

反強磁性多層ディラック電子系 EuMnBi_2 における 軟 X 線磁気共鳴散乱の観測

Observation on the Resonant Soft X-Ray Magnetic Scattering in an Antiferromagnetic Dirac Material EuMnBi_2

増田英俊^{1,*}, 酒井英明², 山崎裕一^{1,3}, 中尾裕則⁴, 村上洋一⁴,
有馬孝尚^{3,5}, 十倉好紀^{1,3}, 石渡晋太郎^{1,6}

¹ 東京大学工学部物理工学科, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

² 大阪大学理学部物理学科, 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1

³ 理化学研究所 CEMS, 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

⁴ KEK 物構研 PF/CMRC, 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

⁵ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

⁶ JST さきがけ, 〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

Hidetoshi Masuda^{1,*}, Hideaki Sakai², Yuichi Yamasaki^{1,3}, Hironori Nakao⁴, Youichi Murakami⁴,
Takahisa Arima^{3,5}, Yoshinori Tokura^{1,3}, Shintaro Ishiwata^{1,6}

¹ Department of Applied Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, 113-8656, Japan

² Department of Physics, Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, 560-0043, Japan

³ RIKEN-CEMS, 2-1 Hirosawa, Wako, 351-0198, Japan

⁴ KEK PF/CMRC, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

⁵ Department of Advanced Materials Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8561, Japan

⁶ JST-PRESTO, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, 332-0012, Japan

1 はじめに

ディラック電子系では伝導電子が質量ゼロの相対論的粒子とみなせ、グラフェンにおける半奇数量子ホール効果の室温での観測など、磁場中での新奇な輸送特性が注目を集めている。中でも EuMnBi_2 はディラック電子と磁気秩序が共存する数少ない系のひとつであり、磁気秩序がディラック電子の伝導に及ぼす影響に興味を持たれる。

EuMnBi_2 は図 1A に示すように、擬 2 次元的なディラック電子をもつピスマス正方格子と、磁性を持つ $\text{Eu} \cdot \text{Mn}$ を含む絶縁層からなる多層ディラック電子系である。この系はディラック電子の量子伝導と Eu/Mn の反強磁性秩序との強い結合により興味深い磁気輸送特性を示す[1]。特に強磁場下のスピントップ相では、伝導面間の飛び移りが抑制されて電子構造の 2 次元性が強く増大し、面間抵抗率の急激な増大や、面内・面間抵抗率における巨大な量子振動、ホール抵抗率の量子化などの特異な量子輸送現象が観測される。このような磁気秩序と結合した磁気輸送現象の機構を理解するには、磁気構造を明らかにすることが不可欠である。

磁気構造を調べるにあたり、通常は中性子散乱が有用である。しかし EuMnBi_2 では Eu の中性子吸収断面積が大きいことが問題となるため、X 線磁気共

鳴散乱が有効である。我々は過去に、硬 X 線領域の $\text{Eu } L_3$ 吸収端における X 線磁気共鳴散乱を観測し、 Eu サイトの磁気構造を決定した[2]。これに加えて、今回我々は軟 X 線領域の $\text{Eu } M_{4,5}$ 吸収端において磁気共鳴散乱の観測を行った。 $M_{4,5}$ 吸収端における磁気共鳴散乱は Eu の $3d$ 軌道から $4f$ 軌道への遷移に由来するため、 $4f$ 軌道に由来する Eu の磁気秩序をより直接的に観測できると期待される。

2 実験

測定は、Photon Factory の BL-19 に設置された 2 軸回折計において行った。測定には自己フラックス法によって育成した EuMnBi_2 単結晶の(0 0 1)ナチュラルファセットを用いた。試料の配置は図 1B のインセットに示す通りである。

3 結果および考察

図 1B に 10 K における XAS と(0 0 3)磁気反射のエネルギースペクトルを示す。XAS は $\text{Eu } M_4$ 吸収端 (~1130 eV) と M_5 端 (~1155 eV) に対応してピーク構造を示す。これらのピークより 5 eV 程度低いエネルギーにおいて、鋭い共鳴構造を示す(0 0 3)磁気反射が観測された。特に M_4 吸収端では、(0 0 2)ブラッグ散乱と同程度のオーダーの強度を持つ非常に強い磁気散乱が観測された。(0 0 3)反射は EuMnBi_2 の空間

群 $14/mmm$ では禁制反射であり、ブラッグ散乱ではないと考えられる。また図 1C に示すように、共鳴エネルギーにおける(0 0 3)磁気反射強度は約 20 K 以下で発達する。これは Eu サイトの反強磁性秩序が反強磁性転移温度 $T_N \sim 22$ K 以下で発達することと対応している。これらの結果から、(0 0 3)反射は Eu サイトの磁気秩序を反映した磁気共鳴散乱であると考えられる。この結果は、Eu L_3 吸収端において(0 0 11)磁気共鳴散乱を観測した結果と矛盾しない。

今回の測定、ならびに Eu L_3 吸収端での測定から明らかになった、EuMnBi₂ のゼロ磁場における磁気構造を図 1A に示す。(0 0 3)磁気散乱が観測されたことから、Eu モーメントが ab 面内で強磁性的に揃い、 c 軸方向には反強磁性的にスタックしている異方的な磁気構造が実現していることが分かる。このような c 軸方向のスタッキングには 2 通りの可能性が考えられるが、 L_3 吸収端での測定から図 1A に示す磁気構造が実現していることが明らかにされている[1,2]。この磁気構造はスピバルブが自然に実現したもののみならずことができ、面間の伝導が抑制されるのに対して面内の移動度は高まると考えられる。このことは Eu サイトの反強磁性転移温度以下で面間抵抗率が増大し、面内抵抗率が減少することと矛盾しない。

前述したように、今回観測した $M_{4,5}$ 吸収端における(0 0 3)共鳴磁気散乱は、(0 0 2)ブラッグ散乱と同程度の強度をもつ非常に強いものであった。これに対して Eu L_3 吸収端における(0 0 11)共鳴磁気散乱は、(0 0 10)ブラッグ散乱の 10^{-5} 程度と非常に弱い。この磁気散乱強度の違いは、以下で議論するように、 $M_{4,5}$ 吸収端における磁気散乱が L_3 吸収端に比べて、Eu サイトの磁気秩序をより直接的に反映していることに由来すると考えられる。

Eu サイトの磁性は $4f$ 軌道が担う。Eu $M_{4,5}$ 吸収端は $3d$ 軌道と $4f$ 軌道のエネルギー差に対応することから、今回観測した $M_{4,5}$ 吸収端における磁気共鳴散乱は、内殻 $3d$ 軌道からスピン偏極した $4f$ 軌道への双極子遷移に由来すると考えられる。これに対して Eu L_3 吸収端は $2p$ 軌道と $5d$ 軌道のエネルギー差に対応する。EuMnBi₂ の Eu サイトでは局所的に反転対称性が破れているため、結晶場によってオンサイトの $4f$ - $5d$ 軌道混成が起これ、 $5d$ 軌道も弱くスピン偏極している。 L_3 吸収端における磁気共鳴散乱は、内殻 $2p$ 軌道から、 $4f$ 軌道との混成によって弱くスピン偏極した $5d$ 軌道への双極子遷移に由来すると考えられる。以上のことから、 $M_{4,5}$ 吸収端における磁気共鳴散乱は $4f$ 軌道に由来する Eu サイトの磁気秩序をより直接的に反映しており、そのために L_3 吸収端に比べて非常に強い磁気共鳴散乱が観測されたと考えられる。

4 まとめ

EuMnBi₂ の X 線磁気共鳴散乱を軟 X 線領域の Eu $M_{4,5}$ 吸収端において観測した。Eu モーメントが ab 面内で強磁性的に揃い、 c 軸方向には反強磁性的にスタックしたスピバルブに似た磁気構造が実現していることが明らかになった。 $3d$ 軌道から $4f$ 軌道への双極子遷移に対応する $M_{4,5}$ 吸収端を用いることにより、 $4f$ 軌道に由来する Eu サイトの磁気秩序を直接的に観測できたと言える。

参考文献

- [1] H. Masuda *et al.*, *Science Advances* **2**, e1501117 (2015).
- [2] H. Sakai *et al.*, PF Activity Report 2015 #33 Part A p. 38 (2016).
- [3] Y. F. Guo *et al.*, *Phys. Rev. B* **90**, 075120 (2014).

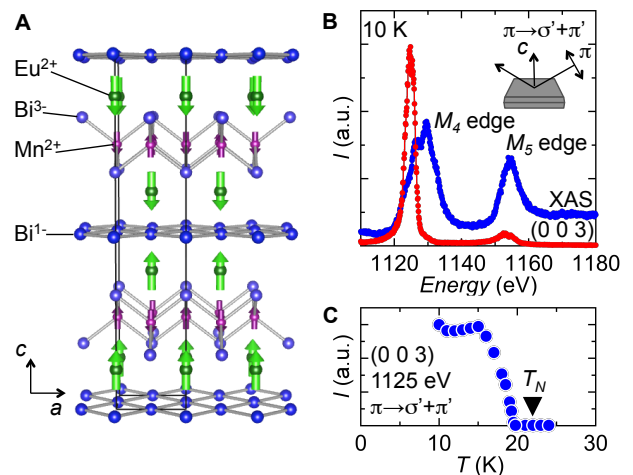


図 1 : (A) EuMnBi₂ のゼロ磁場における結晶構造と磁気構造。Mn サイトの磁気構造は SrMnBi₂ の磁気構造[2]による。(B) XAS と(0 0 3)磁気共鳴散乱の 10 K におけるエネルギースペクトル。インセットは測定における試料と入射光、反射光の配置を模式的に示す。(C) 共鳴エネルギーにおける(0 0 3)磁気散乱強度の温度依存性。三角は磁化率の温度依存性から決定した反強磁性転移温度 T_N を示す。

* masuda@hp.t.u-toyko.ac.jp