

PFにおけるVUV・軟X線を用いた 磁性薄膜・多層膜研究

KEK-PF 雨宮健太

1. どんな実験ができるのか
2. 実験装置と実際の研究例
3. ビームラインの現状と今後の整備計画
4. PFで実験をするには？

PFで行っている磁性研究

軟X線磁気円二色性(XMCD)

元素選択的にスピン・軌道磁気モーメントを決定

⇒ 藤森淳 (10/15 10:30 -)

深さ方向, 面内方向を分解した測定も可能

スピン分解光電子分光

価電子のスピン偏極を直接観測

⇒ 柿崎明人 (10/14 15:20 -)

軟X線共鳴(磁気)散乱

元素選択的な磁気情報 (特に超格子構造に有効)

⇒ 中尾裕則 (10/15 9:40 -)

硬X線共鳴(磁気)散乱

元素選択的な電子構造および磁気情報

⇒ 中尾裕則 (10/15 9:40 -)

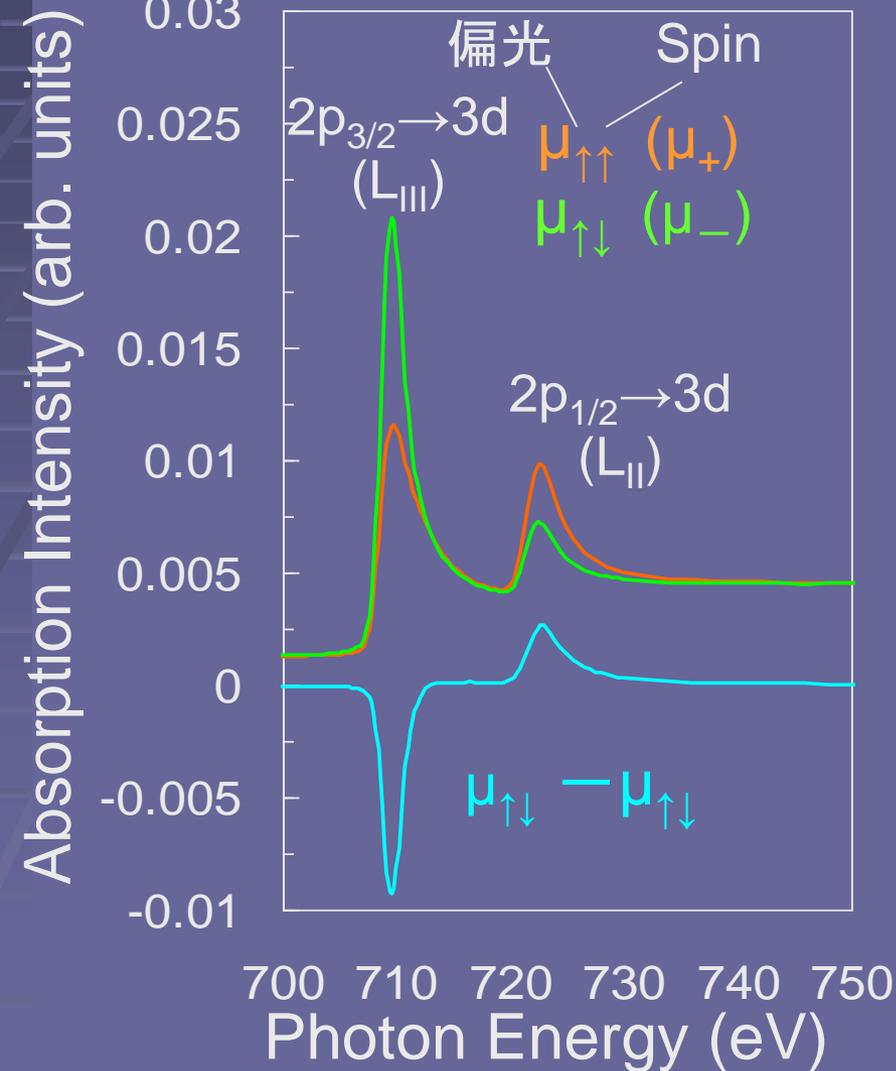
XMCDによる磁性体の観察

3 ML Fe / Cu(100)

Fe L-edge XMCD

X-ray Magnetic Circular Dichroism
(X線磁気円二色性)

左右の円偏光でX線吸収強度が違う現象



1. 元素選択性

← 共鳴吸収($2p \rightarrow 3d$ 等)を利用

2. スピン, 軌道磁気モーメントが求まる (特に3d遷移金属)

← Sum rules

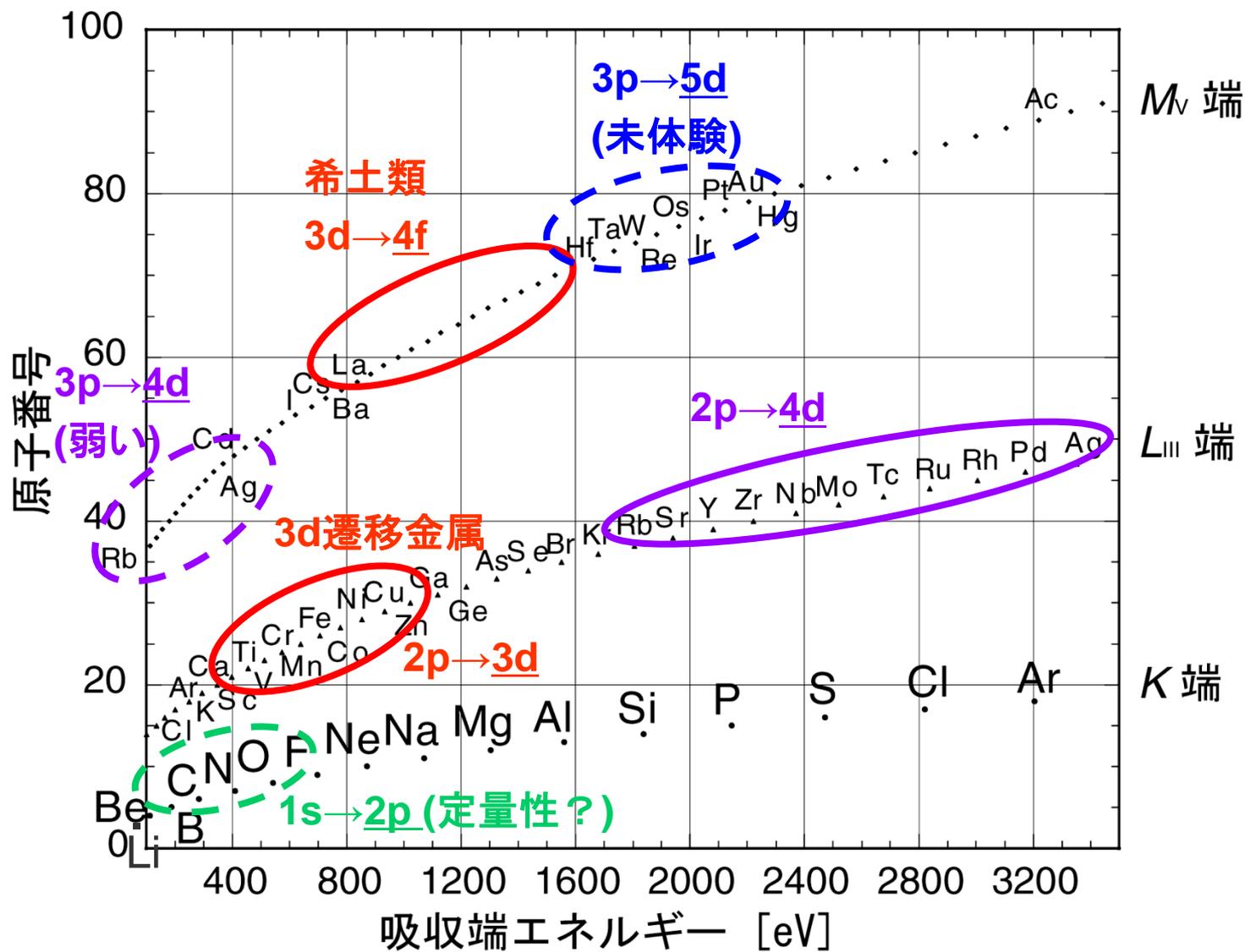
3. 表面感度が高い

⇔ バルク感度は低い

4. 真空が必要(「超高」真空ではない)

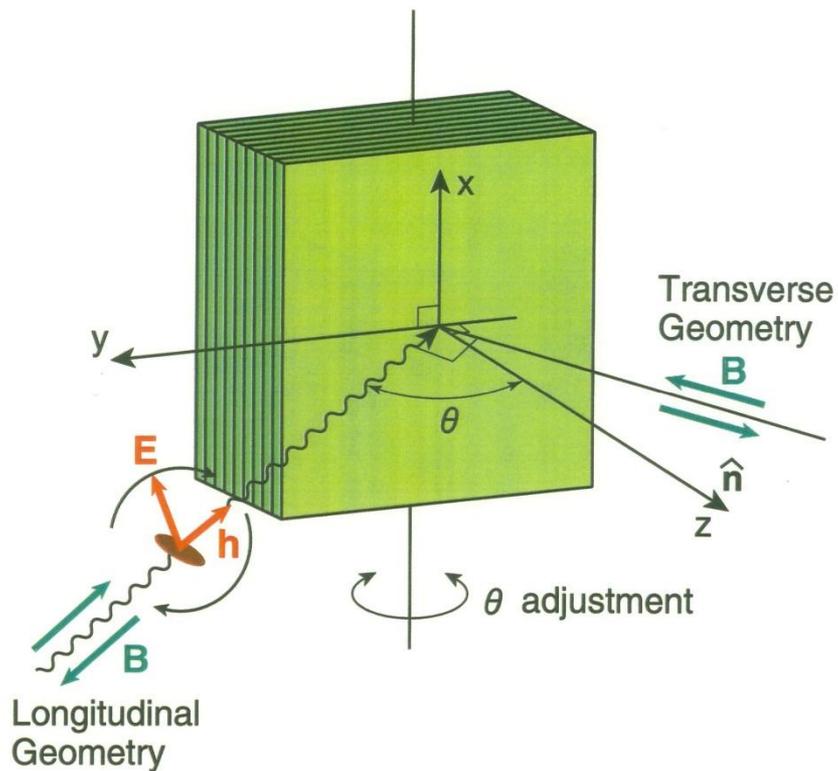
→ 試料の変質, 温度, 圧力の制限

軟X線領域でどんな元素が見られるのか

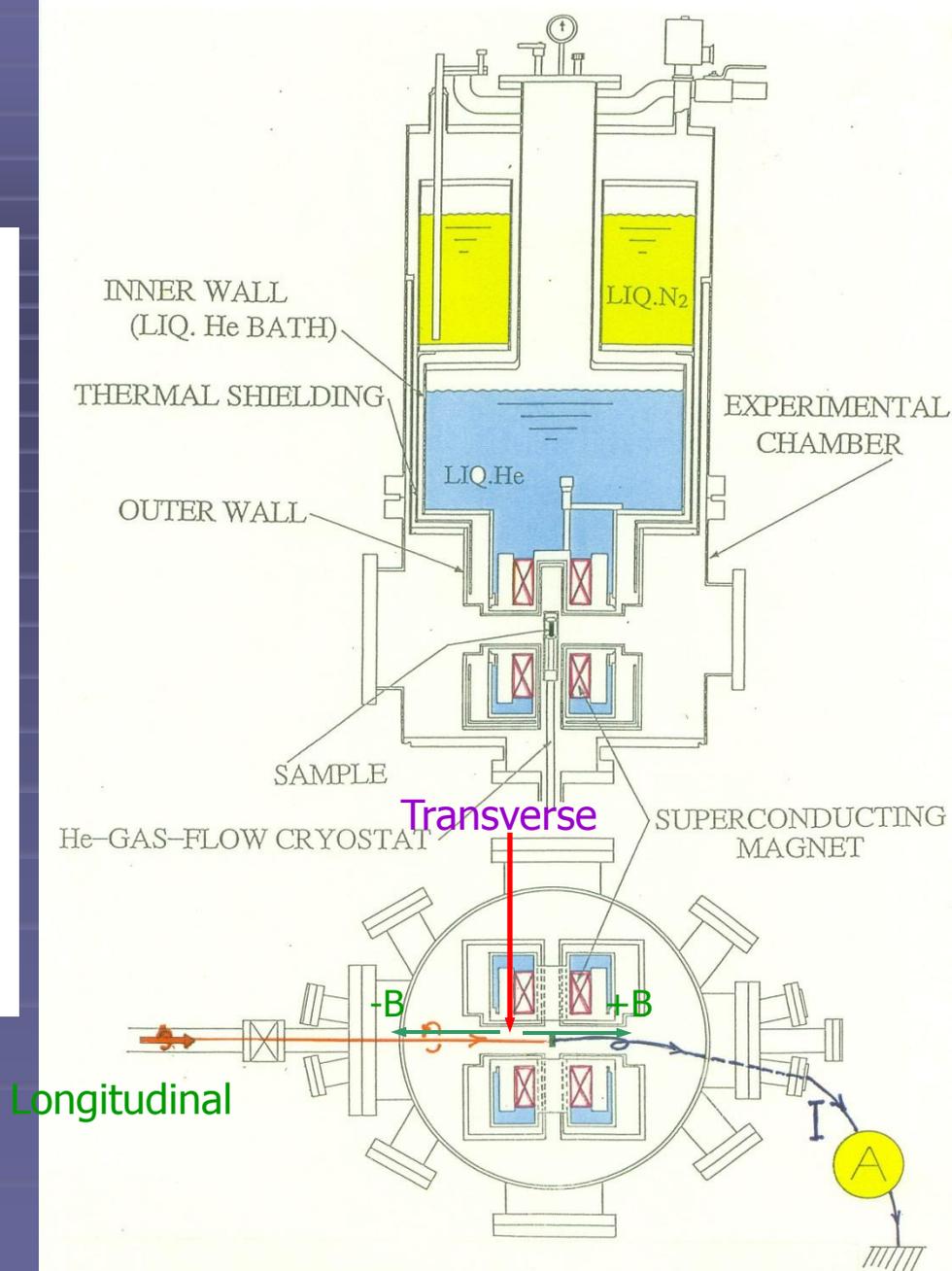


1. どんな実験ができるのか
2. 実験装置と実際の研究例
3. ビームラインの現状と今後の整備計画
4. PFで実験をするには？

配置・角度依存XMCD装置



超伝導磁石により
5 Tまでの強磁場を発生
(超高真空)



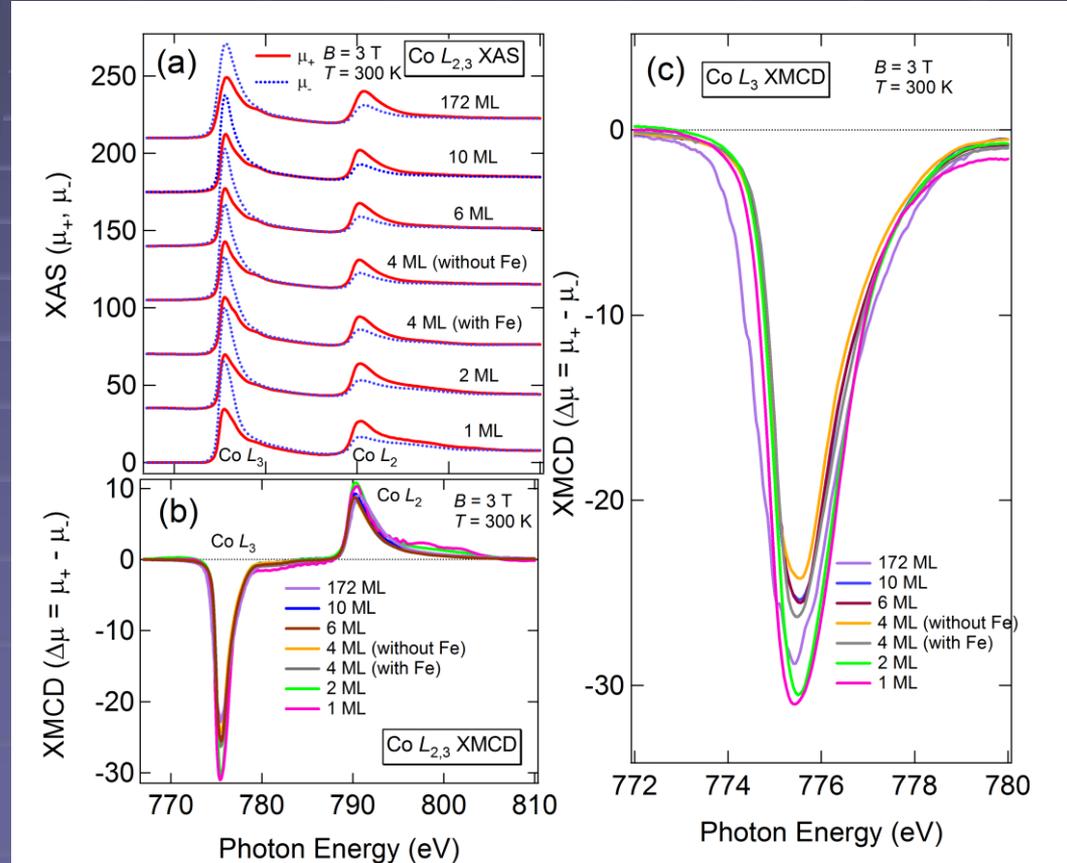
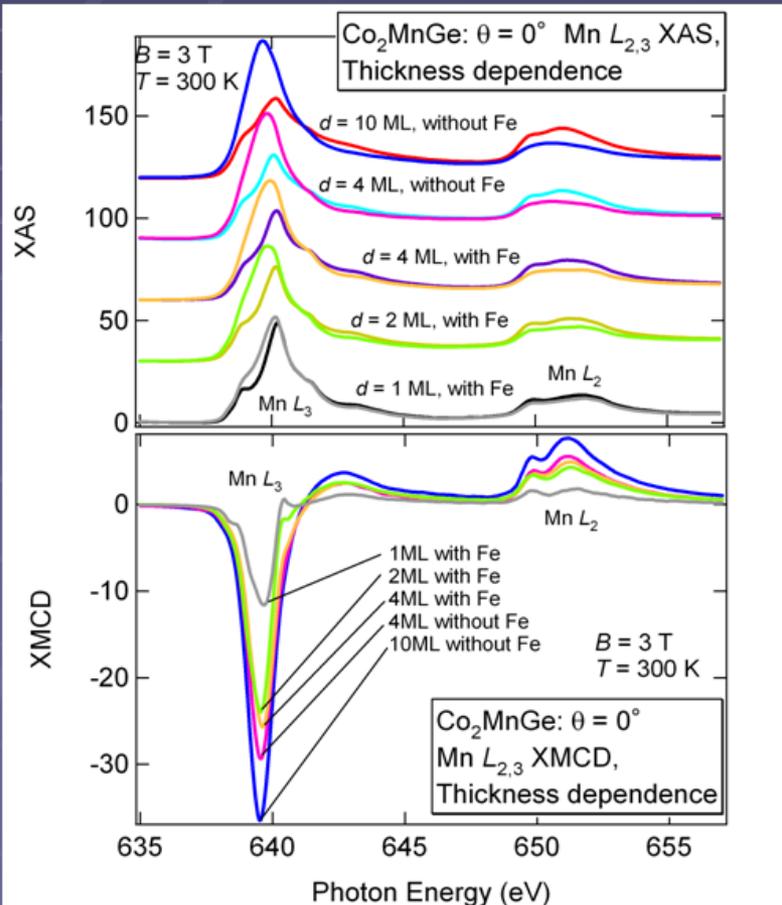
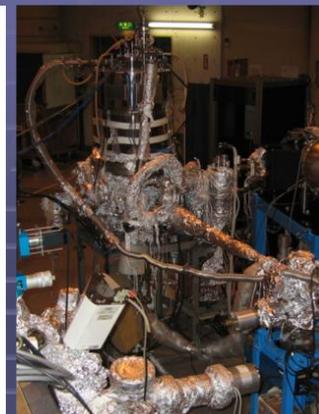
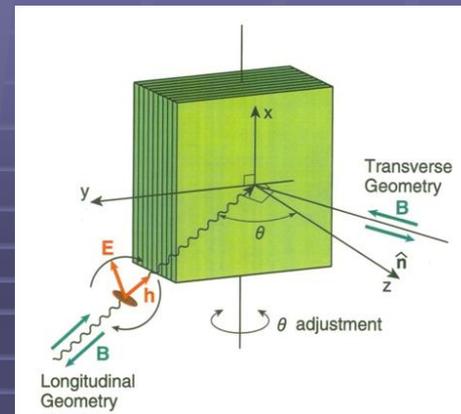
配置・角度依存XMCD装置

定常的に実験が可能

試料トランスファーシステムを常備

全電子収量法(検出深度: 数nm)および

全蛍光収量法(検出深度: 数100 nm)が利用可能



角度依存XMCDの測定例

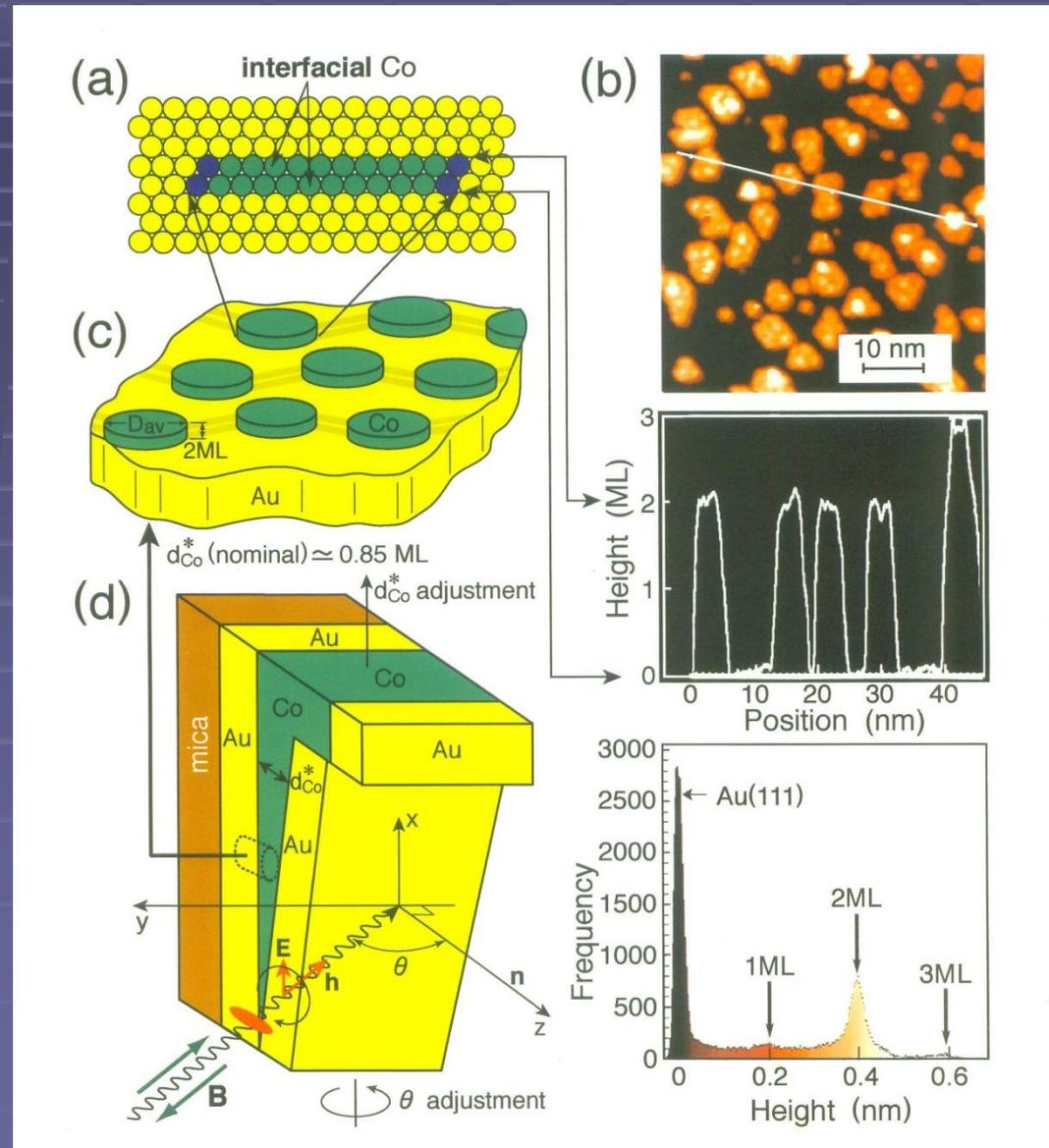
T. Koide et al., Phys. Rev. Lett. 87, 257201 (2001)

Au/Co(2 ML)/Au(111)

Auの再構成を利用した自己組織化によるアイランド形成

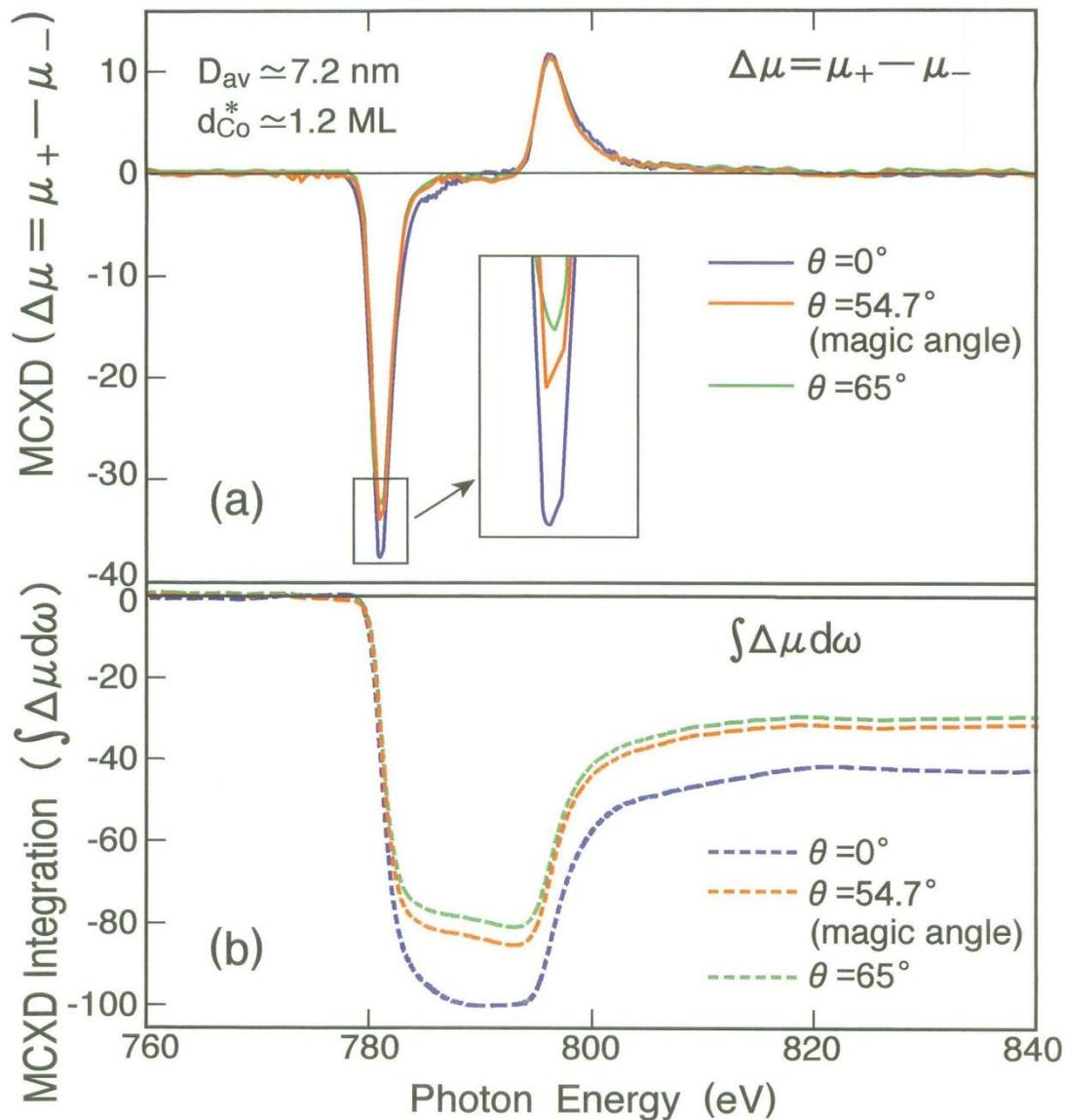
2 ML高さのためすべてのCo原子がCo/Au界面に
⇒ **界面磁性の直接観察**

XMCDの角度依存を測定
 m_S , m_I^{\parallel} , m_I^{\perp} , m_T^{\parallel} , m_T^{\perp}
すべてを定量的に決定



角度依存XMCDの測定例

T. Koide et al., Phys. Rev. Lett. 87, 257201 (2001)



XMCDの角度依存性

m_l, m_T の異方性に起因

$$m_j^\theta = m_j^\perp \cos^2 \theta + m_j^\parallel \sin^2 \theta$$

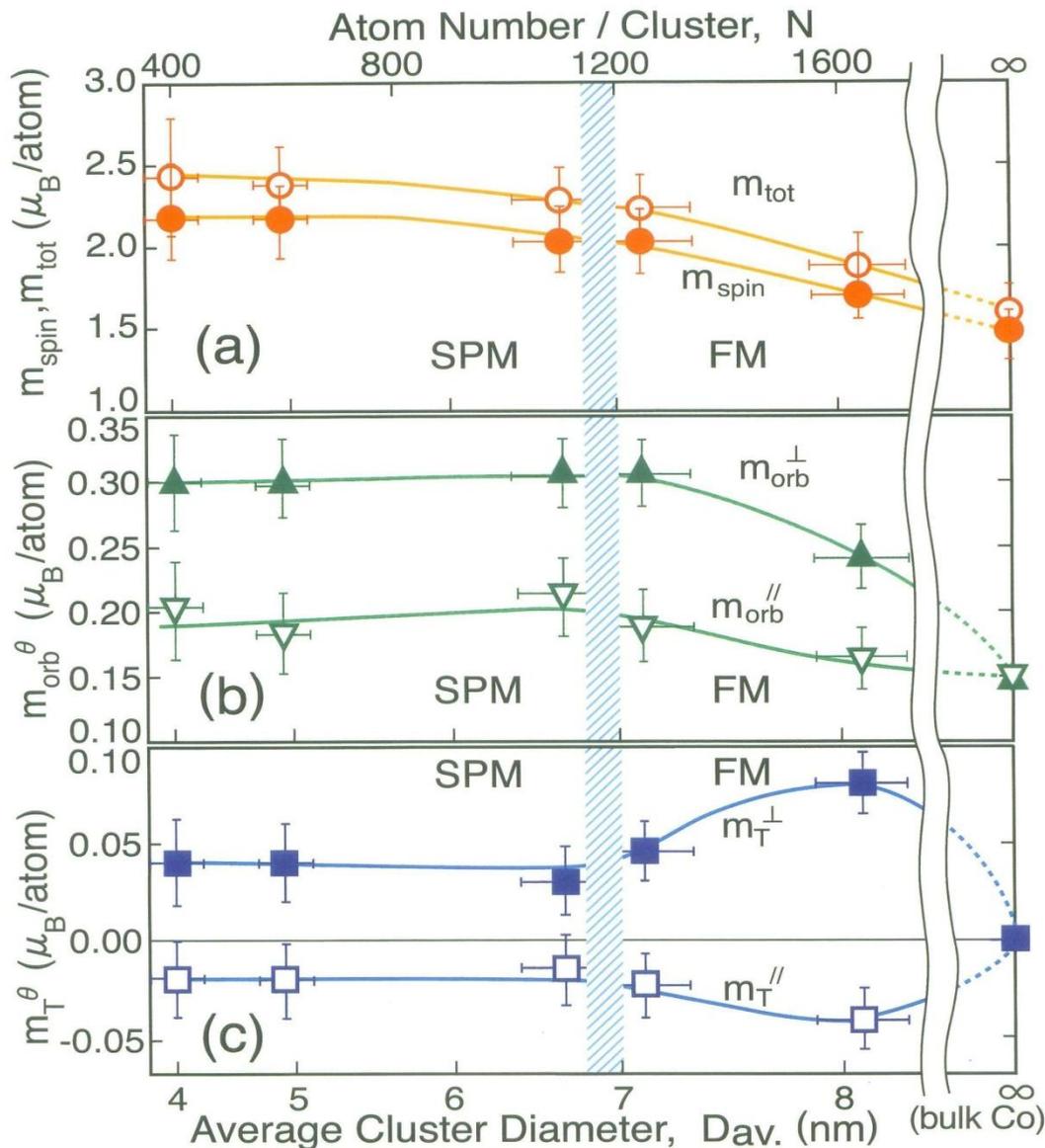
(j = l or T)

$m_T^\perp + 2 m_T^\parallel = 0$ を使うと...

⇒すべての磁気モーメントを
異方性を含めて決定

角度依存XMCDの測定例

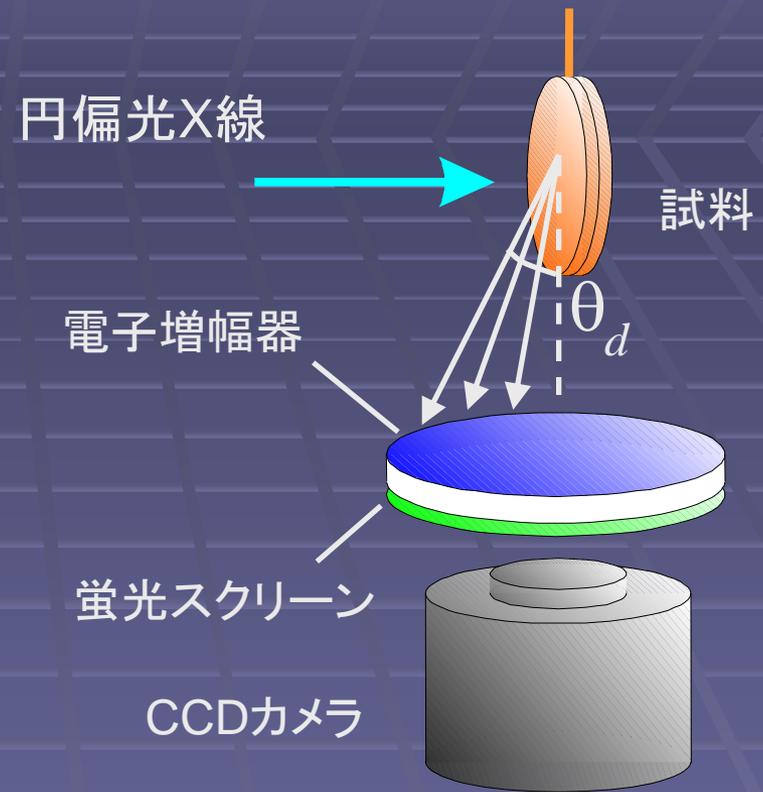
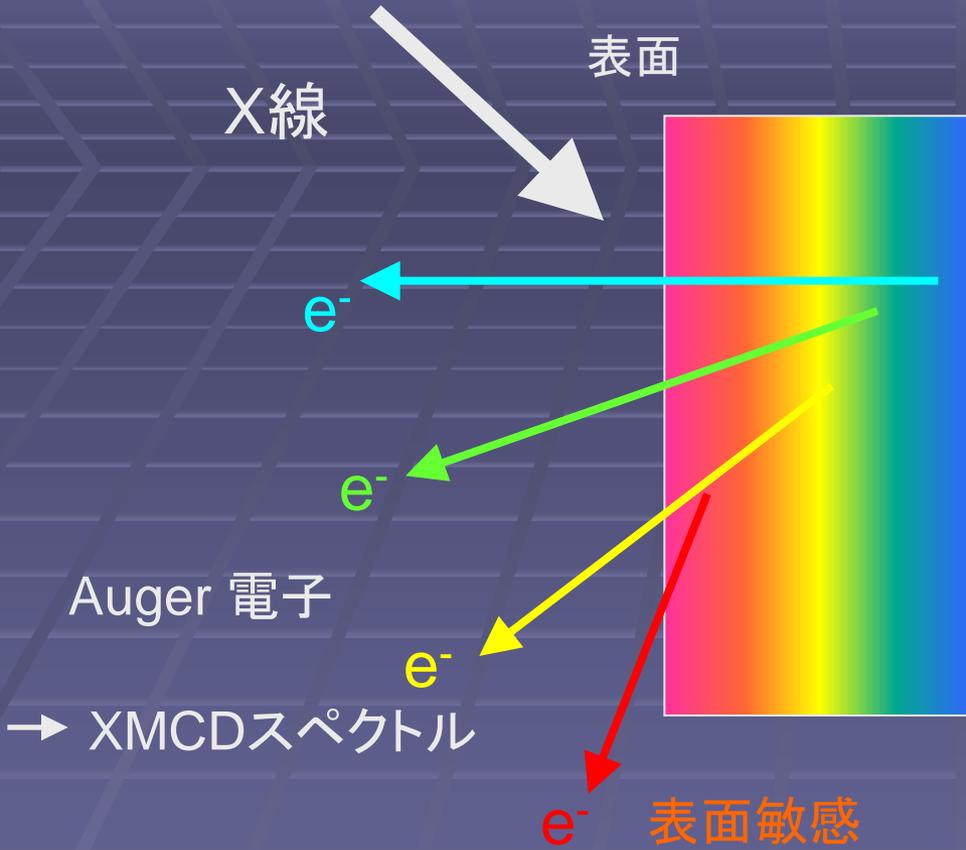
T. Koide et al., Phys. Rev. Lett. 87, 257201 (2001)



Coクラスターの
サイズ依存性を観測

深さ分解XMCD装置

K. Amemiya et al., *Appl. Phys. Lett.* **84**, 936.



様々な出射角で電子収量XMCDを測定
⇒ 様々な検出深度を持つスペクトル群

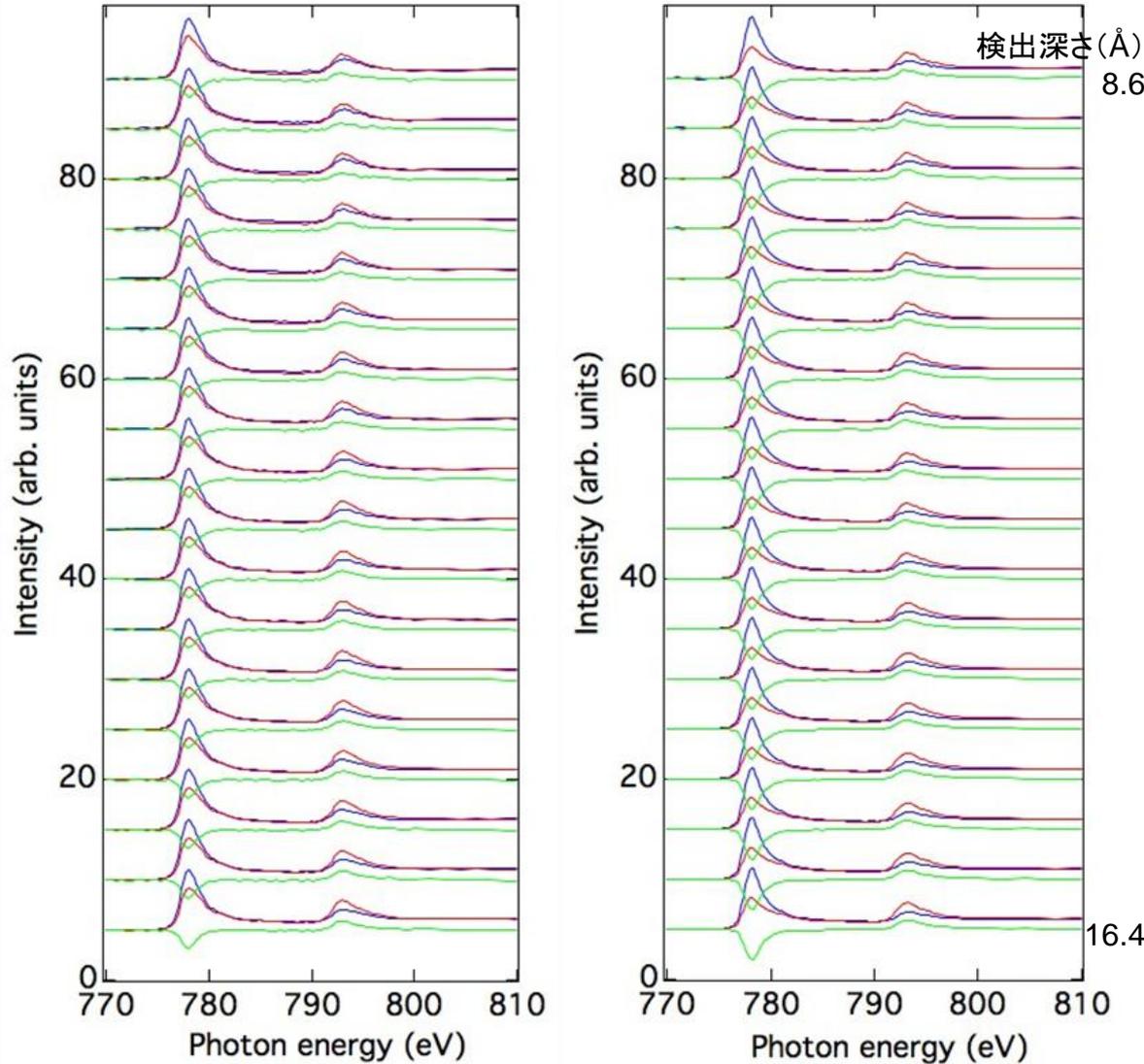
全ての検出深度に対応する
スペクトルを一度に測定

※測定は残留磁化に限る

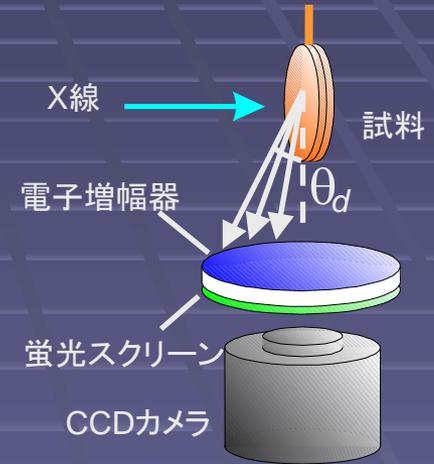
深さ分解XMCD装置

Au/Co/Au/Mo/Al₂O₃

Au/Mo/Co/Au/Mo/Al₂O₃



定常的に実験が可能
その場で薄膜の作製が可能
蒸着源(電子衝撃加熱)常備
試料位置を変えながら自動測定可
測定前に~500 Oeの磁場を印加



深さ分解XMCDの測定例

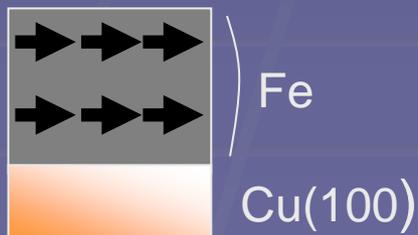
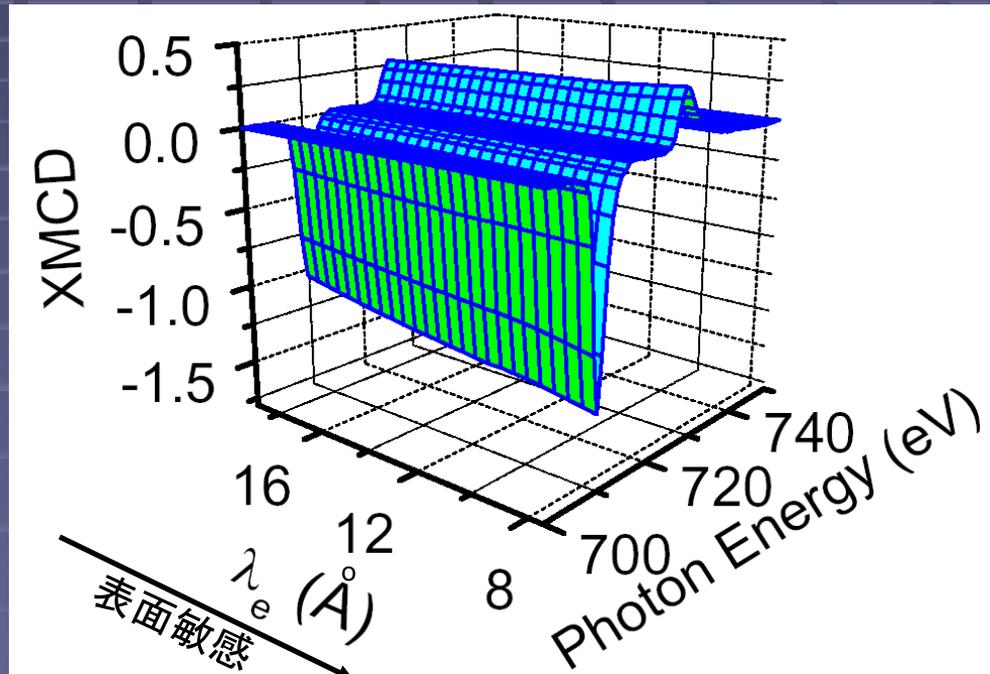
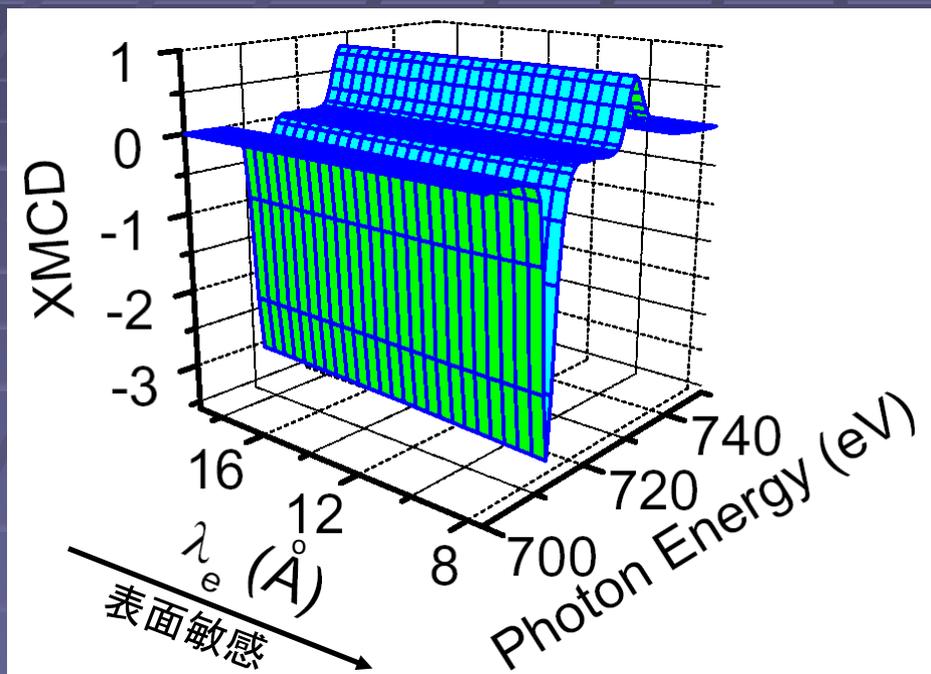
Amemiya et al., Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 936.

測定: PF-BL-7A 超高真空中($\sim 3 \times 10^{-8}$ Pa)

試料: 同じ超高真空装置中でCu単結晶の(100)表面にFeを蒸着
1000 Oe程度で磁化した後, 外部磁場をゼロにして測定

Fe 3原子層

7 原子層



一様に磁化



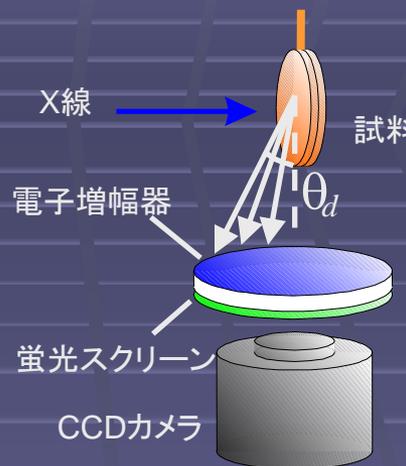
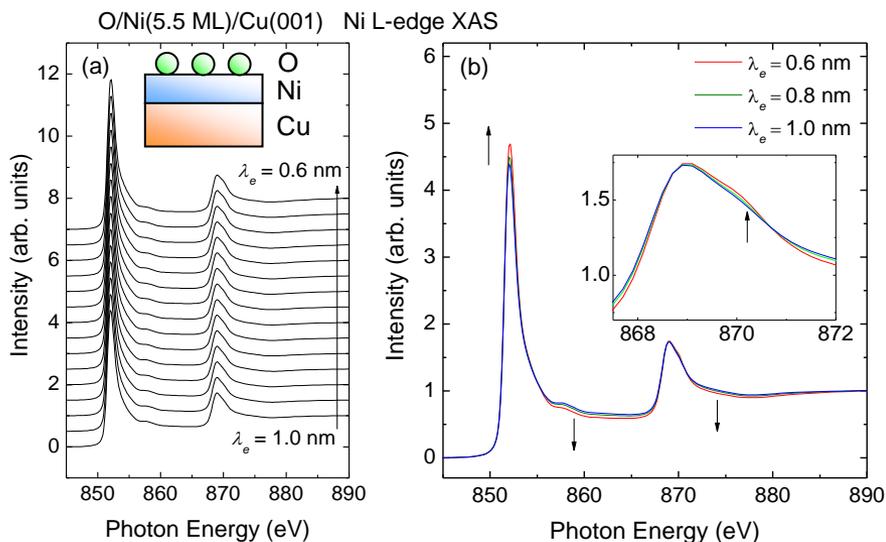
主に表面が磁化

表面2層のみ磁化

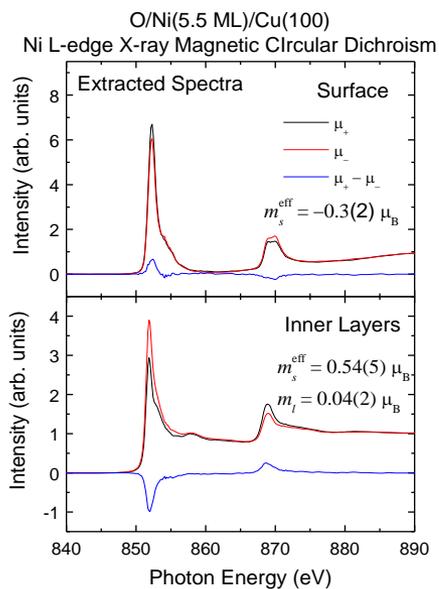
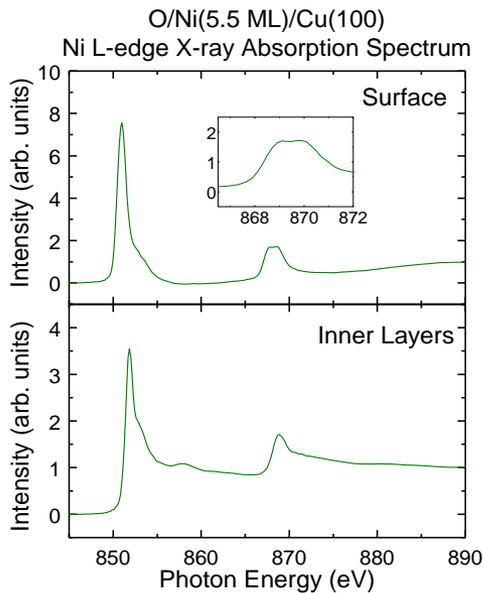
内部はゼロ

深さ分解XMCDの測定例 (表面と内部層の分離)

反強磁性／強磁性界面における原子層レベルの磁気構造の制御と観察



深さ分解XMCD



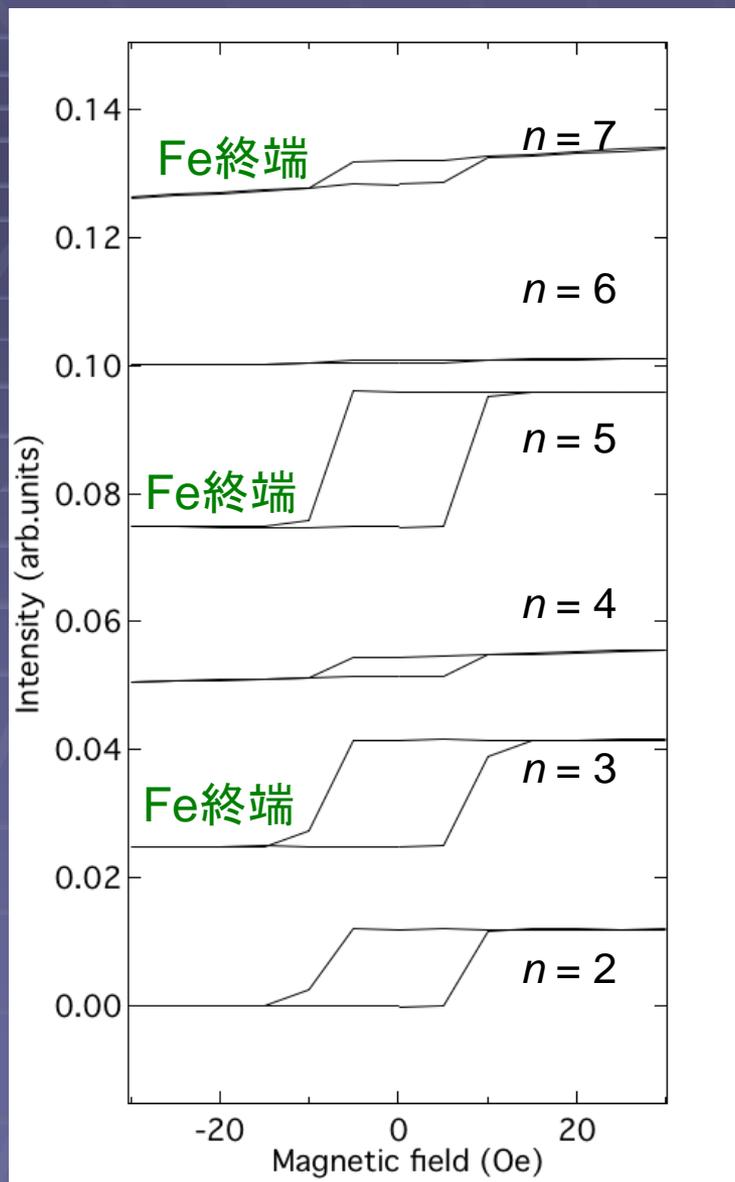
O/Ni(5.5 ML)/Cu(100)において、
表面に一層のみのNiO類似構造を観測

表面のNiO類似構造において、
内部のNi層と逆向きのモーメントを観察

K. Amemiya and M. Sakamaki,
Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 12501.

Ni/Fe多層膜における元素選択的な磁気異方性の決定

面直磁化の変化



Ni 10ML(面直磁化)の上に
Fe, Niを交互に成長

Feが表面にあるときに
面直磁化が強くなる

面内磁化

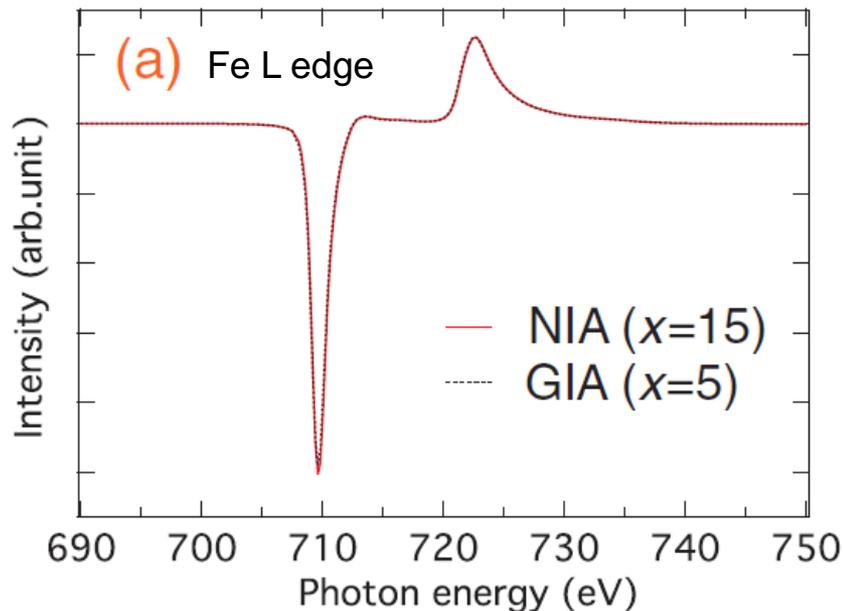
強い
面直磁化

膜厚の増加とともに面直磁化
が弱まる

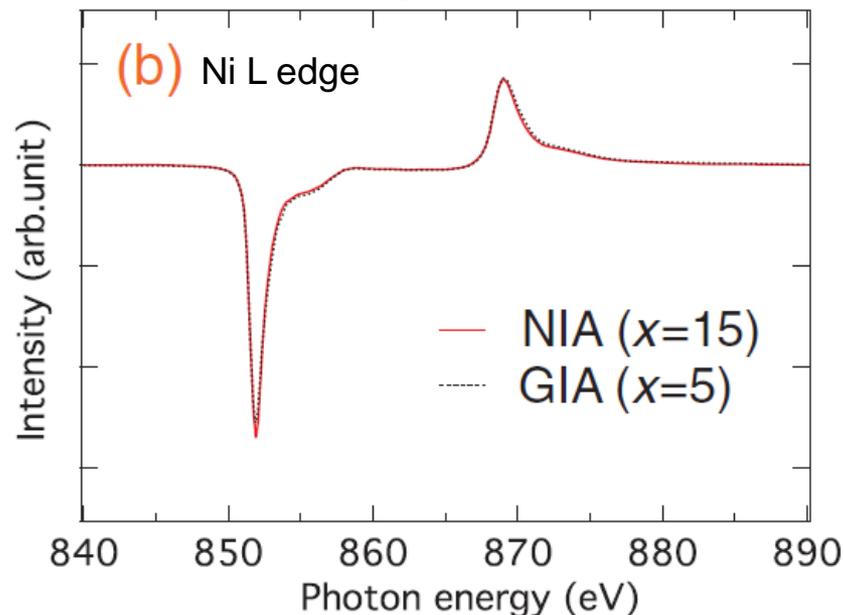
Ni/Fe多層膜における元素選択的な磁気異方性の決定

XMCDによる磁気異方性エネルギーの見積もり

Niに挟まれたFe



Feに挟まれたNi



磁気異方性エネルギー
 $K_{\text{Fe}} = 10 \pm 40 \mu\text{eV}$

表面では $140 \pm 60 \mu\text{eV}$
(強い面直志向)

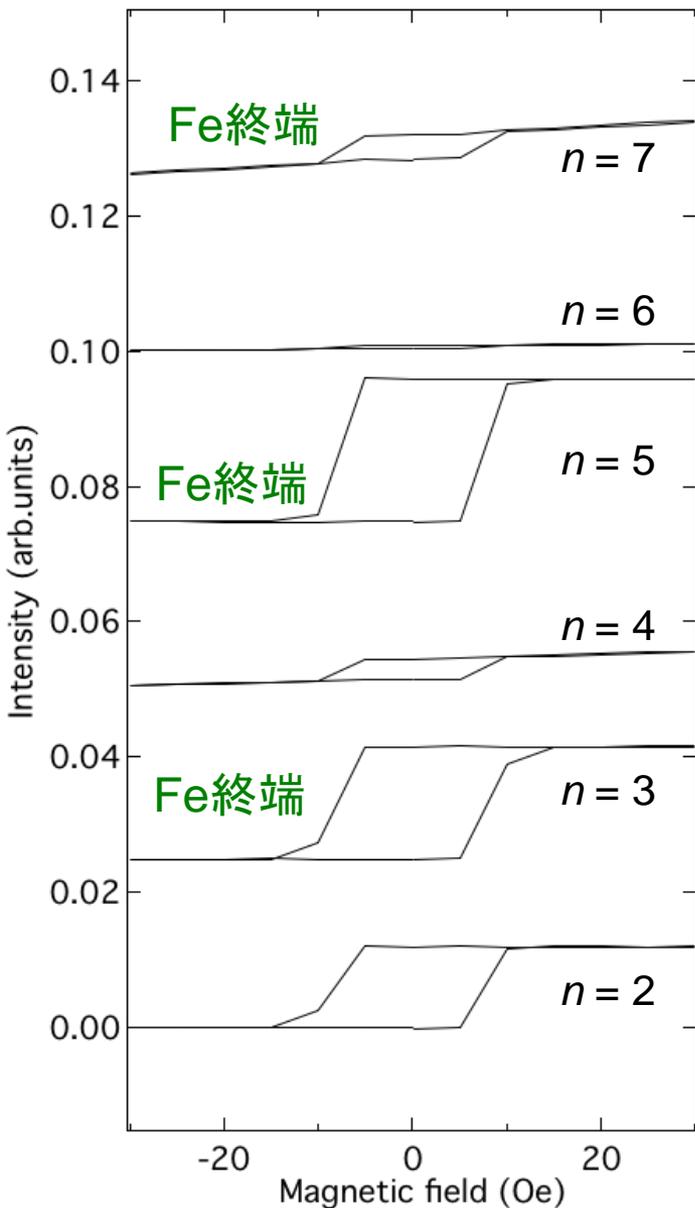


磁気異方性エネルギー
 $K_{\text{Ni}} = 60 \pm 30 \mu\text{eV}$

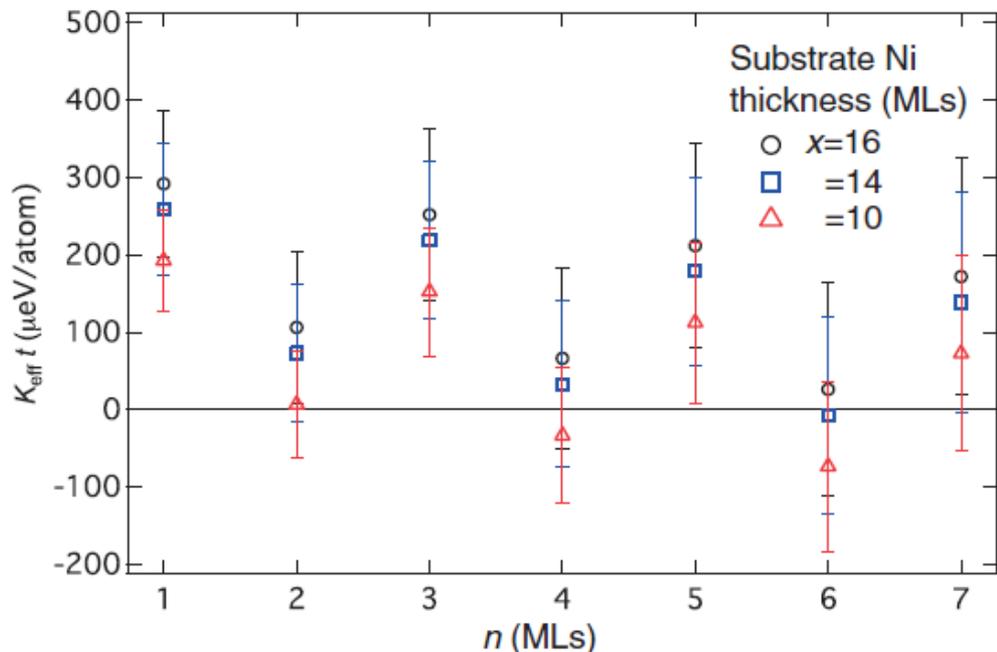
表面では $-30 \pm 20 \mu\text{eV}$

Feを表面と同じような環境におければ面直磁化に有利

Ni/Fe多層膜における元素選択的な磁気異方性の決定



膜全体の磁気異方性のシミュレーション



面直磁化
が安定

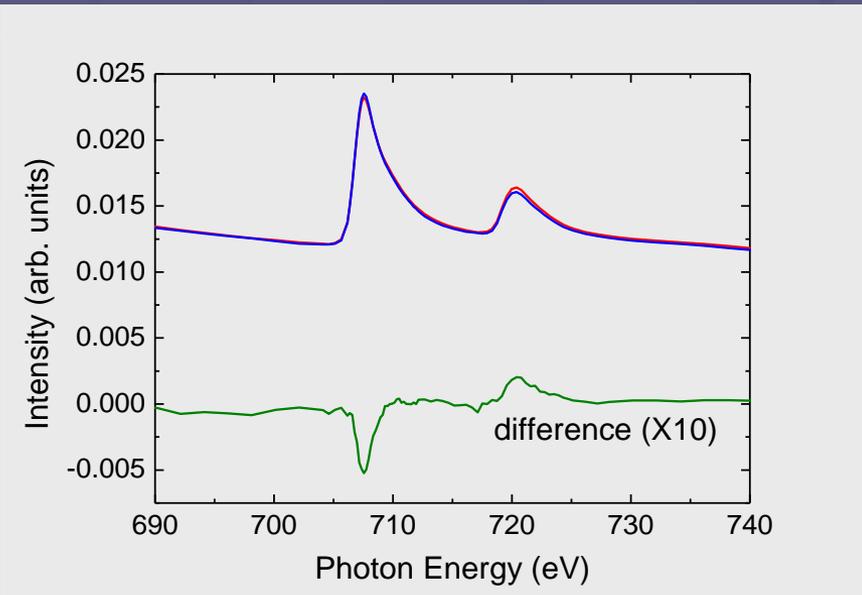
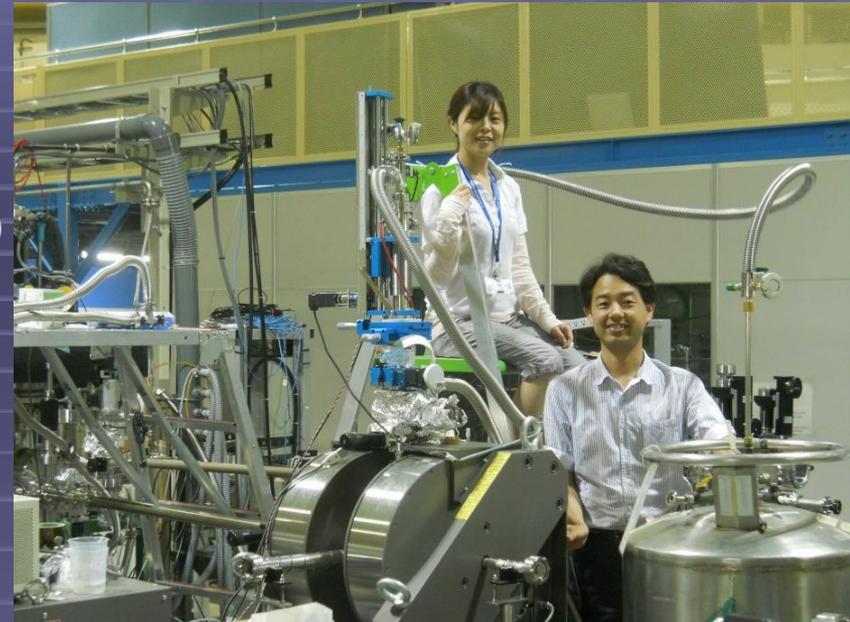


XMCDの結果から見積もった磁気異方性は膜全体の
磁気異方性と一致 \Rightarrow 磁気異方性エネルギーの妥当性

M. Sakamaki and K. Amemiya,
Appl. Phys. Express 4 (2011) 073002.

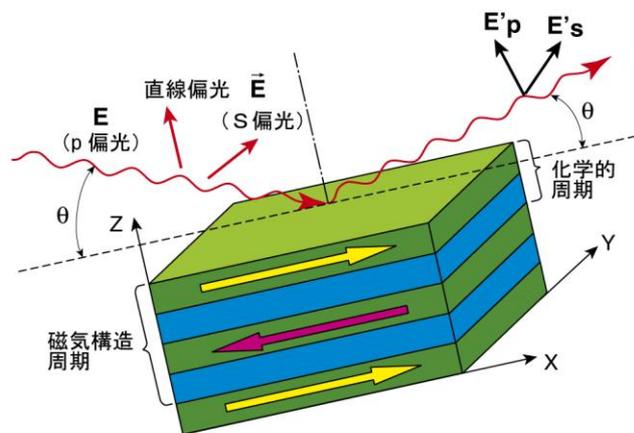
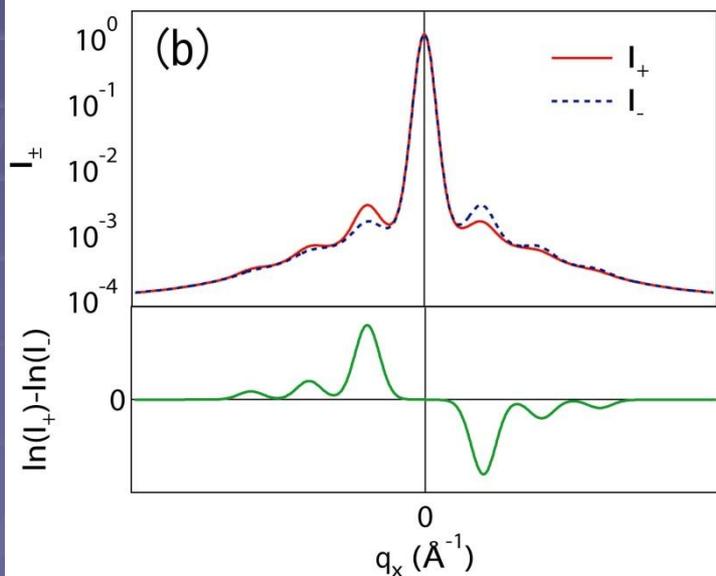
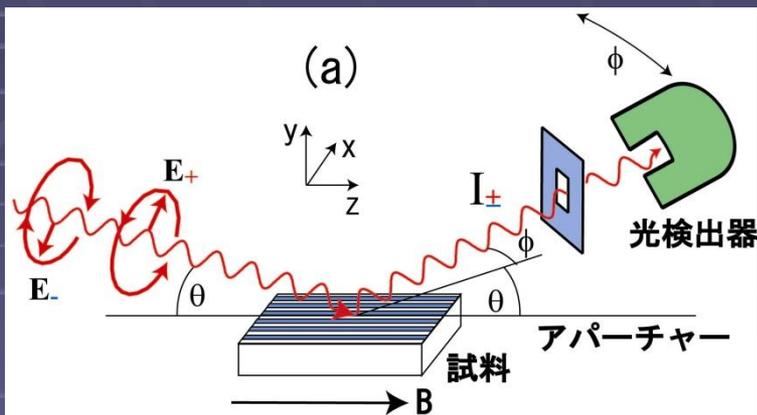
手軽なXMCD装置

水冷電磁石により**1.2 T**までの磁場を発生
最低温度： 100 K (液体窒素), 20 K (液体He)
測定点一点ごとに磁場の反転が可能
試料トランスファーシステムを常備 (する予定)
真空を破って試料を直接取り付けることも可能

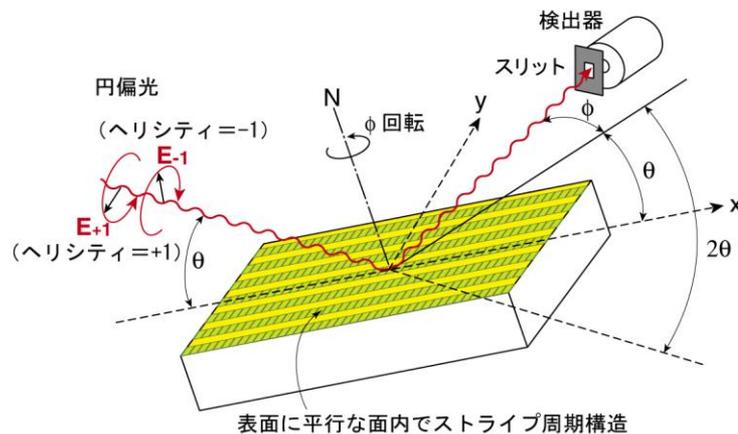


共鳴(磁気)散乱装置

nmオーダーの周期構造を観測
構造と電子(磁気)状態の同時観察

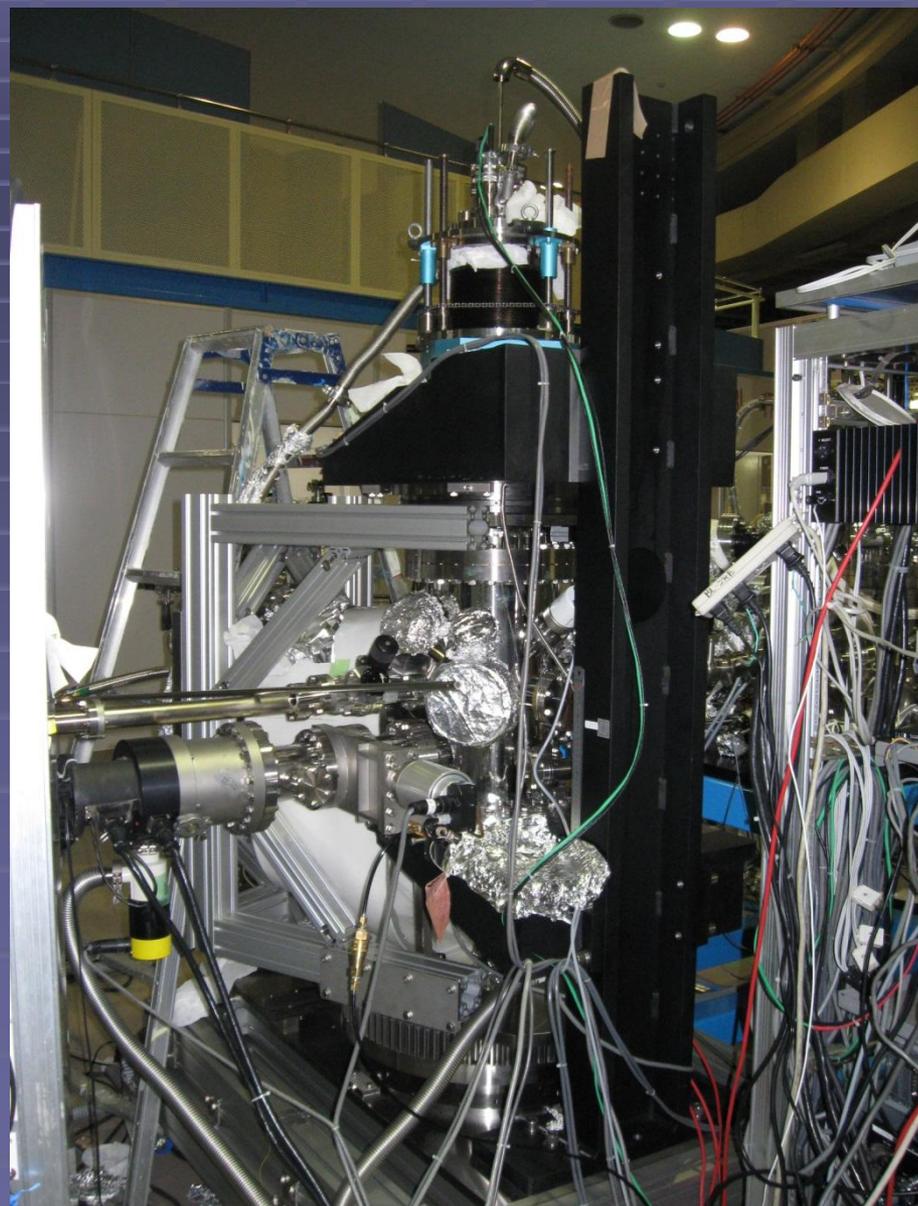
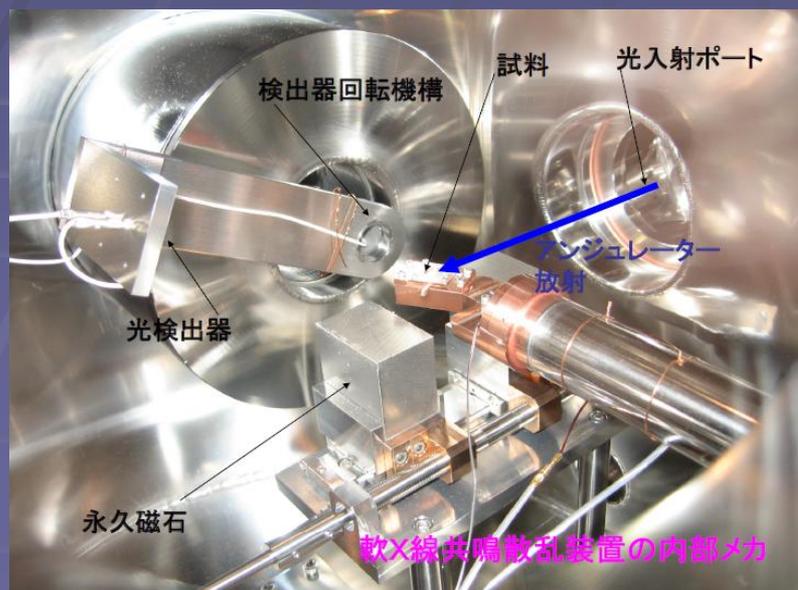
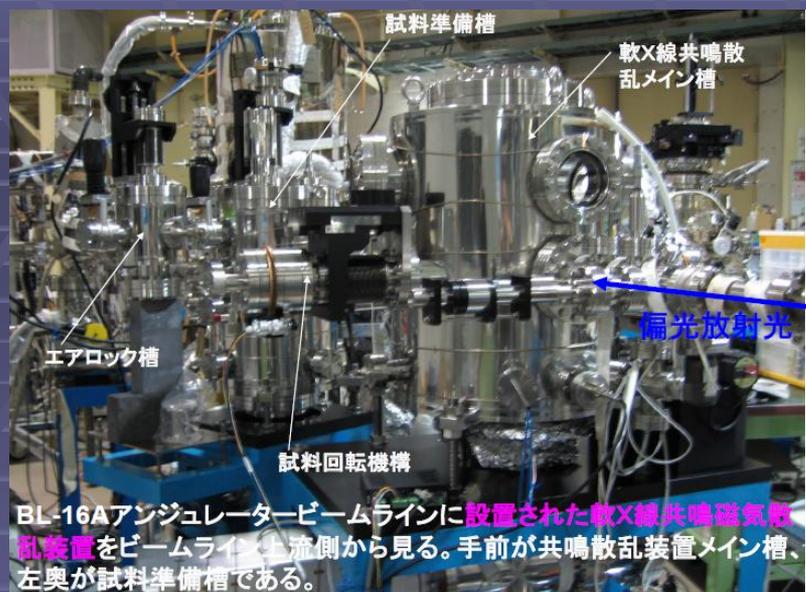


(a) 面垂直方向の周期構造

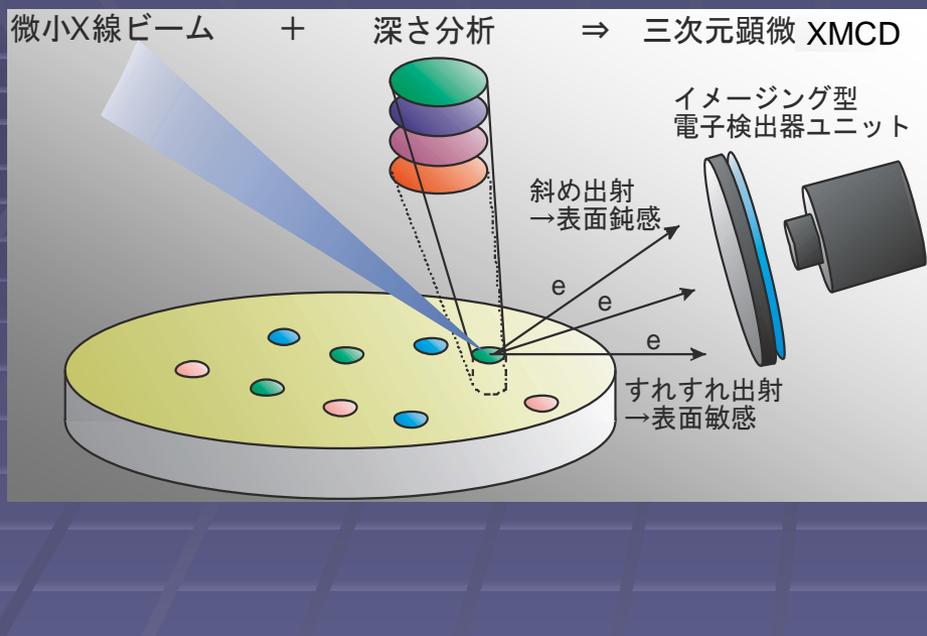


(b) 面内方向の周期構造

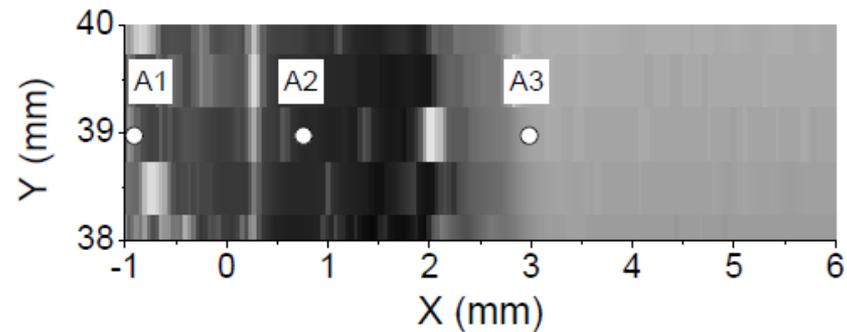
共鳴(磁気)散乱装置



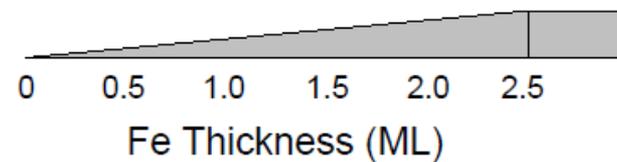
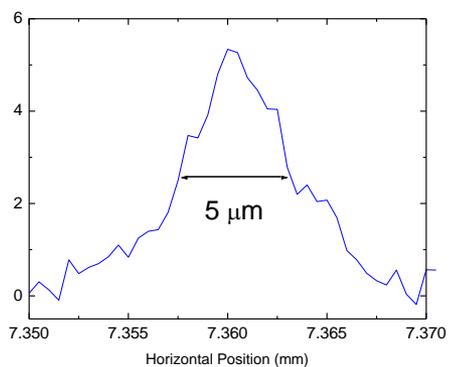
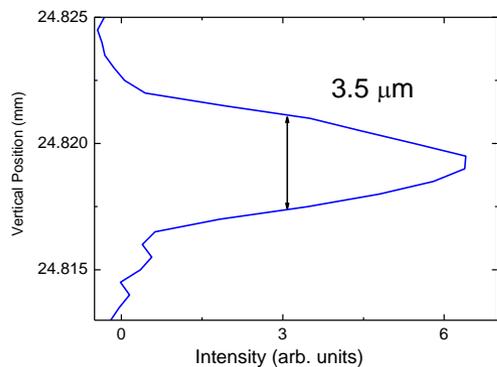
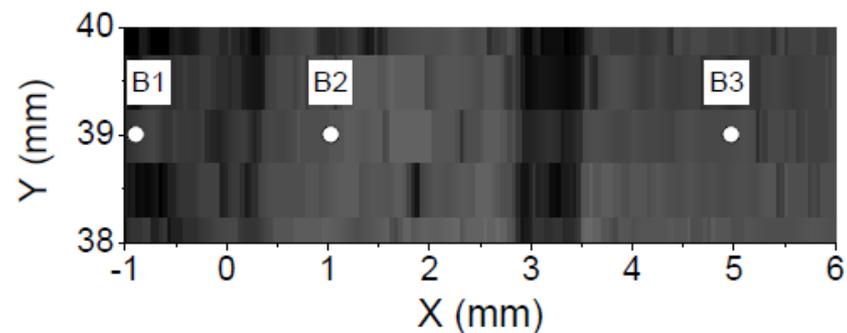
三次元顕微XMCD装置



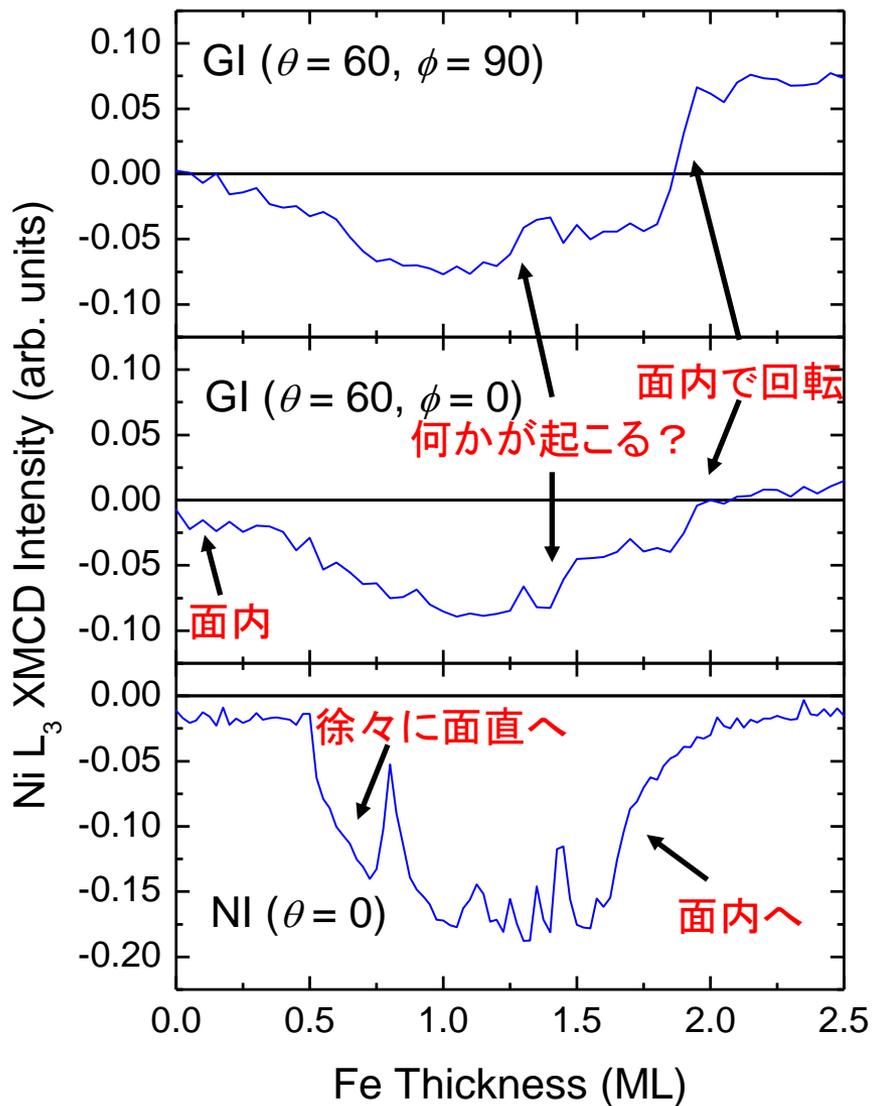
(a) Normal incidence



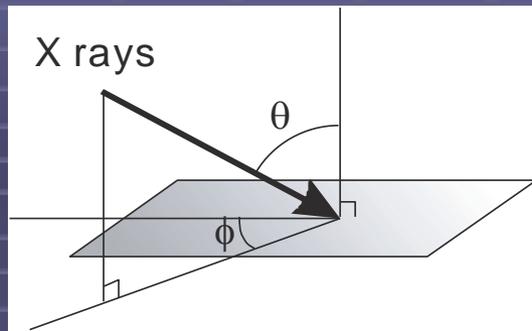
(b) Grazing incidence



三次元顕微XMCDの測定例



Fe/Ni/Cu(100) 薄膜における特異な磁気異方性



Fe 0-0.5 ML Fe 1.0-1.6 ML Fe 2.0-2.5 ML

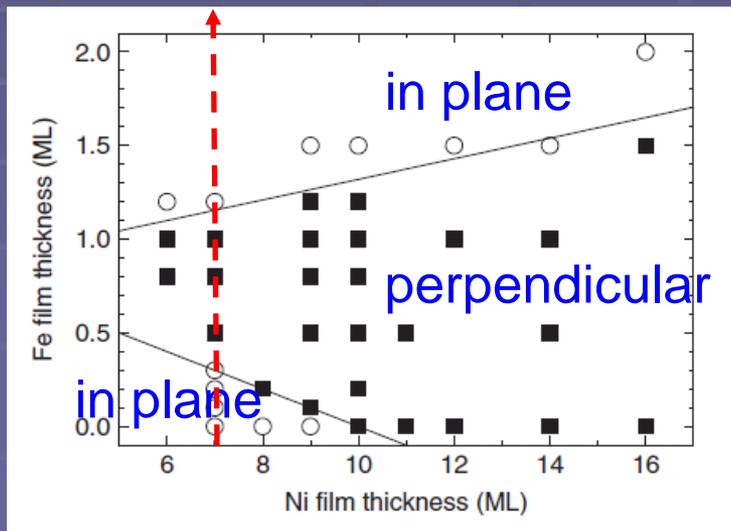


面内磁化($\phi = 0$)

面直磁化

面内磁化($\phi = 90$)

3つの領域の間では複雑な挙動



三次元顕微XMCDの測定例

K.Amemiya and M.Sakamaki, J. Phys. D 44 (2011) 064018.

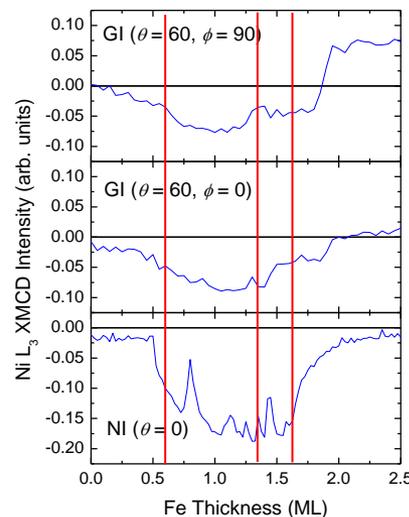
転移の起こり始め(0.6 ML):

表面敏感なデータで軌道磁気モーメント大

面直領域(1.3, 1.6 ML)

全体的に通常のスペクトル

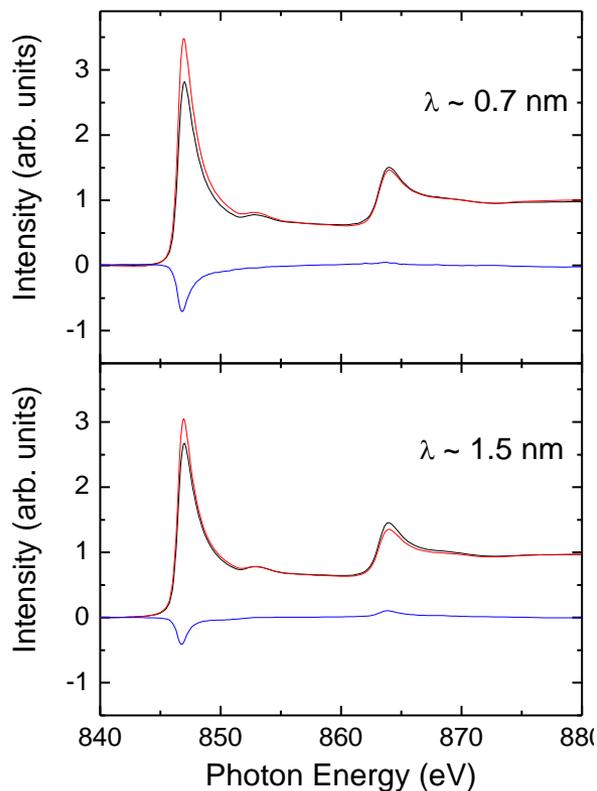
⇒ Feとの界面の軌道磁気モーメントが先行する形でスピン再配列転移が進行?



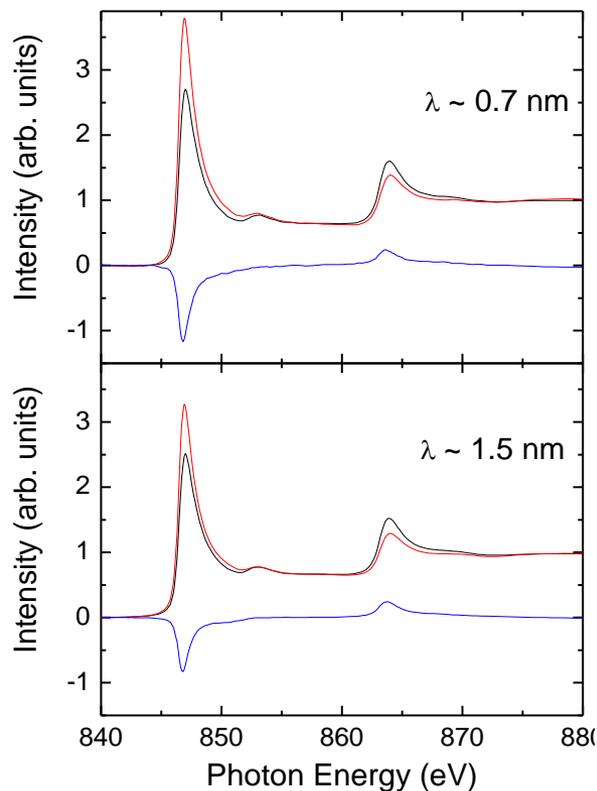
Ni 吸収端

直入射条件で
深さ分解XMCD

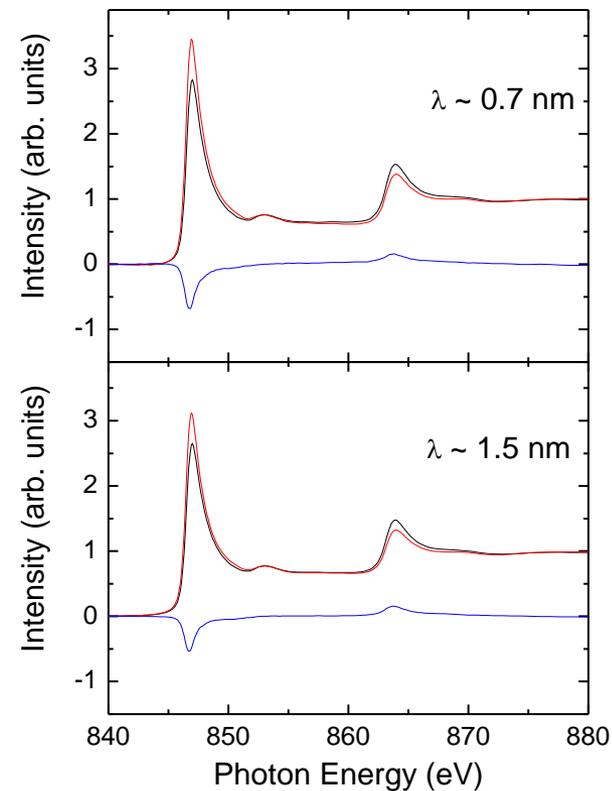
Fe 0.6 ML



Fe 1.3 ML



Fe 1.6 ML



1. どんな実験ができるのか
2. 実験装置と実際の研究例
3. ビームラインの現状と今後の整備計画
4. PFで実験をするには？

磁性研究を行っているVUV・軟X線ビームライン

BL-7A, 11A

偏向電磁石

楕円偏光($P_c \sim 80\%$)を利用したXMCD

小型XMCD装置(0.2 T), 深さ分解XMCD装置

BL-16A (2007年夏に建設, 2008年秋より円偏光利用実験開始)

APPLE-II 型アンジュレータ

円・直線偏光を利用したXMCD, XMLD, XMCD-PEEM

配置・角度依存XMCD, 深さ分解XMCD, 共鳴(磁気)散乱, ...

BL-19A (東大物性研)

リボルバー型アンジュレータ

スピン分解光電子分光

偏光電磁石ビームライン(BL-7A, 11A)

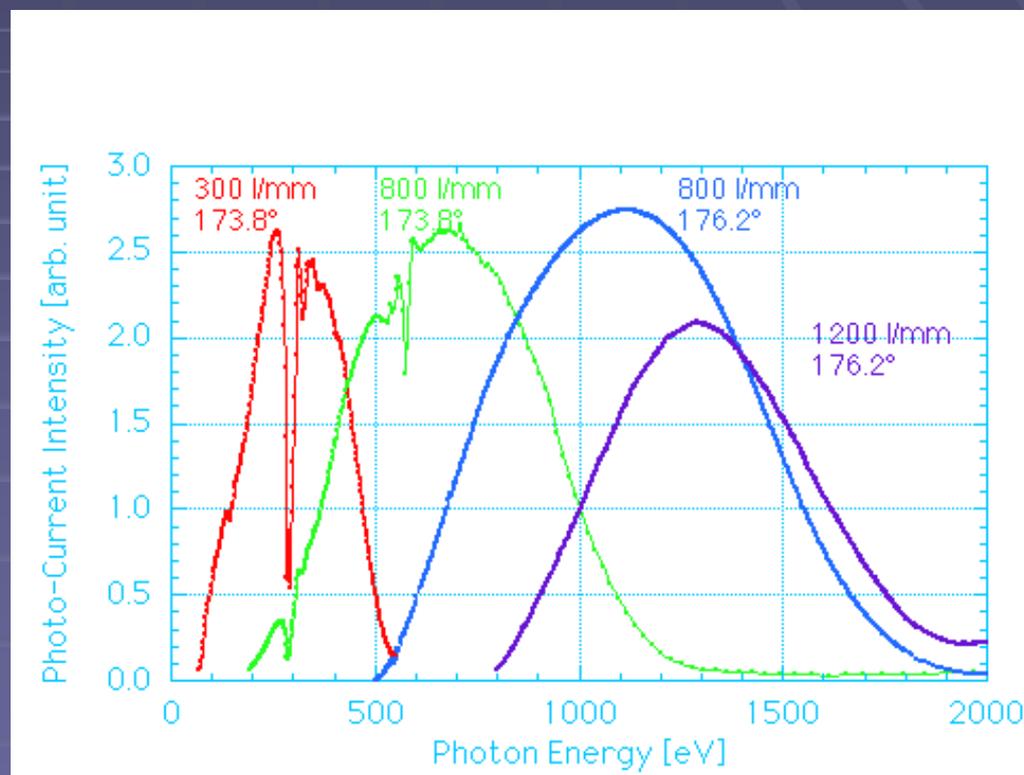
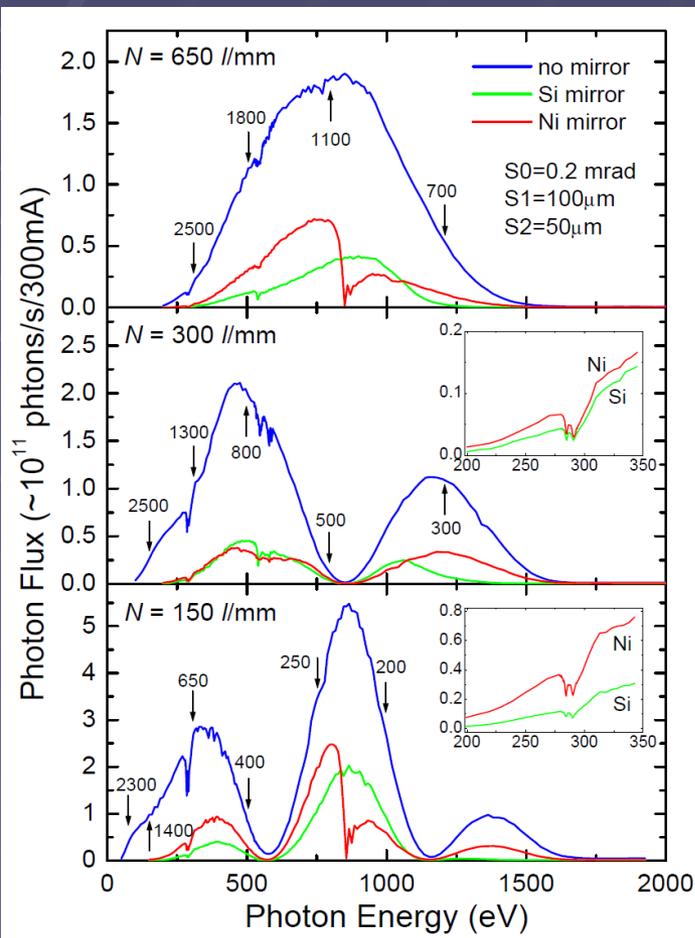
電子軌道面の上下を使うことで楕円偏光を取り出し($P_c \sim 80\%$)

切替え: BL-7Aは自動(5分程度), BL-11Aは手動

エネルギー範囲

BL-7A: 50-1300 eV

BL-11A: 70-1900 eV



アンジュレータビームライン(BL-16A)

Light Source: Twin APPLE II Undulators with Kicker Magnets

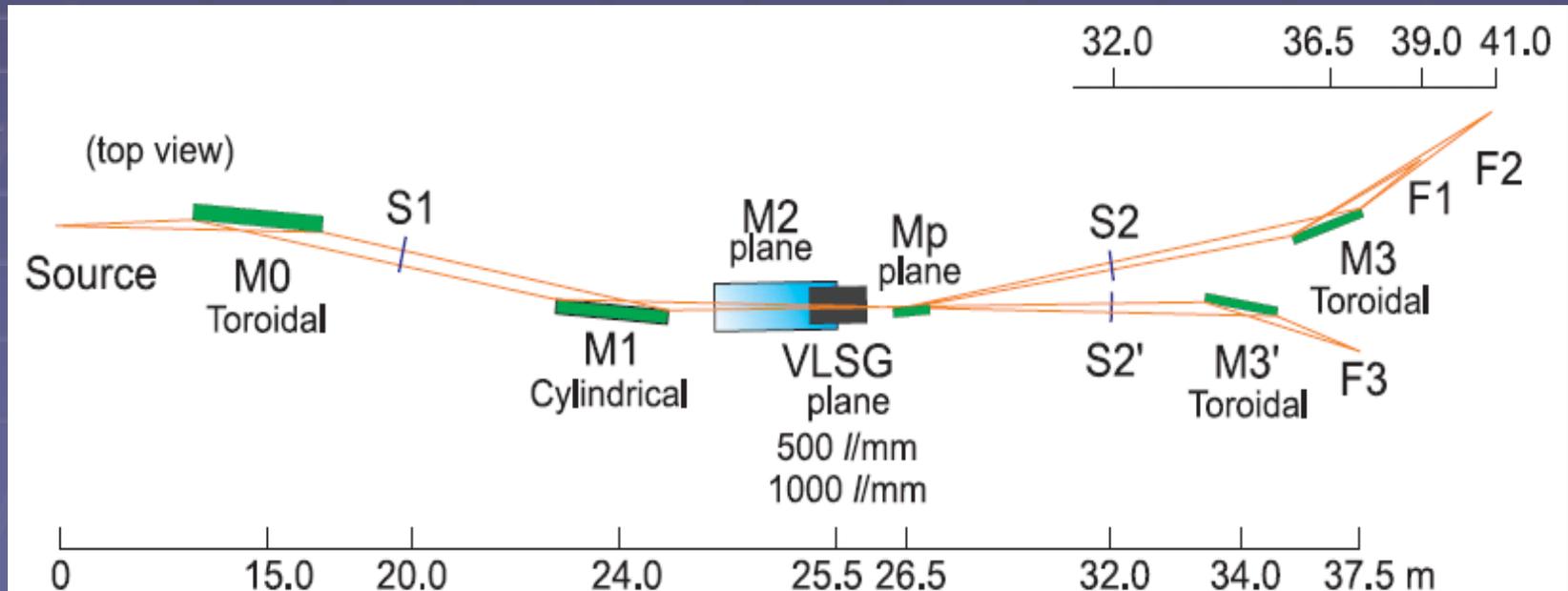
Variable Polarization: Circular and Linear (Horizontal/Vertical) Polarization
Fast Switching (~10 Hz)

1st Undulator: Mar-Apr 2008, 2nd Undulator: 2010 Summer

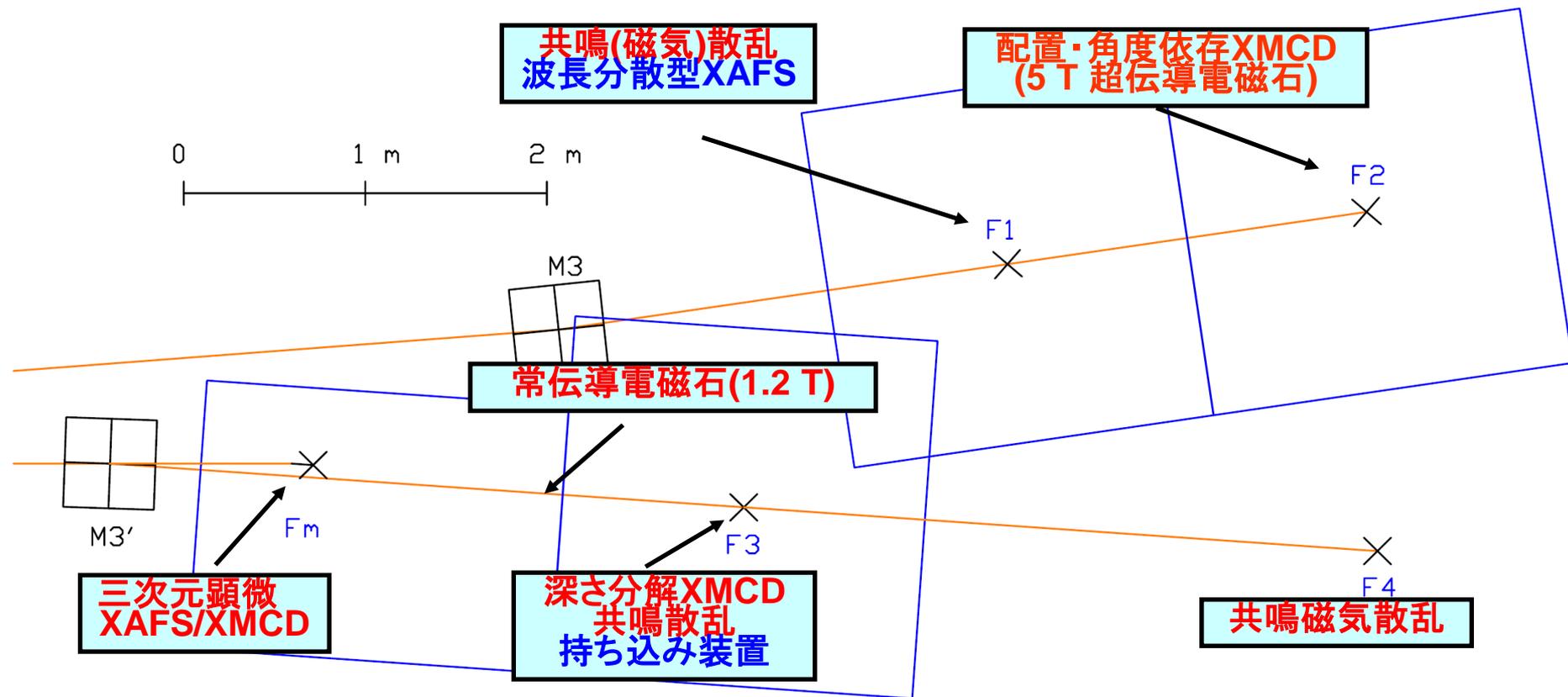
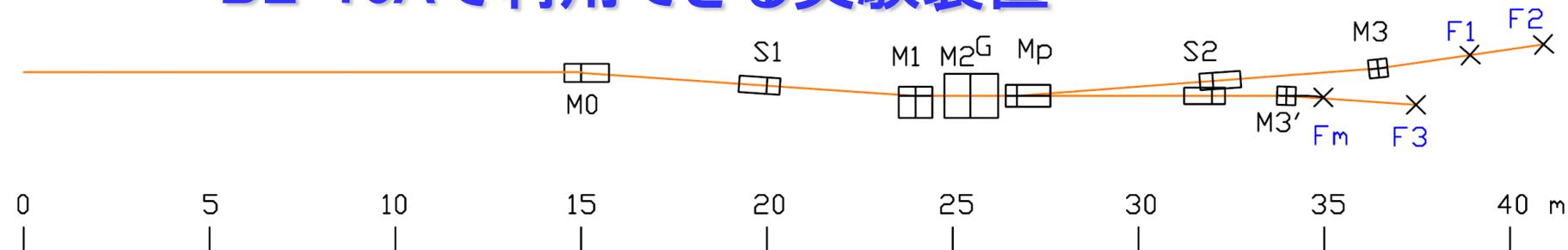
Monochromator: Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Grating

200-1500 eV (3d Transition Metals, Light Elements, and Rare-earth Elements)

Installation: 2007 Summer, Commissioning: Oct 2007-

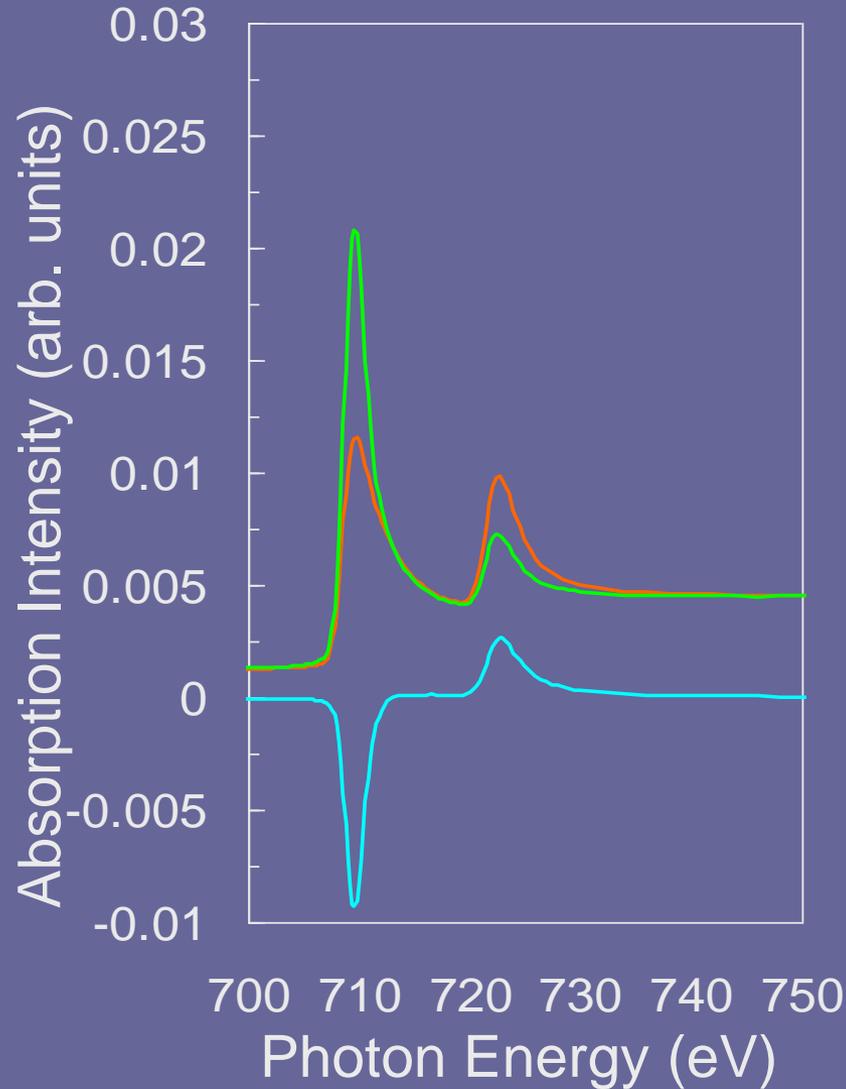


BL-16Aで利用できる実験装置



偏光スイッチングの開発

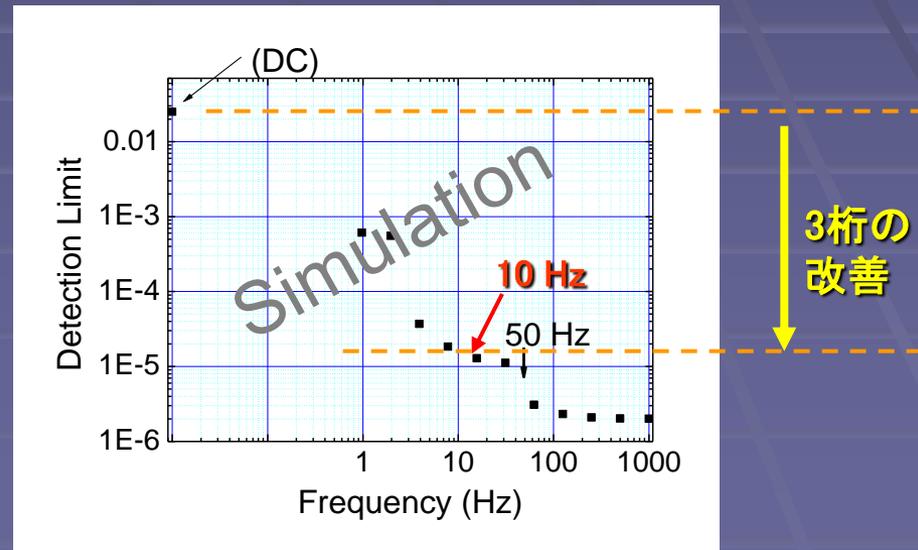
3 ML Fe / Cu(100) Fe L-edge XMCD



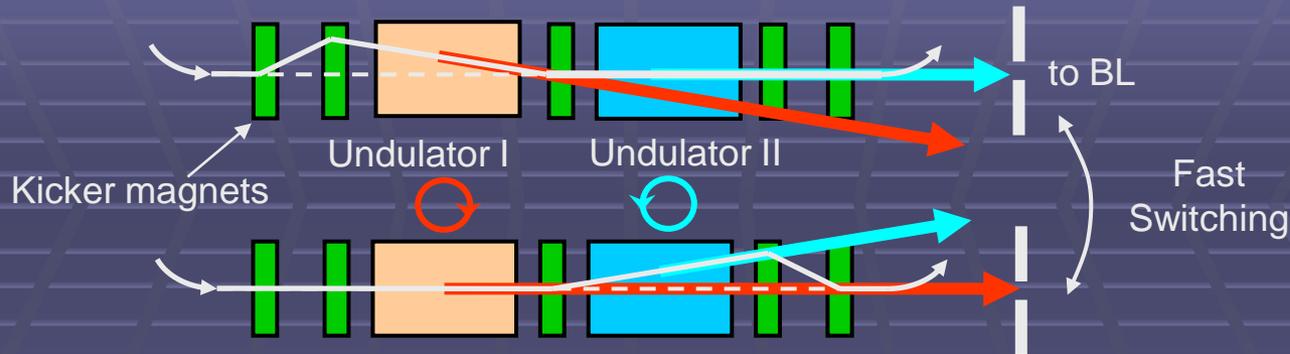
右回り円偏光と左回り円偏光の
スペクトルの差を取る
⇒ 試料の磁気モーメントの情報

微量元素, わずかな磁気モーメントを
何とかして観測したい!!
例: 希薄磁性半導体

通常のDC的な測定では~1%が限界
⇒ 偏光スイッチング+ロックイン技術



BL-16Aにおける偏光スイッチング計画



T. Muro et al., AIP Conf. Proc. 705, 1051 (2004); 879, 571 (2007).

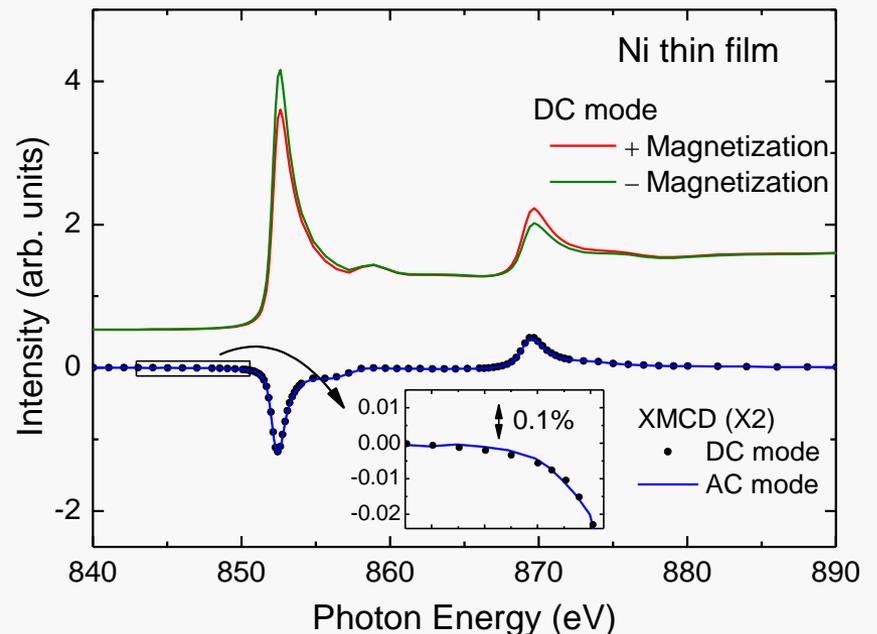
T. Muro et al., J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 144-147, 1101 (2005).

量子ビーム基盤技術開発プログラム(2008-2012年度)

「軟X線の高速偏光制御による
新奇機能性材料の探求と創製」

2010年夏にUndulator II 完成
秋より調整中(10 Hz)

最新の測定結果
2010年12月16日



1. どんな実験ができるのか
2. 実験装置と実際の研究例
3. ビームラインの現状と今後の整備計画
4. PFで実験をするには？

PFで実験をするには？

ビームライン・装置担当者との打ち合わせ

とりあえず誰かに聞けば、適切な人を紹介してくれます



使用する装置, セットアップ等の検討

実験課題申請 (G型:5月と11月, U型:随時)

http://pfwww.kek.jp/users_info/pac_application/index.html



PAC (Program Advisory Committee) による審査

(採択 or 不採択, 採択の場合は評点がつく)

G型課題は2年間有効 (5月申請→10月から, 11月申請→4月から)

ビームタイム要求 (4月, 10月, 1月からのそれぞれ2か月程度前)

試料の数, 実験のセットアップなどを考慮して必要十分な時間を申請



ビームラインの事情に応じた配分 (ビームタイム配分委員会で決定)

評点に応じた傾斜配分

ビームタイム

使用料は無料, 旅費もビームタイムの長さに応じてサポート



異文化交流をお楽しみください

成果の公表



ご清聴ありがとうございました



PFツアーにも是非ご参加ください (10/15 8:40-9:40)