章は、2つ目のトピックに対する導入部分となっている。まず第4章では、Brillouin ゾーンでの巻き付き数の総和が0となることを、Poincaré-Hopfの定理を用いて議論している。続いて第5章で、その後解析に必要な空間群の基礎事項がレビューされている。さらに第6章では、多様体の概念の拡張である、オービフォールドが導入されている。オービフォールドとは、局所的に Euclid 空間を有限群の作用で割ったようなものである。この章では、オービフォールドの定義や具体例、またオービフォールド上の Euler 標数について議論されている。また、後の議論に必要な、運動量空間オービフォールドが導入されている。

第8章では、2つ目のトピックの主要結果である、空間群の対称性に基づく3次元電子系の波数空間のスピン構造の分類について議論されている。特に、 n 回回転を要素に含むシンモルフィックな24種類の空間群に焦点を絞り、さらに時間反転対称性も課した場合に、対応する運動量空間オービフォールド上にどのようなスピン構造の特異性が現れるかを詳細に調べ、一覧表を作成している。また、特に空間群 No. 197 および 211 については、Poincaré-Hopfの定理から、高い巻き付き数の点が対称性の高い特殊点に現れるか、Weyl 点が一般点に現れる可能性があることが議論されている。

最後に論文全体のまとめと結論が述べられている。

以上のように、本論文は、スピン運動量ロッキングの概念はマグノン系においても拡張可能であることを明らかにし、また、3次元電子系のスピン運動量ロッキングを空間群の対称性に基づいて分類し、非自明な特異性が現れる場合があることを明らかにしている。後者は、運動量空間オービフォールドの具体的な応用を切り拓いたものである。得られた結果は、今後の理論的・実験的研究を刺激することが期待される。よって本論文は、学位論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。なお、本論文の後半部分は、上田正仁氏との共同研究に基づいているが、論文提出者が主体になって問題設定と定式化、解析及び結果の検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。