BL09XU
核共鳴散乱

はじめに

核共鳴散乱ビームラインBL09XUは周期長32 mmのSPring-8標準アンジュレータを有する硬X線ビームラインである[1]。ビームラインモノクロメータには液体窒素冷却シリコン結晶が使用されている。ビームラインでは核共鳴散乱と硬X線光電子分光を利用する研究が行われている。以下では2015年度にそれぞれの実験手法で行った整備・高度化について報告する。

Ⅰ．核共鳴散乱

核共鳴散乱では、放射光を励起光としたメスバウアー効果測定が行われており、原子ダイナミクスのための非弾性散乱や電子や原子核の状態を観測する前方散乱や放射光メスバウアー分光が行われている。後者においては、放射線源を用いた実験が困難な高圧下実験や共鳴回折実験に加え、適当な親核を持たない核種の実験に利用されている。

2015年度の整備・高度化として^{57}Fe用0.8 meV高分解能モノクロメータの分解能関数の精密測定、ヘリウム循環型パルスチューブ冷凍機の導入、フォノン状態密度を導出するソフトウェアの導入などを行った。

^{57}Fe用0.8 meV高分解能モノクロメータの分解能関数の精密測定

これまで主として多数の振動モードが観測されるタンパク質試料の非弾性散乱実験に主として利用されてきた^{57}Fe用0.8 meV高分解能モノクロメータは、周期構造を持たない不規則系と言われるガラスなどの原子ダイナミクスにも利用が始められている。^{57}Fe用高分解能モノクロメータには、0.8 meV分解能のほかに2.5 meVと3.5 meV分解能があるが、前者は後者に比べて分解能関数として半値幅は狭いが裾が長いという特徴を持つ。図1のように裾の長い分解能関数による信号観測やスペクトル解析への影響をユーザーに提供できるデータを取得することができた。

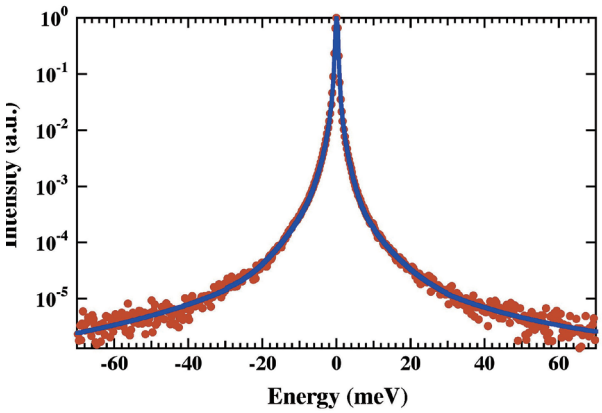


図1　^{57}Fe用0.8 meV高分解能モノクロメータの分解能関数、赤丸：測定データ、青線：フィッティング曲線

ヘリウム循環型パルスチューブ冷凍機の導入

これまでBL09XUでは試料等の冷却にヘリウムフロー型の冷凍機を用いてきたが、液体ヘリウムの高騰及び低温環境の安定的な供用を目的として図2に示すパルスチューブ型冷凍機を導入した。前方散乱実験に利用する場合には、従来の冷凍機同様に3個の試料を装着することが可能で、ラディエーション・シールドを用いて試料ホルダー取り付け位置で最低到達温度が3 Kであることを

図2　核共鳴前方散乱用試料ホルダーを備えるパルスチューブ型冷凍機

確認している。今後、冷凍機の振動による測定への影響を調べ、液体ヘリウムを使用しない非弾性散乱やエネルギー分散型放射光メスバウアー分光の利用実験環境を早期に整備する予定である。

フォノン状態密度を導出するソフトウェアの導入

核共鳴非弾性散乱の実験中に得られたスペクトルからフォノン状態密度を導出する解析ソフトウェアをU. C. Davis（カリフォルニア大学デービス校）のCramer教授のグループの協力を得てBL09XUに導入した。この解析ソフトウェアはフリーソフトウェアであるPHOENNIX[2]をWeb上で簡易利用できるようにしたものである。また、広範なユーザー利用に供するため、^{57}Fe以外の核種にも対応している。

参考文献

[1] Y. Yoda et al.: *Nucl. Instrum. Methods A*, **467-468** (2001) 715.

[2] W. Sturhahn, *Hyperfine Interact*, **125** (2000) 149.

利用研究促進部門
構造物性Ⅱグループ
依田　芳卓・筒井　智嗣

Ⅱ．硬X線光電子分光

BL09XUの硬X線光電子分光（Hard X-ray Photoemission Spectroscopy: HAXPES）は、K-B集光ミラー機構構築を中心とした光学整備が行われ、2014年度後期からHAXPES利用研究に供されている。BL47XUと比較して、30倍程度の光電子検出増大と試料常温下で100 meV程度と非常に高いエネルギー分解能を達成している[3]。加えて研究代表者Claudia　Felser教授（Max Planck Institute）の長期課題計画に沿って、埋もれた界面におけるスピン偏極度を直接観測する検出器開発が行われた。これまでに多層膜の$Fe2p_{3/2}$内殻スピン電子状態計測に成功しているが、電子状態密度が小さいフェルミ（E_f）近傍のスピン分解観測には至っていない[4]。本稿では、高い電子検出効率を望めるBL09XUで実施したスピン検出器開発及びE_f近傍のスピン分解計測について報告する。

本スピン検出器は、スピン軌道相互作用の大きなW単結晶（重元素）を用い、その2次電子がスピン偏極していることを利用してスピン分解する（図3参照）。スピン分解測定ではFigure of Merit (FoM)で示した検出効率が4桁程度減少する。加えて硬X線領域の光電子励起断面積は軟X線領域に比べ2桁程度減少するため、スピン電子検出効率が極端に悪く、チャレンジン

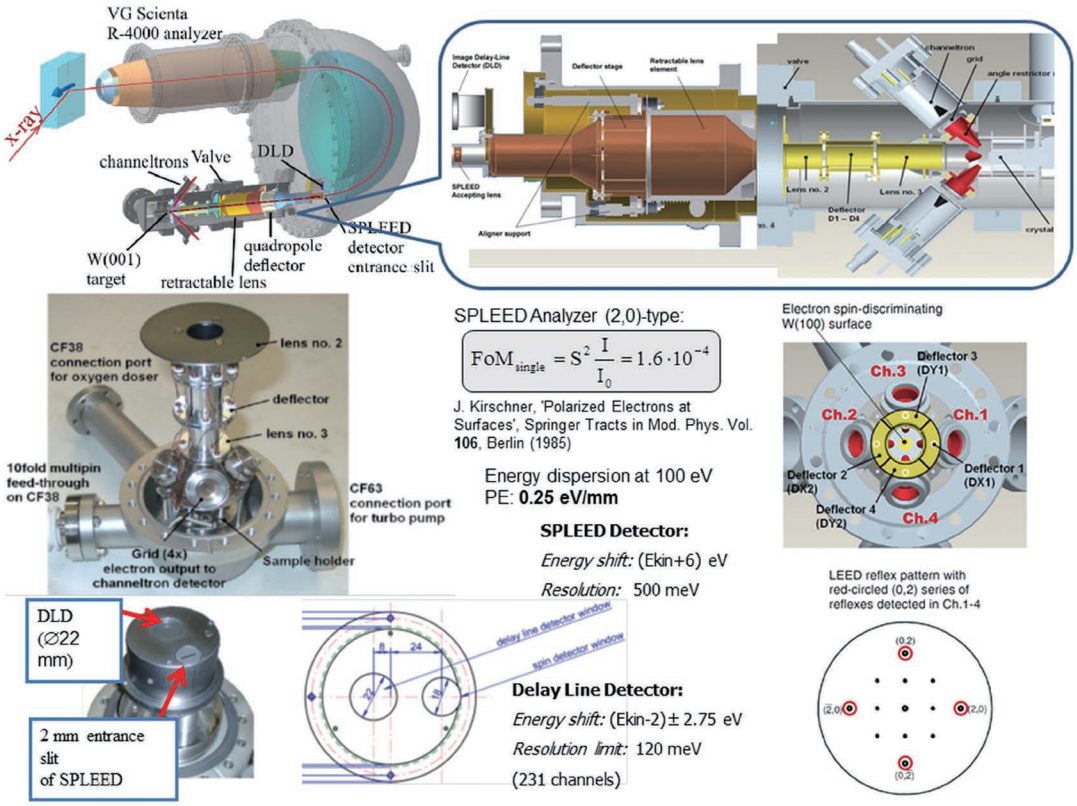
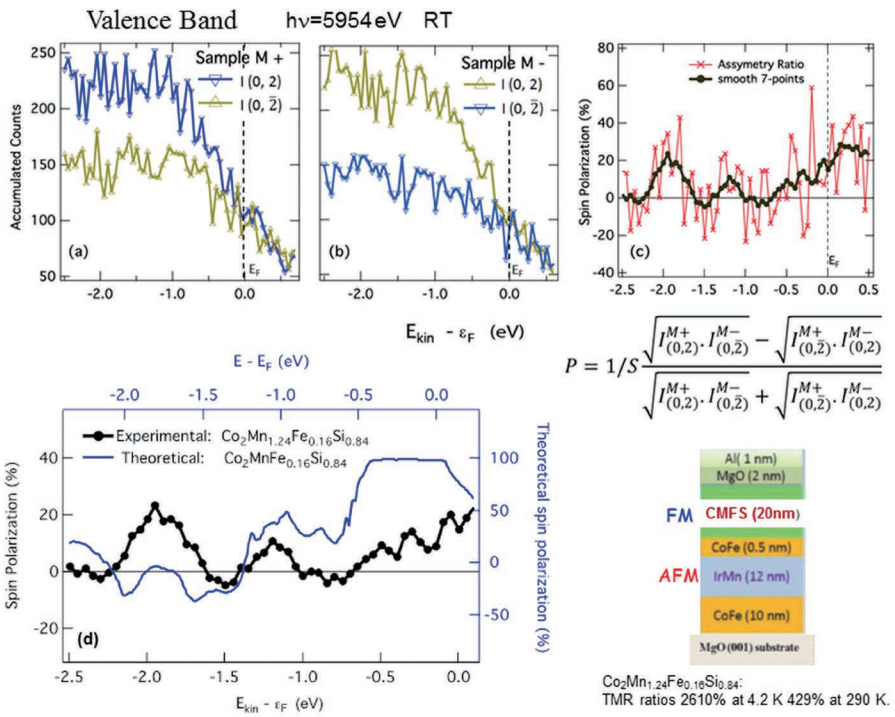


図3　スピン電子検出器の概念図、断面図およびW結晶から放出される方位(0,2)シリーズをチャンネルトロンで検出する機構図



$$P = 1/S\frac{\sqrt{I^{M+}_{(0,2)}\cdot I^{M-}_{(0,\bar{2})}} - \sqrt{I^{M+}_{(0,\bar{2})}\cdot I^{M-}_{(0,2)}}}{\sqrt{I^{M+}_{(0,2)}\cdot I^{M-}_{(0,\bar{2})}} + \sqrt{I^{M+}_{(0,\bar{2})}\cdot I^{M-}_{(0,2)}}}$$

図4　$Co_2Mn_{1.24}Fe_{0.16}Si_{0.84}$(CMFS)磁性層のフェルミ近傍のスピン分解計測スペクトル。
(a)M^+, (b) M^-の各試料方向に対するUpperおよびLower channeltronsの積算スペクトル。(c)スピン偏極度を算出したスペクトル（赤：raw、黒：smooth結果）。(d)スピン偏極度スペクトル（黒：smooth結果、青：第一原理計算結果）

グな検出器開発と言える。また経時によりW結晶表面が汚染劣化するため、酸素雰囲気中600℃程度でフラッシュアニールすることで、清浄表面を回復させる。$Co_2Mn_{1.24}Fe_{0.16}Si_{0.84}$(CMFS)磁性多層膜における$E_f$近傍のスピン分解計測スペクトルを図4に示す。総じてS/Nは低いものの、第一原理計算で求めた特徴的な構造($E\text{-}E_f$ ：−2.0 eV近傍)に一致を示しており、E_f近傍スピン偏極度に関して議論している[5]。さらなる高検出効率化が求められるが、今後、直接スピン偏極を解明する実験手法として、ホイスラー合金界面での磁性多層膜研究やTMR素子を用いた実磁性デバイス材料開発の強力なツールになると期待される。

参考文献

[3] 池永英司: 2014年度SPring-8・SACLA年報(2015) 48-49.
[4] G. Stryganyuk, *et. al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, (2012) 016602.
[5] X. Kozina, E. Ikenaga, *et. al.*: *J. Electron Spectrosc. and Relat. Phenom.* **211**, (2016) 12-18.

利用研究促進部門
応用分光物性グループ
池永　英司