15/ Jan./ 2019 KEK連携コロキウム・研究会エディション 「量子多体系の素核・物性クロスオーバー」

カイラルソリトン格子における 特異な磁場応答

KEK物構研中性子科学研究系本田孝志

Collaborators

東大QPEC, 理研CEMS, NIMS MaDIS



山﨑裕一

KEK物構研 中尾裕則, 村上洋一







青学理工 小椋隆弘 岡大理 高阪勇輔,秋光純





Magnetic skyrmion



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

ローレンツTEM での実空間観測





3次元的(2次元的) トポロジカルスピン構造



放射光での観測

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



X. Z. Yu *et al.,* Nature 564, 95 (2018). http://www.riken.jp/pr/press/2018/20181206_1/

Chiral Soliton Lattice



▶ 1次元系におけるsine-Gordon模型で理論的解釈が行われる

I.E. Dzyaloshinskii, *J. Exp. Theor. Phys.* **19** 960 (1964). Y. A. Izyumov, *Sov. Phys., Usp.* **27**, 845-867 (1984). Soliton density

 $H/H_{\rm c}$

0.5

Y. Togawa et al., PRL 108, 107202 (2012).

1.0

T(0)/T(H)

0.5

0

0





I.E. Dzyaloshinskii, J. Exp. Theor. Phys. 19 960 (1964). Y. A. Izyumov, Sov. Phys., Usp. 27, 845-867 (1984).

Chiral Soliton Lattice

➢ Dynamicsに関する理論研究

J. Kishine et al., PRB 86, 214426 (2012).

▶ 磁気抵抗効果

Y. Togawa *et al., PRL* **92**, 220412(R) (2015).







➢ SQUIDによる精密磁化測定

K. Tsuruta, *et al.*, JPSJ 85, 013707 (2016).



≻ 交流磁化率測定による 磁気相図

> K. Tsuruta *et al., PRB* **93**, 104402 (2016).

Motivation

Chiral magnet CrNb₃S₆

- ➤磁性を担っているのはCrのみ
- > Long-range magnetic ordering: $\lambda_{CSL} \sim 48 \text{ nm}$
- > カイラルソリトン格子は弱磁場下で形成される H < 0.3 T</p>
- qの観測だけで本当にsoliton latticeを形成してると言えるか?



✓ 微小サンプルでの可能 → X線
 ✓ 強い磁気散乱強度の必要性 → 共鳴
 ✓ 通
 ✓ *磁場下小角共鳴軟X線散乱* ✓ Small-Anale Resonant X-ray Scatter

Small-Angle Resonant X-ray Scattering (SARXS)

より高調波成分の情報が必要

Quantum Beams

X-ray

✓ X-rayは電子雲で 散乱される



Neutron

- ✓ 中性子は原子核で 散乱される
- ✓ 高い透過性
- ✓ スピンをもつ(S=1/2)



Muon

✓ 第2世代のレプトン
 ✓ スピンをもつ(S=1/2)
 ✓ 構造内の局所磁場
 を調べることが可能



Slow Positron

- ✓ 電子の反粒子
- ✓ 最表面の回折が可能



静的構造を調べる → 回折(X線、中性子)

Quantum Beams

X-ray ✓ X-rayは電子雲で 散乱される



Neutron

- ✓ 中性子は原子核で 散乱される
- ✓ 高い透過性
- ✓ スピンをもつ(S=1/2)



静的構造を調べる → 回折(X線、中性子)

- 磁気構造を調べる
- → 磁気モーメントとの相互作用が重要
 → 中性子散乱が有用

X線も磁気モーメントと相互作用する →磁気散乱はX線でも検出可能?!

補足) ダイナミクスを観測するには非弾性散乱や準弾性散乱、 ミュオンスピン回転(μSR)法がある(NMRより速い領域)



3d遷移金属: *L*_{2,3}-edge (2*p*→3*d*) 希土類金属: *M*_{4,5}-edge (3*d*→4*f*) 1 軽元素(O, P, S,...): *K*-edge (1*s*→3*p*, 4*p*)

400-1000 eV 1100-2200 eV 500-2500 eV

Small-angle resonant soft x-ray scattering

J. P. Hill *et al., Acta Crystallogr. A: Found. Crystallogr.* **52**, 236 (1996). S. W. Lovesey *et al., J. Phys.: Cond. Matt.* **20**, 272201 (2008).

円偏光共鳴X線回折

$$I^{XRES}_{\chi} = \frac{1}{2} (|M_{\sigma'\sigma}|^2 + |M_{\pi'\sigma}|^2 + |M_{\sigma'\pi}|^2 + |M_{\pi'\pi}|^2) + \chi Im \{M_{\sigma'\sigma}M^*_{\sigma'\pi} + M_{\pi'\sigma}M^*_{\pi'\pi}\}$$

magnetic structure factor

$$M_{\sigma'\sigma} = 0$$

$$M_{\pi'\sigma} = -\frac{3}{4k} i \sum_{j} (-\hat{k}' \cdot \hat{z}_{j}^{\pm}) [F_{11} - F_{1-1}] \exp(i\boldsymbol{q} \cdot \boldsymbol{r}_{j})$$

$$M_{\sigma'\pi} = -\frac{3}{4k} i \sum_{j} (\hat{k} \cdot \hat{z}_{j}^{\pm}) [F_{11} - F_{1-1}] \exp(i\boldsymbol{q} \cdot \boldsymbol{r}_{j})$$

$$M_{\pi'\pi} = -\frac{3}{4k} i \sum_{j} (\hat{k}' \times \hat{k}) \cdot \hat{z}_{j}^{\pm} [F_{11} - F_{1-1}] \exp(i\boldsymbol{q} \cdot \boldsymbol{r}_{j})$$



小角なので、 $M_{\pi'\sigma}, M_{\sigma'\pi}$ 項がメイン
 スピンのx成分を見ている

Experimental condition



Temperature: 10 - 300 K Magnetic field: ± 0.4 T



Y. Yamasaki et al., J. Phys.: Conf. Ser. 425, 132012 (2013).

Experimental condition



Temperature: 10 - 300 K Magnetic field: ± 0.4 T

KEK-PF BL-16A	<i>E</i> = 577 eV: Cr <i>L</i> ₃ -edge
Sample: CrNb ₃ S ₆	透過配置
Thickness: ~120nm (FIB加工)	



Observation of CSL with SARSXS



4qまでの高調波成分を観測

▶ 楕円関数を用いた理論式(黒線、反磁場補正込)とよく合っている

$$\frac{q_{\text{CSL}}}{q_0} = \frac{\pi^2}{4K(\kappa)E(\kappa)} \qquad \sqrt{\frac{H}{H_c}} = \frac{\kappa}{E(\kappa)} \qquad \begin{array}{c} \kappa : 楕円関数の母数 (0 < \kappa < 1) \\ \kappa : 楕円関数の母数 (0 < \kappa < 1) \\ \kappa : 楕円関数の母数 (0 < \kappa < 1) \\ \kappa : 育1種完全楕円積分 \\ E(\kappa) : 第2種完全楕円積分 \end{array}$$



高調波成分を用いてCSLの内部構造を見る

Observe the detail of chiral soliton lattice

CSLを楕円関数を用いて記述すると、

$$m = m_q \hat{n}(z) = m_q (n_x(z), n_y(z), 0)$$

 $n_x(z) = \cos \phi(z) = 2 \sin^2(\gamma z) - 1$
 $n_y(z) = \sin \phi(z) = 2 \sin(\gamma z) \operatorname{cn}(\gamma z)$
 $\gamma = \pi Q_0 / 4E(\kappa) \longrightarrow q(\kappa) / q_0 = \pi^2 / 4K(\kappa)E(\kappa)$

I.E. Dzyaloshinskii, J. Exp. Theor. Phys. 19, 960 (1964).Y. A. Izyumov, Sov. Phys. Usp. 27, 845 (1984).



円偏光共鳴X線回折で見ているのは、 $n_x(z)//H$

n-th intensity at $nq(\kappa)$

 $I_n = A \left| f_m \cos \theta_n J_n^x(\kappa) \right|^2 \begin{array}{l} A: \text{ proportional constant} \\ f_m: \text{ magnetic form factor} \\ \vartheta_n: \text{ incident angle} \end{array}$

$$J_{0}^{x}(\kappa) = 1 + \frac{2\{E(\kappa) - K(\kappa)\}}{\kappa^{2}K(\kappa)}$$
$$J_{n}^{x}(\kappa) = \frac{\pi^{2}}{\kappa^{2}K(\kappa)^{2}} \frac{n}{\sinh(n\pi K'(\kappa)/K(\kappa))}$$
$$K'(\kappa) = K(\sqrt{1 - \kappa^{2}})$$

$$\frac{I_n}{I_1} \sim \left\{ J^x{}_n(\kappa) / J^x{}_1(\kappa) \right\}^2$$

H/H_c = $(\kappa/E(\kappa))^2 \longrightarrow q(\kappa)/q_0 \sigma$ 関数

高調波成分まで見ることで、 CSL内部を観測 共鳴軟X線散乱を用いて、4qまでの高調波成分を観測

楕円関数による表記

$$m = m_q \hat{n}(z) = m_q (n_x(z), n_y(z), 0)$$

 $n_x(z) = \cos \phi(z) = 2 \sin^2(\gamma z) - 1$
 $n_y(z) = \sin \phi(z) = 2 \sin(\gamma z) \operatorname{cn}(\gamma z)$
 $\gamma = \pi Q_0 / 4E(\kappa)$

高調波成分まで見ることで、CSL内部構造を観測

磁場減少時のプロファイルの振舞いより、

熱揺らぎ成分による変化+soliton数による変化

熱揺らぎによってtopological featureが保持