

# 非共線反強磁性体におけるスピン分裂バンドとトンネル磁気抵抗

中辻 知<sup>A, B, C, D</sup>

S. Nakatsuji<sup>A, B, C, D</sup>

東大理<sup>A</sup>, 東大物性研<sup>B</sup>, 東大 TSQS<sup>C</sup>, ジョーンズホプキンス大<sup>D</sup>

<sup>A</sup>Dept. of Phys., University of Tokyo, <sup>B</sup>ISSP, University of Tokyo,

<sup>C</sup>TSQS, University of Tokyo, <sup>D</sup>Johns Hopkins University

## Abstract

The prominent effects coming from spin-split bands have been seen in the noncollinear antiferromagnets, which have been recently proposed for a new class of antiferromagnet called altermagnet. In contrast to altermagnets, in the noncollinear and noncoplanar antiferromagnets, the time-reversal symmetry (TRS) is macroscopically broken by spin texture itself, leading to the nonrelativistic spin-split band and the unconventional transport phenomena including anomalous Hall effect, anomalous Nernst effect, X-ray Magnetic Circular Dichroism and anisotropic TRS-odd spin current or magnetic spin Hall effect. The noncollinear spin splitting in the momentum space generates the strongly anisotropic spin polarized current and anisotropic tunnelling magnetoresistance even in the case of all antiferromagnetic tunnelling junction.

## 1. はじめに

近年、Antiferromagnets に大変、興味が集まっている。その中でも特に、Altermagnets に対してスピン分裂バンドが存在し様々な新しい現象が現れるということが見いだされ、理論・実験の分野で様々な物質を中心に研究が進んでいる。一方で、これらの現象は反強磁性体のなかでも非共線反強磁性体[1,2]において発見され、様々な新しい現象が発見されてきた。共線なスピン構造を持つ Altermagnets とは対照的に、非共線かつ非共面な反強磁性体では、磁性サイト上のスピン構造 (図 1a) によって時間反転対称性 (TRS) が巨視的に破れており、非相対論的なスピン分裂バンド (図 1b) は、異常ホール効果、異常ネルンスト効果、X 線磁気円二色性、および、異方性磁気(TRS-odd)スピン流または磁気スピンホール効果など、次々と新しい輸送現象を引き起こすことが報告されてきた。

## 2. 非共線反強磁性体におけるスピン分裂バンドと巨大応答

非共線反強磁性体(Nocollinear Antiferrmagnets)において、最も研究されている例は  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  であり、異常ホール効果を示すことが実験的に初めて発見された反強磁性体である (図 1c) [2]。430 K のネール温度以下では、カゴメ格子上的反強磁性超交換結合による幾何学的フラストレーションを反映して、スピン  $1\ 2\ 0$  度構造が現れる。反強磁性状態では、双極子モーメント、すなわち磁化が補償され、したがって、高次の多極子、この場合は八極子自由度が、単位格子の 6 つの Mn モーメントのクラスター配置に基づいて、主要な秩序パラメータとなる[1,3]。この材料はトポロジカルにも非自明な電子構造を持ち、時間反転対称性を破ったワイル半金属として初めて報告された例としても知られる[4,5]。フェルミ準位付近の関連する大きなベリー曲率は、特に異常ホール効果[2]、異常ネルンスト効果

[6,7]、磁気光学ファラデー効果およびカー効果[8,9]、X線磁気円二色性[10,11]などの横応答の大きさを増強していることが知られている。非共線反強磁性体は、電流、熱流、光だけでなく、一軸歪みにも敏感である。実際、巨大なピエゾ磁気応答が発見されており、反強磁性体における磁化と異常ホール効果の歪み制御が可能になった最初の例でもある [12]。

Altermagnets と非共線反強磁性体におけるスピン偏極バンドの顕著な効果の一つとして、異方性スピン流がある。運動量空間における非共線スピン分裂 (図 b) は、強い異方性スピン偏極電流を生成することが期待される[13]。この顕著な効果の一つとして、我々は最近、反強磁性体の電極のみを用いてトンネル磁気抵抗効果があることを見出した。これは通常の強磁性体で議論される磁化に比例したスピン偏極の議論では理解できず、上記の強く異方的なスピン偏極電流の存在を示唆する。運動量空間における非共線スピン分裂の効果を検証するために、異方的なトンネル磁気抵抗測定を行った結果、その予測を裏付けるように、トンネル磁気抵抗測定では、電場と磁場が平行な場合はスピン流が正であり、垂直な場合は負であることが確認された (図 1 d,e) [14]。

さらに、強磁性体では、縦スピン流がスピン移行トルクに基づいて磁壁運動を駆動することが知られている。同様に、マイクロメートルスケールの  $Mn_3X$  デバイスへの電流注入は、スピン移行トルクによる磁壁伝搬を示すことが明らかになった (図 1 f) [15]。驚くべきことに、強磁性体またはフェリ磁性体と比較して、移動度は桁違い大きい (図 g)。さらに、臨界電流密度は 1 桁小さく、キラル格子磁性体におけるスキルミオン運動と同程度であることがわかった[16]。

最後に、運動量空間における異方性スピン偏極バンド (図 1b) は、TRS-odd のスピン流を生成することが知られる。TRS-even である従来のスピンホール効果とは対照的に[17]、横スピン流によるスピンホール効果は、磁気構造に基づいてスピン偏極を変化させる[18,19]。これは「磁気スピンホール効果(Magnetic Spin Hall Effect)」と呼ばれ、磁気トンネル接合における磁性自由層の効率的なスピン軌道トルク (SOT) スイッチングに有用である[20]。

### 3. さいごに

上記のすべての現象が室温で利用可能であり、超高速不揮発性メモリ[21,22]を含むスピントロニクスデバイスの開発に潜在的に有用であることは非常に興味深い。講演では、反強磁性体で初めて確認されたトンネル磁気抵抗を中心に議論を行いたい。以上の成果は、Xianzhe Chen, 肥後友也, Hanshen Tsai, 松尾拓海, 井土 宏, 大谷義親, 三輪 真嗣, 近藤浩太, Mingxing Wu, 有田亮太郎, 野本拓也, 田中克大, 坂本祥哉, 甲崎秀俊, 松永隆佑, 近藤猛, 松田拓也, C-L. Chien, C. Broholm, P. Armitage, O. Tschernyshov, B. Ramshaw (敬称略) らとの共同研究の成果である。また、JST-MIRAI(JPMJMI20A)、JST-ASPIRE(JPMJAP2317)の支援をいただいた。ここに感謝を申し上げる。

### 引用文献

- [1] S. Nakatsuji and R. Arita, Annual Review of Condensed Matter Physics **13**, 119 (2022).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015).
- [3] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017).
- [4] K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T.

- Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo, and S. Nakatsuji, *Nature Materials* **16**, 1090 (2017).
- [5] T. Chen, T. Tomita, S. Minami, M. Fu, T. Koretsune, M. Kitatani, I. Muhammad, D. Nishio-Hamane, R. Ishii, F. Ishii, R. Arita, and S. Nakatsuji, *Nature Communications* **12**, 572 (2021).
- [6] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji, *Nature Physics* **13**, 1085 (2017).
- [7] X. Li, L. Xu, L. Ding, J. Wang, M. Shen, X. Lu, Z. Zhu, and K. Behnia, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 056601 (2017).
- [8] T. Matsuda, N. Kanda, T. Higo, N. P. Armitage, S. Nakatsuji, and R. Matsunaga, *Nature Communications* **11**, 909 (2020).
- [9] T. Higo, H. Man, D. B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O. M. J. van 't Erve, Y. P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M. T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C. L. Chien, R. Arita, R. D. Shull, J. Orenstein, and S. Nakatsuji, *Nature Photonics* **12**, 73 (2018).
- [10] M. Kimata, N. Sasabe, K. Kurita, Y. Yamasaki, C. Tabata, Y. Yokoyama, Y. Kotani, M. Ikhlas, T. Tomita, K. Amemiya, H. Nojiri, S. Nakatsuji, T. Koretsune, H. Nakao, T.-h. Arima, and T. Nakamura, *Nature Communications* **12**, 5582 (2021).
- [11] S. Sakamoto, T. Higo, M. Shiga, K. Amemiya, S. Nakatsuji, and S. Miwa, *Phys. Rev. B* **104**, 134431 (2021).
- [12] M. Ikhlas, S. Dasgupta, F. Theuss, T. Higo, S. Kittaka, B. J. Ramshaw, O. Tchernyshyov, C. W. Hicks, and S. Nakatsuji, *Nature Physics* **18**, 1086 (2022).
- [13] J. Železný, Y. Zhang, C. Felser, and B. Yan, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 187204 (2017).
- [14] X. Chen, T. Higo, K. Tanaka, T. Nomoto, H. Tsai, H. Idzuchi, M. Shiga, S. Sakamoto, R. Ando, H. Kosaki, T. Matsuo, D. Nishio-Hamane, R. Arita, S. Miwa, and S. Nakatsuji, *Nature* **613**, 490 (2023).
- [15] M. Wu, T. Chen, T. Nomoto, Y. Tserkovnyak, H. Isshiki, Y. Nakatani, T. Higo, T. Tomita, K. Kondou, R. Arita, S. Nakatsuji, and Y. Otani, *Nature Communications* **15**, 4305 (2024).
- [16] L. Peng, K. Karube, Y. Taguchi, N. Nagaosa, Y. Tokura, and X. Yu, *Nature Communications* **12**, 6797 (2021).
- [17] J. Sinova, S. O. Valenzuela, J. Wunderlich, C. H. Back, and T. Jungwirth, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 1213 (2015).
- [18] M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P. K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, A. H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani, *Nature* **565**, 627 (2019).
- [19] K. Kondou, H. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, T. Higo, A. H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani, *Nature Communications* **12**, 6491 (2021).
- [20] S. Hu, D.-F. Shao, H. Yang, C. Pan, Z. Fu, M. Tang, Y. Yang, W. Fan, S. Zhou, E. Y. Tsymbal, and X. Qiu, *Nature Communications* **13**, 4447 (2022).
- [21] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, A. Sakai, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, R. Arita, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji, *Nature* **580**, 608 (2020).
- [22] T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, M. Shiga, S. Sakamoto, X. Chen, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, S. Miwa, and S. Nakatsuji, *Nature* **607**, 474 (2022).

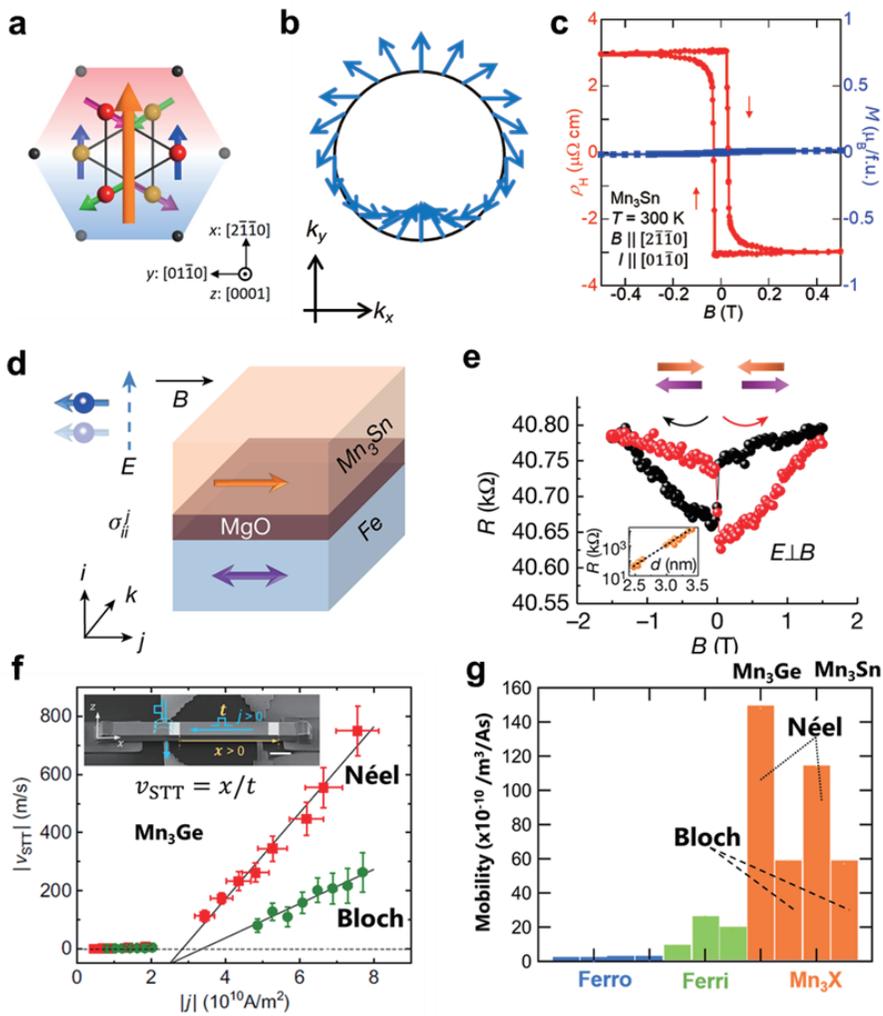


図1 非共線反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  におけるスピン分裂バンドと時間反転対称性を破った異方的スピン流の効果

2025年2月24日受理