共鳴軟X線小角散乱による ナノスケール磁気テクスチャのダイナミクス

山崎裕一(Yuichi YAMASAKI) 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 特任講師 理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー



空間反転対称性が破れた結晶における磁気テクスチャ

2 /20



スピンハミルトニアン

スキルミオン





磁気テクスチャとその応用 スキルミオン格子

スキルミオン格子

ローレンツ顕微鏡による観測





Yu, X. Z. et al. Nature 465, 901-904 (2010).



3

/20

トポロジカルに安定なため不純物の散乱に強い

不揮発性メモリ スキルミオン物性 構造・ダイナミクス 246.27281 voltages 過渡現象·臨界現象 磁気共鳴・外場応答 magnetic current lines vortex or skyrmion element 高感度、高分解能 高速の検出法 Scientific Report 4, 5123 (2014) **Riken NEWS**

MRAM, DRAMを凌駕する100 Gbits/cm², 10 GHz級のメモリーデバイスの可能性

磁気テクスチャの観測 磁気スキルミオン格子の例



Attcube, website

Nat. Phys. 7, 713–718 (2011)

コヒーレント軟X線イメージング(軟X線ホログラフィ)



PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

5

/20

共鳴軟X線散乱

4p

3d

Soft x-ray

(<2 keV)

2p_{3/2}

2p_{1/2}

1s

K X-ray (>4 keV)

L



元素が多く含まれている

PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

Energy

軟X線小角散乱装置の開発

7 /20











透過型軟X線散乱用サンプル準備

8 /20

軟X線透過試料



Thickness (nm)

試料加工

FIB (focused ion beam) thinning method



B20型合金 FeGelにおけるスキルミオン格子

ローレンツ電子顕微鏡



PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

FeGe , 707 eV



PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

10

/20

11 /20



基板からの歪み効果(Tensile Strain)



高q分解能によりスキルミオン格子の 微小な歪みを観測

共鳴軟X線小角散乱の特長

▶ 元素選択(吸収端の選択)
 ▶ 高いq分解能(高いエネルギー分解能)
 ▶ 高いスピン感度
 ▶ 磁気イメージング(コヒーレント光の利用)
 ▶ スピンカイラリティの観測(円偏光の利用)
 ▶ 高速ダイナミクスの観測(パルス特性の利用)

共鳴軟X線小角散乱



12 /20



コヒーレント散乱によるイメージング:ホログラフィ、位相回復、逆モンテカル法

位相回復アルゴリズム

位相回復アルゴリズムによるイメージング(FeGe)



軟X線小角散乱の将来展望 コヒーレント軟X線イメージング

高精度のイメージングを実現するための解析方法の探究・確立を目指す

位相回復の問題点:

ダイレクトビームキャッチャによる情報の損失 ⇒ 特殊な形状のアパーチャによる精度の向上



S. Flewett et al., PRL 108, 223902 (2012)

非対称アパーチャを用いた軟X線小角散乱





シミュレーションによる収束性の向上も確認

穴の形状による収束度の検証



PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

40

40

40

60

80

80

100

60

100

60

00

100

軟X線小角散乱による磁気散乱の観測 カイラルソリトン格子 CrNb₂S₆ 15 /20



軟X線小角散乱による磁気散乱の観測 マルチフェロイクスBiFeO₃ 16 /20

共鳴軟X線散乱による強誘電性分極に由来したスピンヘリシティの観測

マルチフェロイクス物質 BiFeO3

軟X線小角散乱 (Fe-L)



-q -q +q I(C+S) - I(C-S)



左右円偏光の散乱強度差から スピンヘリシティを検出

2015/7/27

PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」

軟X線小角散乱スキルミオン格子のダイナミクス

17 /20





スキルミオン格子のダイナミクス

Counter-clockwise

Rotation



PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

Abrupt shrinking Clockwise Rotation

将来光源に向けた期待磁気イメージングとダイナミクスの観測

将来光源:コヒーレント軟X線のフラックスの向上

ullet

b

- 19 /20
- kHz MHz GHz Hz THz 磁気共鳴(パルス同期実験) スキルミオンのダイナミクス スキルミオン格子のダイナミクス (a) H^C₂sino₂t (ω₂=6.12x10⁻³) (c) HPsineost (exa=7.76x10⁻³) (h) Decreasing magnetic field Lead Sample Lead Expanding M 1 0 +1 Abrupt shrinking Clockwise Rotation ドメインダイナミクス(XPCS) 250 sec 500 sec 1000 sec 1500 sec t=0 M. Mochizuki et al., PRL (2012) J. Iwasaki et al., Nat. Tech. (2013) 1.0 Microwaves Spin-wave current 0.8 9.0 70 = 0.0 8.0 T = 150K T = 177.5K 0.2 T = 178.5K T = 179.0K 0.0 = 179.4K 10 100 1000 Delay Time (sec) T. An, et al.: Nat. Mat., 12, 549-553 (2013) **Riken NEWS** http://sinhagroup.ucsd.edu/ PF研究会「次世代放射光光源を用いた構造物性研究への期待」 2015/7/27

放射光X線を用いた磁気テクスチャの観測:展望とまとめ

- ・ 共鳴軟X線小角散乱: これまでの測定手法にない特長を備えたプローブ
 ▶ 高q分解能 ⇒ スキルミオン構造の微小な歪みを検出
 ▶ 高感度 ⇒ 短時間での磁気散乱観測、高次反射の観測
 ▶ スピンカイラリティ、磁気イメージング
- スキルミオン格子のダイナミクス
 - スキルミオンとらせん磁気構造の転移におけるサブ秒の格子ダイナミクスを観測
 - 将来的には、X線チョッパーを用いた時分割測定やGHzのスピンダイナミクスの観測





20

/20