

論文の内容の要旨

題目 Anomalous and topological Hall effects in itinerant magnets

(邦題 遍歴磁性体における異常及びトポロジカルホール効果)

指導教官 十倉 好紀 教授
工学系研究科 物理工学専攻 塩見 雄毅

研究要旨

磁性体においては、ローレンツ力による通常のホール効果に加え、磁化による異常ホール効果や、非共面的な磁気構造に由来するトポロジカルホール効果が生じることが知られている。強磁性金属における異常ホール効果の起源は古くから研究されており、外因性起源（スキュー散乱）と内因性起源と呼ばれる二種類の機構が散乱率の関数として重要性が移り変わることが明らかとなっていた。我々は、内因性起源による異常ホール効果に対し、ローレンツ比と呼ばれる物理量を有効に使うことで、異常ホール流が理論的に予測されていた非散逸性を液体窒素温度よりも高い温度まで持ち得ることを検証し、さらに散乱強度の増大による非散逸性の破れが起きる閾値を明らかとした。また、外因性起源によるスキュー散乱に対しては、100K 以下で大きなスキュー散乱の寄与が見られる Fe に着目し、内因性起源からのクロスオーバーによってローレンツ比が負値や発散などの異常を示すことを発見し、またスキュー散乱の不純物元素依存性に関して系統的な研究を行った。

トポロジカルホール効果に関しては、物質例が比較的少なかったことに着目し、物質探索を行うことでトポロジカルホール効果を示す螺旋磁性金属を2つ発見 (Fe_{1+x}Sb , MnP) した。また、カイラルな結晶構造をもつ螺旋磁性金属 MnGe においては、スカーミオン格子相と呼ばれる非自明な渦状のスピンの構造が周期的に配列した磁気相が存在することが示唆されていた。本研究ではネルンスト効果及び熱ホール効果の測定により、熱流によって駆動されるトポロジカルホール効果の性質を議論した。

I. 強磁性金属における異常ホール効果に関する研究

I-1. 背景

強磁性体の異常ホール効果においては、内因性起源と外因性起源の二種類の起源が知られており、どちらの起源が優勢であるかについて論争が半世紀以上続いてきた。しかし、弾性散乱を考慮した最近の理論的研究により、散乱率の関数として内因性起源と外因性起源（の一種のスキュー散乱機構）が移り変わることが明らかとなった[1]。このことは弾性散乱が主な非常に低温でホール伝導率の縦伝導率依存性を調べることにより、実験的にも検証されている[2]。

I-2. ローレンツ比を用いた、内因性起源による異常ホール流の非散逸性の検証とその散乱強度依存性の研究

内因性起源に関しては、非散逸的な異常ホール流が流れることが理論的に予測されており、実験的にも非常に低温において、フィリングによって電気伝導率が数桁変化しても異常ホール伝導率は散乱確率に依存しないことが示されていた[3]。本研究では、非弾性散乱に敏感であるという性質をもつローレンツ比（熱伝導率と電気伝導率の比を絶対温度で割った量）という量に注目し、低温から室温に至る広い温度領域で、内因性起源による異常ホール流の非弾性散乱依存性を詳しく調べた。結果として、NiやCuを少量ドーピングしたNiにおいて、最低温から100K程度までの広い温度領域で異常ホール流が非弾性散乱に依らないことを明らかにした。さらに、Ni、Co、Fe、それらに不純物をドーピングした試料を用いた系統的な研究により、温度上昇や不純物量の増加に伴う散乱強度の増大によって、その非散逸性が壊れることを明らかにした。その非散逸—散逸クロスオーバーの散乱強度の閾値は、内因性起源において本質的なスピン軌道相互作用によるバンドギャップ程度の大きさ（数十meV）であることを突き止めた。

I-3. 不純物をドーピングしたFeにおける外因性（スキュー散乱）起源異常ホール効果

Feにおいては、約100K以上の高温では内因性起源の異常ホール効果が主であるが、それより低温でスキュー散乱機構（外因性起源の一種）による異常ホール効果が支配的な領域に移り変わることが知られていた[2]。本研究では、まず非弾性散乱に敏感なローレンツ比を用いた研究により、内因性—外因性クロスオーバーを調べ、異常ホール流に対するローレンツ比がクロスオーバーの温度付近で負値や発散などの異常を示すことを示した。これは非弾性散乱に依りにくい内因性起源の異常ホール流と、非弾性散乱に依存するスキュー散乱起源の異常ホール流の競合を考えることで理解できる。

また、Feにおけるスキュー散乱誘起異常ホール効果は、理論的に予測されるように強く不純物の種類や量に依存することがわかった。本研究では実際に、不純物の種類、量を系統的に変化させたFeを作製し、スキュー散乱誘起異常ホール効果の不純物元素による性質の違いを、ホール効果測定、ネルンスト効果測定などを用いて詳細に調べた。

II. らせん磁性金属におけるトポロジカルホール効果に関する研究

II-1. 背景

非共面的な磁気構造に対しては、スカラースピカイラリティが零でない値をとり、それがベリ一位相と結びつくことでホール効果を生じさせることが最近明らかとなった[4]。その例として実験的、理論的にも活発に研究されているのが、スカーミオンと呼ばれる渦状のスピ構造であり、これは実際にカイラルな螺旋磁性体 MnSi や $(\text{Fe,Co})\text{Si}$ など実際に存在が観測されている[5]。

II-2. トポロジカルホール効果を示す螺旋磁性金属の発見1 : Fe_{1+x}Sb

3点のスピに対して定義されるスカラースピカイラリティは非共面的な磁気構造に対して零でない値をとるが、結晶全体で和をとるとしばしば結晶の対称性によって打ち消し合い、マクロなホール効果が生じないことが知られていた。三角格子上的 120° 磁気構造はその典型的な例である。本研究で扱った Fe 三角格子系物質 Fe_{1+x}Sb は、三角格子上的 Fe スピが 120° 磁気構造を示すのに加え、余剰に含まれるインターカレートした(x 量の) Fe が非常に低温でスピングラス的な秩序をしめす。我々は、低温強磁場下で余剰 Fe スピが偏極 (オーダー) した際、DM相互作用による格子 Fe スピの変調が引き金となって、トポロジカルホール効果が生じることを示した。

II-3. トポロジカルホール効果を示す螺旋磁性金属の発見2 : MnP

MnP は典型的な遅延螺旋磁性体の一つであり、特にその磁性について精力的な研究が行われてきた。最近、中性子回折実験により、零磁場の螺旋磁気構造がローカルなDM相互作用の影響によってわずかに非共面的になっていることが報告された[6]。単結晶を合成しホール効果を測定した所、磁場を a 軸にかけた際のコニカル相とファン相、 b 軸にかけた際のFAN相などにおいて、トポロジカルホール効果を観測した。零磁場の場合と同様に非共面的な磁気構造が磁場下でも広く存在し、ホール効果に影響を与えていると考えられる。

II-4. カイラル螺旋磁性体 MnGe におけるトポロジカル熱ホール及びネルンスト効果

MnGe は MnSi などと同じカイラルな結晶構造を持ち、スカーミオン格子相が広い温度・磁場領域で存在することが強く期待されている[7]。本研究では、 MnGe においてスカーミオン格子相における熱流駆動によるホール効果 (熱ホール効果、ネルンスト効果) について、詳しく調べた。ホール効果[7]においては 70K 以下で大きなトポロジカルホール項が見られていたのに対し、熱ホール効果においては、トポロジカルホール項が最低温から温度上昇につれて急激に減少し、 30K 以上ではほとんど認識できないことがわかった。一方、ネルンスト効果においては、螺旋磁気転移点直下の 140K でもトポロジカルホール項を観測することができた。このように電気ホール効果の結果と好対照な結果を得、それぞれの性質について詳しく議論した。

III. 結論

強磁性金属における異常ホール効果に対しては、内因性起源と外因性起源（スキュー散乱）による異常ホール効果の両方に対して研究を遂行し、異常ホール流の非弾性散乱依存性や、スキュー散乱誘起異常ホール効果の不純物元素依存性を明らかにした。

トポロジカルホール効果に対しては、トポロジカルホール効果を示す物質を2つ(Fe_{1+x}Sb , MnP)発見した。また、スピンのスカーミオン格子を組むと考えられている MnGe に対し、熱流におけるホール効果が電流駆動のホール効果とは異なる性質を示すことを明らかにした。

このように、強磁性金属の異常ホール効果、らせん磁性金属におけるトポロジカルホール効果に対し、単結晶合成や電気・熱磁気輸送現象測定を用いて包括的に研究を行った。

参考文献

- [1]S. Onoda, *et al.* Phys. Rev. Lett. 97, 126602 (2006).
- [2]T. Miyasato, *et al.* Phys. Rev. Lett. 99, 086602 (2007). 等
- [3]W-L. Lee, *et al.* Science 303, 1647 (2004).
- [4]J. Ye, *et al.* Phys. Rev. Lett. 83, 3737 (1999). 等
- [5]X.Z. Yu, *et al.* Nature 465, 901 (2010). 等
- [6]T. Yamazaki, *et al.* arXiv:1106.4599 (2011)
- [7]N. Kanazawa, *et al.* Phys. Rev. Lett. 106, 156603 (2011).