



筑波キャンパス

放射光・陽電子



東海キャンパス

中性子・ミュオン

KEK構造物性研究センターにおける (Condensed Matter Research Center) 軟X線分光・散乱研究の現状と展望

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・
放射光科学研究施設 (PF) / 構造物性研究センター (CMRC)



村上洋一

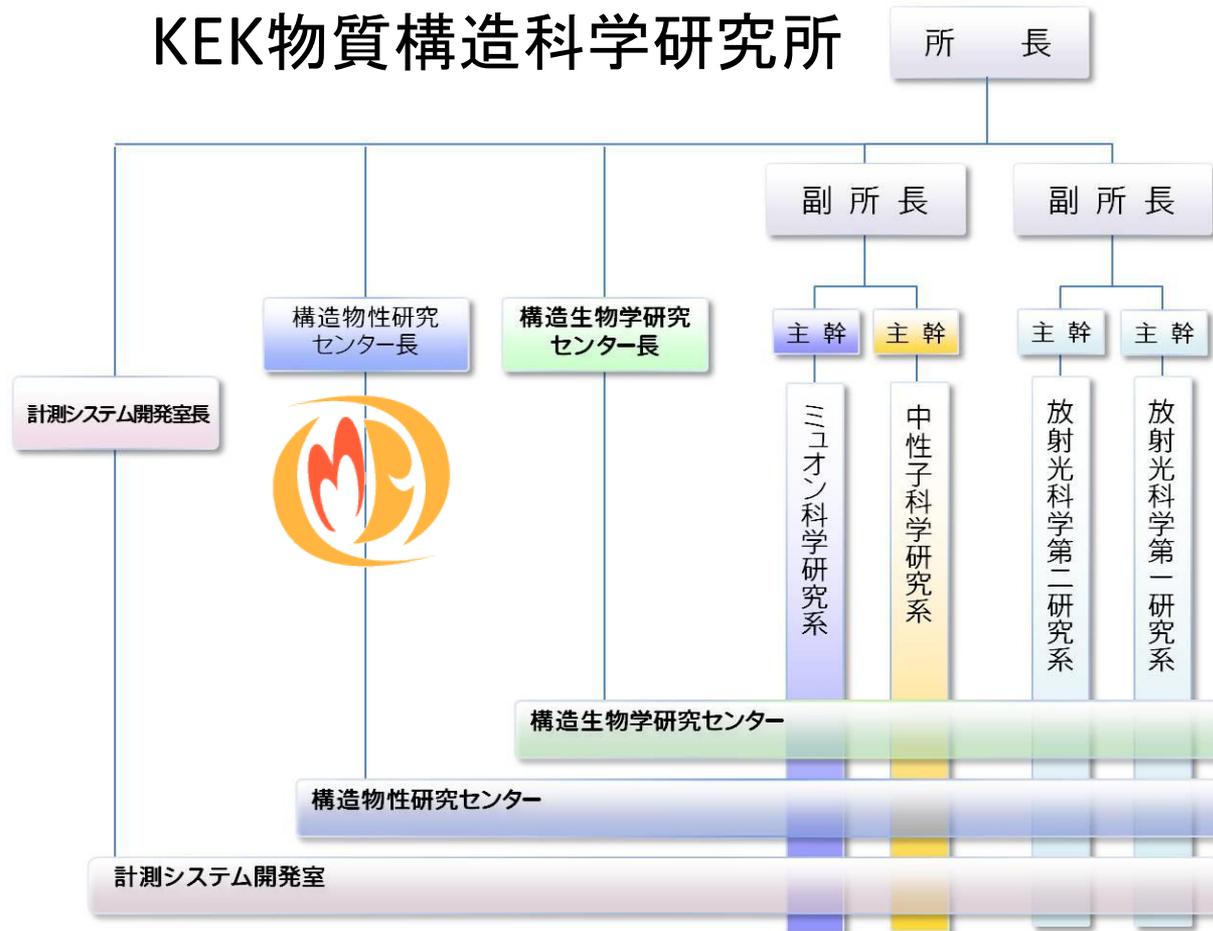
OUTLINE

- 構造物性研究センターの紹介
- CMRCにおける軟X線散乱装置の整備状況
- X線・軟X線を相補利用した研究例の紹介
- 軟X線散乱実験の展望



の使命

放射光・中性子・ミュオンなど量子ビームの相補利用により
先端的構造物性研究を切り開くことにより、大学・他機関との
構造物性ネットワークを構築する。





Member in IMSS

>>プロジェクトごとのメンバーリストはこちら

所属	Name 名前	職名	電話	e-mail	居室
(放射光)	Murakami Youichi 村上洋一	センター長 教授	TEL 029-864-5589 PHS 4881	youichi.murakami(at)kek.jp	4号館235号室
(放射光)	Nasu Keiichiro 那須奎一郎	教授	TEL 029-864-5588 PHS	keiichiro.nasu(at)kek.jp	4号館223号室
(放射光)	Kawata Hiroshi 河田洋	教授	TEL 029-879-6193 PHS 4363	hiroshi.kawata(at)kek.jp	4号館212号室
(放射光)	Adachi Shinichi 足立伸一	教授	TEL 029-879-6022 PHS 4737	shinichi.adachi(at)kek.jp	4号館215号室
(放射光)	Kumai Reiji 熊井玲児	教授	TEL 029-861-6024 PHS 4977	reiji.kumai(at)kek.jp	4号館224号室
(放射光)	Kumigashira Hiroshi 組頭広志	教授	TEL 029-861-5584 PHS 4917	hiroshi.kumigashira(at)kek.jp	PF実験準備棟 110号室
(中性子)	Seto Hideki 瀬戸秀紀	教授	TEL 029-879-6228 PHS 4039	hideki.seto(at)kek.jp	4号館207号室 東海1号館309室
(中性子)	Kamiyama Takashi 神山崇	教授	TEL 029-864-5612 PHS 4080	takashi.kamiyama(at)kek.jp	4号館201号室 東海1号館310室
(中性子)	Otomo Toshiya 大友季哉	教授	TEL 029-864-5615 PHS 4333	toshiya.otomo(at)kek.jp	4号館208号室 東海1号館311室
(ミュオン)	Kadono Ryosuke 門野良典	教授	TEL 029-864-5625 PHS 4715	ryosuke.kadono(at)kek.jp	4号館217号室 東海1号館308室
(放射光)	Koide Tsuneharu 小出常晴	准教授	TEL 029-864-5673 PHS 4208	tsuneharu.koide(at)kek.jp	PF511号室
(放射光)	Ono Kanta 小野寛太	准教授	TEL 029-864-5659 PHS 4205	kanta.ono(at)kek.jp	PF409号室
(放射光)	Amemiya Kenta 雨宮健太	准教授	TEL 029-864-5656 PHS 4729	kenta.amemiya(at)kek.jp	PF406号室
(放射光)	Nakao Hironori 中尾裕則	准教授	TEL 029-879-6025 PHS 4868	hironori.nakao(at)kek.jp	4号館226号室
(中性子)	Itoh Shinichi 伊藤晋一	准教授	TEL 029-864-5616 PHS 4451	shinichi.ito(at)kek.jp	4号館206号室 東海1号館312室
(ミュオン)	Kojima Kenji 小嶋健児	准教授	TEL 029-284-4613 PHS 4613	kkojima(at)post.kek.jp	4号館217号室 東海1号館305室
(放射光)	Kikegawa Takumi 亀卦川卓美	講師	TEL 029-864-5592 PHS 4359	takumi.kikegawa(at)kek.jp	4号館221号室
(ミュオン)	Kouda Akihiko 幸田章宏	研究機関講師	TEL 029-864-5603 PHS 4585	coda(at)post.kek.jp	4号館217号室 東海1号館301室
東京大学	Wadati Hiroki 和達大樹	特任講師	TEL 029-879-6207 PHS 2632	wadati(at)ap.t.u-tokyo.ac.jp	4号館225号室
(放射光)	Iwano Kaoru 岩野薫	助教	TEL 029-864-5593 PHS 4658	kaoru.iwano(at)kek.jp	4号館222号室
(放射光)	Yamasaki Yuichi 山崎裕一	助教	TEL 029-879-6207 PHS 4941	yuichi.yamasaki(at)kek.jp	4号館225号室
(中性子)	Yokoo Tetsuya 横尾哲也	助教	TEL 029-879-6191 PHS 4329	tetsuya.yokoo(at)kek.jp	4号館205号室 東海1号館313室
(中性子)	Yamada Norifumi 山田信史	助教	TEL 029-284-4274 PHS 4274	yamadan(at)post.kek.jp	4号館239室 東海1号館314室
(放射光)	Okamoto Jun 岡本淳	特任助教	TEL 029-879-6023 PHS 4902	jun.okamoto(at)kek.jp	4号館216号室
(放射光)	Sudayama Takaaki 須田山貴亮	博士研究員	TEL 029-879-6023 PHS 4938	takaaki.sudayama(at)kek.jp	4号館216号室
(中性子)	Sadakane Koichiro 貞包浩一朗	博士研究員	TEL 029-284-4720 PHS 4720	sadakane(at)post.kek.jp	東海1号館4720室
(放射光)	Kobayashi Kensuke 小林賢介	研究員	TEL 029-879-6026 PHS 4961	kensuke.kobayashi(at)kek.jp	4号館224号室

構造物性メンバー
IMSS内部 約30人
外部 約50人

Tsukuba Campus



構造物性研究センター

Condensed Matter Research Center (CMRC) since 2009

Tokai Campus



Synchrotron light at PF and PF-AR

Neutron, Muon at J-PARC

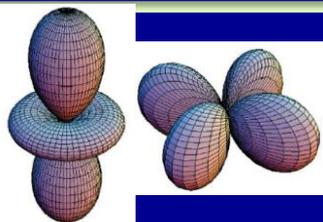
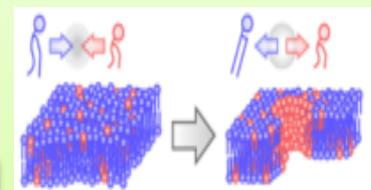
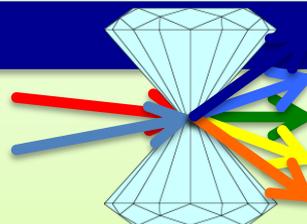
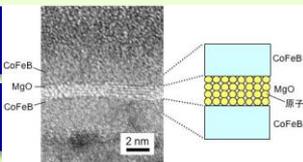
<http://cmrc.kek.jp/index.html>

組織図



強相関プロジェクト 1: 混成軌道秩序

強相関プロジェクト 2: 幾何学的相関



表面/界面プロジェクト

極限条件物質プロジェクト

ソフトマタープロジェクト

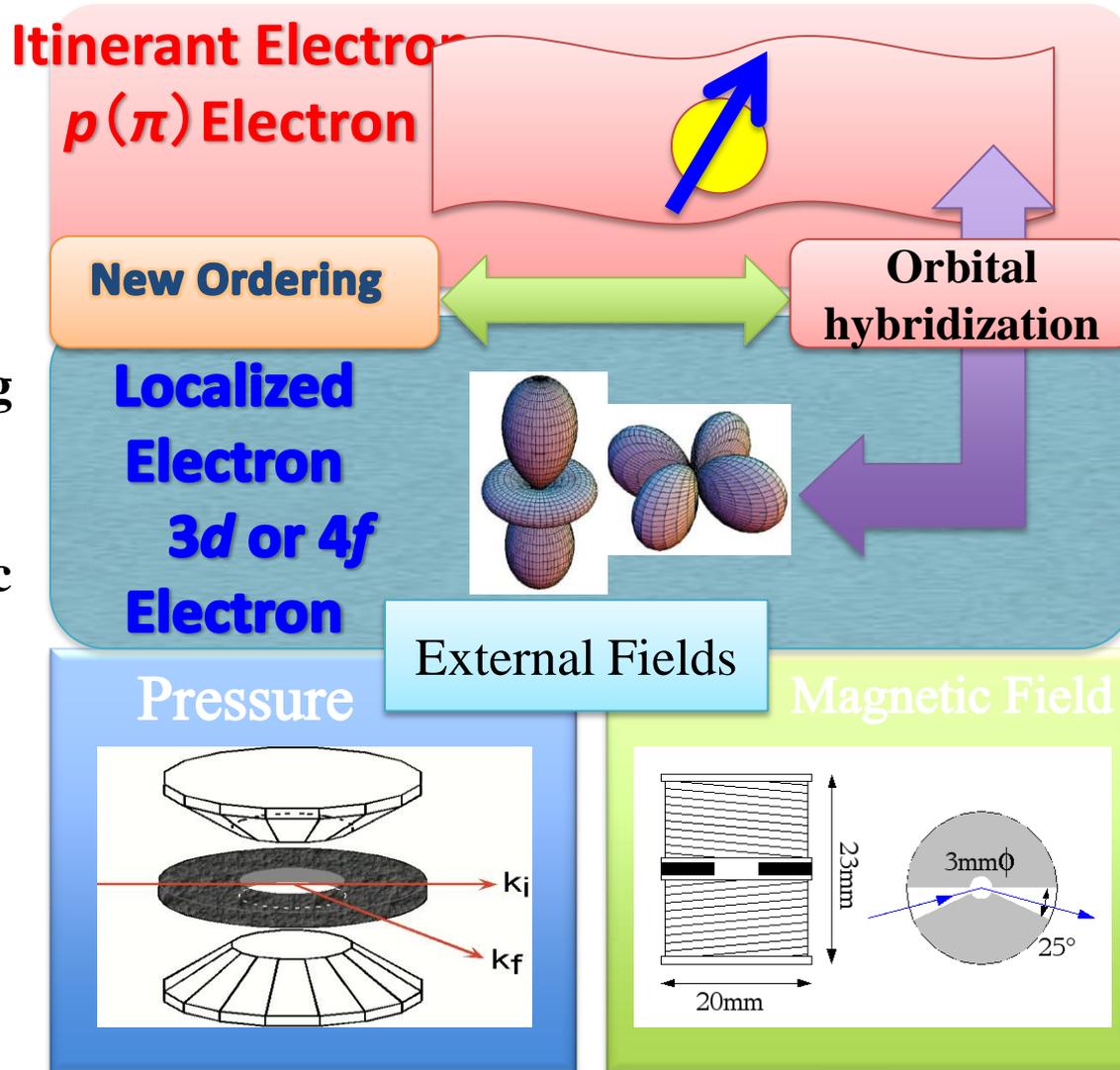
強相関プロジェクト 3: 分子性結晶

Correlated Electrons: Project 1

Hybridized Orbital Ordering in SCES

Resonant
Hard/soft
X-ray Scattering

Element Specific
Orbit Specific



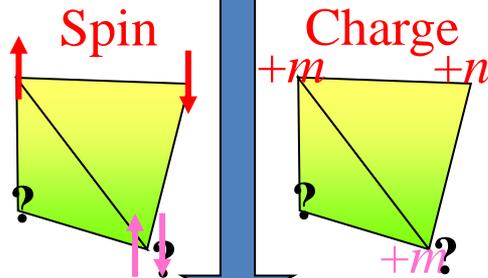
Neutron
Inelastic
Scattering

Muon Spin
Rotation

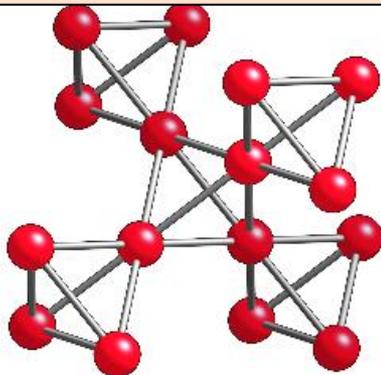
Correlated Electrons: Project 2

Geometrical Correlation of Itinerant Electrons

Antiferroic correlation
(Local picture)



Frustration
(=Large scale degeneracy)



Pyrochlore lattice

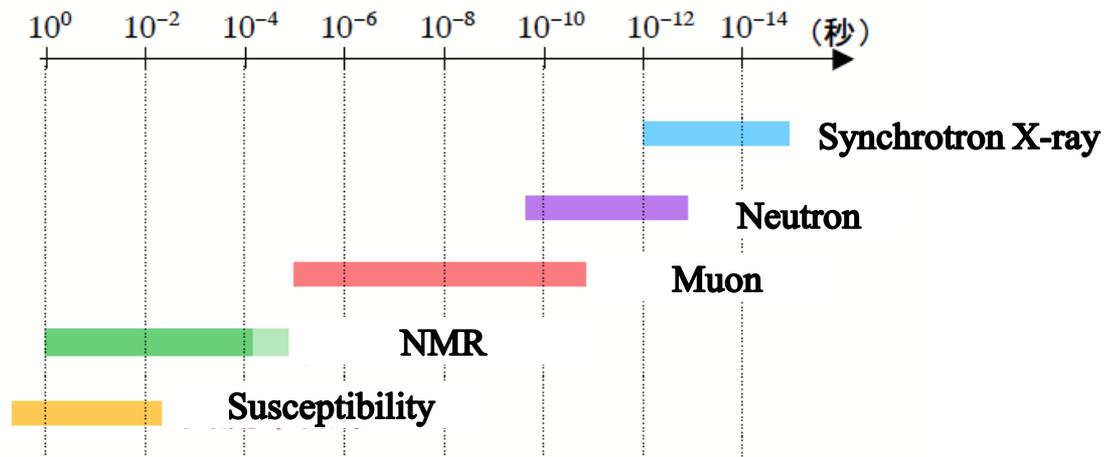
“Heavy Fermion” State in Metallic Spinels

YMn₂(’89), LiV₂O₄(’97)

Mass enhancement $\sim 10^2!$
(according to specific heat, etc.)

Project goal: Determine the characteristic time scale of fluctuation in frustrated systems

Correlation Time of Fluctuation

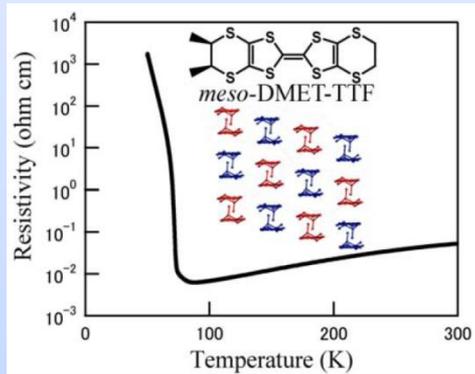


Correlated Electrons: Project 3:

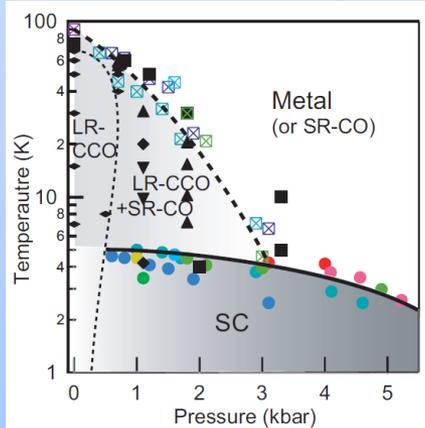
Charge, Spin and Orbital Order in Molecular Crystals

Charge Ordering under Pressure

- Charge Fluctuation in charge ordered phase
and Superconducting phase-

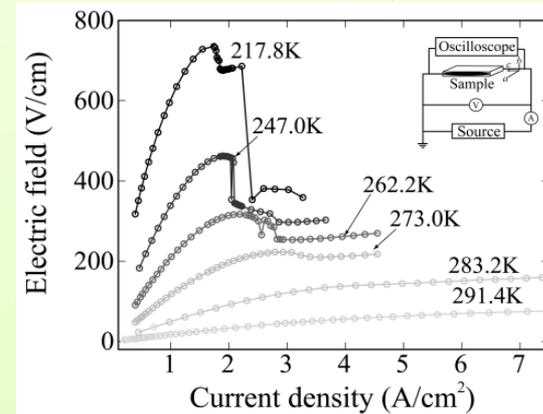
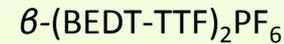


Metal-Insulator Transition: Charge Order Pattern

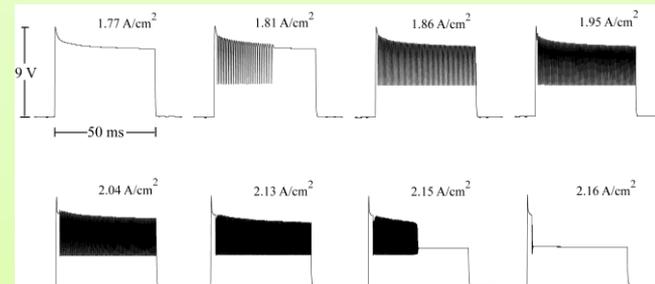


Pressure-Temperature Phase Diagram

CDW Sliding under Electric Field



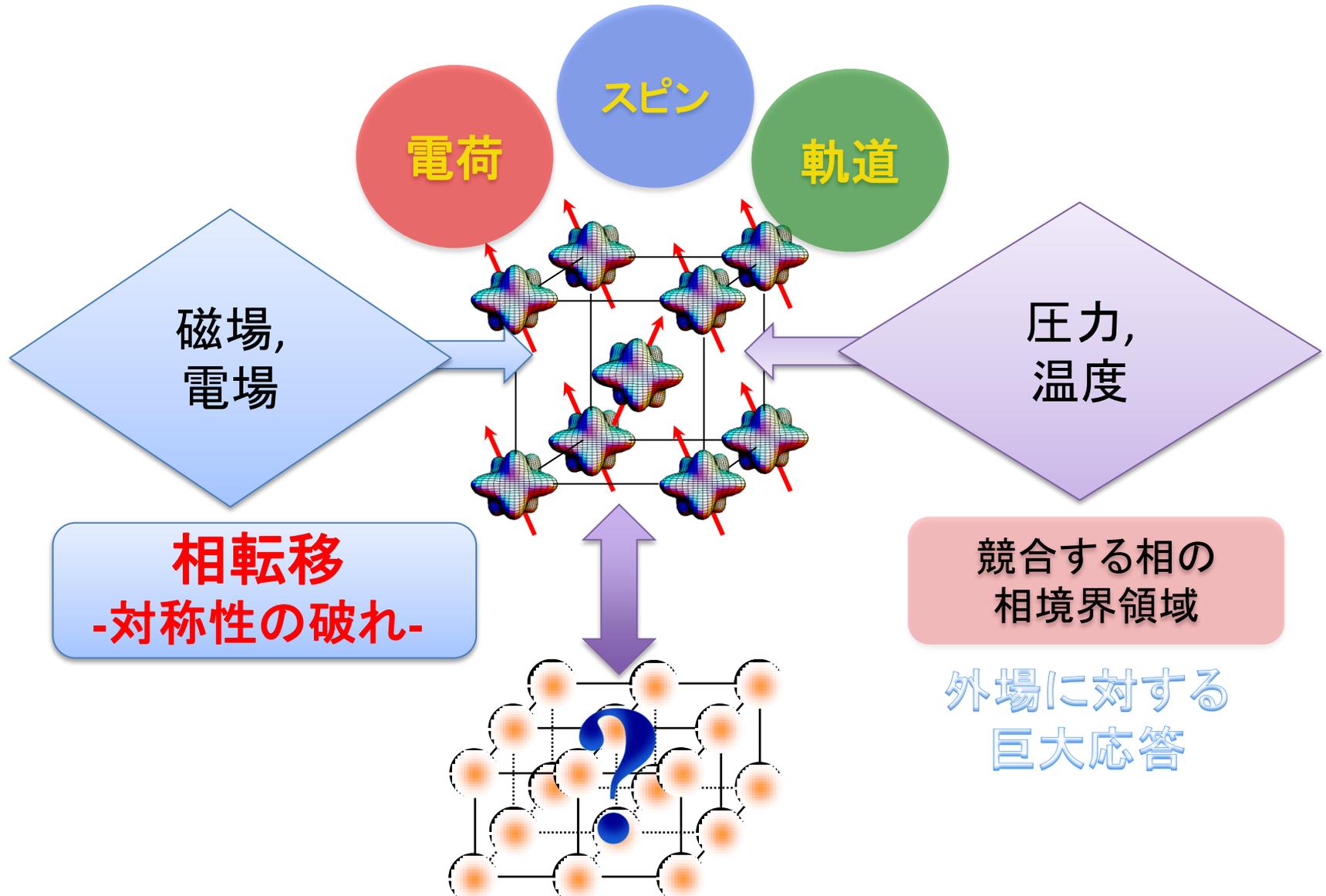
Current Dependence of Electric Field I - V



Oscillation of Electric Field in Constant Current

Cooperative Excitation of Charge Ordering

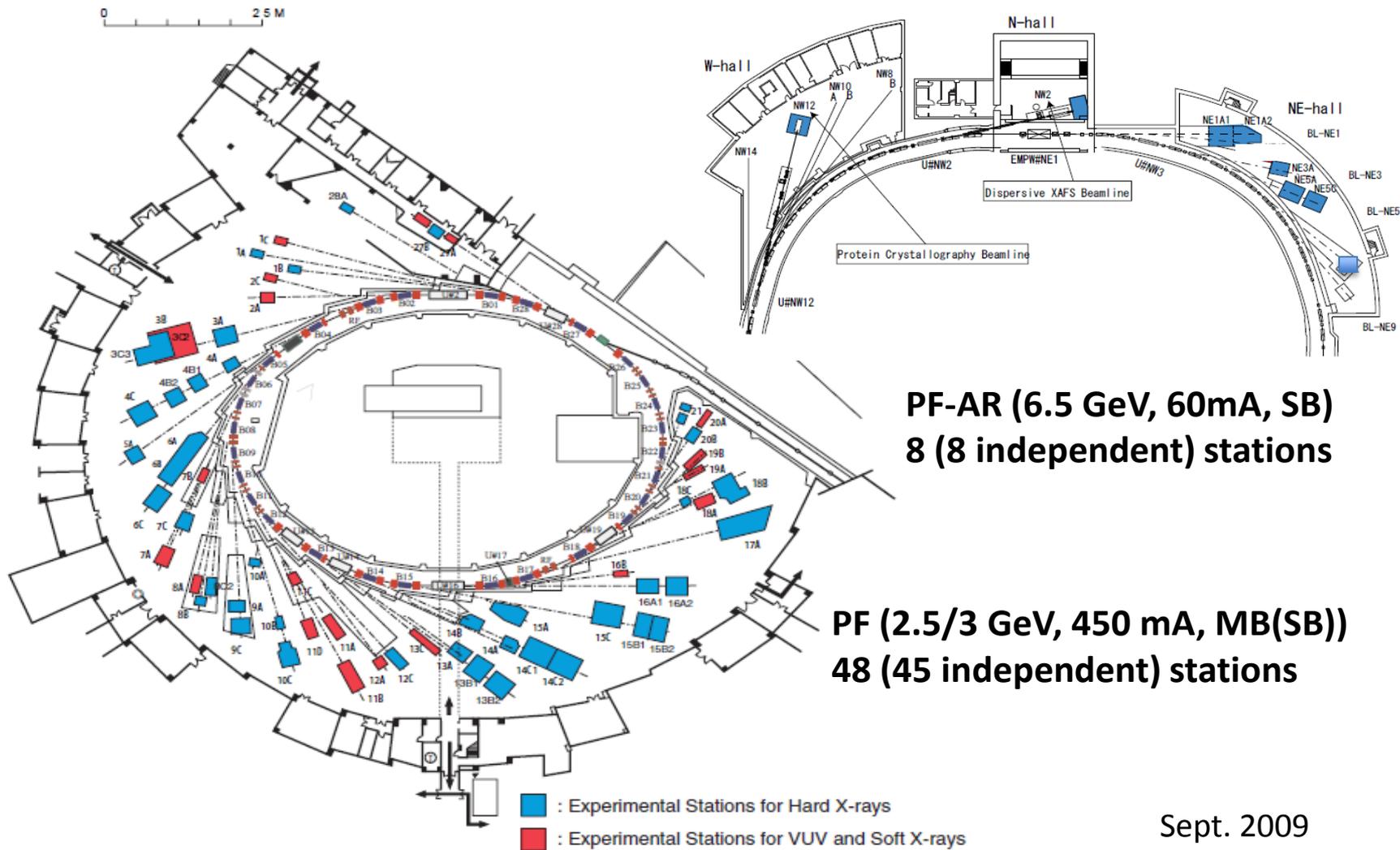
電子自由度(電荷・スピン・軌道)の 静的・動的秩序構造



Photon Factory における X線と軟X線の相補的利用を目指して

PF

PF-AR



VUV/SX

光源	ビームライン	実験ステーション・実験装置	エネルギー領域 [eV]	担当者	担当者 (所外)
U	BL-19A (東大物性研)	スピン偏極光電子分光実験ステーション	12 - 250	柳下 明	柿崎明人 (東大)
HU	BL-28A/B	可変偏光VUV・SX不等間隔平面回折格子分光器・高分解能角度分解光電子分光実験ステーション	30 - 300	小野 寛太	
U	BL-13A	有機薄膜研究用光電子分光ステーション	30 - 1200	間瀬 一彦	
U	BL-16A	可変偏光軟X線分光ステーション	200 - 1500	雨宮 健太	
U	BL-19B (東大物性研)	分光実験ステーション <2011年10月以降の課題募集は停止します。>	10 - 1200	柳下 明	柿崎明人 (東大)
U	BL-2C	軟X線不等間隔平面回折格子分光器 軟X線発光分光器	250 - 1400	足立 純一	
U	BL-2A	軟X線2結晶分光ステーション	1740 - 5000	北島 義典	
B	BL-20A	3m直入射型分光器 気体光電子分光装置	5 - 40	伊藤 健二	河内宣之 (東工大)
B	BL-3B	VUV 24m 球面回折格子分光器 (SGM) <角度分解光電子分光専用ステーションに変更予定>	10 - 280	柳下 明	加藤博雄 (弘前大)
B	BL-18A (東大物性研)	表面・界面光電子分光実験ステーション	15 - 150	柳下 明	柿崎明人 (東大)
B	BL-11D	軟X線光学素子評価装置専用ステーション	60 - 900	伊藤 健二	
B	BL-7A (東大・スペクトル)	軟X線分光(XAFS, XPS)ステーション	50 - 1300	雨宮 健太	岡林 潤 (東大)
B	BL-11A	軟X線斜入射回折格子分光ステーション	70 - 1900	北島 義典	
B	BL-11B	軟X線2結晶分光ステーション	1724 - 5000	北島 義典	
B	BL-27A	放射性試料用軟X線実験ステーション	1800 - 4000	宇佐美徳子	

光源の種類は、U：アンジュレータ、HU：ヘリカルアンジュレータ、B：偏向電磁石

X

ビームライン	実験ステーション・実験装置	担当者	担当者 (所外)
BL-1A	タンパク質結晶構造解析ステーション	松垣 直宏	
BL-3A	六軸X線回折計/二軸磁場中X線回折実験ステーション	中尾 裕則	
BL-3C	X線光学素子評価ステーション/白色磁気回折ステーション	平野 馨一	
BL-4A	蛍光X線分析/マイクロビーム分析	飯田 厚夫	
BL-4B1	極微小結晶・微小領域回折実験ステーション	山崎 裕一	
BL-4B2	多連装粉末X線回折装置	中尾 裕則	井田 隆 (名工大)
BL-4C	六軸X線回折計用実験ステーション	山崎 裕二	
BL-5A	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田 悠介	
BL-6A	X線小角散乱ステーション (BL-15Aからの移設作業中 (2011年10月から共同利用開始予定))	五十嵐教之	
BL-6C	X線回折/散乱実験ステーション	河田 洋	佐々木聡 (東工大)
BL-7C	XAFS/異常散乱/汎用X線ステーション	杉山 弘	
BL-8A	多目的極限条件下ワイセンベルグカメラ	山崎 裕一	
BL-8B	多目的極限条件下ワイセンベルグカメラ	中尾 裕則	
BL-9A	XAFS実験ステーション	阿部 仁	
BL-9C	小角散乱/XAFSステーション	野村 昌治	
BL-10A	垂直型四軸X線回折装置	山崎 裕二	
BL-10C	溶液用小角散乱実験ステーション (酵素回折計)	五十嵐教之	野島修二 (東工大)
BL-12C	XAFS実験ステーション	仁谷 浩明	
BL-14A	単結晶構造解析・検出器開発ステーション	岸本 俊二	
BL-14B	精密X線回折実験ステーション	平野 馨一	
BL-14C	X線イメージングおよび汎用X線実験ステーション	兵藤 一行	
BL-15A	X線小角散乱ステーション (BL-6A移設に伴う閉鎖)	五十嵐教之	奥田浩司 (京大)
BL-15B1	白色X線トポグラフィおよび汎用X線実験ステーション	杉山 弘	
BL-15B2	表面界面X線回折実験ステーション	杉山 弘	
BL-15C	精密X線回折ステーション	平野 馨一	
BL-17A	タンパク質結晶構造解析ステーション	五十嵐教之	
BL-18B (インドDST)	Multipurpose Monochromatic Hard X-ray Station	五十嵐教之	M. Mukhopadhyay(Saha)
BL-18C	超高圧下粉末回折計	亀卦川卓美	中野智志 (物材研)
BL-20B (ANBF)	Multipurpose Monochromatic and White Beam Hard X-ray Station	河田 洋	
BL-27B	放射性試料用X線実験ステーション	宇佐美徳子	
AR-NE1A	レーザー加熱超高温実験ステーション	亀卦川卓美	
AR-NE3A	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田 悠介	

AR-NE5C	高温高圧実験ステーション /MAX80	亀卦川卓美	
AR-NE7A	X線イメージングおよび高温高圧実験ステーション	兵藤 一行	
AR-NW2A	時分割XAFS及び時分割X線回折実験ステーション	阿部 仁	
AR-NW10A	XAFS実験ステーション	仁谷 浩明	
AR-NW12A	タンパク質結晶構造解析ステーション	CHAVAS, Leonard	
AR-NW14A	時間分解X線回折実験ステーション	足立 伸一	

軟X線回折装置 at BL-16A

BL-16A: 可変偏光X線分光ステーション

偏光モード: 左右円偏光、水平・垂直直線偏光

測定可能波長領域: 250–1800eV

エネルギー分解能:

0.1 eV (500 eV – 1500 eV)

ビームサイズ: 縦 $50\mu\text{m}$ 、横 $100\text{--}200\mu\text{m}$

軟X線用 2軸回折計

2θ 可動範囲: $0\text{--}170^\circ$

真空度: $< 1 \times 10^{-5}$ Pa

検出器: PD, MCP

Heフロークライオ: 試料位置 $25\text{--}350\text{K}$

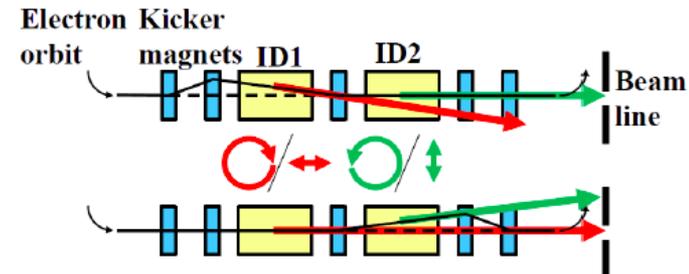


— 軟X線領域での共鳴X線散乱 —

3d遷移金属: $L_{2,3}$ -edge ($2p \rightarrow 3d$)

希土類金属: $M_{4,5}$ -edge ($3d \rightarrow 4f$)

軽元素 (O, P, S...): K-edge

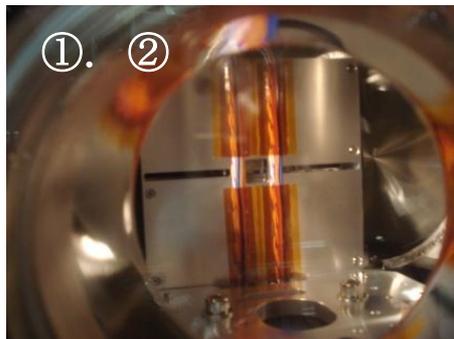
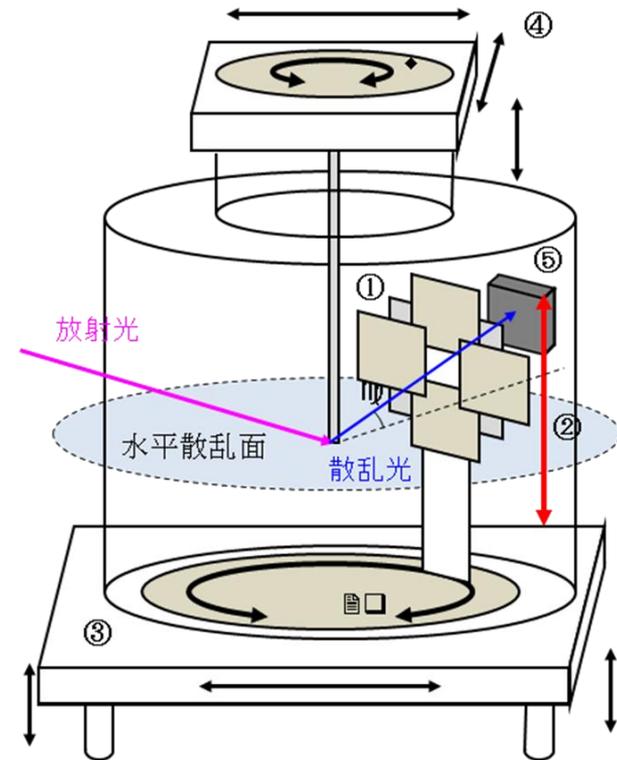


軟X線回折計の改修

精度が高く、かつ、快適な
共鳴軟X線散乱実験を目指して

改修項目と趣旨

- ①4象限スリットの設置
= S/N向上 (迷光、backgroundのカット)
- ②検出器の上下駆動機構 $\cong \chi$ 駆動
- ③架台調整機構 + pin hole
= 光軸微調整
- ④xyz-stageモーター駆動
= 試料位置調整
- ⑤パルスカウント検出器
= 微弱信号の検出



$\pm 40 \text{ mm}$
 $\Leftrightarrow \chi \sim \pm 17$



超伝導磁石搭載 軟X線回折装置の建設

BL-3Aと同じ磁場条件での
実験が可能に

0 - 7.5 T
4 - 300K

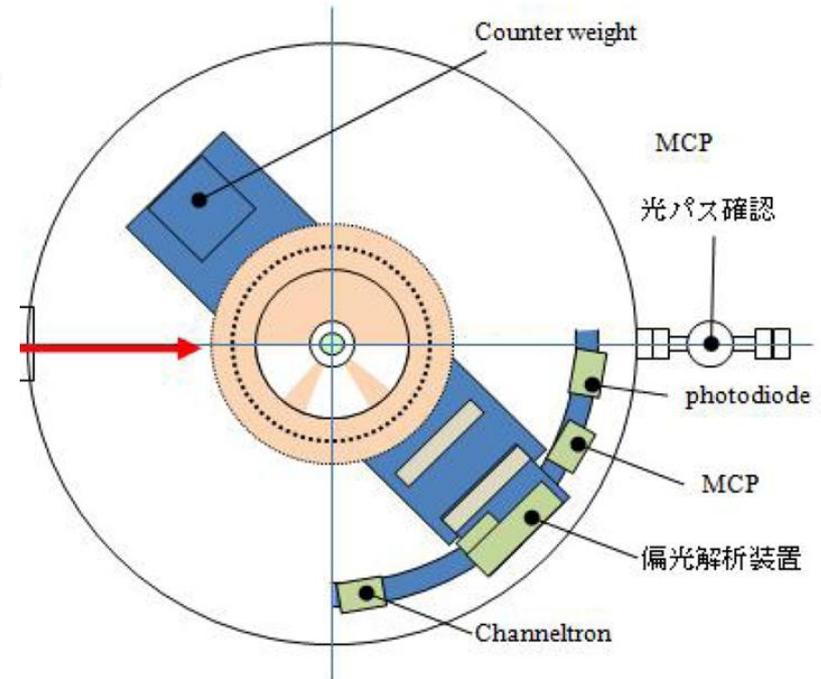
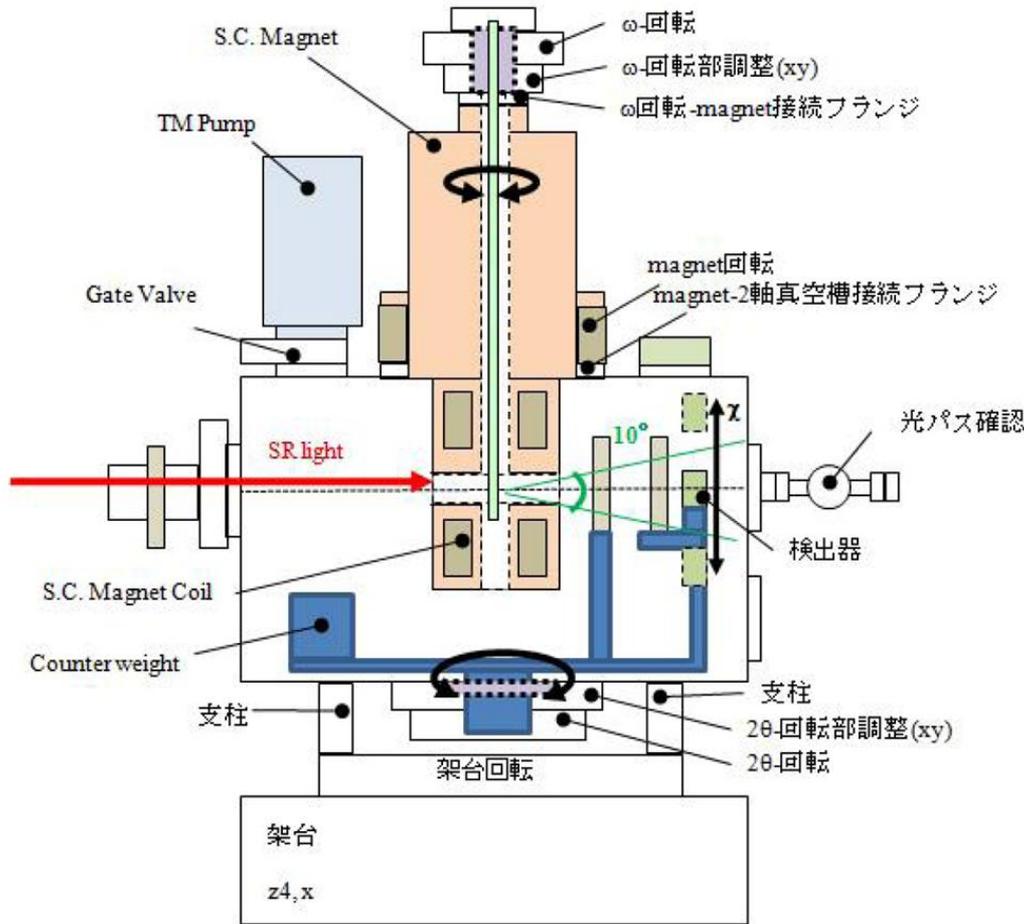
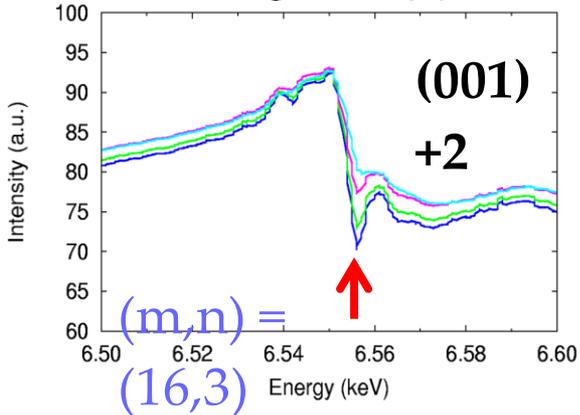
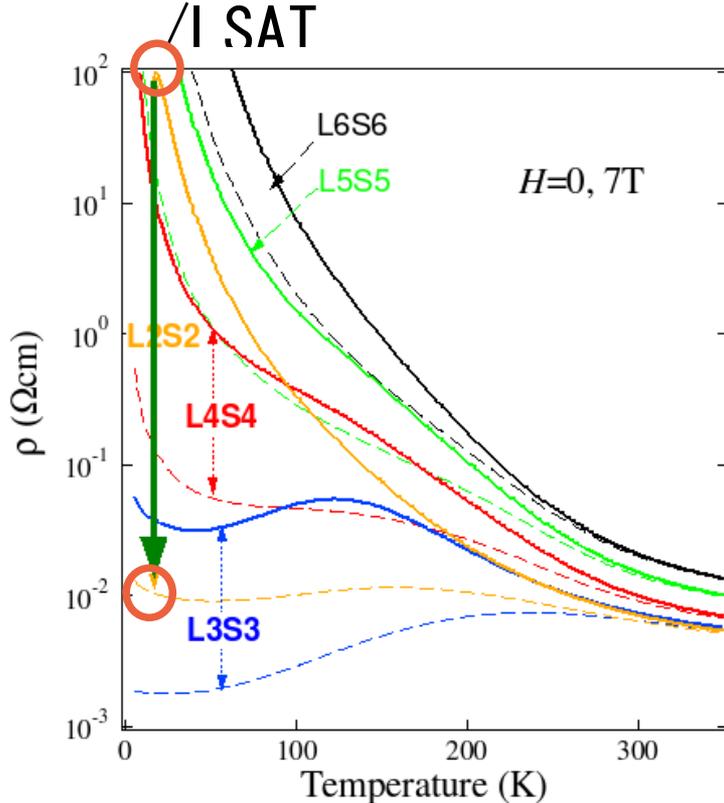


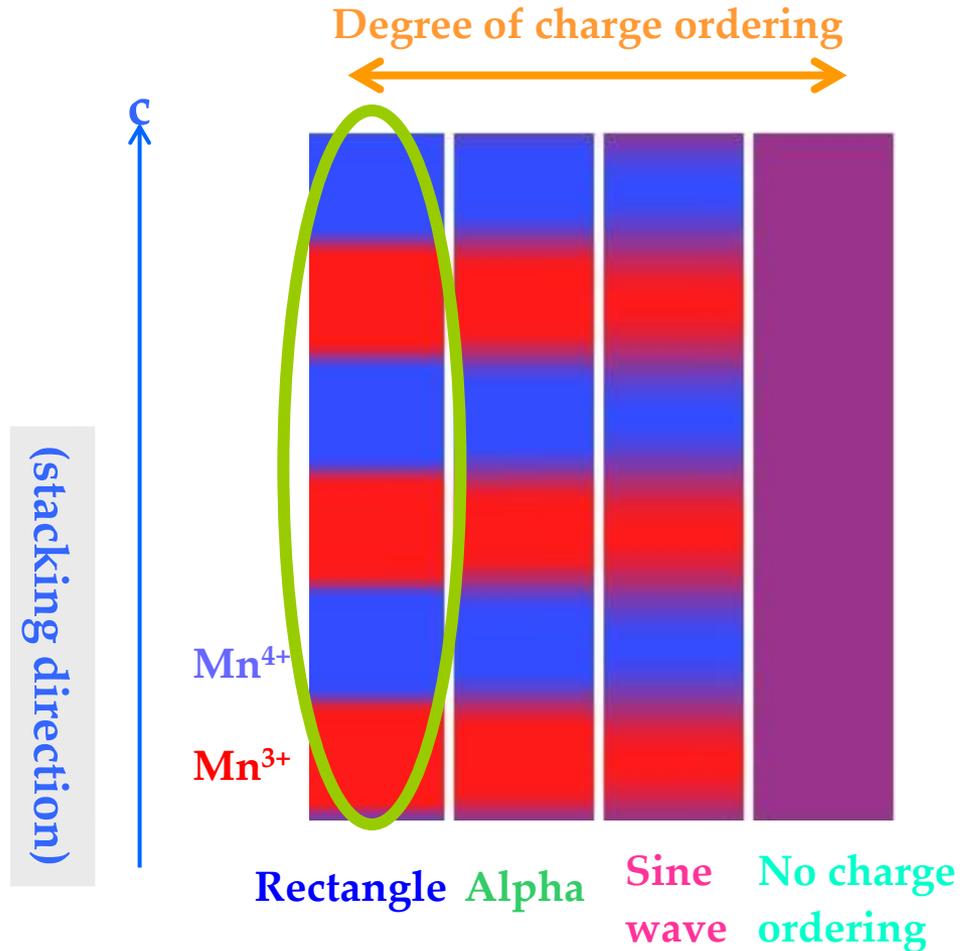
図1: 超伝導磁石搭載時概念図

X線・軟X線を相補的に利用したCMRC研究成果1

Artificial superlattice: $[(\text{LaMnO}_3)_m (\text{SrMnO}_3)_m]_n$



Charge distribution of Mn ion



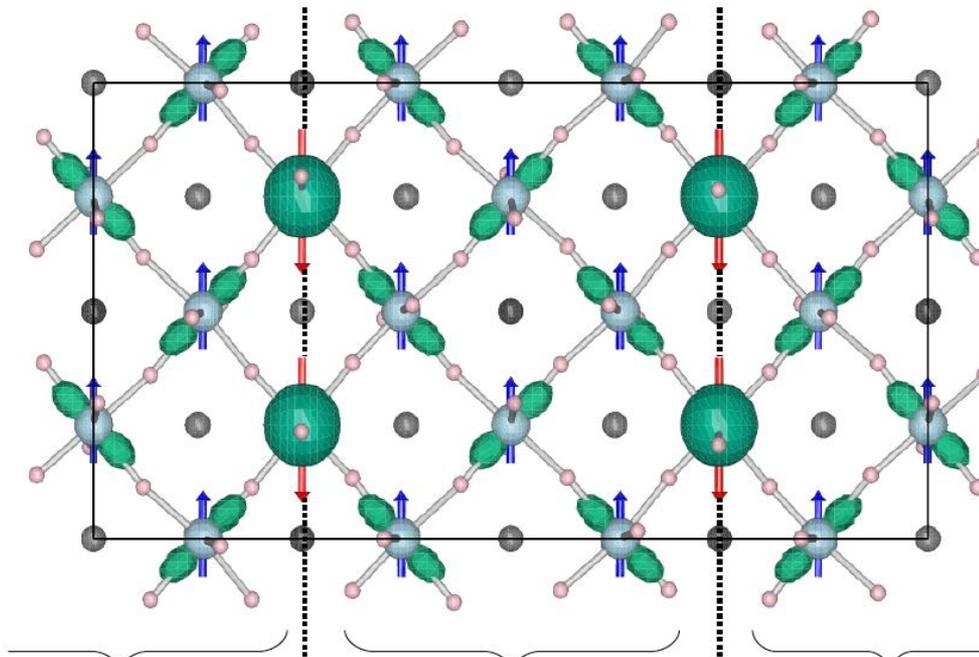
=> 中尾さんの講演

X線・軟X線を相補的に利用したCMRC研究成果2

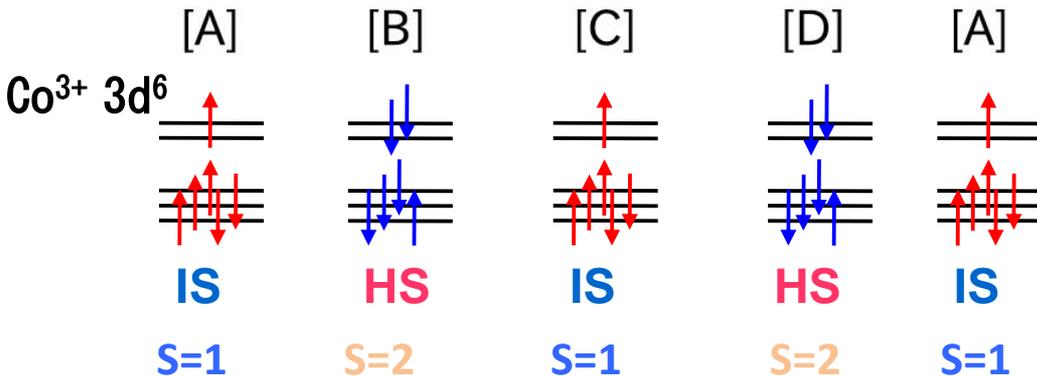
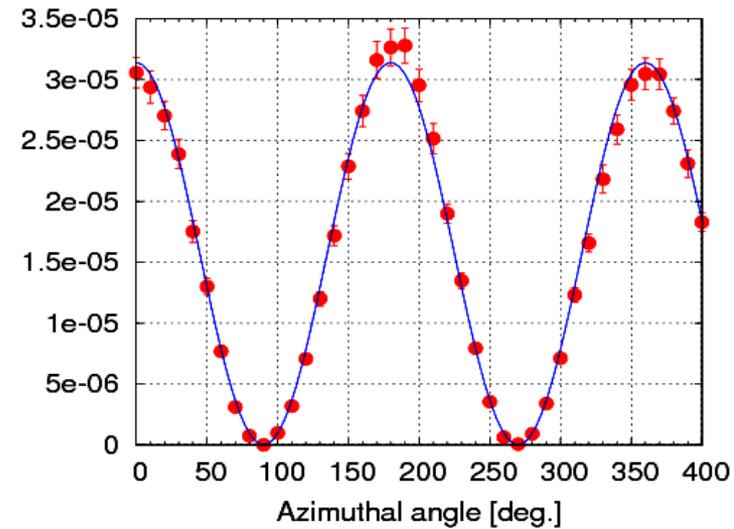
室温強磁性体：コバルト酸化物



共鳴X線散乱 (硬X線、軟X線)
中性子磁気散乱



$I(5/4\ 5/4\ 0)/I(2\ 2\ 0)$ [a.u.]

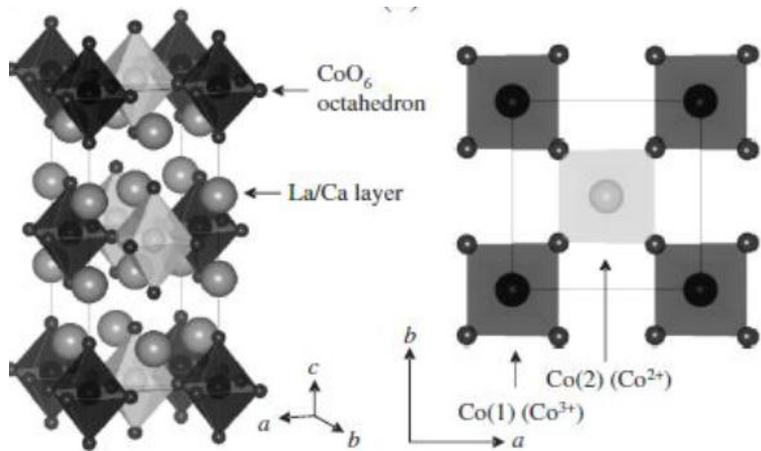
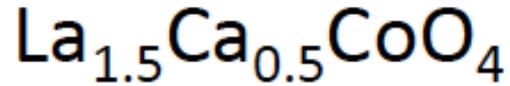


=> 中尾さんの講演

H. Nakao et al. JPSJ, **80** (2011) 023711.
Editor's Choice

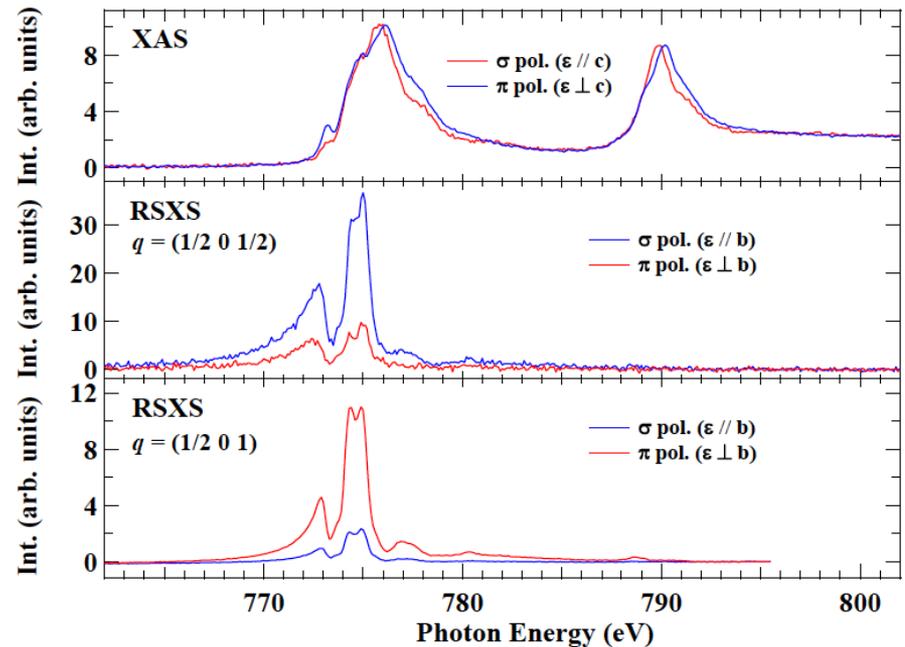
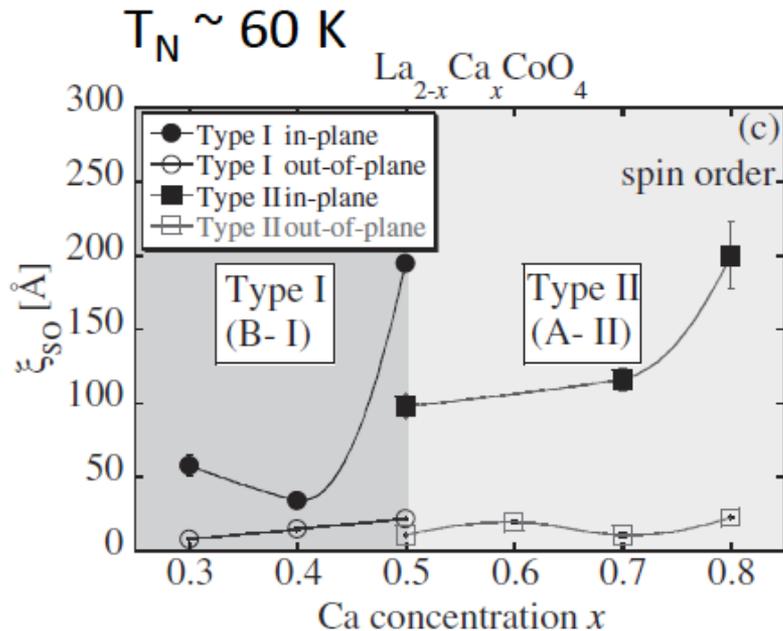
スピン状態秩序 + 軌道秩序 → フェリ磁性発現

X線・軟X線を相補的に利用したCMRC研究成果3



=> 岡本さんの講演

Co L_{2,3}-edge RSXSからの情報

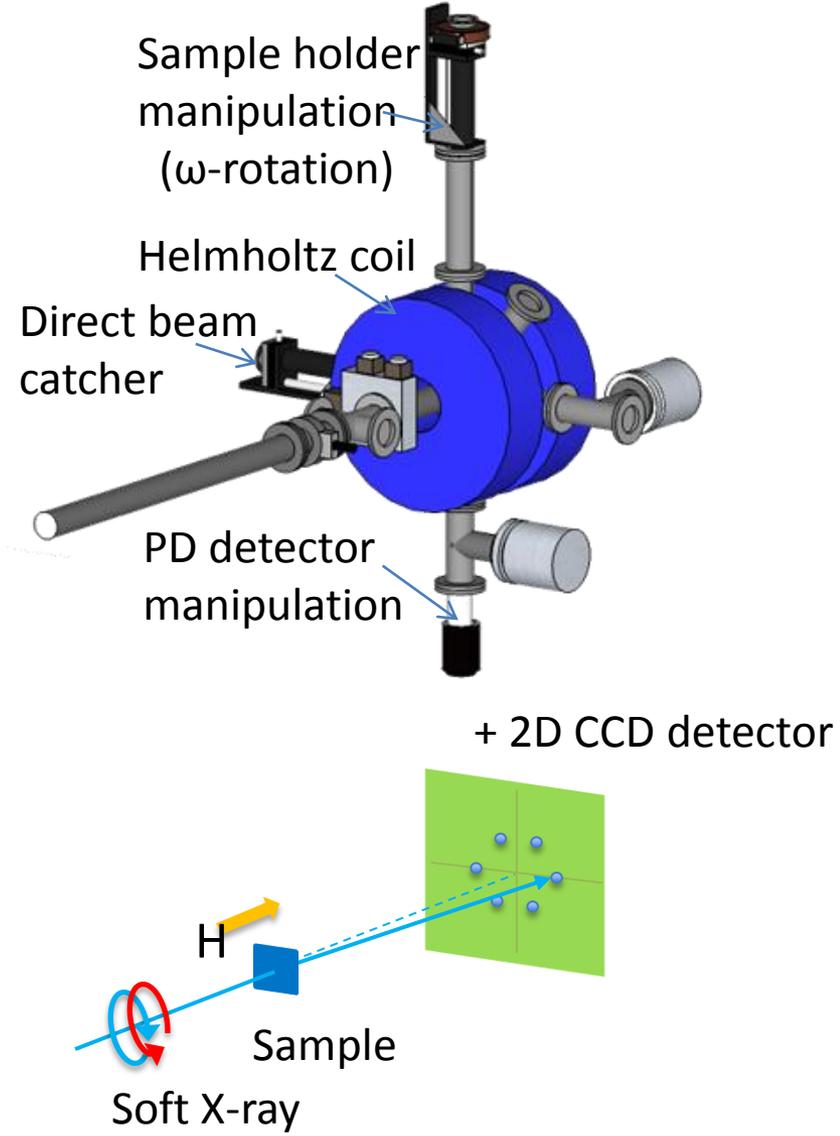


Future Plans: 軟X線

軟X線小角(共鳴)散乱

Small Angle Resonant Soft X-ray Diffraction

山崎さん



Temp: 5 – 300 K, Mag: ± 0.4 T

Future Plans: Small-angle Resonant Soft X-ray Scattering 軟X線

Resonant Soft X-ray Scattering

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim |f_o + f' + if''|^2$$

- Elements selective
 - Valence electron density: charge ordering
 - Site symmetry: orbital ordering
 - Spin density: magnetic ordering
- circular pol. -> spin helicity

3d Transition Metal Compounds

$L_{2,3}$ edge $2p \rightarrow 3d$

500 eV \rightarrow 900 eV

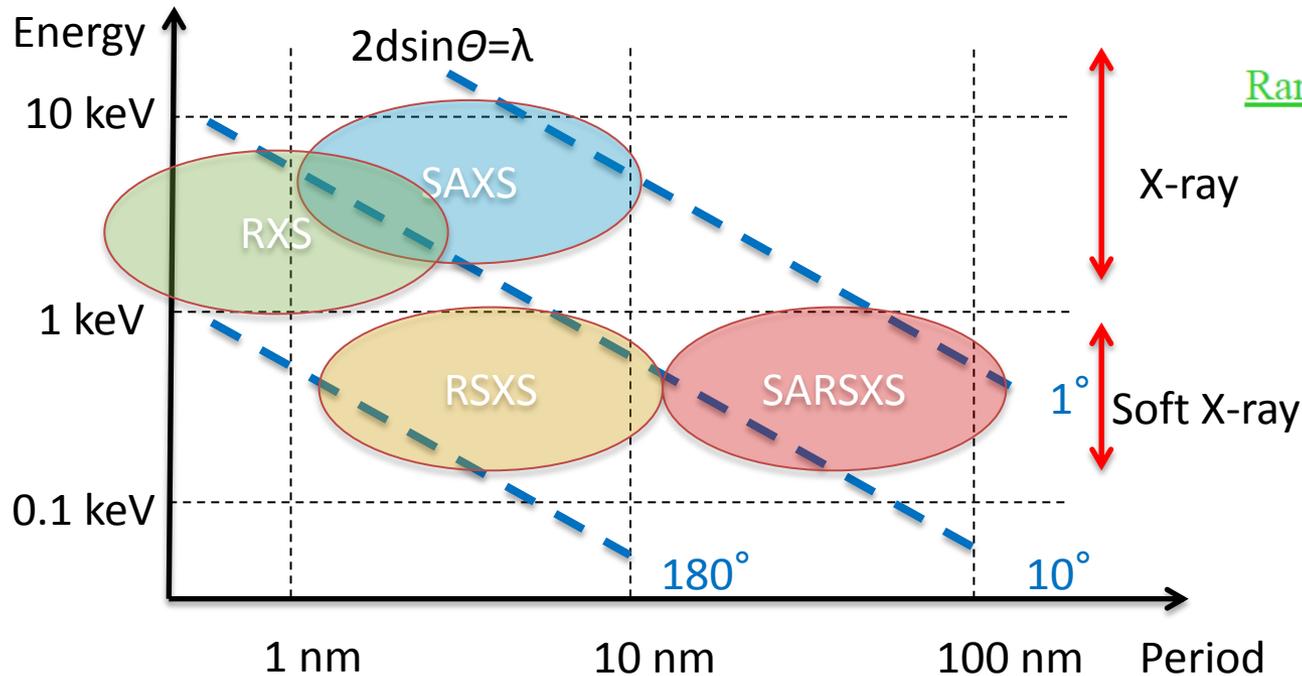
20 Å \rightarrow 12 Å

Rare Earth's (4f compounds)

$M_{4,5}$ edge $3d \rightarrow 4f$

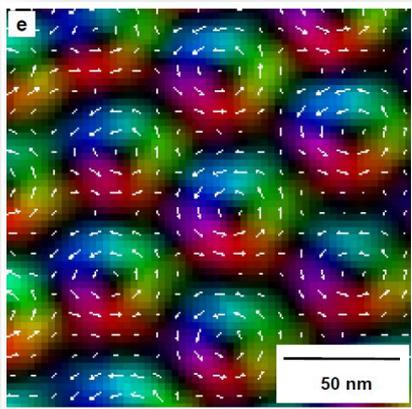
800 eV \rightarrow 1800 eV

12 Å \rightarrow 8 Å

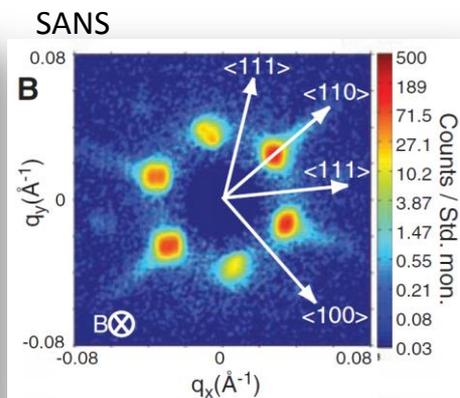


Future Plans : 軟X線

Skyrmion Lattice

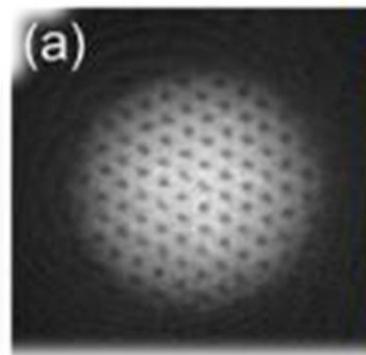


XZ. Yu et al.,
Nature 465, 901 (2010)

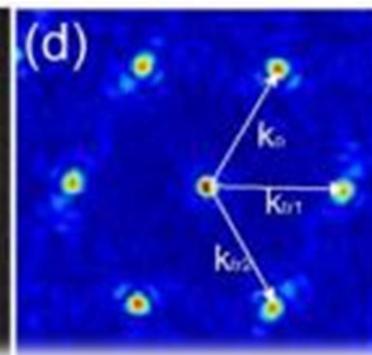


S Mühlbauer et al.,
Science 323, 915 (2009)

Vortex Lattice



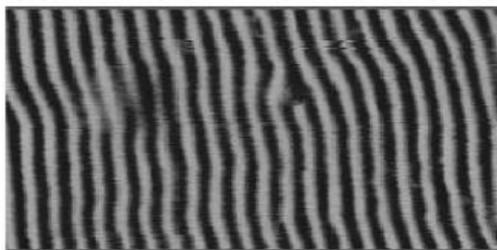
SANS



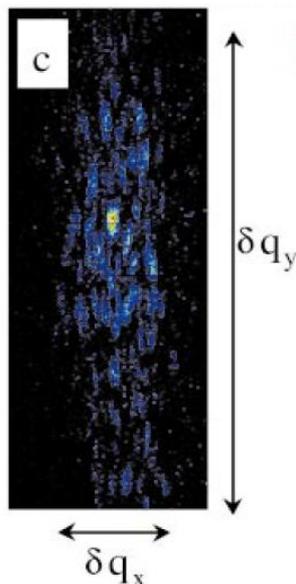
Phase separation, surface, quantum dot...

Magnetic Domain

FePd wire



K. Chesnel et al.,
PRB 66, 172404 (2002)



Surface, quantum dot...

Resonant Soft X-ray Scattering

: Charge/Orbital/Spin order

Small Angle: 10~100 nm

Coherent Soft X-ray

: Speckle Scattering

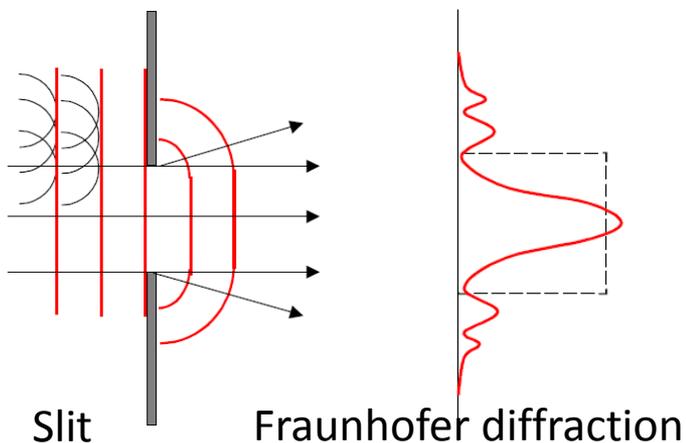
XPCS

: Domain dynamics, fluctuation

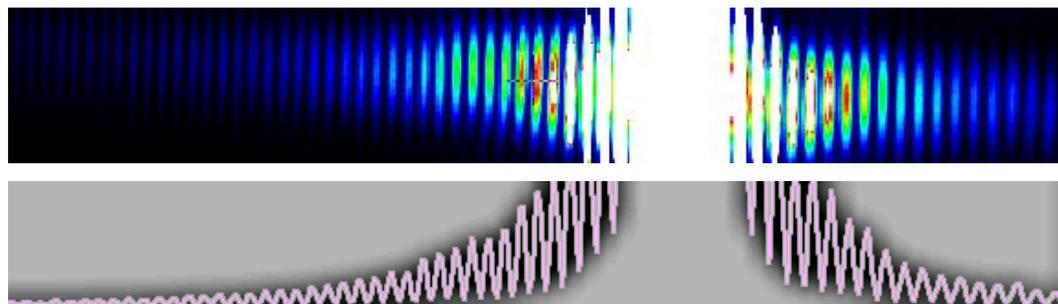
Under electric and magnetic field...

Future Plans: 軟X線

Coherent Soft X-ray Scattering

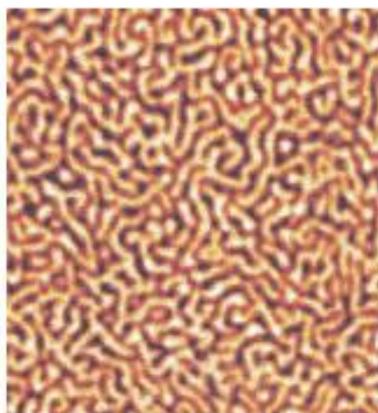


Fraunhofer diffraction

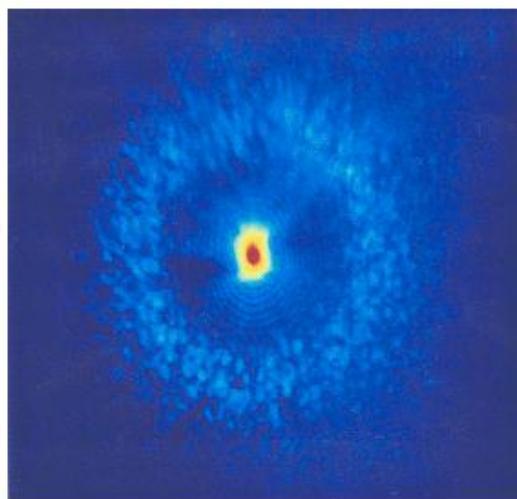


780eV, Slit size 5X20 μ m, Photon Factory, BL-16A

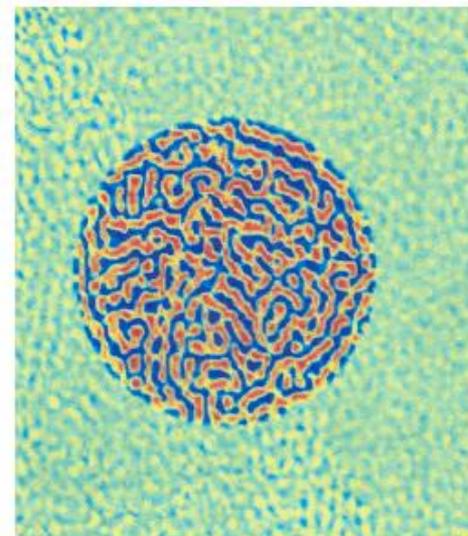
Magnetic Domain



RSXS Speckle Pattern



Domain Reconstruction



Prof. Sawatzky's Group

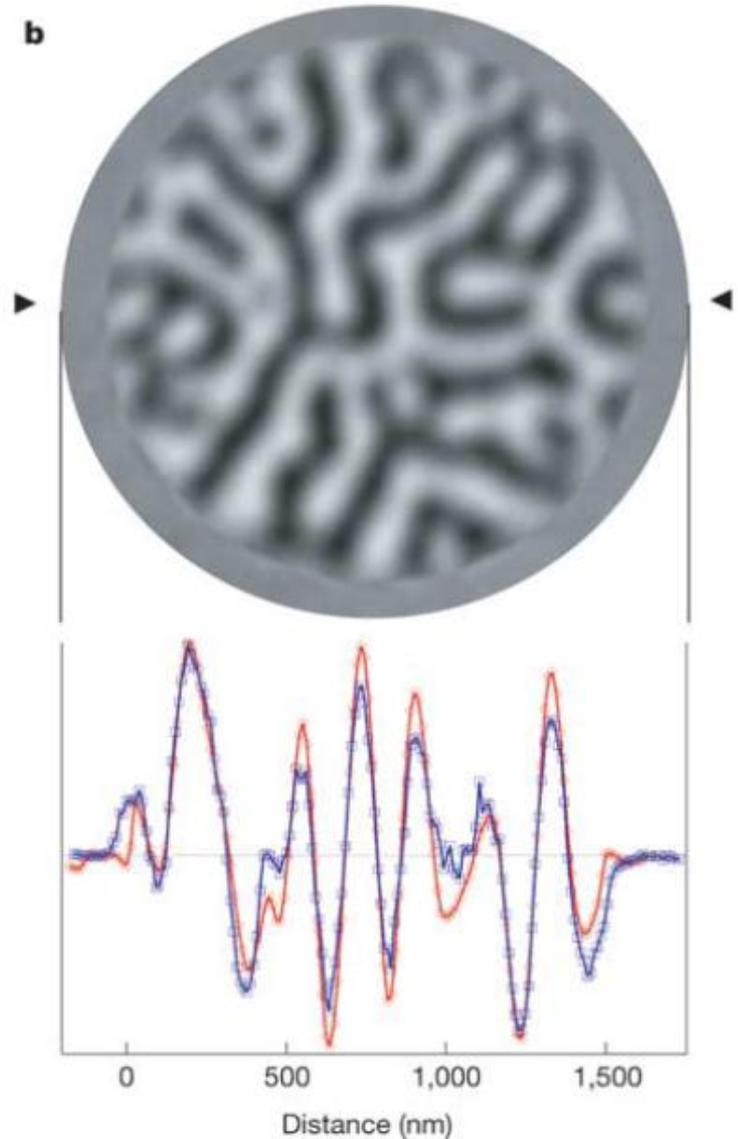
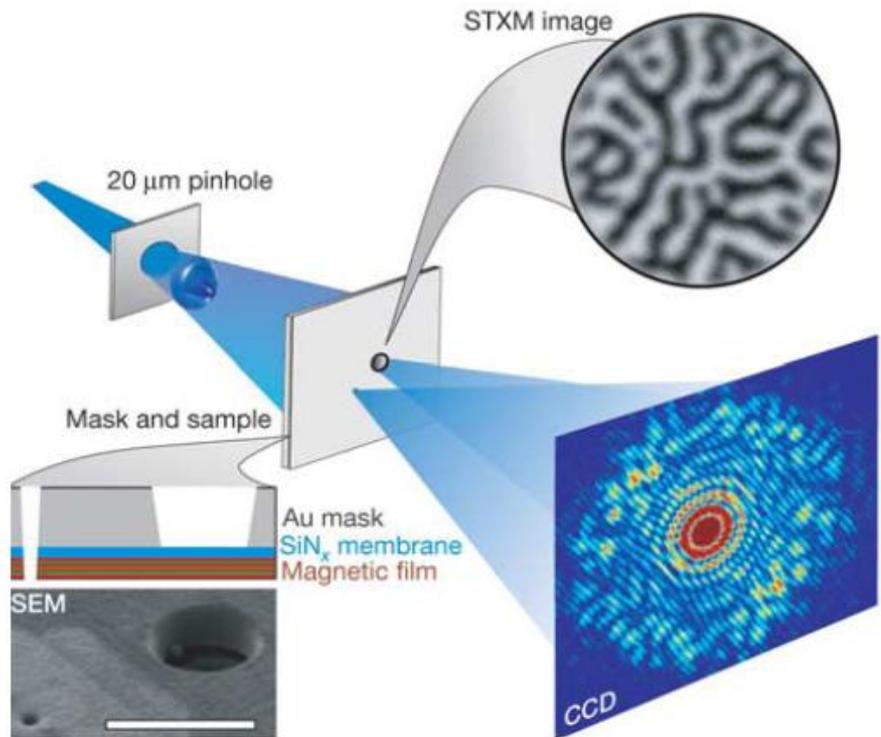
Fe L-edge

Future Plans:
軟X線

Soft X-ray holography

Lensless imaging of magnetic nanostructures by X-ray spectro-holography

S. Eisebitt¹, J. Lüning², W. F. Schlotter^{2,3}, M. Lörger¹, O. Hellwig^{1,4},
W. Eberhardt¹ & J. Stöhr²

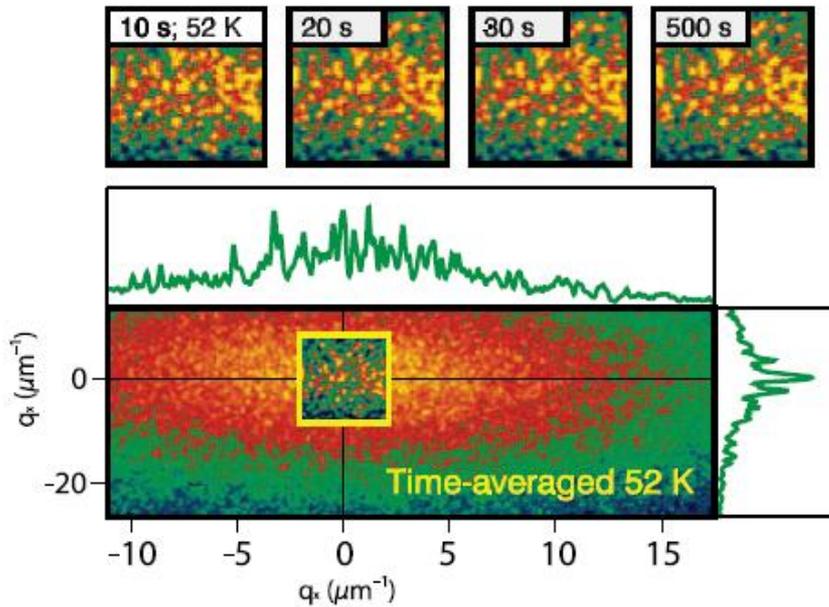
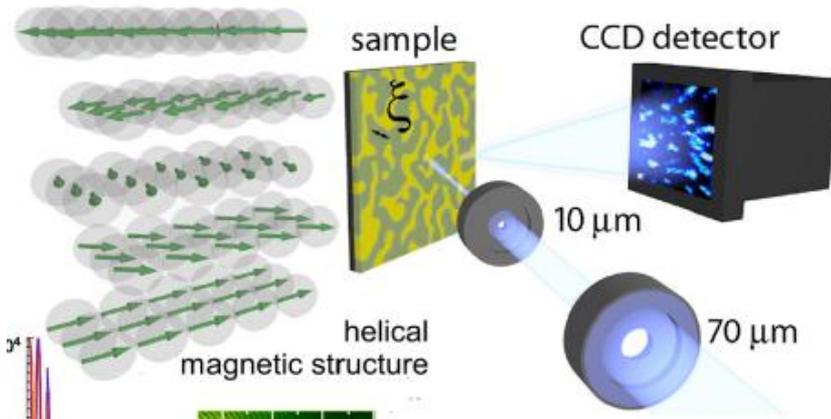


Eisebitt et al. Nature (2004) 432, 885.

Future Plans: X-ray photon correlation spectroscopy

軟X線

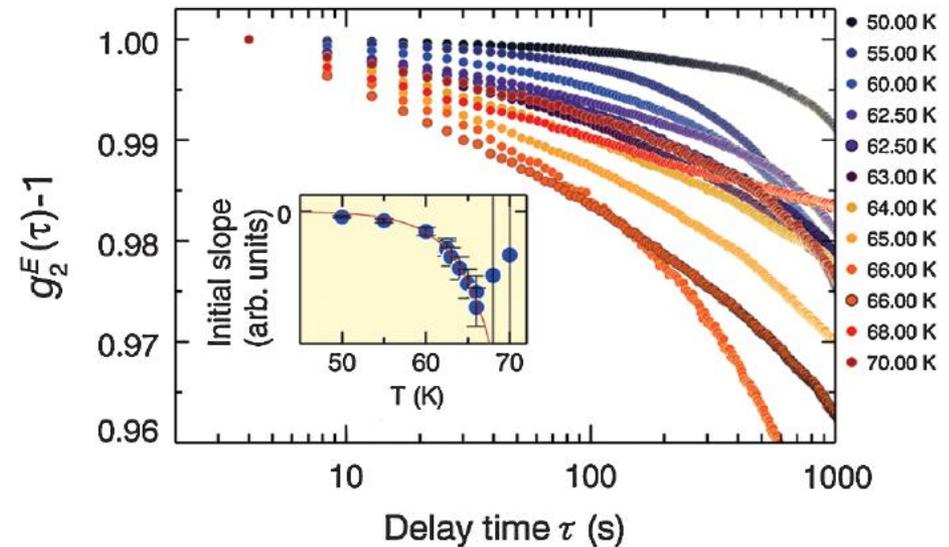
Magnetic Domain Fluctuation in AFM



Self correlation function

$$g_2(Q, \tau) \equiv \frac{\langle I(Q, t) I(Q, t + \tau) \rangle}{\langle I \rangle^2}$$

Domain Fluctuation, Dynamics



S. Konings et al., PRL 106, 077402 (2011)

まとめ —X線と軟X線の相補的利用—

X線

vs.

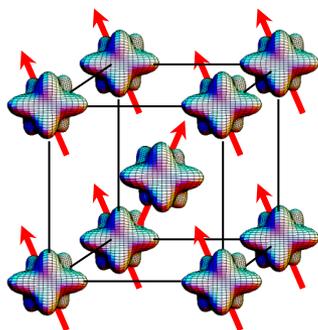
軟X線

エネルギー 2 keV 以上

0.1 – 2 keV

手法 回折・散乱・分光

分光・散乱・回折



共鳴散乱
磁気円二色性
線二色性
XAFS
光電子分光
非弾性散乱

情報 結晶構造
電荷分布

電子構造

電子自由度秩序

静電ポテンシャル (電荷秩序・スピン秩序・軌道秩序)

ダイナミクス(格子振動・電荷密度波・スピン波・軌道波)

電荷相関関数・スピン相関関数……