

論文審査の結果の要旨

氏名 高田 えみか

整数量子ホール効果の発見により、広く認識されるようになった固体物性におけるトポロジーの概念の有用性は、近年では電子系に限らずボソン系にも応用され、急速に進展している。特に、強磁性体中の準粒子であるマグノンの熱ホール効果は、整数量子ホール効果と同様に Bloch 波動関数の波数空間における Berry 曲率が重要となる現象であるが、パイロクロア強磁性体などで実際に観測されている。磁性体中には、マグノン以外にも様々な準粒子が存在する。特に、フラストレート系や低次元系では、マグノンペアと呼ばれるマグノンの束縛状態が飽和磁化近傍での低エネルギー励起となる場合がある。本論文ではそのような場合に着目し、マグノンペアの熱ホール効果に対する寄与を理論的に調べまとめている。

本論文は和文で、5章からなる。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。第2章では、本論文で用いる、ボソン系の熱ホール効果の Berry 曲率を用いた定式化についてまとめられている。まず、整数量子ホール効果の Thouless らによる定式化を導入し、続いて、松本・村上による、マグノンの熱ホール伝導度の Berry 曲率を用いた定式化を解説している。また、この定式化のマグノンペアが存在する場合への適用について議論している。さらに、電子系とボソン系の類似点・相違点が議論され、マグノン系で有限の Berry 曲率が現れるためには、Dzyaloshinsky-守谷 (DM) 相互作用の存在が重要であることが強調されている。

第3章・4章の内容が、本論文の主要結果である。第3章の前半では、双2次相互作用を持つパイロクロア反強磁性体(以下、パイロクロア系)を導入し、その磁場中相図および DM 相互作用が存在する場合の、マグノンとマグノンペアの分散関係を議論している。マグノンペアに関しては実空間で近接サイトにあるマグノンの束縛状態のみを考慮して解析を行っている。後半では、弱く結合した $S=1/2$ フラストレート zigzag スピン鎖(以下、zigzag スピン鎖系)を導入し、その磁場中相図および DM 相互作用が存在する場合の、マグノンとマグノンペアの分散関係を議論している。また、DM 相互作用がマグノンとマグノンペアの混成をもたらし、バンド間のレベル反発を引き起こすことを確認している。

第4章では、第2章で導入した方法を用いて、パイロクロア系、zigzag スピン鎖系のそれぞれにおける熱ホール効果についての解析をおこなっている。まず、パイロクロア系については、マグノンおよびマグノンペアのそれぞれのバンドに対する Berry 曲率を数値的に求め、熱ホール伝導度を計算している。その結果、十分低温ではマグノンペアの寄与が支配的となる温度領域があることを明らかにしている。一方で高温側では、マグノンの寄与とマグノンペアの寄与が逆符号であるため、熱ホール伝導度が磁場に対して非単調に振る舞うことを見出している。この点は、強磁性体におけるマグノンの熱ホール効果と定性的にも異なる点である。また、DM 相互作用による混成の効果についても議論されているが、十分低温では結果は定性的には変わらないことが確認されている。次に zigzag スピン鎖系については、マグノンとマグノンペアの混成を考慮しない場合、考慮する場合のそれぞれについての熱ホール伝導度を計算し、混成がない場合にはマグノンペアの寄与はほとんどないが、混成を考慮した場合には有意な寄与を与えることを明らかにしている。また、 HgCr_2O_4 などの対応する物質におけるパラメターの値を用いて、熱ホール伝導度の大きさを見積もり、現実的な温度・磁場領域で測定できる可能性があることも議論している。

第5章では論文全体のまとめと結論が述べられている。付録は A-F からなり、本文中の議論に必要な計算結果などがまとめられている。

以上のように、本論文では、飽和磁化近傍の磁性体におけるマグノンペアの熱ホール効果に関する理論的研究を行い、マグノンの熱ホール効果との相違点や、マグノンペアの寄与が重要となる場合があることを明らかにしている。マグノンペアは、フラストレート系や低次元系の磁性体において、ネマティック秩序の観点で以前から関心を持たれていたが、その熱ホール効果への寄与が調べられたのは初めてである。また、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、本論文は、佐藤正寛氏との共同研究であるが、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。