

Mn₃Sn を用いた異常ホール効果の測定

1 はじめに

カゴメ格子構造 (図 1) を持つフラストレートした反強磁性体の 1 つである Mn₃Sn のホール効果を見た。反強磁性体は次世代のスピンロニクス材料として注目されている。

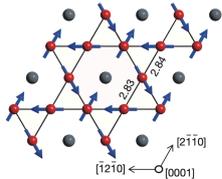


図 1: カゴメ格子構造を持つ Mn₃Sn の結晶構造。赤が Mn、灰が Sn、矢印がスピンの向きを表す。([1])

2 ホール効果とは

図 2 のような系ではローレンツ力によって $\rho_{yx} = \frac{B_z}{nq}$ のホール抵抗率が生じる。

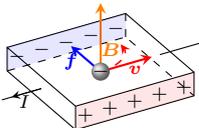


図 2: ホール効果の古典的説明

3 異常ホール効果

従来的には、強磁性体のホール効果は強磁性体を持つ内部磁場によって、外部磁場なしでホール効果を起こすと説明されてきた。しかし、この説明は全ての物質には当てはまらない。例えば、今回実験した Mn₃Sn 等の反強磁性体では、観測されるホール効果は内部磁場から予想される値より遥かに大きい。

4 Mn₃Sn の測定結果

Mn₃Sn の磁化の磁場に対する依存性は図 3 のようになる。試料の大きさは 4.5 mm × 4.7 mm × 69 nm であることから、1Mn 原子あたりの磁化は大きく見積もっても $10^{-3} \mu_B$ 程度であり、強磁性体のオーダー $\sim 1 \mu_B$ と比較す

るとはるかに小さく、Mn₃Sn が反強磁性体であることがわかる。

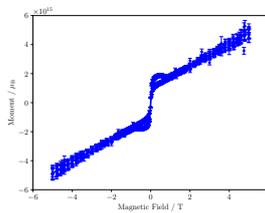


図 3: 300 K の時の磁場に対する磁化

通常の異常ホール効果は磁化に比例するという経験式から、このオーダーの磁化に対してホール伝導度は大きくとも $0.1 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ と見積もられる。ところが、Mn₃Sn のホール伝導度を測定すると、次の図 4 のように、見積もられる値よりも極めて大きい値を得る。

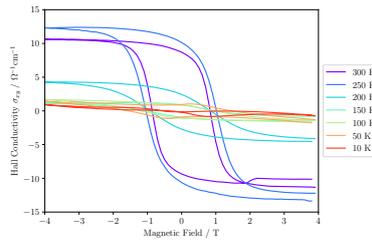


図 4: 磁場に対するホール伝導度

外部磁場をかけない時のホール伝導度の温度依存性をプロットすると図 5 となり、260 K 付近で相転移する傾向が見られる。

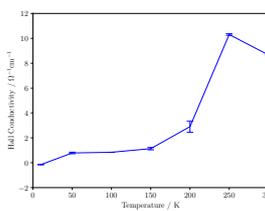


図 5: 磁場 0 でのホール伝導度の温度依存性

これは図 6 に示すような、巨視的に時間反転対称性を破る III の相から時間反転対称性を破らない II の相への 260 K 付近で起こる磁気構造の相転移に伴う。

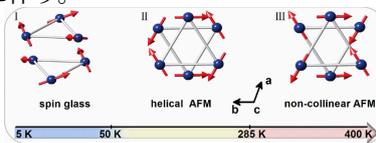


図 6: Mn₃Sn の磁気構造の相 ([2])

5 ベリー曲率とワイル点

実は異常ホール効果は逆格子空間のベリー曲率に由来している。ホール伝導率は、全ての占有されたバンドでのベリー曲率の積分

$$\sigma_{xy} = - \sum_n \frac{e^2}{\hbar} \int_{\text{BZ}} \frac{dk}{(2\pi)^3} \Omega_{n,xy}(\mathbf{k}) f_n(\epsilon_{\mathbf{k}})$$

として表される。n はバンドのラベル、 $\Omega_{n,xy}$ はベリー曲率の xy 平面に垂直な成分、 $f_{n,k}$ はフェルミ分布関数。

ワイル粒子は互いに交差する 2 つの縮退のない線形分散をもつ電子の低励起を記述する。ワイル点と呼ばれる交差点は、運動量空間における仮想磁場の源、すなわち仮想的な磁極として見なすことができる。実際、このようなワイル点が Mn₃Sn のフェルミ面付近に存在することが知られている。すなわち、これらのワイル点の存在がフェルミ面での大きなベリー曲率の存在につながり、また観測された異常ホール効果にも寄与している。

6 謝辞

本実験は中辻・酒井研究室の皆様のご協力のもと行われました。特に対馬湧太郎さん、松本卓也さんには薄膜の作成から測定まで、実験全体にわたり大変お世話になりました。ご協力頂いた全ての方々に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 中辻 知. 応用物理, 86(4):310 - 314, 2017.
- [2] J.J.Deng et al. Appl. Phys.,55, 2022.