

## 共鳴 X 散乱による磁気テクスチャとそのダイナミクスの観測

## Observation of Spin Texture and its Dynamics by Resonant X-ray Scattering

**実験組織** 研究代表者：山崎裕一（東京大学大学院工学系研究科量子相エレクトロニクス研究センター / 理化学研究所創発物性科学研究センター創発超構造研究ユニット）

本田孝志<sup>A</sup>、中尾裕則<sup>A</sup>、深谷亮<sup>A</sup>、増田英俊<sup>B</sup>、伊藤 雅春<sup>B</sup>、野本敦朗<sup>B</sup>、高橋英史<sup>B</sup>、酒井英明<sup>B\*</sup>、石渡 晋太郎<sup>B</sup>、岡村嘉大<sup>B</sup>、藤岡淳<sup>B</sup>、大川達也<sup>B</sup>、阿部 伸行<sup>C</sup>、山本航平<sup>D</sup>、横山優一<sup>D</sup>、田久保耕<sup>D</sup>、平田靖透<sup>D</sup>、和達大樹<sup>D</sup>、田端千紘<sup>E</sup>、上西健太<sup>E</sup>、網塚浩<sup>E</sup>、森川大輔<sup>F</sup>、有馬孝尚<sup>CF</sup>、十倉好紀<sup>BF</sup>

<sup>A</sup> 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所、<sup>B</sup> 東京大学大学院工学系研究科物理学専攻、<sup>C</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻、

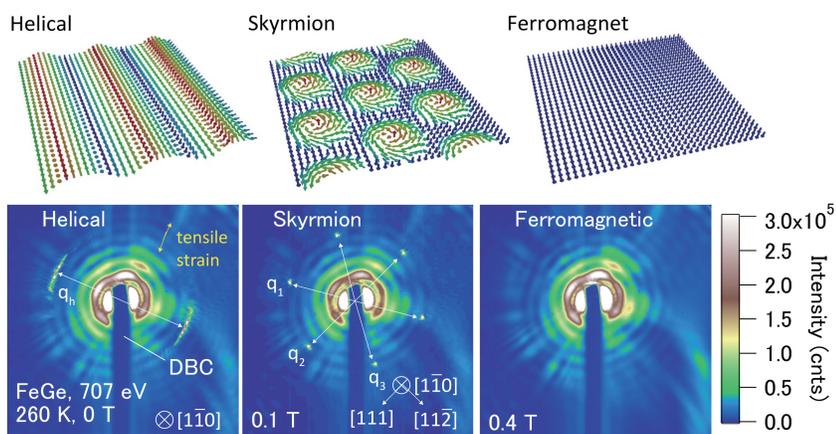
<sup>D</sup> 東京大学物性研究所極限コヒーレント光科学研究センター、<sup>E</sup> 北海道大学大学院、<sup>F</sup> 理化学研究所創発物性科学研究センター、\* 現所属：大阪大学理学部

**課題情報** 課題有効期間：2015年10月～2018年9月、利用した実験ステーション：3A, 4C, 8B, 13A/B, 16A、実施したビームタイム：3A(28日)、4C(11日)、8B(5日)、13A(1日)、16A(14日)

**研究目的** 近年、ナノメートルスケールのトポロジカルなスピントロニクス構造であるスキルミオンが注目されている。スキルミオンは電場や電流、温度勾配に対して巨大な応答を示すことから、次世代のスピントロニクスデバイスにおける新たな情報媒体への応用が期待されている。このようなナノスケールの磁気テクスチャは、電子自由度の秩序構造とも強く相関しており多彩な物性を創発している。その電子状態やダイナミクス、外場応答を直接的に観測することは、基礎物性の理解と共に、応用研究においても非常に重要となる。このような観点から、磁気テクスチャの秩序構造と電子状態を、高感度・高速・高い位置分解能で観測できる実験手法の必要性がますます高まっている。本S2型課題研究では、共鳴軟 X 線小角散乱を中心手法としてナノスケールの磁気テクスチャ、および、それと関連のある電子秩序構造の観測を行う。特に、共鳴 X 線散乱の特性を最大限に活かした、コヒーレント X 線回折によるホログラフィー測定や位相回復アルゴリズムによる磁気テクスチャの実空間イメージング、パルス放射光を使った時分割測定による磁気テクスチャの高速ダイナミクス観測、電流・電場・磁場・応力など多彩な外場に対する磁気テクスチャの応答観測を行っていく。これらの研究により、磁気テクスチャの基礎物性を構造物性・電子物性の観点から解明し、強相関電子系やスピントロニクス物質で観測される顕著な創発物性の発現機構解明を目指していく。

## 研究成果1：共鳴軟 X 線散乱によるスキルミオン格子の観測

共鳴軟 X 線小角散乱装置を開発し、B20型結晶 FeGe において磁気スキルミオン格子の観測に成功した。放射光 X 線の高い q 分解能のため微小なスキルミオン格子の変形を検出することが可能になった。測定は FIB 加工によって薄片化した試料を Si 基板上に固定して行ったため、熱膨張率の違いにより基板からのテンサイルストレインが加わり、スキルミオン格子は数%歪むことが確認された。またヘリカル磁気構造とスキルミオン格子の間での磁気構造変化において、スキルミオン格子の伸縮や回転といった新規現象を観測することに成功した。(Y. Yamasaki et al., PRB, 92 (2015) 220421(R)).

研究成果3：BiFeO<sub>3</sub>における長周期磁気秩序の観測

BiFeO<sub>3</sub> は強誘電性秩序と反強磁性秩序を同時に有するマルチフェロイクス特性を室温において示す非常に稀有な物質である。強誘電性秩序に由来した反転心の欠如に由来した Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用により長周期の変調ベクトルを持つ反強磁性体となる。本研究では、共鳴軟 X 線小角散乱により長周期磁気秩序の観測に成功した。さらに、左右円偏光の共鳴軟 X 線散乱のスペクトル形状からスピン秩序と干渉する多極子秩序の存在を示す結果を得た。電気分極とスピンの外積によるトロイダルモーメントが長周期に秩序している可能性が考えられる。(Y. Yamasaki et al., in preparation)

## 研究成果2：ディラック電子を有する反強磁性体の磁気構造解明

EuMnBi<sub>2</sub> はディラック電子と磁石の性質が共存すると予想される層状物質であり、Eu<sup>2+</sup> の磁気秩序に伴い電気抵抗率が大きく変化する。その起源を解明するため、未解明であった Eu<sup>2+</sup> の磁気秩序構造を共鳴 X 線散乱によって観測した。その結果、磁場がない状態では Eu<sup>2+</sup> のスピンの c 軸方向に向いた P 格子の構造になっていることを解明した。さらに面直方向へ磁場を加えるとスピンドロップを起こし、磁気モーメントの方向が 90 度回転することが明らかになった。このとき、面直方向への伝導が 1 桁近く抑制され、ディラック電子を面内に強く閉じ込めることが判明した。この状態では、ホール抵抗が量子化抵抗値 (約 25.8kΩ=h/e<sup>2</sup>) を (半) 整数で割った値で一定となる量子ホール効果の実現しており、ディラック電子がほぼ理想的な二次元系に達していることが明らかになった。ディラック電子状態を Eu<sup>2+</sup> スピンを介して磁場で制御できることに示唆している。(H. Masuda et al., Sci. Adv., 2 (2016) e1501117.)



## 研究成果4：カイラルソリトン格子の観測

層状硫化物 CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub> は、磁気秩序温度 (~120 K) 以下で周期 48 nm のヘリカル磁気構造となり、伝播ベクトル q に対し垂直方向に磁場を印加すると、らせん磁気構造の一部がほどけ、コヒーレントに格子を組んだカイラルソリトン格子を形成することが知られている。本研究では、このカイラルソリトンの形成を Cr の L3 吸収端 (E = 577 eV) の近傍で共鳴軟 X 線小角散乱実験により観測を目指した。その結果、ゼロ磁場ではヘリカル磁気構造が観測され、磁場印加によるカイラルソリトン格子形成に伴い、4q 反射までの高調波成分を観測した。磁気散乱の磁場依存性を詳細に測定したところ、カイラルソリトンの厳密解の磁場依存性をよく再現することが明らかになった。

(T. Honda, Y. Yamasaki et al., in preparation)

## 次年度以降の計画

## ・長周期磁気秩序構造の観測

CuB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> における磁気カイラルソリトン格子、β-Mn type Co-Zn-Mn 合金におけるスキルミオン格子、超伝導におけるボルテックス格子、電場・電流などの外場下でのスピントロニクス構造の観測を目指す。

## ・コヒーレント軟 X 線を用いた磁気イメージング

コヒーレント軟 X 線を用いた共鳴軟 X 線小角散乱により磁気テクスチャの実空間イメージングを目指す。位相回復アルゴリズムによるイメージングを主眼に、低対称なアパーチャなどイメージングに最適な試料構成を探索・開発する。

## ・時分割計測

放射光のパルス特性を活用し、磁気テクスチャに特徴的なダイナミクスの観測を目指す。

## 研究成果発表

・"Surface Ordering of Orbitals at a Higher Temperature in LaCoO<sub>3</sub> Thin Film"

Yuichi Yamasaki et al., J. Phys. Soc. Jpn., 85 (2016) 023704.

・"Quantum Hall effect in a bulk antiferromagnet EuMnBi<sub>2</sub> with magnetically confined two-dimensional Dirac fermions", Hidetoshi Masuda et al., Sci. Adv., 2 (2016) e1501117.

[プレスリリース] 質量ゼロのディラック電子の流れを制御できる新しい磁石を発見

・"Dynamical process of skyrmion-helical magnetic transformation of the chiral-lattice magnet FeGe probed by small-angle resonant soft x-ray scattering",

Y. Yamasaki et al., Phys. Rev. B, 92 (2015) 220421(R).