

# 次世代放射光

## ナノ光電子分光ワークショップ 2019

### 講演集



日時: 2019年10月2日(水)

場所: 東京大学本郷キャンパス山上会館大会議室

主催: 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門 次世代放射光整備開発センター

協賛: 日本放射光学会、日本表面真空学会



# 次世代放射光 ナノ光電子分光ワークショップ2019

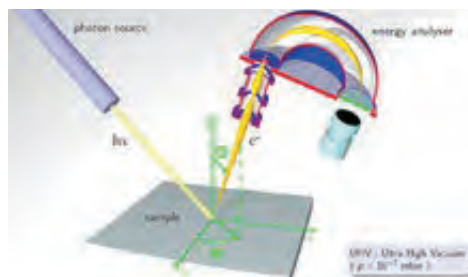
1. 場所: 東大本郷キャンパス山上会館2F大会議室
2. 日時: 2019年10月2日(水)13時~17時
3. 参加費: 無料
4. 主催: 量子科学技術研究開発機構 (QST)  
次世代放射光施設整備開発センター
5. 協賛: 日本表面真空学会、日本放射光学会

## プログラム

- 13:00~ Opening Address: WS趣旨説明 (東大・尾嶋正治)
- 13:10~ 高輝度3GeV放射光の特徴と光源性能 (QST・高橋正光)
- 13:30~ ナノスピン分解電子状態解析:サイエンスとビームライン提案 (東北大・佐藤宇史、KEK・堀場弘司)
- 14:20~ スピン分解光電子分光の動向 (広大・奥田太一)
- 14:50~ ナノARPESの研究動向 (広大・岩澤英明)
- 15:20~ 休憩
- 15:40~ QSTにおけるスピントロニクス材料研究の展開 (QST高崎・境誠司)
- 16:10~ レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓 (東大物性研・近藤猛)
- 16:40~ パネル討論
- 16:55~ Concluding Remarks



次世代放射光施設のイメージ図



本件連絡先: 加道雅孝  
(QST次世代センター)  
3GeV-info@qst.go.jp



## もくじ

WS 趣旨説明	東京大学・尾嶋正治	1
高輝度 3GeV 放射光の特徴と光源性能	量子科学技術研究開発機構・高橋正光	6
ナノスピン分解電子状態解析:サイエンスとビームライン提案	東北大学・佐藤宇史	17
	高エネルギー加速器機構・堀場弘司	27
スピン分解光電子分光の動向	広島大学・奥田太一	33
ナノ ARPES の研究動向	広島大学・岩澤英明	49
QST におけるスピントロニクス材料研究の展開	量子科学技術研究開発機構・境誠司	60
レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓	東京大学物性研究所・近藤猛	74
ミラーナノ集光系に対する準備	東京大学物性研究所・松田勲	106
資料		108

**WS 趣旨説明**  
**東京大学・尾嶋正治**

# 次世代放射光 ナノ光電子分光ワークショップ2019

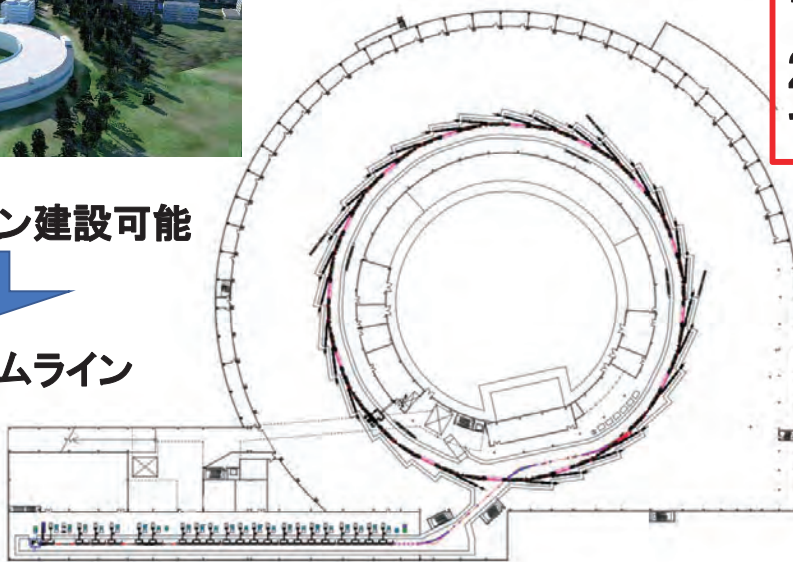
QSTナノ光電子分光WG主査 尾嶋正治(東京大学物性研)



26本ビームライン建設可能



10本先行ビームライン



問われる視点

1. 世界最先端か?
2. ニーズとシーズのマッチングは?

Storage ring  
周長349 m

## 次世代放射光施設QSTビームライン ナノ光電子分光

名称	ビームライン	光源	照射器	エネルギー	エネルギー分散	波長	実験内容	対象物質
第1期	BL-VIII	軟X線ナノ光電子分光	APPLE-EUV	0.05-1.0 keV (5.0 eV FWHM) 0.05-1.0 keV (水平線維) 0.05-1.0 keV (垂直線維)	E/ΔE=10,000-30,000	50 nm-10 μm	A 1. ナノ全電子状態解析 (ナノスピンの分解光電子分光) 2. ナノ電子状態解析 (ナノ光電子分光) B 1. 電子状態解析 (マイクロ集光角分解光電子分光) 2. 光電子顕微鏡	1. ナノスピントロニクス 2. 量子コンピュータ 3. 固体物理学
	BL-IX	軟X線ナノ分光	APPLE-SX (segmented)	0.10-2 keV (5.0 eV FWHM) 0.13-2 keV (水平線維) 0.18-2 keV (垂直線維) 【偏光高選択型】	E/ΔE>10,000	50 nm-10 μm	A 1. ハイスループット計測 (X線吸収分光, X線磁気円二色性, X線磁気線二色性, X線線二色性) 2. ダイナミクス計測 (X線強磁性共振) 3. ナノ磁性イメージング (線形X線磁気円二色性, 線形X線磁気線二色性, 線形X線磁気光学カー効果) B 1. そのほか磁気計測 (X線吸収分光, X線磁気円二色性, X線磁気線二色性, X線線二色性)	1. 磁石材料 2. 軟磁性材料 3. 電気記録材料 4. スピントロニクス 5. 固体物理学
	BL-X	軟X線超高分解能共振分光	APPLE-SX	0.25-1.0 keV (5.0 eV FWHM) 0.25-1.0 keV (水平線維) 0.25-1.0 keV (垂直線維)	E/ΔE>150,000	< 500 nm	1. 超精密光電子状態解析 (超高分解能共振分光) 2. 固体内部励起状態解析 (超高分解能共振分光) 3. 固液・固気界面反応解析 (超高分解能共振分光) 4. ナノ構造・電子状態同時解析 (超高分解能共振分光)	1. エレクトロニクス 2. 材料 3. 固体物理学 4. 触媒 5. 電池

ビームライン検討委員会(有馬委員会)報告書より

tentativeだがすでに2本ブランチになっている。



米、英、仏、伊など世界の放射光施設では、ナノARPESがすでに稼働・活躍している。

# 次世代放射光施設QSTビームライン ナノ光電子分光関係で2件応募提案

P-01

次世代放射光施設ビームラインに関する意見提出 様式1(ビームライン提案用)

平成 31 年 2 月 15 日	
提案ビームライン タイトル	ナノ集光スピン分解ARPES実験ステーション
提案者名称 (個人または組織名)	
代表者	氏名:堀場弘司 <b>堀場弘司(KEK)</b>
	所属(身分):高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所(准教授)

P-02

次世代放射光施設ビームラインに関する意見提出 様式1 (ビームライン提案用)

平成 31 年 2 月 15 日	
提案ビームライン タイトル	先端材料開発のためのナノスピン電子状態解析ビームライン
提案者名称 (個人または組織名)	
代表者	氏名:佐藤 宇史 <b>佐藤宇史(東北大)</b>
	所属(身分):東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻(教授)

2019年7月30日  
第1回ナノ光電子分  
光WGで議論

提案者(堀場氏、佐  
藤氏)が話し合っ  
て1つの提案とす  
ることを了承

## 【参考資料】財団ビームライン

## 初期整備ビームラインリスト

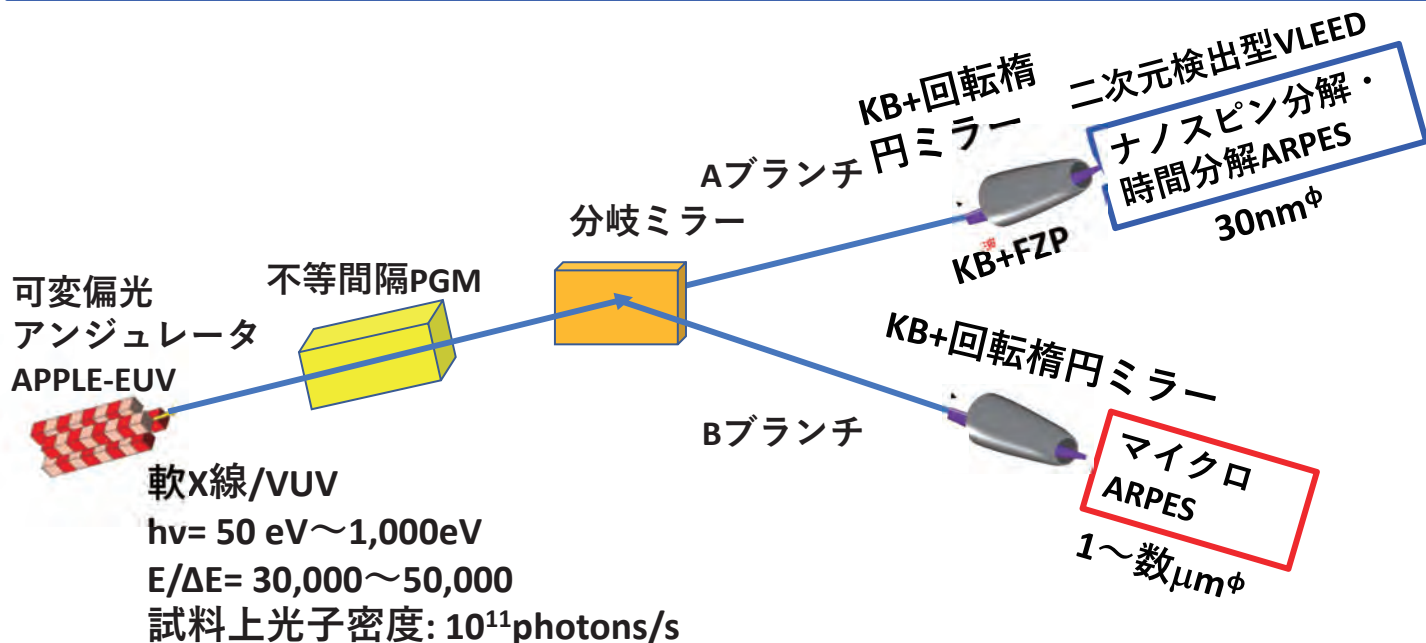
ビームライン	装置	ビームサイズ	特徴	対応される利用分野
BL-I	X線オペランド分光 <b>X線オペランド分光</b>	100 nm	1. オペランド電子状態解析(大入射X線光電子分光、大入射X線吸収分光) 2. 物質内部電子状態(軟X線光電子分光)	1. 触媒 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス 5. ナノ材料 6. エネルギー材料
BL-II	X線構造・電子状態トータル解析 <b>X線構造・電子状態トータル解析</b>	50 μm	1. オペランド電子状態解析(大入射X線吸収分光、エレクトロニクスX線吸収分光) 2. 化学状態解析(メソスコピックX線吸収分光)	1. 触媒 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス
BL-III	X線階層的構造解析 <b>X線階層的構造解析</b>	50 μm	1. オペランド電子状態解析(大入射X線吸収分光、エレクトロニクスX線吸収分光) 2. 化学状態解析(メソスコピックX線吸収分光)	1. 触媒 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス
BL-IV	X線コヒーレントイメージング <b>X線コヒーレントイメージング</b>	50 μm (非重畳) 100 nm (重畳)	1. 元素・化学状態マップ(非重畳) 2. 元素・化学状態マップ(重畳)	1. 触媒 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス
BL-V	軟X線磁気イメージング <b>軟X線磁気イメージング</b>	< 50 nm	1. 磁気構造解析(磁気トモグラフィ) 2. 磁気構造解析(X線磁気トモグラフィ)	1. 触媒 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス
BL-VI	軟X線電子状態解析 <b>軟X線電子状態解析</b>	< 50 nm	1. ナノ化学・電子状態解析(大入射X線光電子分光)	1. ナノ材料 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス
BL-VII	軟X線オペランド分光 <b>軟X線オペランド分光</b>	< 50 nm	1. オペランド電子状態解析(大入射X線光電子分光、大入射X線吸収分光) 2. 物質内部電子状態(軟X線光電子分光)	1. 触媒 2. 電池 3. 薄膜エレクトロニクス 4. エレクトロニクス

ビームライン検討委員会(有馬委員会)報告書より

# BL-8ナノ光電子分光ビームライン(叩き台)

## 基本的考え方(私見)

1. スピン分解ARPESは1台で十分
2. High-throughputマイクロARPES(オペランド化:外場依存バンド分散解析)
3. 集光系は回転楕円ミラー(東大院工・三村研)の開発待ち?
4. フォトンエネルギー範囲:30eVまでは困難⇒50eV~1keVにする

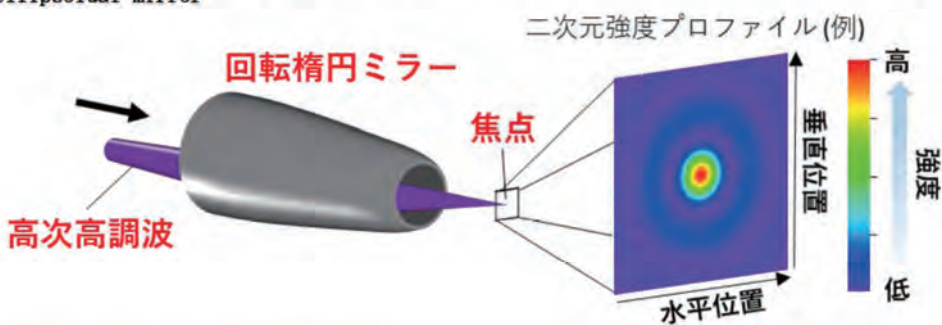


## 「東大、高精度な回転楕円ミラーを用いた軟X線集光システムを開発」:2019年6月18日新聞発表

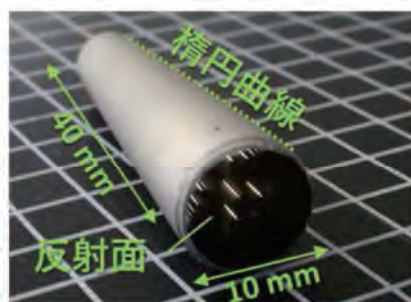
雑誌名: 「Applied Physics Letters」 (オンライン版:6月17日)

論文タイトル: Broadband nano-focusing of high-order harmonics in soft X-ray region with ellipsoidal mirror

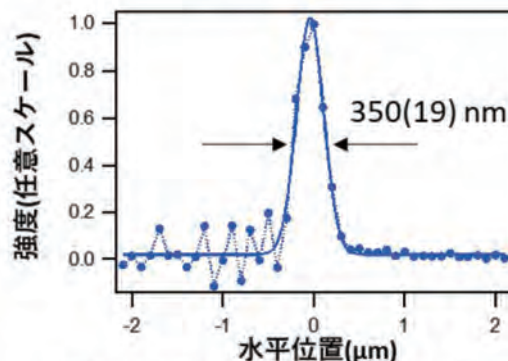
三村 秀和准教授(東大院工精密工学専攻)



SPring-8 BL25SU  
で150nm達成?



実験に使用した回転楕円ミラー



水平方向に計測した集光ビームの強度プロファイル



# 次世代放射光 ナノ光電子分光ワークショップ2019

1. 場所: 東大本郷キャンパス山上会館2F大会議室
2. 日時: 2019年10月2日(水)13時~17時
3. 参加費: 無料
4. 主催: 量子科学技術研究開発機構 (QST) 次世代放射光施設整備開発センター
5. 協賛: 日本放射光学会、日本表面真空学会

## プログラム

- |        |                              |                     |
|--------|------------------------------|---------------------|
| 13:00~ | Opening Address: WS趣旨説明      | (東大・尾嶋正治)           |
| 13:10~ | 高輝度3GeV放射光の特徴と光源性能           | (QST・高橋正光)          |
| 13:30~ | ナノスピン分解電子状態解析:サイエンスとビームライン提案 | (東北大・佐藤宇史、KEK・堀場弘司) |
| 14:20~ | スピン分解光電子分光の動向                | (広大・奥田太一)           |
| 14:50~ | ナノARPESの研究動向                 | (広大・岩澤英明)           |
| 15:20~ | 休憩                           |                     |
| 15:40~ | QSTにおけるスピントロニクス材料研究の展開       | (QST高崎・境誠司)         |
| 16:10~ | レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓      | (東大物性研・近藤猛)         |
| 16:40~ | 総合討論とまとめ                     |                     |

**高輝度 3GeV 放射光の特徴と光源性能  
量子科学技術研究開発機構・高橋正光**

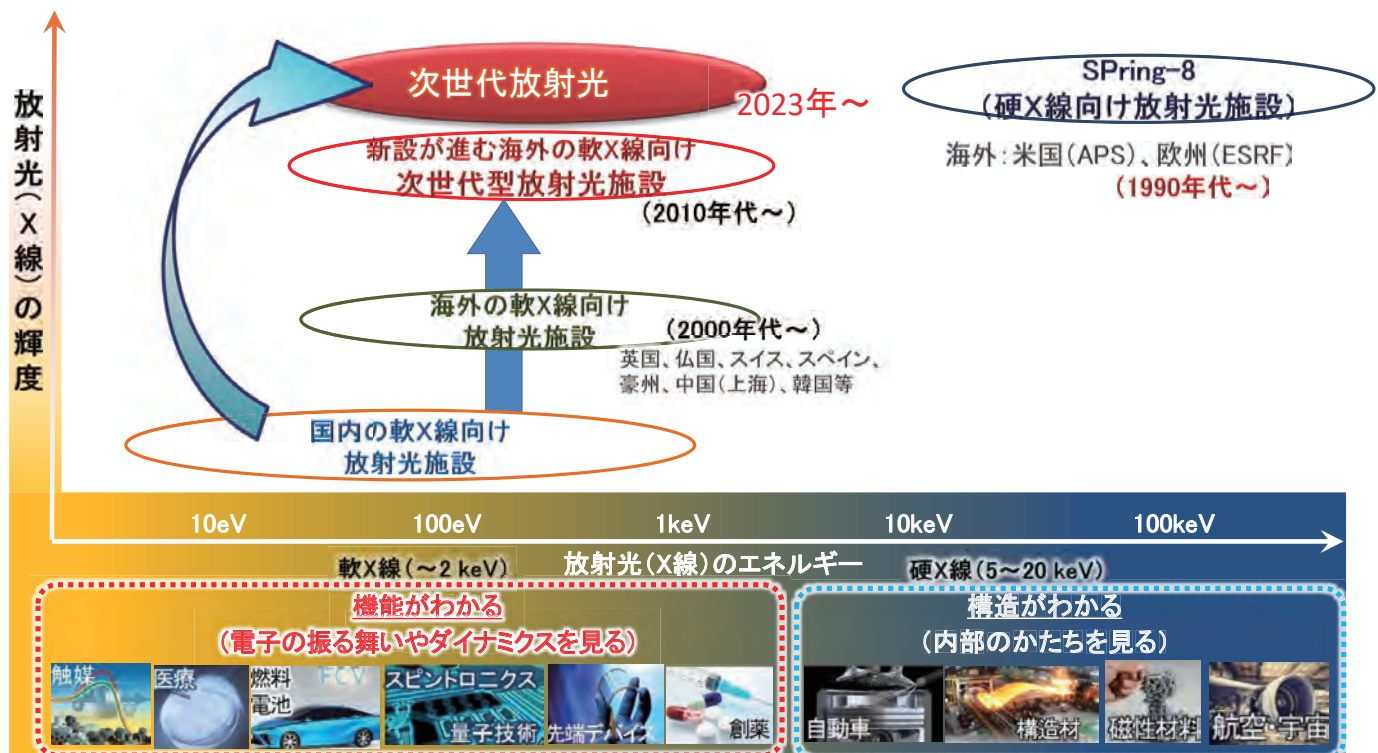
# 高輝度放射光の特徴と光源性能

量子科学技術研究開発機構  
次世代放射光施設整備開発センター  
高橋正光

## 概要

1. 次世代放射光施設計画の経緯
2. 次世代放射光施設の特徴
  - 基本建屋
  - 加速器
  - 光源
3. 今後のスケジュール

# 次世代放射光の位置付け



## これまでの経緯

年月	国	東北
2011		東北放射光施設検討会有志による放射光施設構想の趣意書
2014		東北放射光施設推進協議会設立 名称: SLiT-J
2016. 6		SLiT-J国際評価委員会
11	文科省第1回「量子ビーム利用推進小委員会」	
12		光科学イノベーションセンター設立
2017. 2	量子ビーム小委員会中間的整理	
4		建設地選定諮問委員会が「東北大学青葉山新キャンパス」を最適地であると光科学イノベーションセンターに答申
7	量研を「計画案の検討を行う」主体候補」に認定	
2018. 1	量子ビーム小委員会最終報告書、パートナー提案募集開始	パートナー公募に応募
8	光科学イノベーションセンター(代表機関)、宮城県、仙台市、東北大学、東経連がパートナーとして選定	
9	量研と光科学イノベーションセンターが、連携協力協定締結	
12	政府予算案に整備費計上	
2019. 3	量研を「整備・運用を進める国の主体」に指名	

東北のSLiT-J計画から、官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設計画へ

## 官民地域パートナーシップ 整備役割分担

項目	内訳	試算額	役割分担
加速器	ライナック、蓄積リング、輸送系、制御・安全	約170億円 程度	国において整備
ビームライン	当初10本 (パートナーは最大7本)	約60億円 程度 (パートナーは最大約40億円程度)	国及びパートナーが分担
用地整備 および建屋	建物・附属設備	約130億円 程度	パートナーが整備

総額: 約370億円 (国負担: 約200億円、パートナー負担: 約170億円)

## 官民地域パートナーシップ 整備役割分担

項目	内訳	試算額	役割分担
加速器	ライナック、蓄積リング、輸送系、制御・安全	約170億円 程度	国において整備
ビームライン	当初10本 (パートナーは最大7本)	約60億円 程度 (パートナーは最大約40億円程度)	国及びパートナーが分担
用地整備 および建屋	建物・附属設備	約130億円 程度	パートナーが整備

総額: 約370億円 (国負担: 約200億円、パートナー負担: 約170億円)

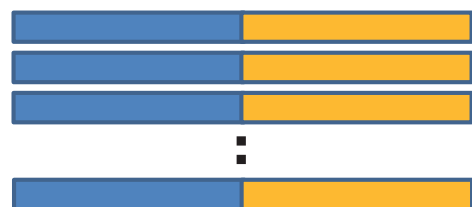
### ビームタイム配分のイメージ

国が共用法に基づき  
整備する共用ビーム  
ライン  
(3本)



■ 共用ビームタイム  
(原則として、課題公募、  
成果公開に基づく)

パートナーが整備する  
ビームライン  
(専用ビームライン)  
(7本)



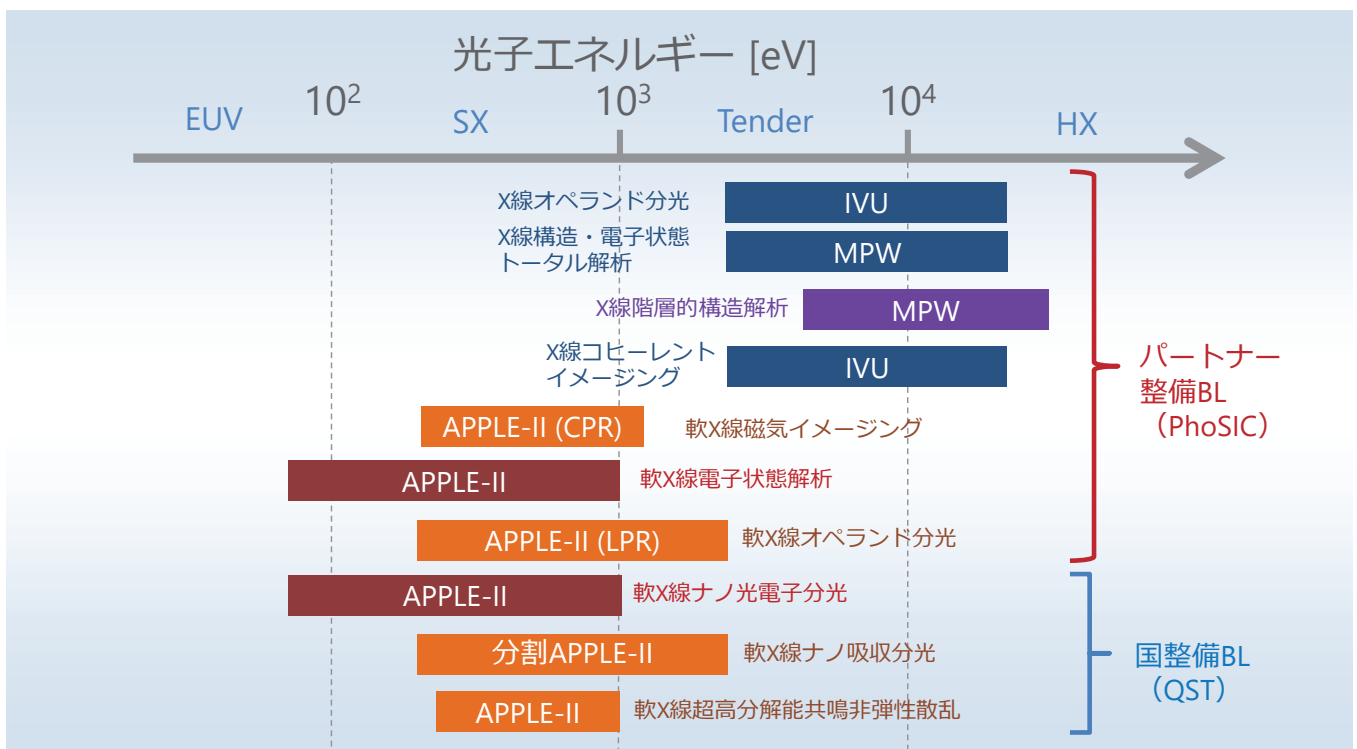
■ コリジョンコンセプトに基づき、  
パートナー機関が自主運用

# 第1期整備ビームライン決定まで

年月	国	東北
2016.11		東北放射光施設計画 (SLiT-J) エンドステーション・デザインコンペ公開シンポジウム
2017. 7		東北放射光施設計画 (SLiT-J) エンドステーション・デザインコンペ答申
12	高輝度放射光源とその利用に係る整備運用計画案	
2018. 1	新たな軟X線向け高輝度3GeV級放射光源の整備等について (量子ビーム小委員会報告書)	
8		ビームライン構想委員会 (委員長 有馬孝尚 東京大学教授)
12	ビームライン検討委員会 (委員長 有馬孝尚 東京大学教授)	
2019.6	次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書(1) —第1期整備ビームラインラインアップ— <a href="https://www.3gev.qst.go.jp/">https://www.3gev.qst.go.jp/</a>	

7

## 第1期整備ビームライン



「ビームライン構想委員会」(PhoSIC)、「次世代放射光施設利用研究検討委員会」(QST)において、今後、各ビームラインにおける利用研究の詳細やエンドステーションの仕様等を検討するとともに、ビームラインの基本設計を開始する。

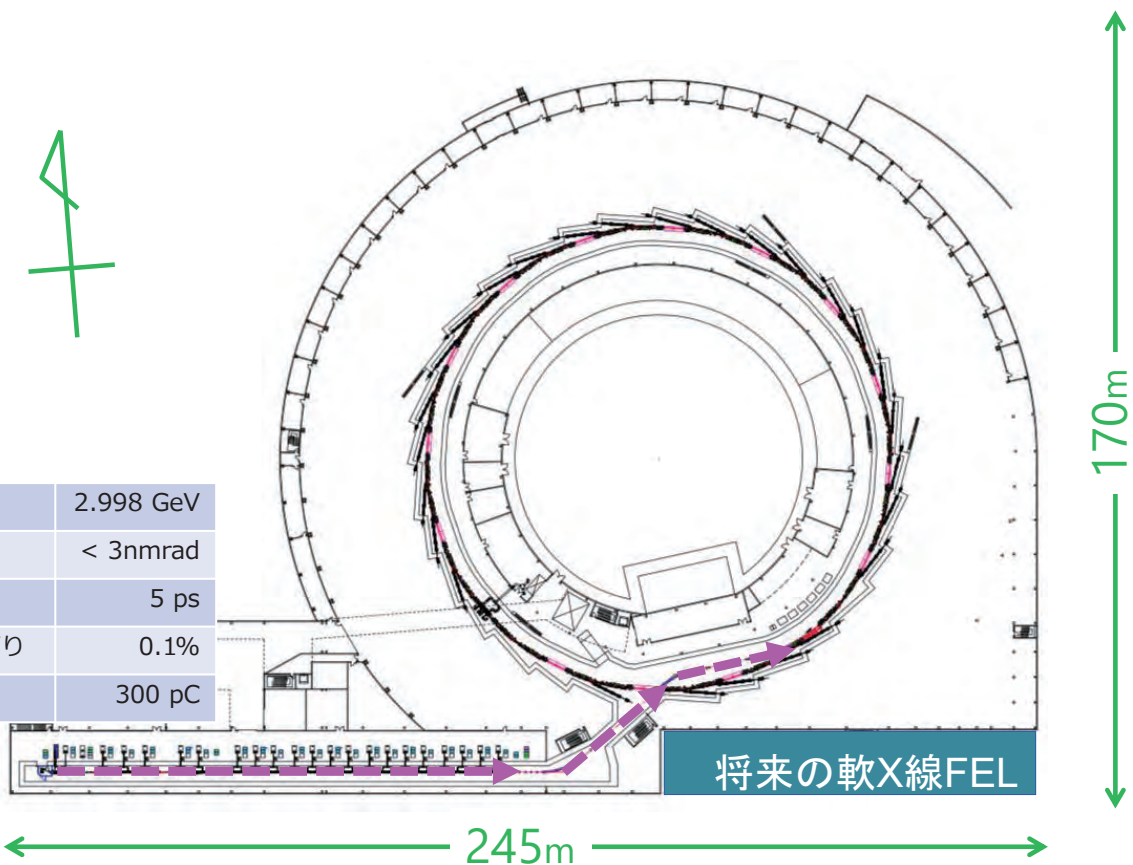
# 次世代放射光施設の立地



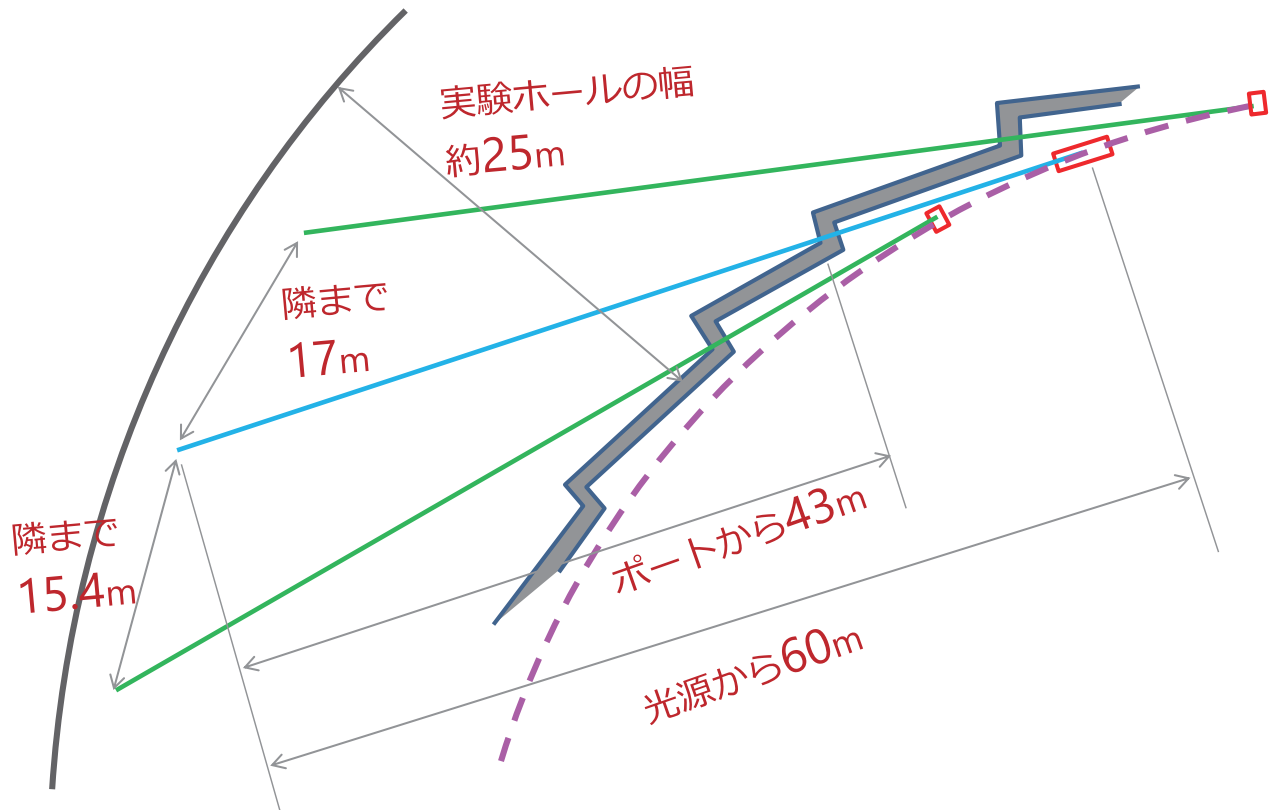
# 次世代放射光施設の概要

## 線型加速器

電子エネルギー	2.998 GeV
エミッタンス	< 3nmrad
バンチ長	5 ps
エネルギー広がり	0.1%
電荷量	300 pC



# 実験ホールの概要



# 蓄積リングのパラメータ

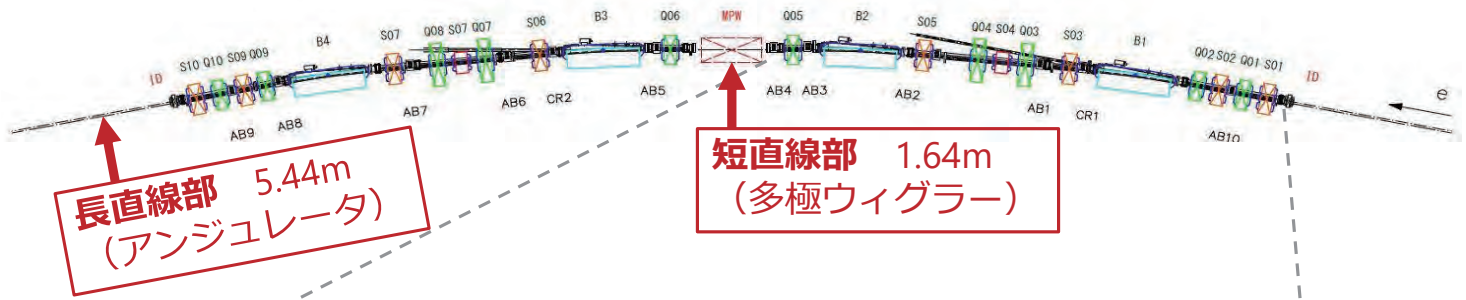
Lattice parameter		次世代放射 光施設	MAX-IV	TPS	NSLS-II	DIAMOND
Beam energy	E (GeV)	3	3	3	3	3
Lattice structure		4BA	7BA	DBA	DBA	DBA
Circumference	C (m)	348.8	528	518.4	792	561.6
Number of cells	$N_s$	16	20	24	30	24
Long straight section	(m)	$5.44 \times 16$	$4.6 \times 19$	$12 \times 6$	$9.3 \times 15$	$8 \times 4$
Short straight section	(m)	$1.64 \times 16$		$7 \times 18$	$6.6 \times 15$	$5 \times 18$
Natural horizontal emittance	(nmrad)	1.14	0.2-0.33	1.6	0.55	3.17
RF frequency	(MHz)	508.759	99.931	499.654	500	500
Harmonic number	h	592	176	864	1320	936
Beam size at long straight section	$\sigma_x/\sigma_y$	121 / 5.8	42-54 / 2-4	165.1 / 9.8	99 / 5.5	110-190 / 3-7

## 次世代放射光施設の特徴

1. コンパクトな加速器
2. コヒーレント比 > 10% @ E=1keV を実現する低エミッタンス
3. SPring-8 と同程度の長さの挿入光源



# 次世代放射光施設の蓄積リング



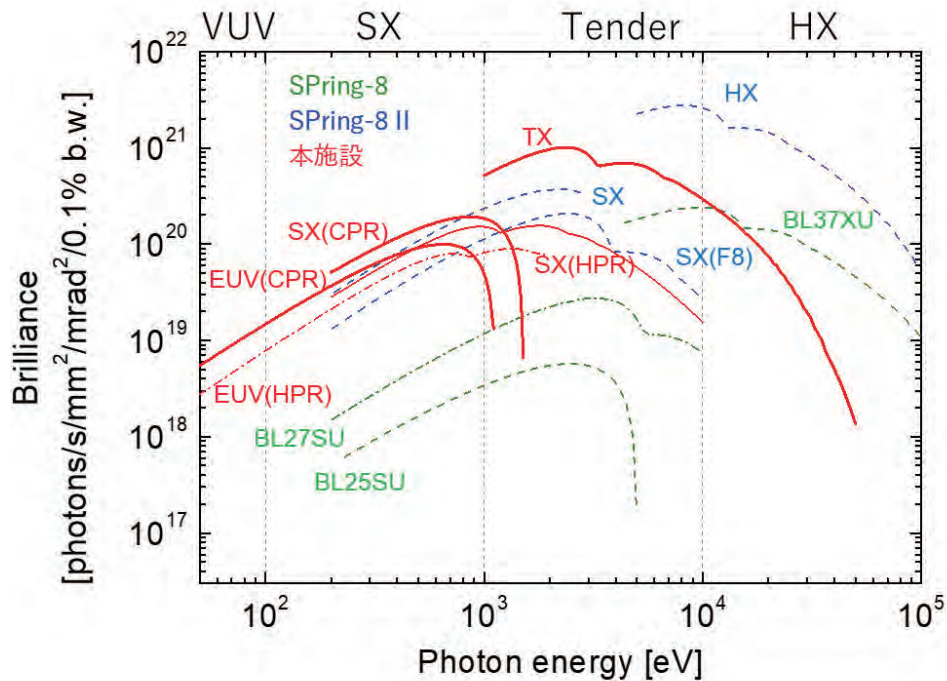
次世代放射光施設蓄積リングの試験ハーフセル (SPring-8実験ホールにて試験中)

## 挿入光源のラインアップ

- 必要とされる光の特性 (光子エネルギー、偏光)
- 蓄積リングの電子ビーム軌道への影響
- 立ち上げ・運用の合理化とビームライン更新の円滑化

エネルギー範囲	種類	偏光	周期長 (mm)	周期数
テnder-X線	真空封止 平面アンジュレータ	水平直線	22	190
軟X線 - VUV	APPLE-II	水平直線 垂直直線 左右円 (準静的可変)	56	75
		クrossアンジュレータ (APPLE-II×4)	56	15
白色	多極ウィグラー	水平直線	120	5

# 次世代放射光源の輝度スペクトル

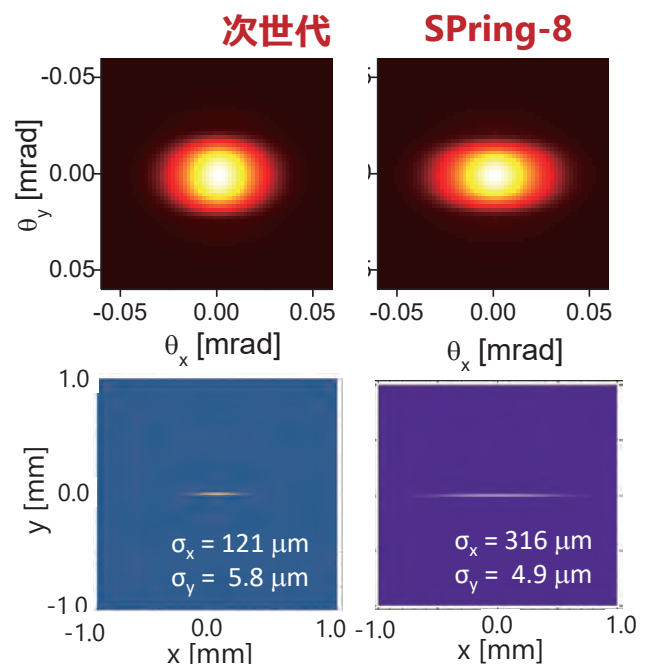
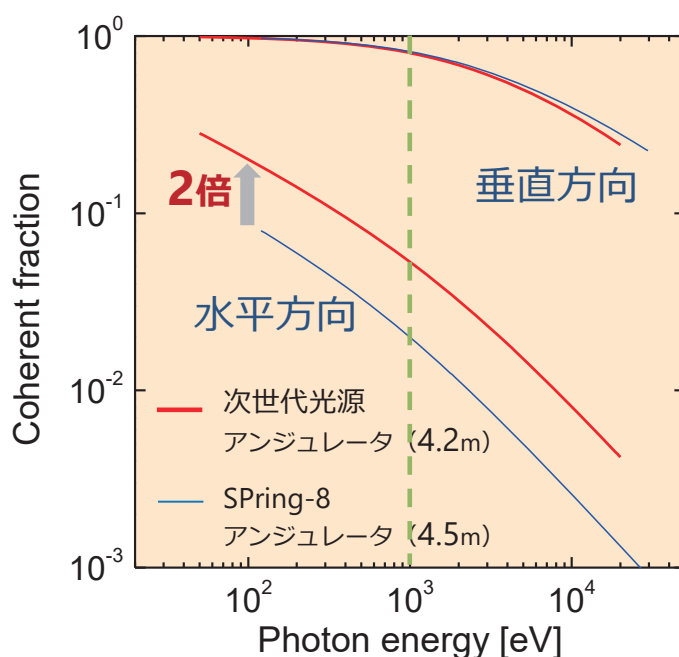


- 軟X線の輝度はSPring-8の数十倍
- テンダーX線の輝度はSPring-8 IIと比べても優位

軟X線～テンダーX線のナノビーム・コヒーレンス利用に強み

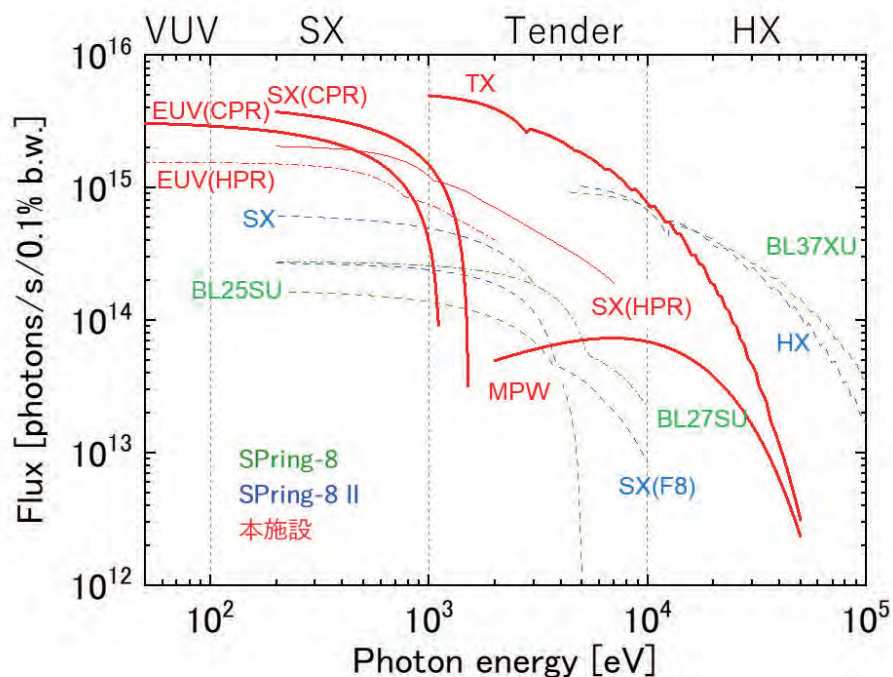
## コヒーレント性

$$(\text{コヒーレント比}) = \frac{(\text{回折による光の広がり})}{(\text{ビーム全体の広がり})} \rightarrow \text{イメージング, ナノ集光などへの応用で重要}$$



次世代放射光は軟X線～テンダーX線領域のコヒーレント光源

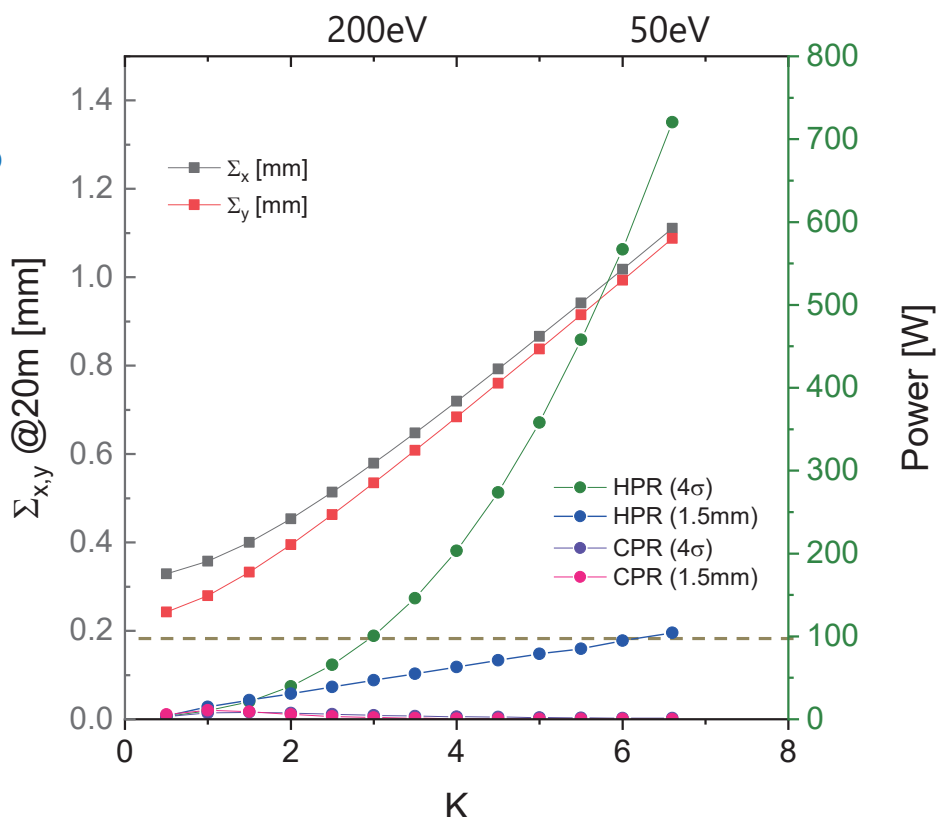
# 次世代放射光源のフラックススペクトル



- 軟X線、テンドーX線のフラックスは将来にわたり優位性  
エネルギー  $E < 5\text{keV}$  の光子フラックス利用にも強み

## 直線偏光VUV領域の熱負荷

APPLE-II  
75mm x 56



- 直線偏光モードでは、 $E < 200\text{eV}$  では熱負荷が急激に増大
- 円偏光モードでは軸上の熱負荷は小さい

# 建設スケジュール



ナノスピン分解電子状態解析:サイエンスとビームライン提案  
東北大学・佐藤宇史、高エネルギー加速器機構・堀場弘司

# ナノspin分解電子状態解析 サイエンスとビームライン提案

東北大学材料科学高等研究所  
佐藤宇史

## Material science and ARPES

エレクトロニクス



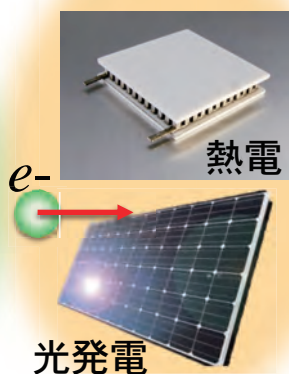
meV - eV

磁性



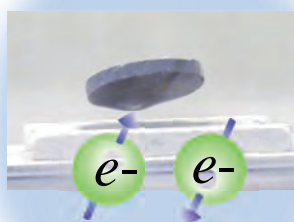
meV - eV

エネルギーデバイス

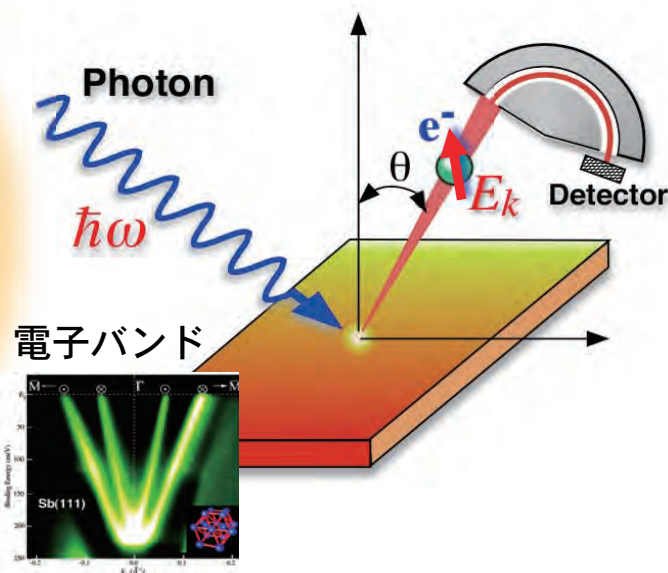


μeV - meV

超伝導



μeV - meV



- ・ 流れる電子 ( $k$ )
- ・ 単一電子の応答 ( $E$ )
- ・ 磁性の最小単位 ( $S_{x,y,z}$ )

# History of PES and ARPES

year 1887 1905 ~1950-1980 1986 1990 1995 1999- 2000 2008 2010 Present

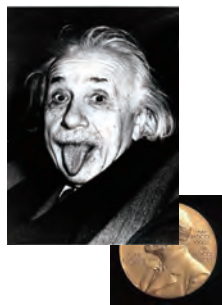
**H. R. Hertz**

電磁波の発見  
光電効果の観測



**A. Einstein**

光量子仮説

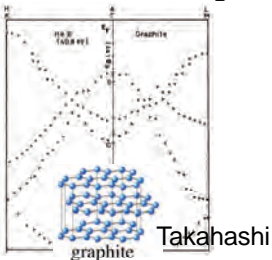


**K. Siegbahn**



1981 ノーベル賞

高分解能  
光電子分光の開発

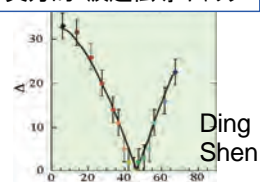


銅酸化物  
高温超伝導

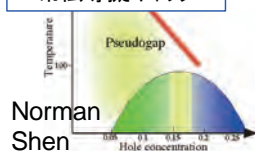
大きなフェルミ面



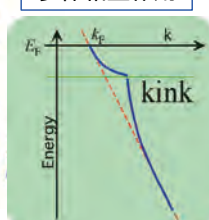
異方的な $d$ 波超伝導ギャップ



常伝導擬ギャップ

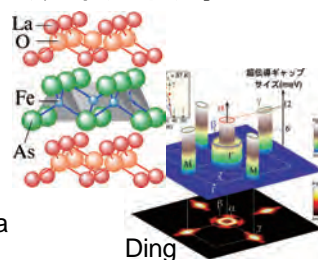


多体相互作用



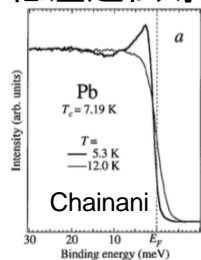
Valla, Lanzara

鉄系超伝導



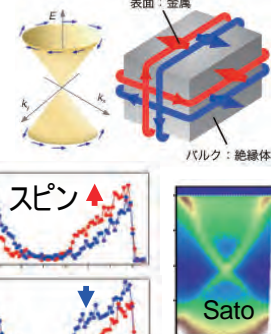
Ding

低温超伝導

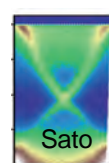


レーザー光沢  
Kiss

トポロジカル絶縁体



スピン



エネルギー分解能	1 eV	~100 meV	30-20 meV	10 meV	1 meV	Sub-meV
スピン検出	モット検出器 ベータ崩壊	スピン分解PES Hoster, Raue 磁性体 Ni 1983	Rashba Au(111) LaShell 1996 (スピン非分解)		Osterwalder 2004	Kirschner 2015

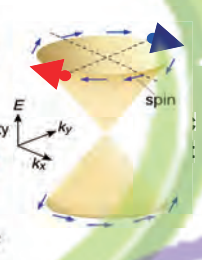
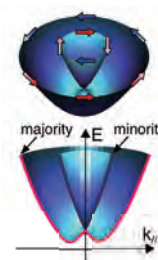
## Advancing spectroscopies for material studies

**Spin**

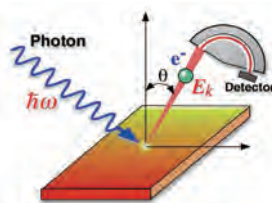
強磁性体  
交換分裂



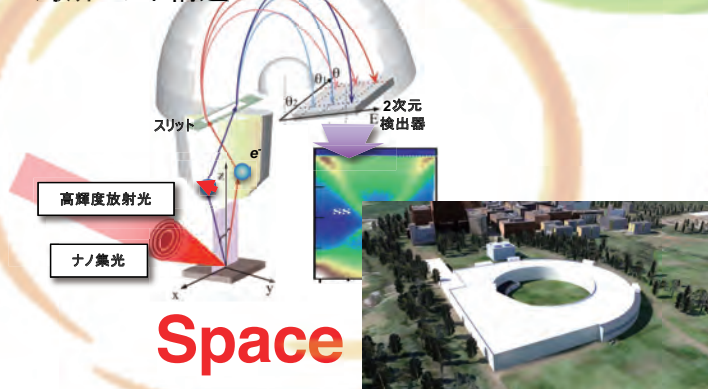
Rashba TI  
スピントクスチャ



**ARPES**

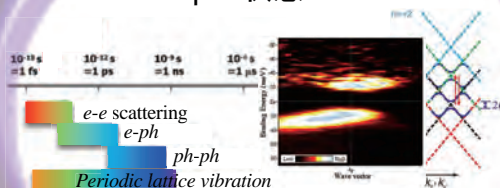


局所バンド構造



**Space**

緩和過程  
 $E_F$ より上のバンド構造  
Floquet状態



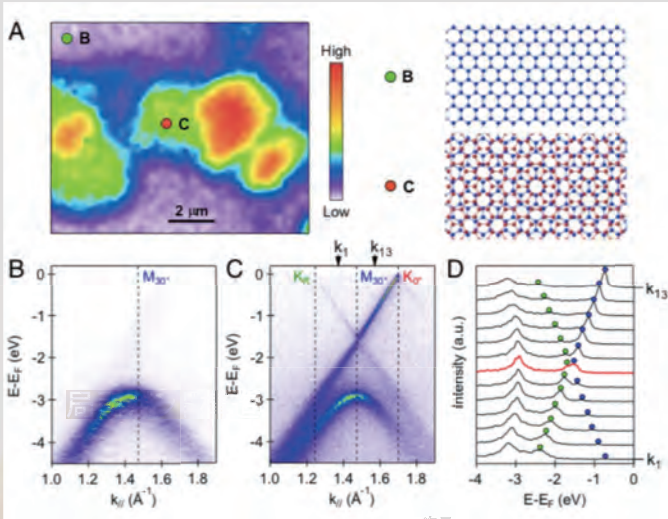
二光子光電子分光

**Time**

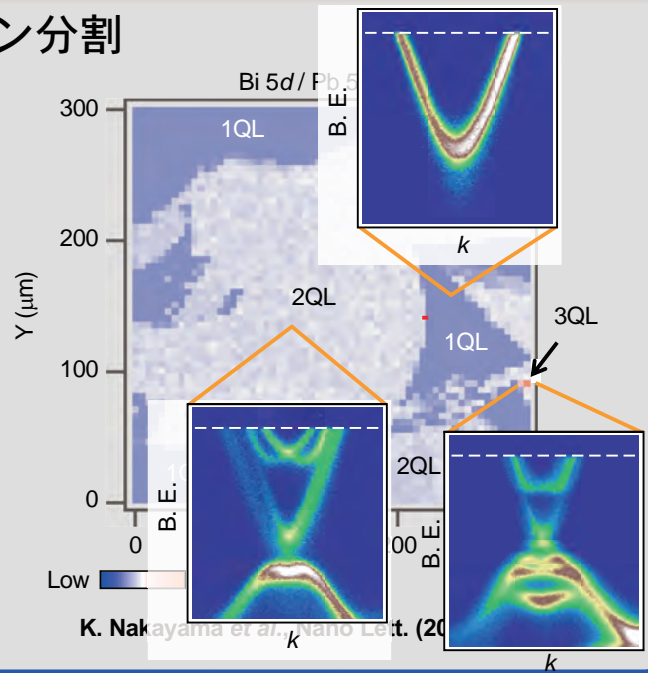
# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Domain selection

## ドメイン分割

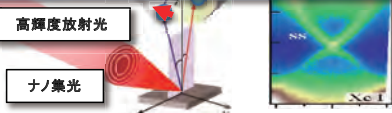
30° twisted bi-layer graphene



W. Yao *et al.*, PNAS (2018).



K. Nakayama *et al.*, Nano Lett. (2018)



Space

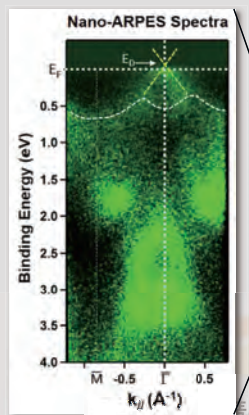
### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

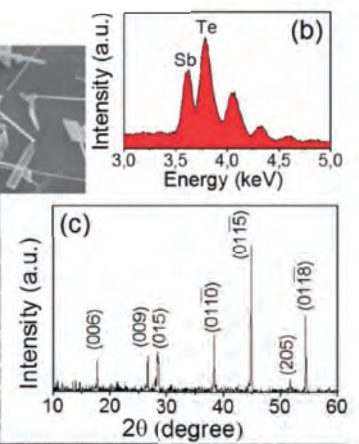
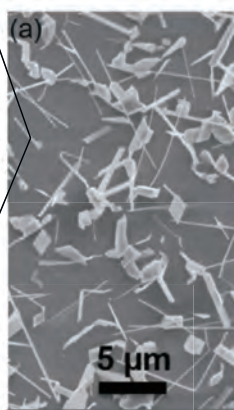
# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Target samples

## ナノワイヤ

トポロジカル絶縁体



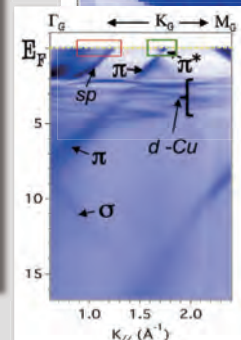
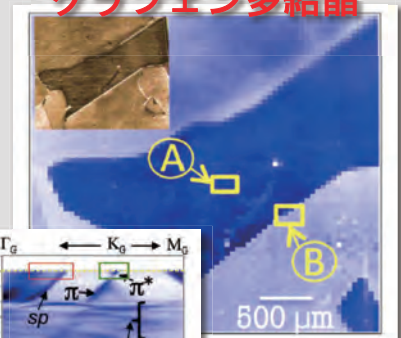
$Sb_2Te_3$



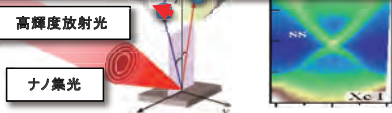
Y. C. Arango *et al.*, Sci. Rep. (2016).

## 多結晶

グラフェン多結晶



J. Avila *et al.*, Sci. Rep. (2013).



Space

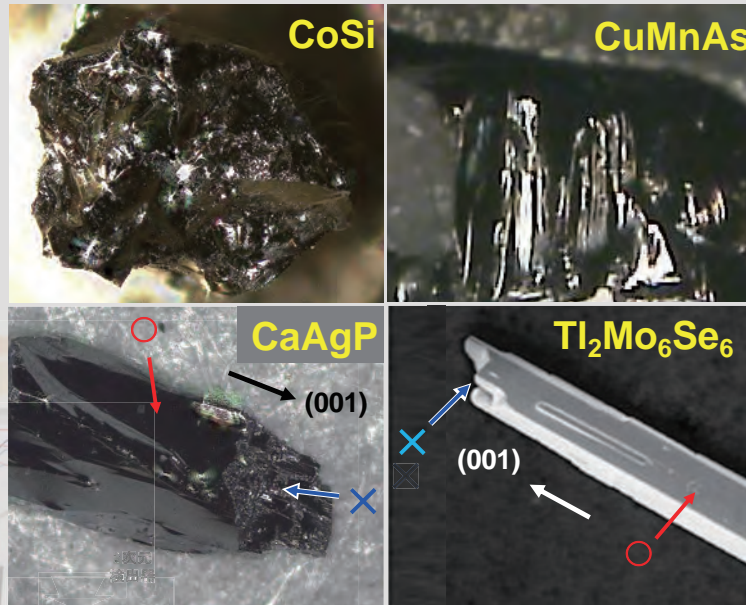
### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定



# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Target samples

## 劈開困難(凸凹表面)試料



局所バンド構造

スリット

高輝度放射光

ナノ集光

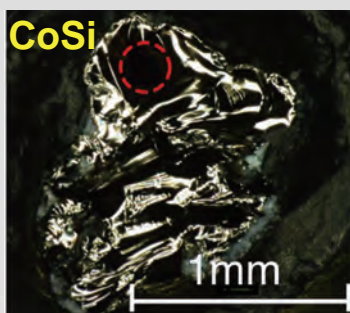
Space

### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Target samples

## 劈開困難(凸凹表面)試料



D. Takane et al., PRL (2019).

局所バンド構造 Physics Synopsis

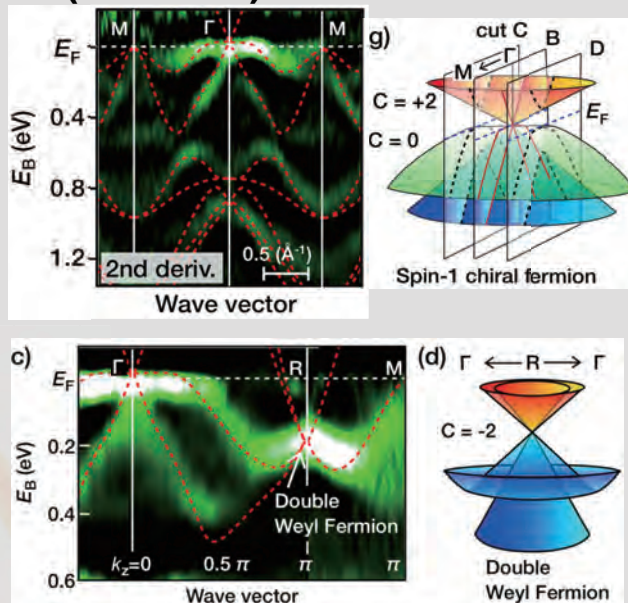
スリット

2次元検出器

高輝度放射光

ナノ集光

Space

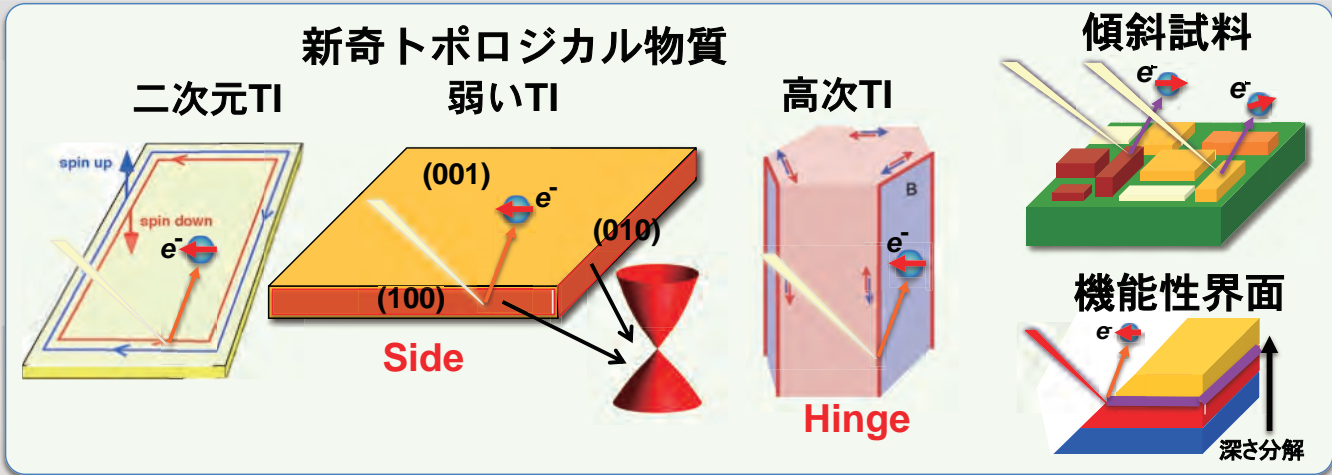


### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Target samples

## さらなる対象拡大



超微小単結晶 (新物質), 粉体, 不均一試料...

サイエンス: 新準粒子探索, 超伝導/トポロジカル物質開拓, 原子層機能化...



Space

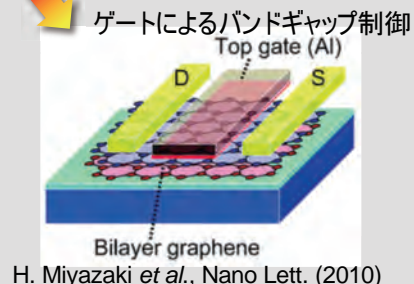
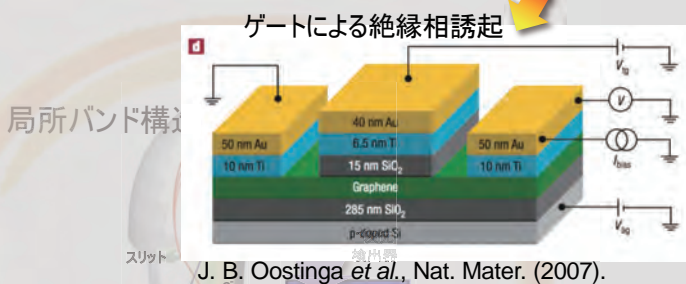
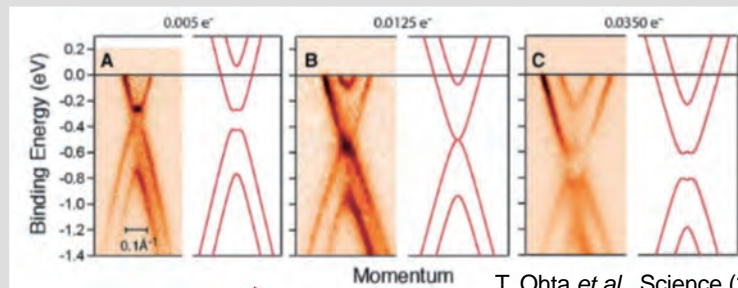
### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Device analysis

## 電子状態観察からデバイスへの発展

2層グラフェン表面へのK蒸着  
バンドギャップ開閉制御



Space

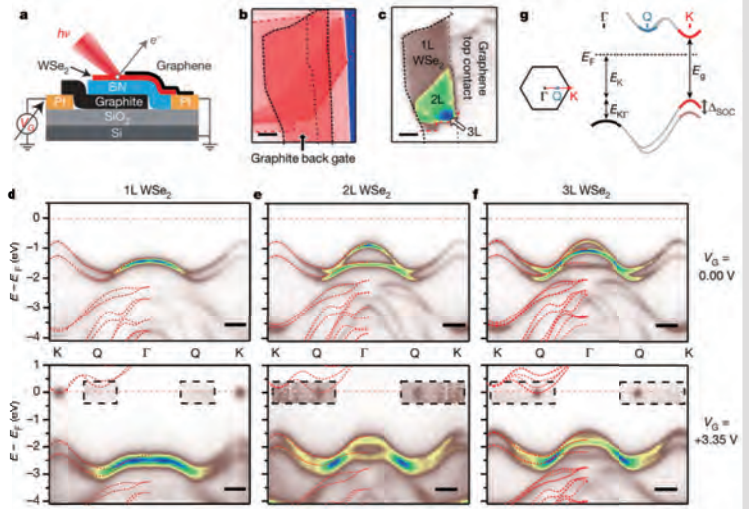
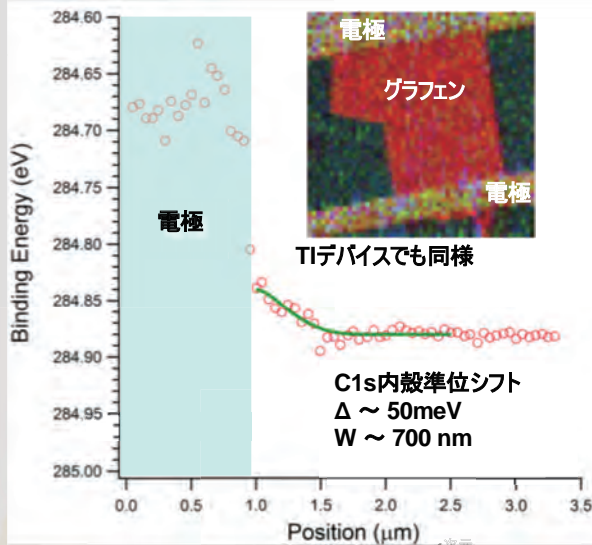
### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Device analysis

## 空間分解バンドプロフィール

## 原子層ゲート制御バンド調整



堀場, 尾嶋, 表面科学 (2013).

P. V. Nguyen *et al.*, Nature (2019).



Space

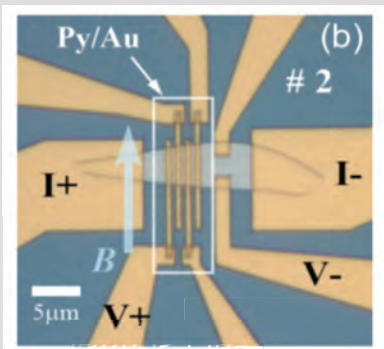
### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Device analysis

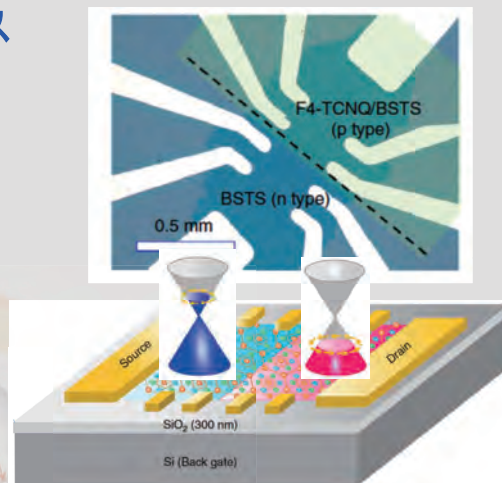
## 多岐にわたるデバイスの動作原理解明・性能向上

### トポロジカルスピンデバイス



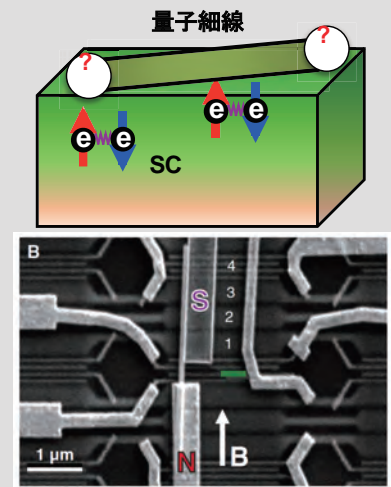
Yang *et al.*, PRB (2016).

### トポロジカルP/N接合デバイス



N. H. Tu *et al.*, Nat. Commun. (2016).

### マヨラナ検出デバイス



Mourik *et al.*, Science (2012).

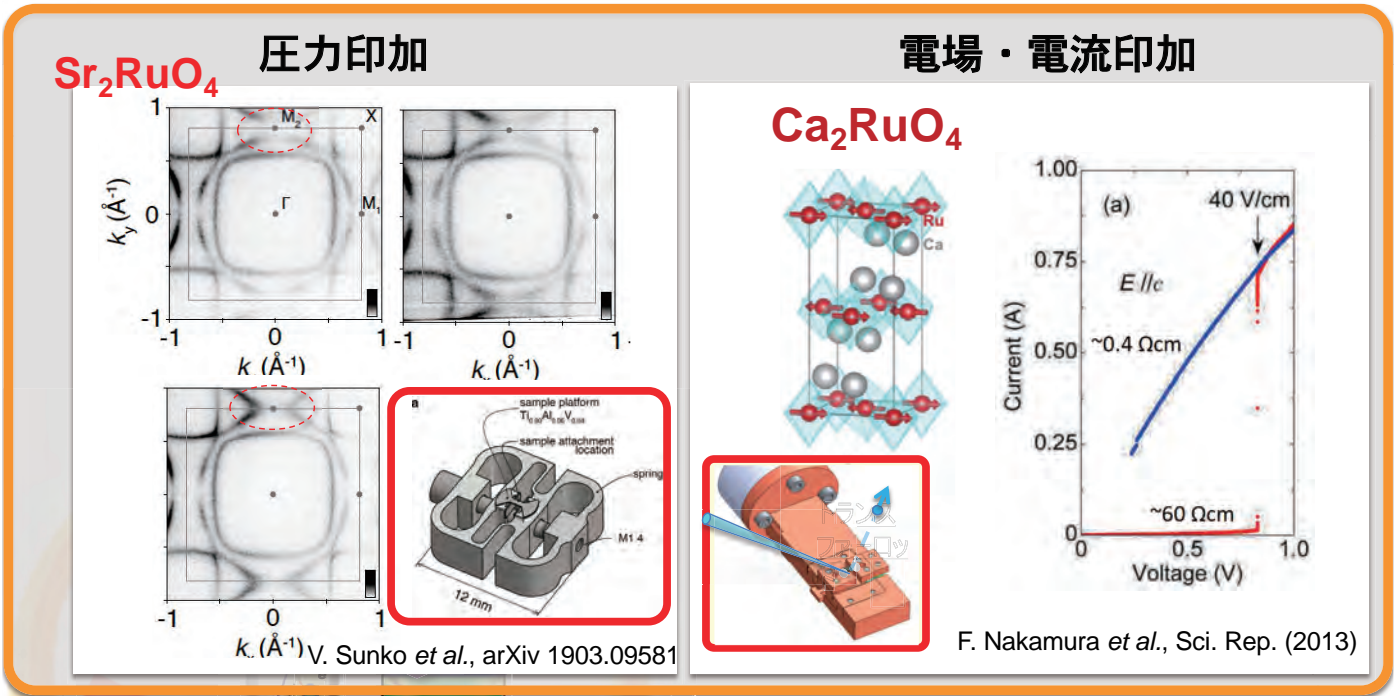


Space

### ◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

# Applicability of $\mu$ /nano-ARPES: Multiple conditions



**Space**

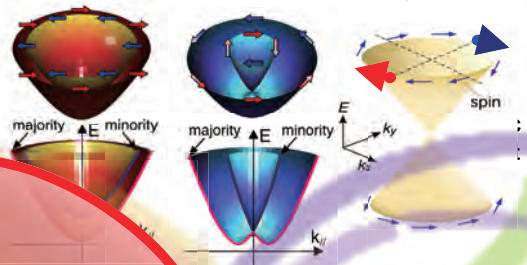
◆空間分解実験のメリット◆

- 1) 対象物質範囲の拡大
- 2) デバイスオペランド解析
- 3) 多元環境下測定

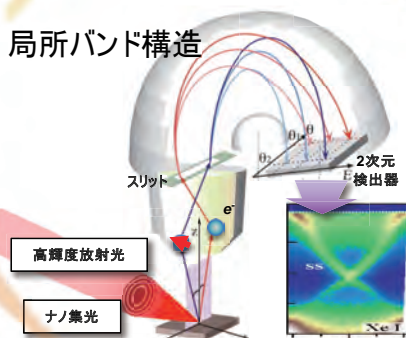
## Advancing spectroscopies for material studies

### Spin

強磁性体 交換分裂    Rashba    TI  
スピンテクスチャ

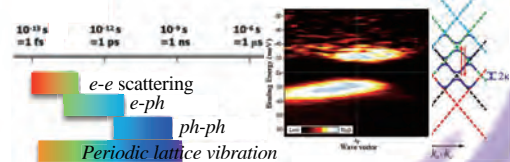


局所バンド構造



**Space**

緩和過程  
E<sub>F</sub>より上のバンド構造  
Floquet状態



二光子光電子分光

**Time**

# Nano & Spin ARPES

**エッジのスピンの偏極バンド**

スピンの直接観測

トポロジカル絶縁体のスピンの流

**局所スピン構造の決定**

強磁性体 交換分裂

Ferro Insulator TMR素子 Ferro

**局所バンド構造**

Edge state

グラフェン磁性

**緩和過程**

$E_F$ より上のバンド構造

Floquet状態

光子光電子分光

Time

**Spin rotation**

Spin-orbit

スピンFET素子

# Combining spin, time, and spatially resolved ARPES

**Spin**

強磁性体 交換分裂

Rashba TI

スピントクスチャ

**局所高速磁化反転**

トンネル磁気抵抗素子

電流誘起

< 1 ns

C. Engel *et al.*, IEEE Transactions and Communications (2017)

**実逆空間スピン制御**

Persistent spin helix

Y. Kunihashi *et al.*, NTT Tech. Rev. (2016)

電場印加

M. P. Walser *et al.*, Nature Phys. (2012)

二光子光電子分光

**Space**

**Time**

# New direction of ARPES

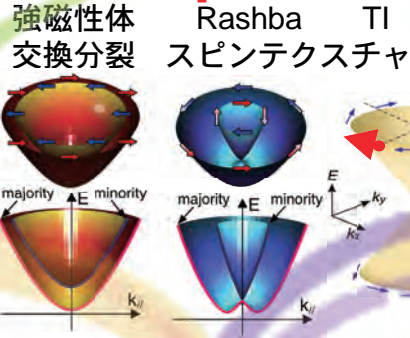
## ■ 他分野融合 ■

- ・情報科学  
ビッグデータ, 機械学習
- ・高度計測手法との融合

## ■ 新手法 ■

- ・1電子 → 2電子  
コインシデンス分光
- ・光コヒーレンス

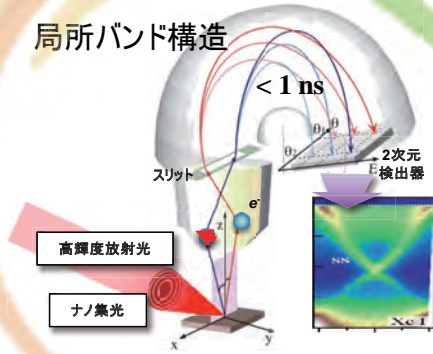
## Spin



## ■ 極限環境 ■

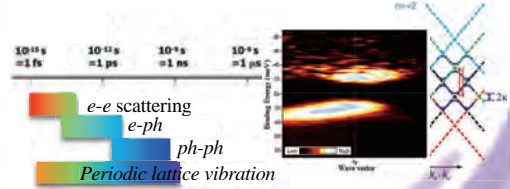
- ・高磁場  
ランダウ準位  
整数/分数量子ホール
- ・高圧 室温超伝導  
(一軸圧, 静水圧)

## 局所バンド構造



## 緩和過程

$E_F$ より上のバンド構造  
Floquet状態



二光子光電子分光

Space

Time

# ナノスピン分解電子状態解析 ~ビームライン提案~

KEK物構研 堀場 弘司

1

## 次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書 -ビームラインリスト-

初期整備ビームラインリスト

種別	BL番号	名称	導入光源	分光器	エネルギー (単位)	分解能	ビームサイズ	計測手法例	想定される利用分野
ハートナー	BL-I	X線オパランド分光	IVU	低エネルギー用二結晶分光器	2-20 keV (水平直線)	E/ΔE=7,000	100 nm	A: 1.オパランド電子状態解析 (X線X線分光電子分光, X線X線分光線形偏光分光) 2.物質内部電子状態 (X線X線分光) B: 1.結晶構造解析 (X線X線分光)	1.結核 2.電池 3.有機エレクトロニクス 4.エレクトロニクス 5.ナノ材料 6.エレクトロニクス材料
	BL-II	X線構造・電子状態トータル解析	MPW	低エネルギー用二結晶分光器	2-20 keV (水平直線)	E/ΔE=7,000	50 μm	A: 1.化学状態イメージング (X線X線分光X線構造解析) 2.構造解析 (X線X線分光, X線X線分光) B: 1.オパランド化学状態の高分辨解析 (X線X線分光線形偏光分光, エネルギー分散型X線X線分光線形偏光分光) 2.化学状態解析 (X線X線分光線形偏光分光, エネルギー分散型X線X線分光線形偏光分光)	1.結核 2.電池 3.有機エレクトロニクス 4.エレクトロニクス 5.ナノ材料 6.エレクトロニクス 7.ポリマー 8.アモルファス 9.膜材 10.触媒
	BL-III	X線構造解析	MPW	低エネルギー用二結晶分光器	4.4-30 keV (水平直線)	E/ΔE=7,000	50 μm	A: 1.モルフォロジー解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態分布マップ (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態分布マップ (X線X線分光) B: 1.構造解析 (X線X線分光, X線X線分光) 2.構造解析 (X線X線分光)	1.結核 2.電池 3.有機エレクトロニクス 4.エレクトロニクス 5.アモルファス 6.膜材 7.触媒
	BL-IV	X線コヒーレントイメージング	IVU	低エネルギー用二結晶分光器	3.1-20 keV (左右円) 2-20 keV (水平直線) 3.1-20 keV (垂直直線)	E/ΔE=7,000	50 μm (全偏光) 100 nm (線偏光)	A: 1.元素・化学状態マップ (X線X線分光線形偏光分光, 空間分解能<5 nm) 2.タイコグラフィ (空間分解能<5 nm) B: 1.構造解析 (コヒーレント回折イメージング, 空間分解能<5 nm)	1.結核 2.エレクトロニクス 3.構造生物 4.構造材 5.バイオテクノロジー
	BL-V	X線構造イメージング	APPLE-SX	回折格子	0.18-1.2 keV (左右円) 0.13-2 keV (水平直線) 0.23-2 keV (垂直直線)	E/ΔE=10,000-30,000	< 50 nm	A: 1.構造解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態イメージング (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態イメージング (X線X線分光) 4.電子状態イメージング (X線X線分光) 5.固体物質イメージング (X線X線分光) B: 1.超微構造解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態イメージング (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態イメージング (X線X線分光) 4.電子状態イメージング (X線X線分光) 5.固体物質イメージング (X線X線分光)	1.スピンロニクス 2.結核 3.電池 4.食料 5.触媒 6.バイオテクノロジー 7.有機エレクトロニクス 8.エレクトロニクス 9.膜材 11.医学
	BL-VI	X線電子状態解析	APPLE-EUV	回折格子	0.05-1.0 keV (左右円) 0.05-1.0 keV (垂直直線)	E/ΔE=10,000-30,000	< 50 nm	A: 1.電子状態解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態イメージング (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態イメージング (X線X線分光) 4.電子状態イメージング (X線X線分光) 5.固体物質イメージング (X線X線分光) B: 1.超微構造解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態イメージング (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態イメージング (X線X線分光) 4.電子状態イメージング (X線X線分光) 5.固体物質イメージング (X線X線分光)	1.ナノテクノロジー 2.電子デバイス
	BL-VII	X線オパランド分光	APPLE-SX	回折格子	0.13-2 keV (水平直線) 0.23-2 keV (垂直直線)	E/ΔE=10,000-30,000	< 50 nm	A: 1.オパランド電子状態解析 (X線X線分光電子分光, X線X線分光線形偏光分光) 2.電子状態解析 (X線X線分光)	1.結核 2.電池 3.有機エレクトロニクス 4.エレクトロニクス
常 (共同)	BL-VIII	X線ナノ光電子分光	APPLE-EUV	回折格子	0.05-1.0 keV (左右円) 0.05-1.0 keV (水平直線) 0.05-1.0 keV (垂直直線)	E/ΔE=10,000-30,000	50 nm-10 μm	A: 1.ナノ光電子状態解析 (X線X線分光電子分光) 2.ナノ電子状態解析 (X線X線分光) B: 1.電子状態解析 (X線X線分光) 2.光電子顕微鏡	1.ナノエレクトロニクス 2.電子デバイス 3.固体物理学
	BL-IX	X線ナノ分光	APPLE-SX (segmented)	回折格子	0.18-2 keV (左右円) 0.13-2 keV (水平直線) 0.18-2 keV (垂直直線) 【高エネルギー可変】	E/ΔE=10,000	50 nm-10 μm	A: 1.ハイスループット計測 (X線X線分光, X線X線分光) 2.電子状態解析 (X線X線分光) 3.電子状態解析 (X線X線分光) 4.電子状態解析 (X線X線分光) 5.電子状態解析 (X線X線分光) B: 1.電子状態解析 (X線X線分光) 2.電子状態解析 (X線X線分光)	1.膜材 2.触媒材料 3.超微構造材料 4.スピンロニクス 5.固体物理学
	BL-X	X線電子状態解析	APPLE-SX	回折格子	0.25-1.0 keV (左右円) 0.25-1.0 keV (水平直線) 0.25-1.0 keV (垂直直線)	E/ΔE>150,000	< 500 nm	A: 1.超微構造解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態イメージング (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態イメージング (X線X線分光) 4.電子状態イメージング (X線X線分光) 5.電子状態イメージング (X線X線分光) B: 1.超微構造解析 (X線X線分光) 2.元素・化学状態イメージング (X線X線分光線形偏光分光) 3.元素・化学状態イメージング (X線X線分光) 4.電子状態イメージング (X線X線分光) 5.電子状態イメージング (X線X線分光)	1.エレクトロニクス 2.材料 3.固体物理学 4.結核 5.電池

2

初期整備ビームラインリスト

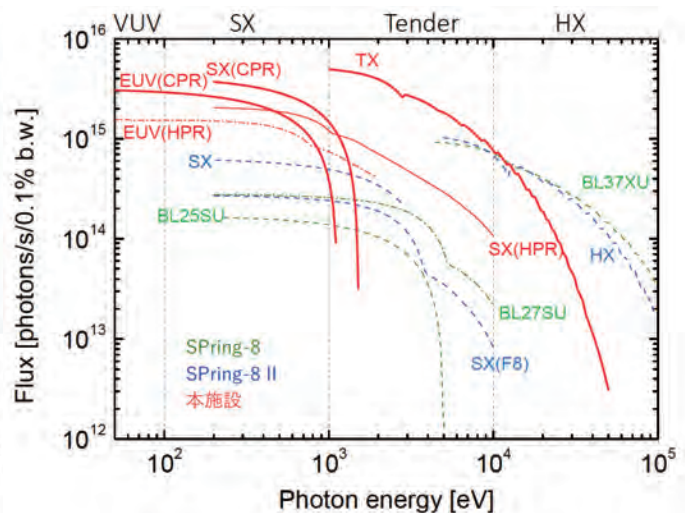
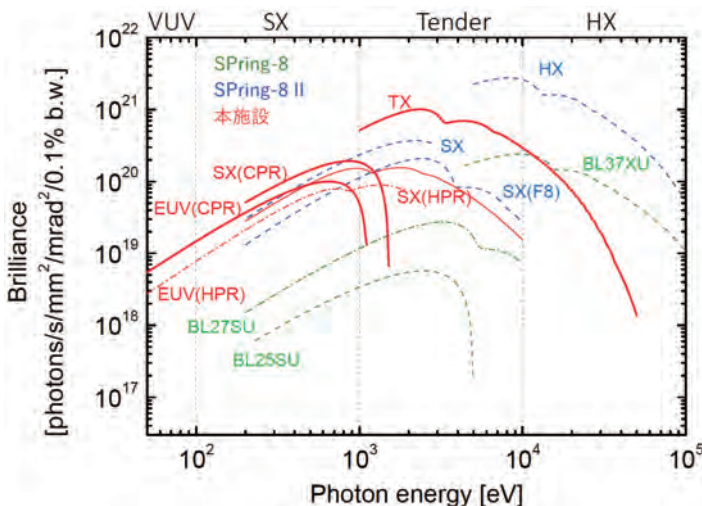
国	ビームライン	名称	導入光源	分散器	エネルギー (eV)	分散度	ビームサイズ	主要な実験分野	想定される利用分野
国 (共用)	BL-VIII	軟X線ナノ光電子分光	APPLE-EUV	回折格子	0.05-1.0 keV (水平直線) 0.05-1.0 keV (垂直直線)	$E/\Delta E > 10,000$	50 nm-10 $\mu$ m	1. ナノ全電子状態解析 (ナノスピンスピン分解光電子分光) 2. ナノ電子状態解析 (ナノ光電子分光)	1. 材料 2. 電気 3. 水素エネルギー 4. エレクトロニクス 5. ナノ材料 6. エネルギー材料
	BL-IX	軟X線ナノ吸収分光	APPLE-SX (segmented)	回折格子	0.18-2 keV (左右円) 0.13-2 keV (水平直線) 0.18-2 keV (垂直直線) 【偏光高速切替】	$E/\Delta E > 10,000$	50 nm-10 $\mu$ m	1. ハイスループット計測 (X線吸収分光, X線磁気円二色性, X線磁気線二色性, X線線二色性) 2. ダイナミクス計測 (X線強磁性共鳴) 3. ナノ磁性イメージング (顕微鏡X線磁気円二色性, 顕微鏡X線磁気線二色性, 顕微鏡X線磁気光学カー効果)	1. 材料 2. 電気 3. 水素エネルギー 4. エレクトロニクス 5. ナノ材料 6. 環境 7. 宇宙 8. ナノ材料 9. 材料 10. 産業
	BL-X	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱	APPLE-SX	回折格子	0.25-1.0 keV (左右円) 0.25-1.0 keV (水平直線) 0.25-1.0 keV (垂直直線)	$E/\Delta E > 150,000$	< 500 nm	1. 超精密電子状態解析 (超高分解能共鳴非弾性X線散乱) 2. 固体内素動起振 (超高分解能共鳴非弾性X線散乱) 3. 固液・固気界面反応解析 (超高分解能共鳴非弾性X線散乱) 4. ナノ構造・電子状態同時解析 (軟X線非弾性回折)	1. 材料 2. 電気 3. 水素エネルギー 4. エレクトロニクス
国 (共用)	BL-VIII	軟X線ナノ光電子分光	APPLE-EUV	回折格子	0.05-1.0 keV (左右円) 0.05-1.0 keV (水平直線) 0.05-1.0 keV (垂直直線)	$E/\Delta E > 10,000$ -50,000	50 nm-10 $\mu$ m	1. ナノ全電子状態解析 (ナノスピンスピン分解光電子分光) 2. ナノ電子状態解析 (ナノ光電子分光)	1. ナノエレクトロニクス 2. 量子コンピュータ 3. 固体物理学
	BL-IX	軟X線ナノ吸収分光	APPLE-SX (segmented)	回折格子	0.18-2 keV (左右円) 0.13-2 keV (水平直線) 0.18-2 keV (垂直直線)	$E/\Delta E > 10,000$	50 nm-10 $\mu$ m	1. ハイスループット計測 (X線吸収分光, X線磁気円二色性, X線磁気線二色性, X線線二色性) 2. ダイナミクス計測 (X線強磁性共鳴) 3. ナノ磁性イメージング (顕微鏡X線磁気円二色性, 顕微鏡X線磁気線二色性, 顕微鏡X線磁気光学カー効果)	1. 材料 2. 電気 3. 水素エネルギー 4. エレクトロニクス 5. ナノ材料
	BL-X	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱	APPLE-SX	回折格子	0.25-1.0 keV (左右円) 0.25-1.0 keV (水平直線) 0.25-1.0 keV (垂直直線)	$E/\Delta E > 150,000$	< 500 nm	1. 超精密電子状態解析 (超高分解能共鳴非弾性X線散乱) 2. 固体内素動起振 (超高分解能共鳴非弾性X線散乱) 3. 固液・固気界面反応解析 (超高分解能共鳴非弾性X線散乱) 4. ナノ構造・電子状態同時解析 (軟X線非弾性回折)	1. エレクトロニクス 2. 材料 3. 固体物理学 4. 材料 5. 電気

3

		最大 K値	最大磁場 (T)	光子エネルギー範囲 (keV)
APPLE-SX $\lambda_u = 56$ mm	円偏光	2.75	0.526	0.178 - 1.20
	水平直線偏光	4.67	0.893	0.128 - 2 <sup>1)</sup>
	垂直直線偏光	3.39	0.648	0.226 - 2 <sup>1)</sup>
APPLE-EUV $\lambda_u = 75$ mm (56周期)	円偏光	4.67	0.666	0.050 - 1.01
	水平直線偏光	6.60	0.942	0.050 - 2 <sup>1)</sup>
	垂直直線偏光	6.21	0.887	0.056 - 2 <sup>1)</sup>

輝度

フラックス



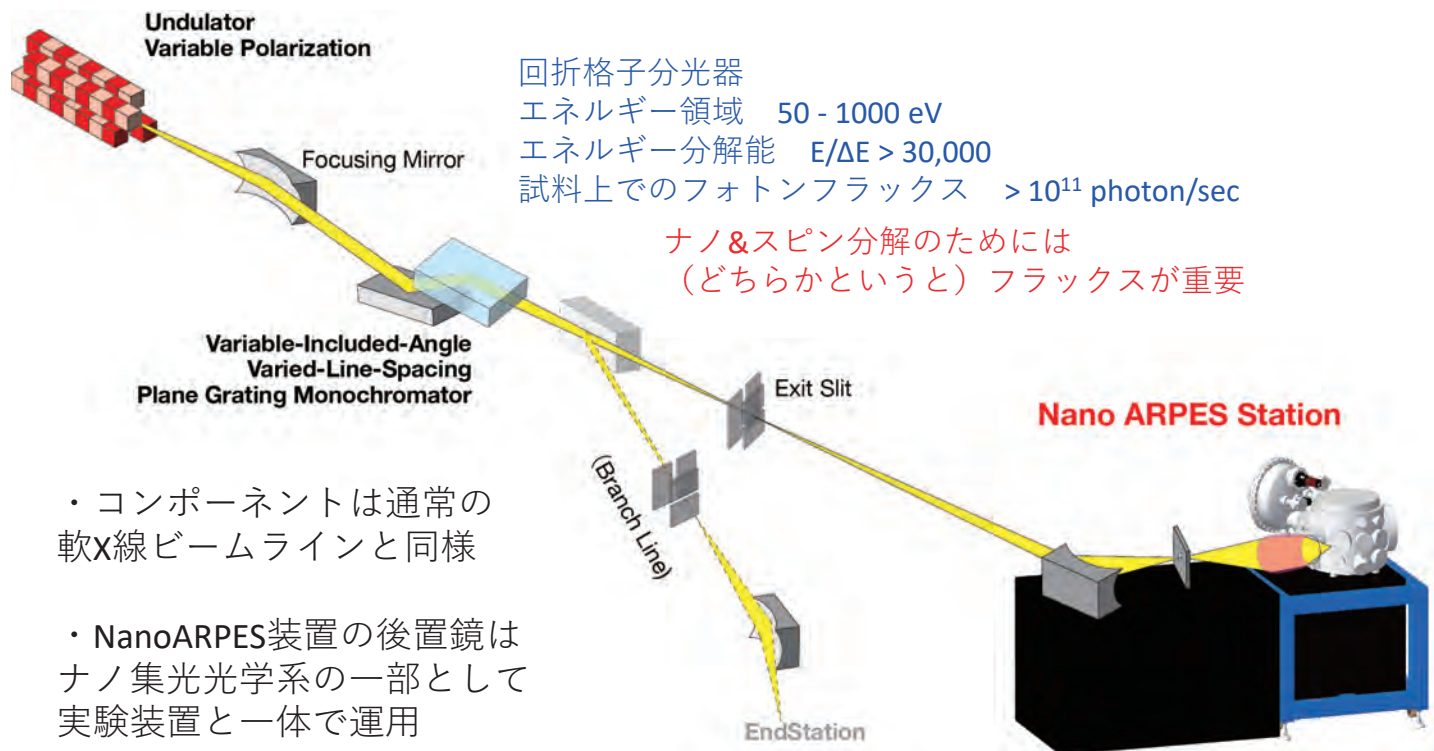
4



## ナノ集光スピ分解ARPESビームライン (案)

光源：可変偏光アンジュレータ (水平・垂直・左右円偏光：高速切り替えは不要)

エネルギー領域 50 - 1000 eV



・コンポーネントは通常の軟X線ビームラインと同様

・ NanoARPES装置の後置鏡はナノ集光光学系の一部として実験装置と一体で運用

・ ブランチでは汎用的な集光系によるARPESやPEEM実験を想定

5

## 世界の動向：世界放射光施設のナノARPES装置

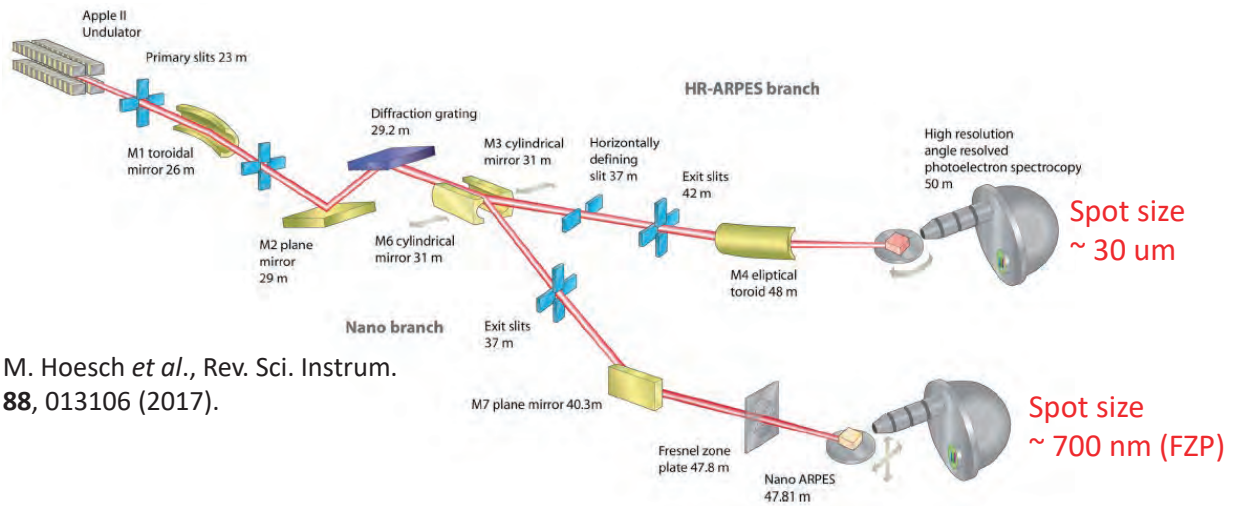
	Focusing Optics	Spot size	Energy Range	Energy Resolution	Spin Resolved
Spectromicroscopy (Elettra, Italy)	Schwarzschild	500 nm	27eV & 74eV (Fixed)	12.5 meV	×
Maestro (ALS, USA)	FZP Capillary	120 nm 450 nm	80 - 1000 eV	50 meV	×
ANTARES (Soleil, France)	FZP	150 nm	95 - 1000 eV	25 meV	×
I05: ARPES (Diamond, UK)	FZP	700 nm	60 - 150 eV	30 meV	×
本提案	超精密加工 ミラー光学系	< 100 nm	50 - 1000 eV	< 10 meV	○

建設中：SSRF(China), TPS(Taiwan), NSLS-II(USA),等

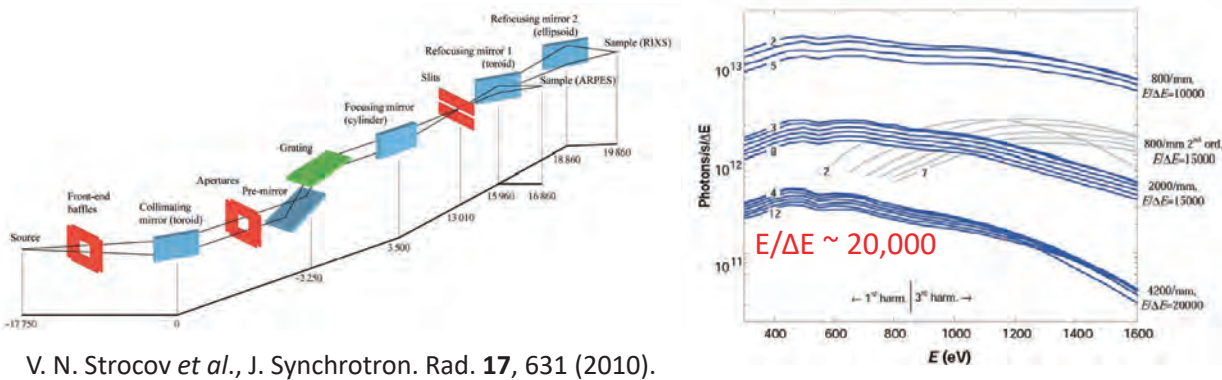
6

参考ビームライン：

### Diamond I05: HR u-ARPES and nano-ARPES



### SLS ADDRESS: HR SX-ARPES and RIXS

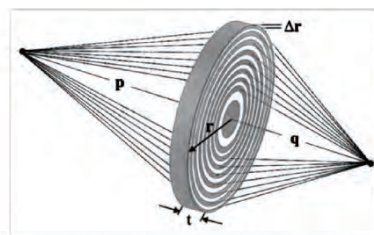


最近の動向：ナノ集光光学系

①フレネルゾーンプレート：現在様々な装置で最も汎用的に使用されている。

- ・長所：調整が非常に容易
- ・短所：強度が著しく低下する
- ・集光サイズ：

極限では10nm級が可能だが、ARPES実験の制約のためにナノARPES装置では最高でも100nm級の集光に留まる。



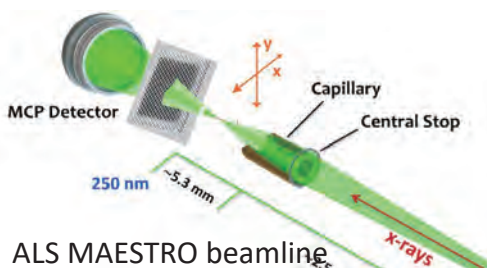
r: 半径 = 100 μm  
 Δr: 最外ゾーン幅 = 35 nm  
 m: 回折次数 = 1  
 σ: 光源サイズ ~ 50 μm  
 p: 光源 - FZP間距離 = 15 m  
 q: FZP - 試料間距離 (焦点距離)  
 $2r\Delta r/m\lambda = 5.65 \text{ mm} @ 1 \text{ keV}$   
 E: 光エネルギー  
 ΔE: 光エネルギー分解能

$$\delta_m = \sqrt{\left(\frac{1.22 \times \Delta r}{m}\right)^2 + \left(\sigma \frac{q}{p}\right)^2 + \left(2r \frac{\Delta E}{E}\right)^2}$$

回折限界 42.7 nm      縮小率 ~ 30 nm      色収差 ~ 40 nm

$$f = \frac{2r\Delta r}{m\lambda}$$

②キャピラリーミラー

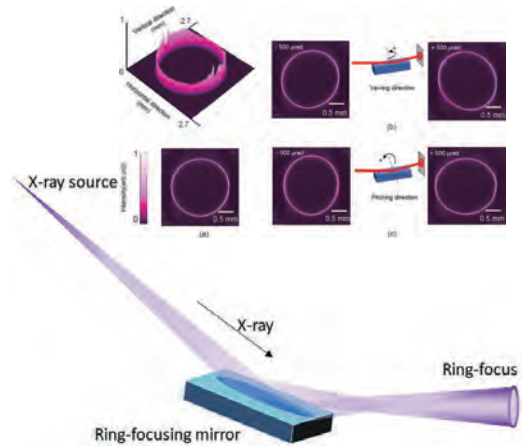


ALS MAESTRO beamline  
 (Dr. Eli Rotenberg)

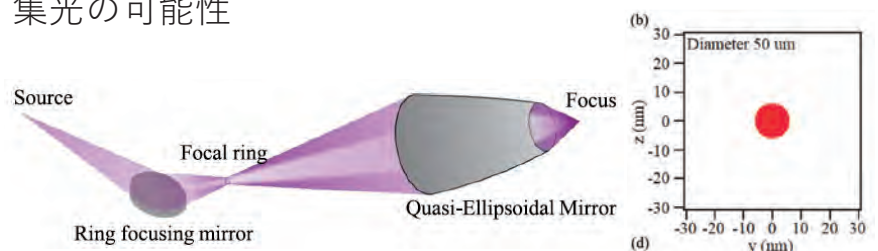
- ・アメリカのベンチャー企業 (SIGRAY) で販売開始
- ・ALS MAESTROビームラインでテストを開始し、スポットサイズ450 nmを達成。
- ・強度はFZPと比較して100倍に向上。
- ・ただし中心通過を防ぐセンターストップが必要。
- ・加工精度の問題で極限集光サイズは頭打ちか？

③超精密加工ミラー：日本発の世界最高峰技術

- FZPの100倍の強度
- リング型前段集光により、センターストップが不要
- Wolter型配置により、FZPと同様の容易な調整・安定性を実現
- 集光点がエネルギーに依存しない（広エネルギー化には反射率等の関係で要検討）
- 10nm級の極限（回折限界）集光の可能性

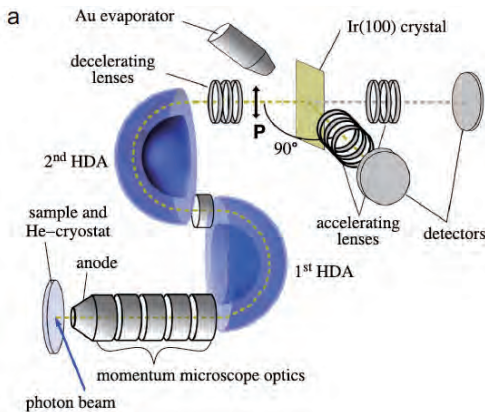


H. Mimura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 131901 (2019).

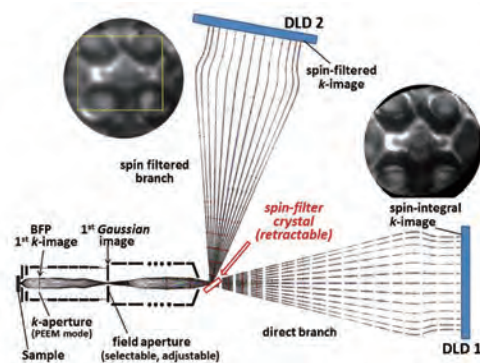


H. Motoyama *et al.*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48**, 244002 (2015).

①Irターゲット（スピン軌道相互作用）

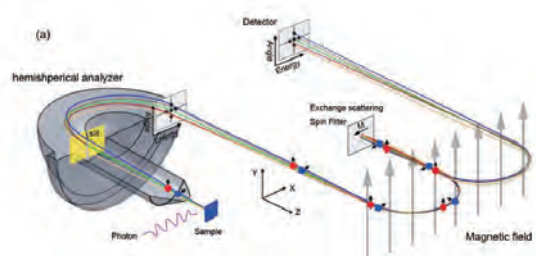


C. Tusche *et al.*, *Ultramicroscopy* **159**, 520 (2015).



G. Schonhense *et al.*, *JESRP* **200**, 94 (2015).

②O/Feターゲット（強磁性体交換相互作用）

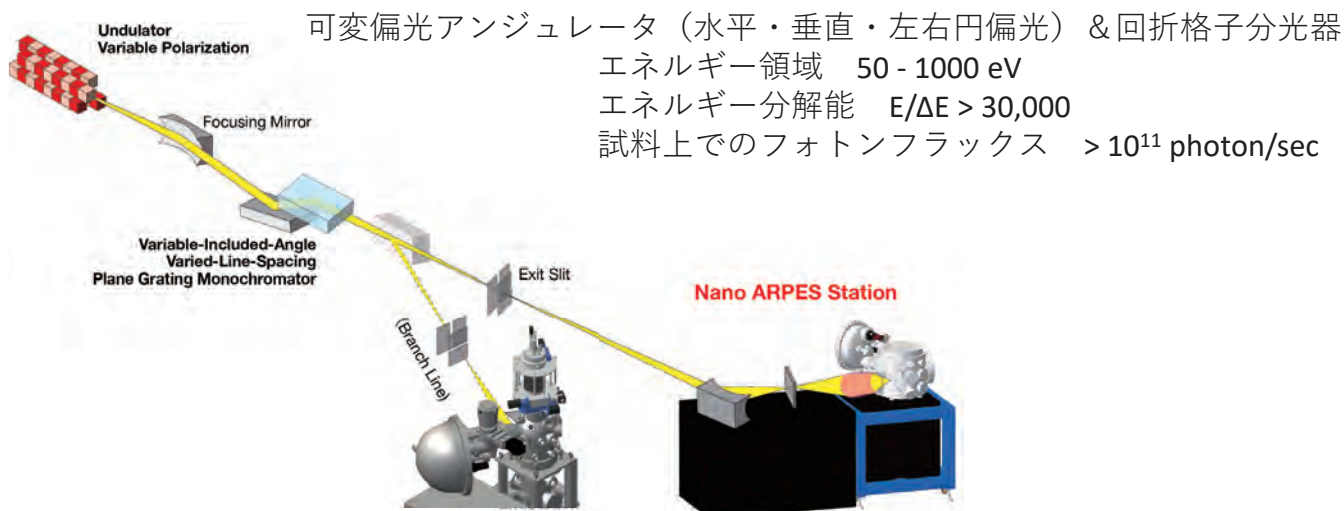


F. Ji *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 177601 (2016).

いずれの方法も、2次元のARPES信号を、2次元情報を保持したままターゲットで反射させた後に検出器上に結像する。

電子の結像レンズの調整が非常に難しく、主流の方法がどうなるかはまだ定まっていない。

## ナノ集光スピ分解ARPESビームライン エンドステーション (案)



### Branch : 高分解能スピ分解軟X線ARPES

- ・エネルギー分解能 > 30,000
- ・フォトンフラックス >  $10^{11}$
- ・スポットサイズ  $\sim 10$   $\mu\text{m}$
- ・試料温度 < 10 K

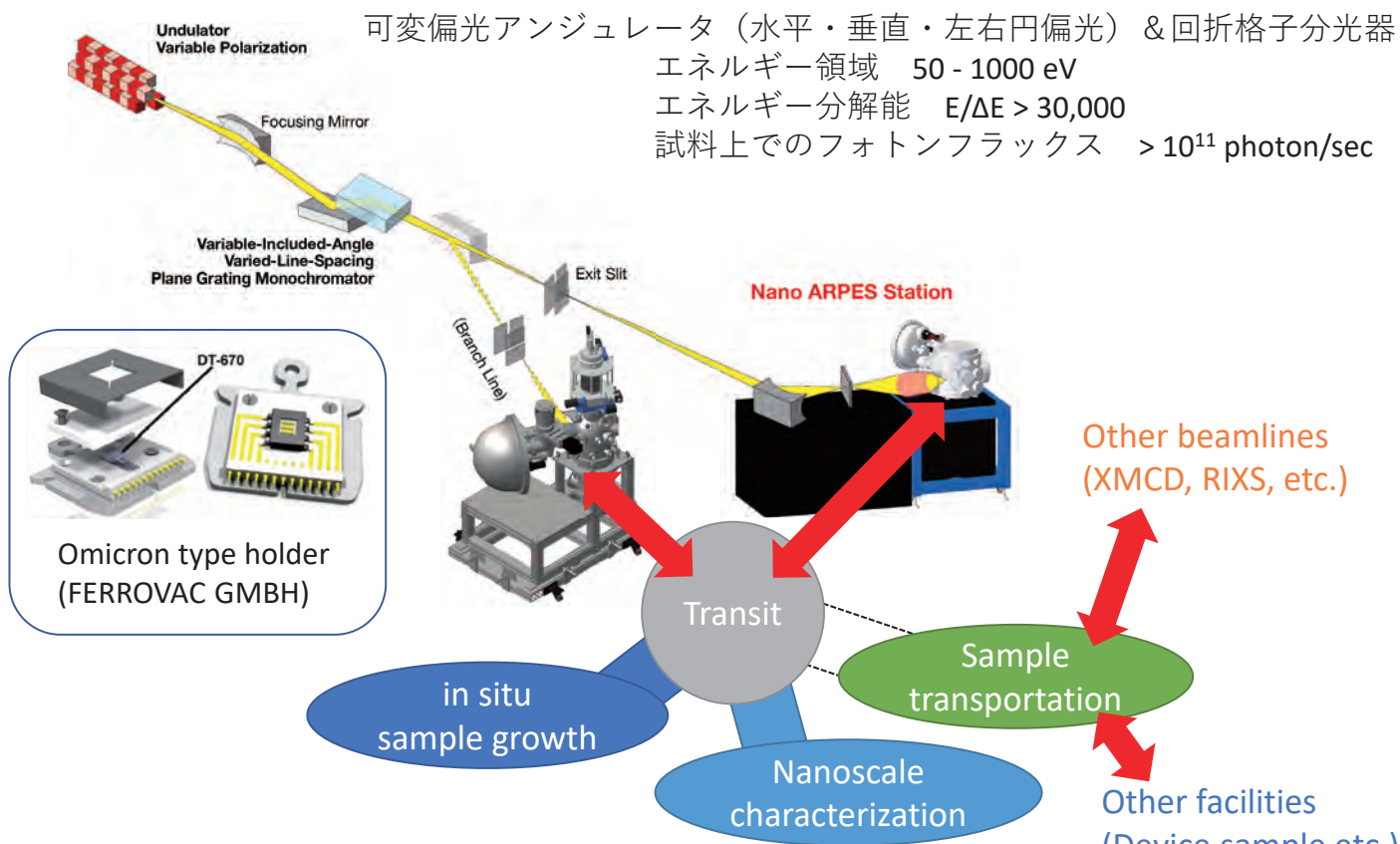
### Branch : ナノ集光スピ分解ARPES

- ・エネルギー分解能  $\sim 10,000$
- ・フォトンフラックス >  $10^{12}$
- ・スポットサイズ < 100 nm
- ・試料温度 < 30 K

世界最高分解能軟X線ARPES  
 世界初の軟X線スピ分解ARPES  
 シングルスピ検出器→マルチスピ検出器

世界一使いやすいナノARPES  
 (長WD、広エネルギー、高効率etc.)  
 →+マルチスピ検出器で  
 世界初のナノスピARPES

## ナノ集光スピ分解ARPESビームライン エンドステーション (案)



- ・試料ホルダーの共通化 (ブランチ間、ビームライン間、他設備間)
- ・ナノデバイス試料のオペランド計測への展開

スピン分解光電子分光の動向  
広島大学・奥田太一

# スピン分解光電子分光の動向

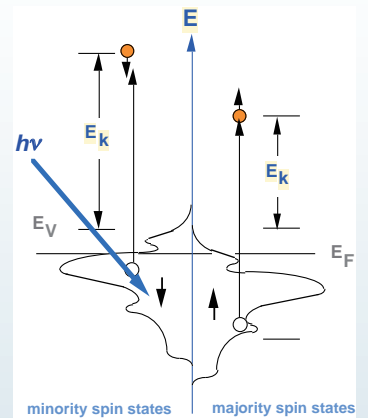
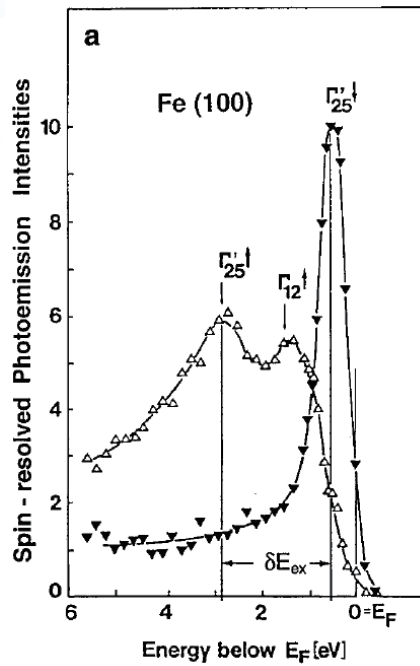
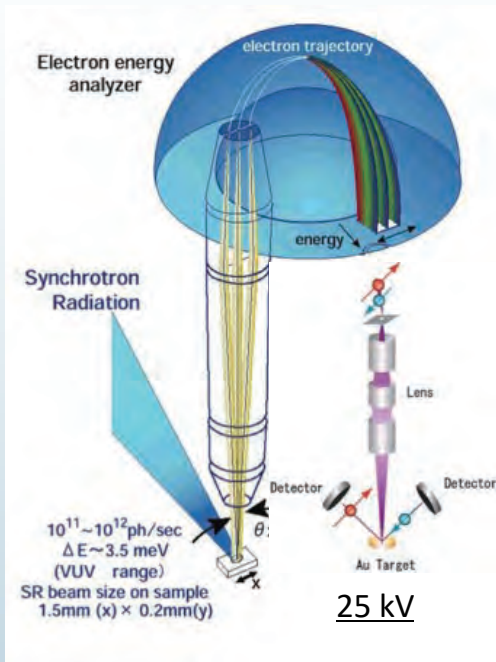
---

広島大学放射光科学研究センター 奥田太一

## Outline

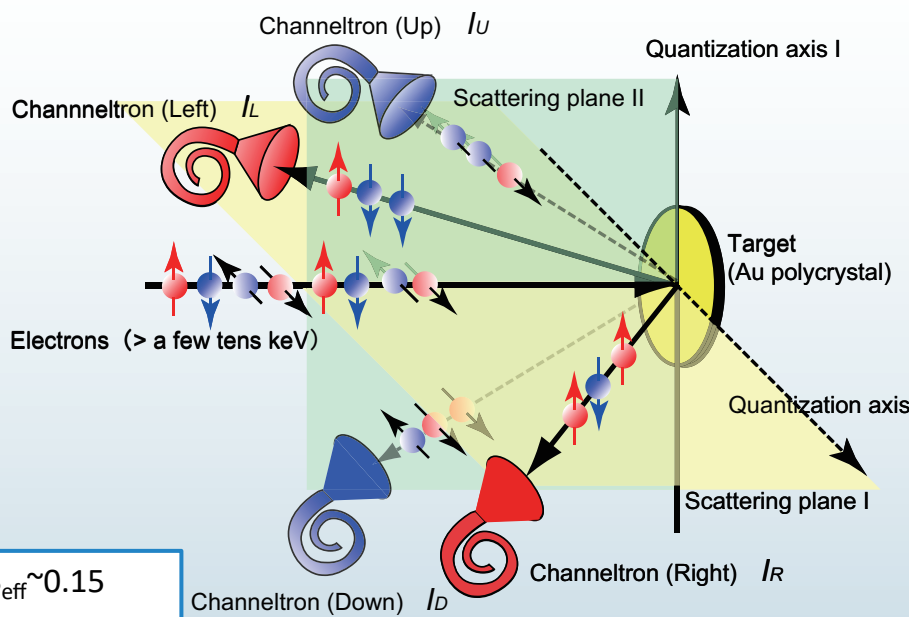
- 主なスピン分析器と特徴（復習）  
Mott, VLEED, Au/Ir or W filter
- スピンARPESの近年の進展
- マルチチャンネル検出器の現状
- 国内外のスピンARPESの現状と将来

# What is spin-polarized ARPES

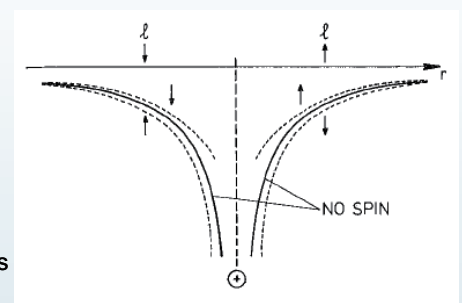


E. Kisker et al. Phys. Rev. B 31, 329 (1985).

## Mott



### Spin-Orbit Interaction



$$H_{SOI} = \lambda \vec{l} \cdot \vec{s}$$

$$S_{eff} \sim 0.15$$

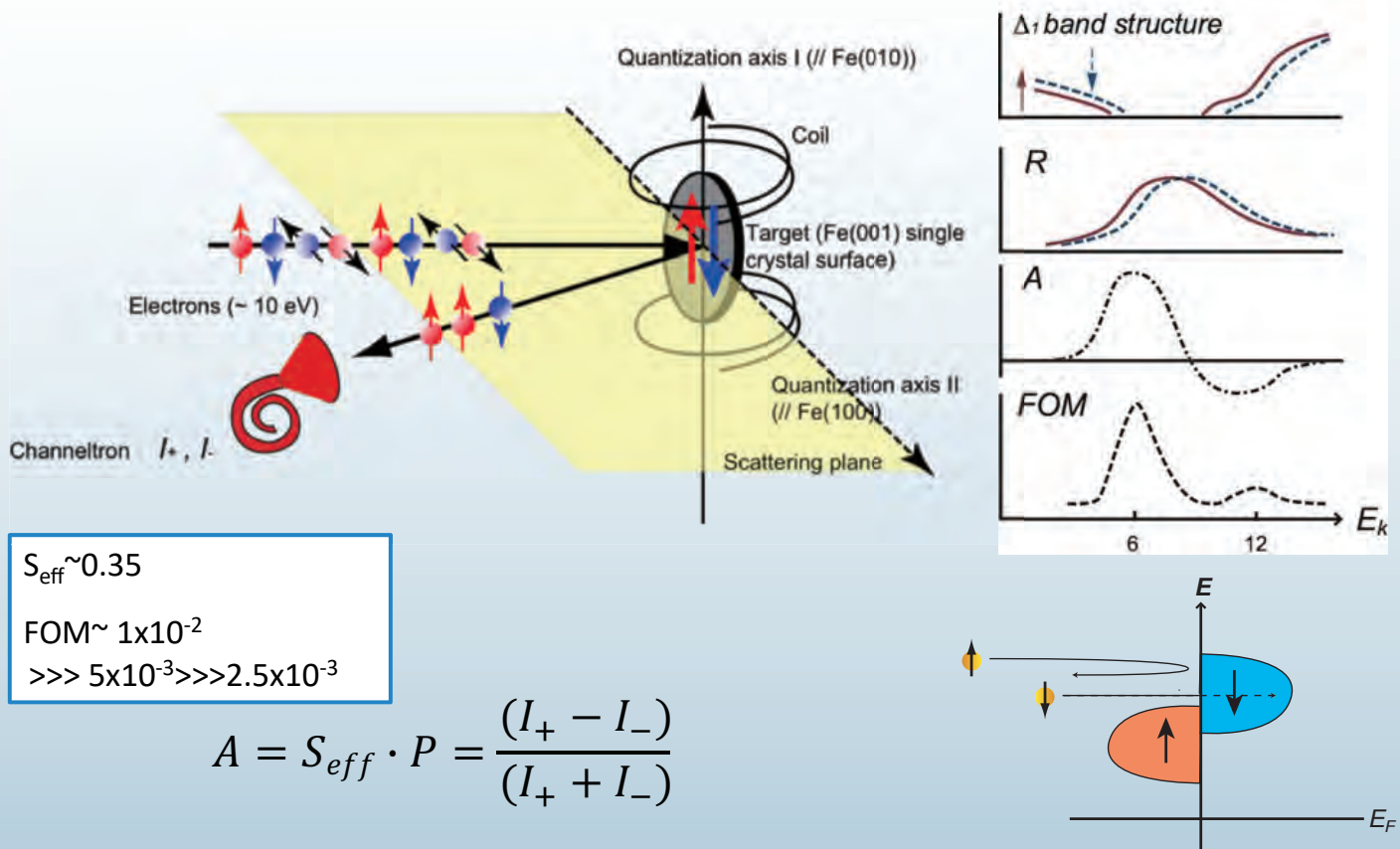
$$FOM \sim 1 \times 10^{-4}$$

$$A = S_{eff} \cdot P = \frac{(I_L - I_R)}{(I_L + I_R)} \rightarrow P = A / S_{eff} \equiv \frac{I^\uparrow - I^\downarrow}{I^\uparrow + I^\downarrow} \rightarrow \begin{cases} I^\uparrow = \frac{1}{2} I \cdot (1 + P) \\ I^\downarrow = \frac{1}{2} I \cdot (1 - P) \end{cases}$$

# VLEED

D. Tillemann et al., Z. Phys. B. 77, 1 (1989).

## Spin-Exchange Interaction

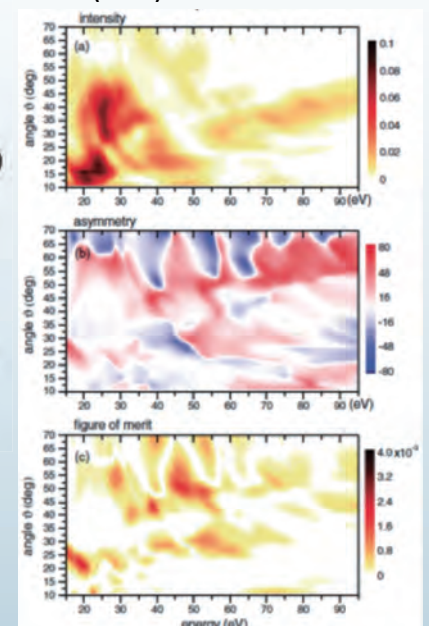
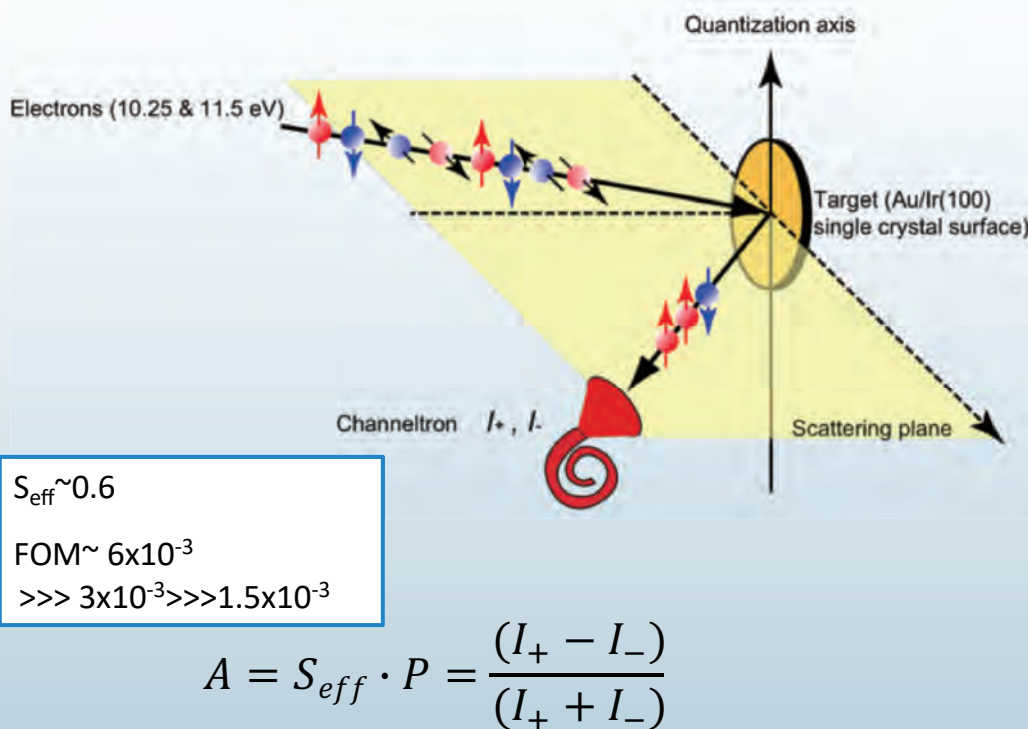


# Au/Ir(100) (or W) filter

Kutnyakhov, D. et al., Ultramicroscopy 130, 63–69 (2013).

## Spin-orbit Interaction

Au 1ML pseudomorphic film on Ir(100)



J. Kirschner et al., PRB 88 125419 (2013).



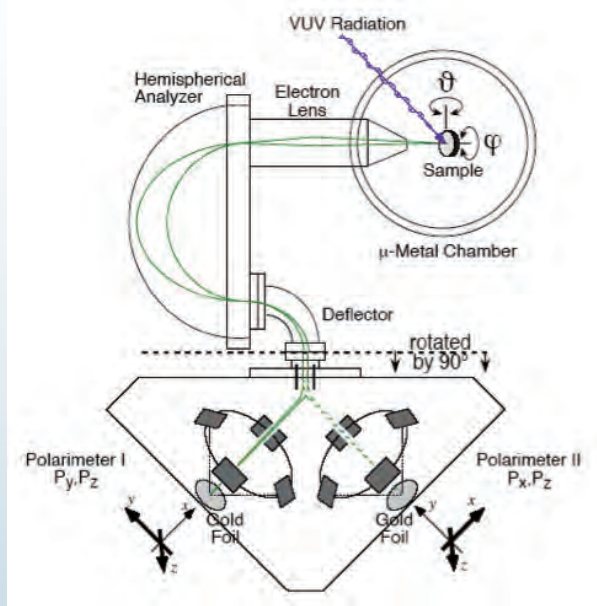
## まとめ1：スピン検出器の比較 (シングルチャンネルで比較)

	Mott	VLEED	Au/Ir filter
効率 (FOM)	△	◎	○
3Dベクトル測定	◎	○	△
高分解能測定	△	○	○
微小試料測定	△	○	○
時間分解測定	◎	△	△
安定性・メンテナンス	◎	○	○

## Outline

- 主なスピン分析器と特徴 (復習)  
Mott, VLEED, Au/Ir or W filter
- スピンARPESの近年の進展
- マルチチャンネル検出器の現状
- 国内外のスピンARPESの現状と将来

# COPHEE (COmplete PHotoEmission Experiment) machine @ SLS for 3D spin vector analysis (3次元スピン解析)

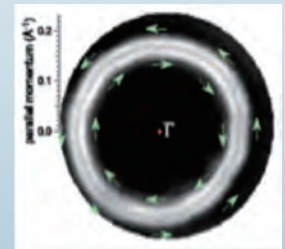
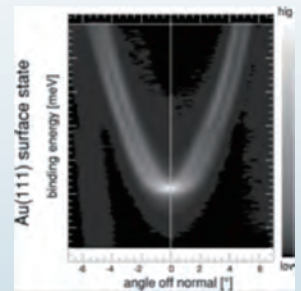
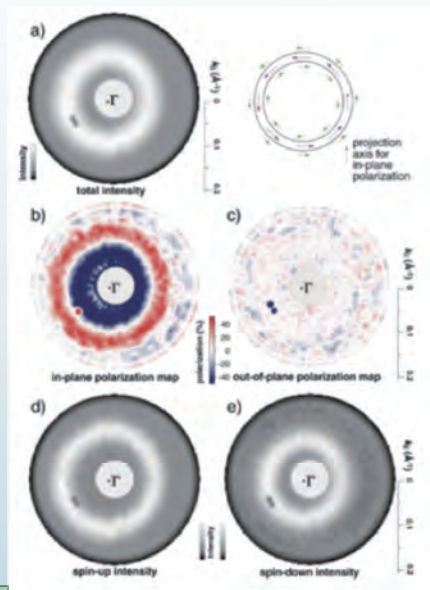


$\Delta E : \sim 70 \text{ meV}$   $\Delta\theta : \sim \pm 1^\circ$

3次元スピン解析の重要性を示した。

M. Hoesch et al. J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 124,263 (2002).

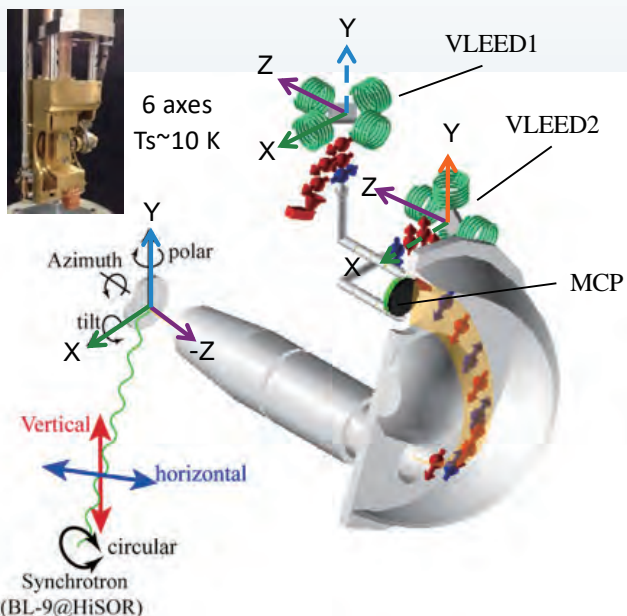
3<sup>rd</sup> generation SR Swiss light source (2000~)  
100 times higher photon flux than HiSOR



M. Hoesch et al. PRB69, 241401(R)(2004).

## ESPRESSO machine at HiSOR BL-9B 2011~ (高効率スピン検出 → 高分解能化)

### Efficient SPin RESolved SpectroScOpy (ESPRESSO) machine for 3D spin vector analysis



#### Resolution

- ❖ Best  $(\Delta E, \Delta\theta) = (7.5 \text{ meV}, \pm 0.2^\circ)$
- ❖ Typical  $(\Delta E, \Delta\theta) = (\sim 20 \text{ meV}, \pm 0.38 \sim 0.75^\circ)$

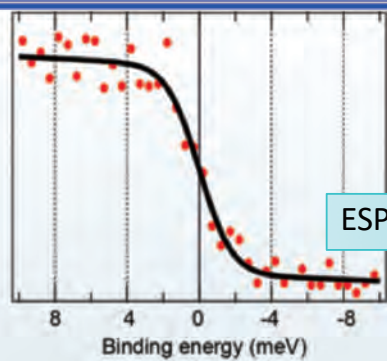
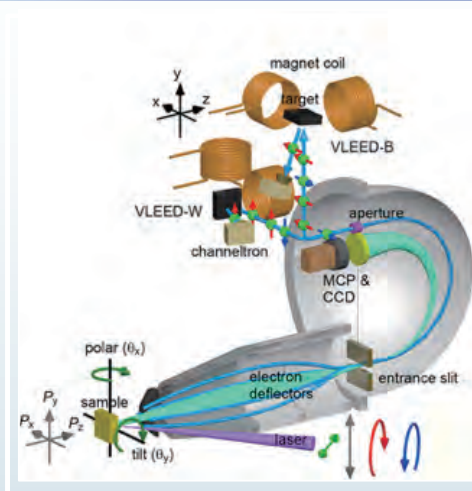
#### Special function

- ❖ Efficient normal ARPES
- ❖ 3D spin vector observation ( $P_x, P_y, P_z$ )

高分解能測定と3次元スピン解析の両立を実現した。

J. Electron Spectrosc. Relate. Phenom. 201, 23 (2015).

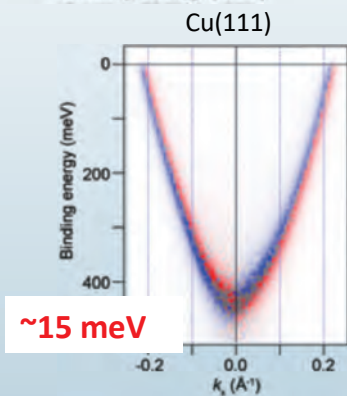
# VUV-Laser 光源の利用 6 eV ~ 7 eV (超高分解能化)



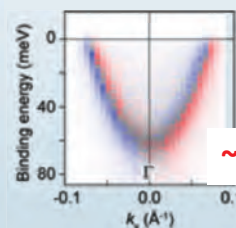
Pass energy 2eV  
T = 9 K

$\Delta E = 1.7 \text{ meV}$

ESPRESSOより1桁高い!



Ag(111)



$\sim 4 \text{ meV}$

$\Delta E \sim 5 \text{ meV}$ , T=12 K  
1枚12時間で取得

LASOR

7 eV laser :  $1 \times 10^{14} \text{ ph/s } 0.04\phi$

Flux dens.  $2.5 \times 10^{17} \text{ ph/s mm}^2$

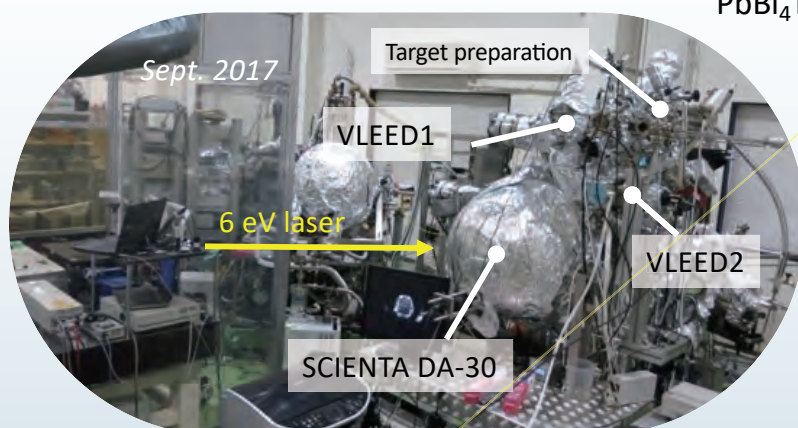
PFやHiSORのSRより4桁高い!

K. Yaji et al., Rev. Sci. Instrum. **87**, 53111 (2016).

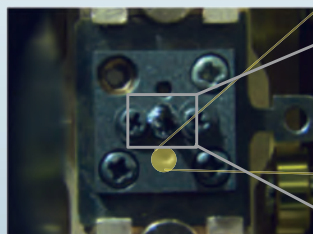
ISSP 矢治、黒田氏より提供

# マイクロビームの利用

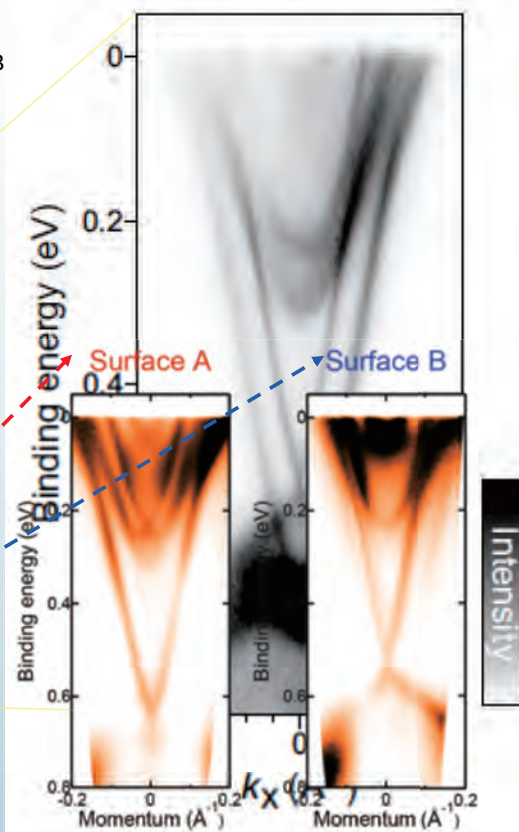
Laser Spin-ARPES system at HiSOR



PbBi4Te4S3



Beam size  $\sim 10 \mu\text{m}$



K. Sumida et al., Phys. Rev. Mat. **2**, 104201 (2018).

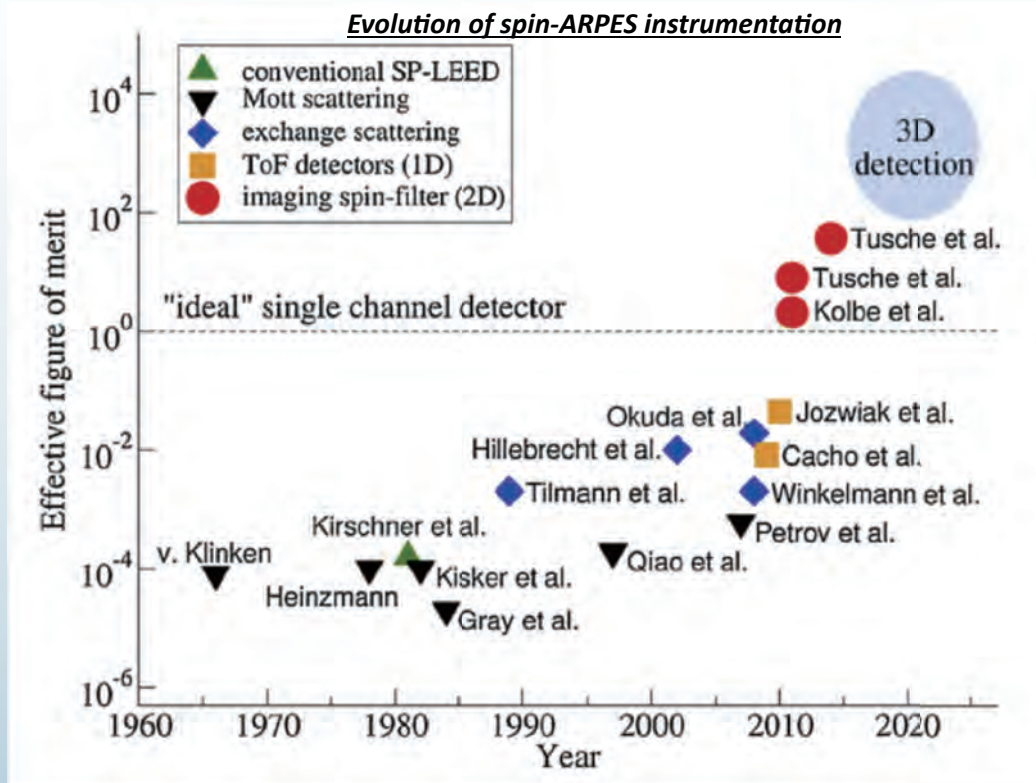
## まとめ2: 最近のspin-ARPESの発展 (i.e. 最近のspin-ARPESに求められる条件)

- 3次元スピンベクトル解析
- 高分解能 (エネルギー・波数)
  - ▶ レーザー利用による超高分解能化
- 微小ビームによるサイト選択的な測定

## Outline

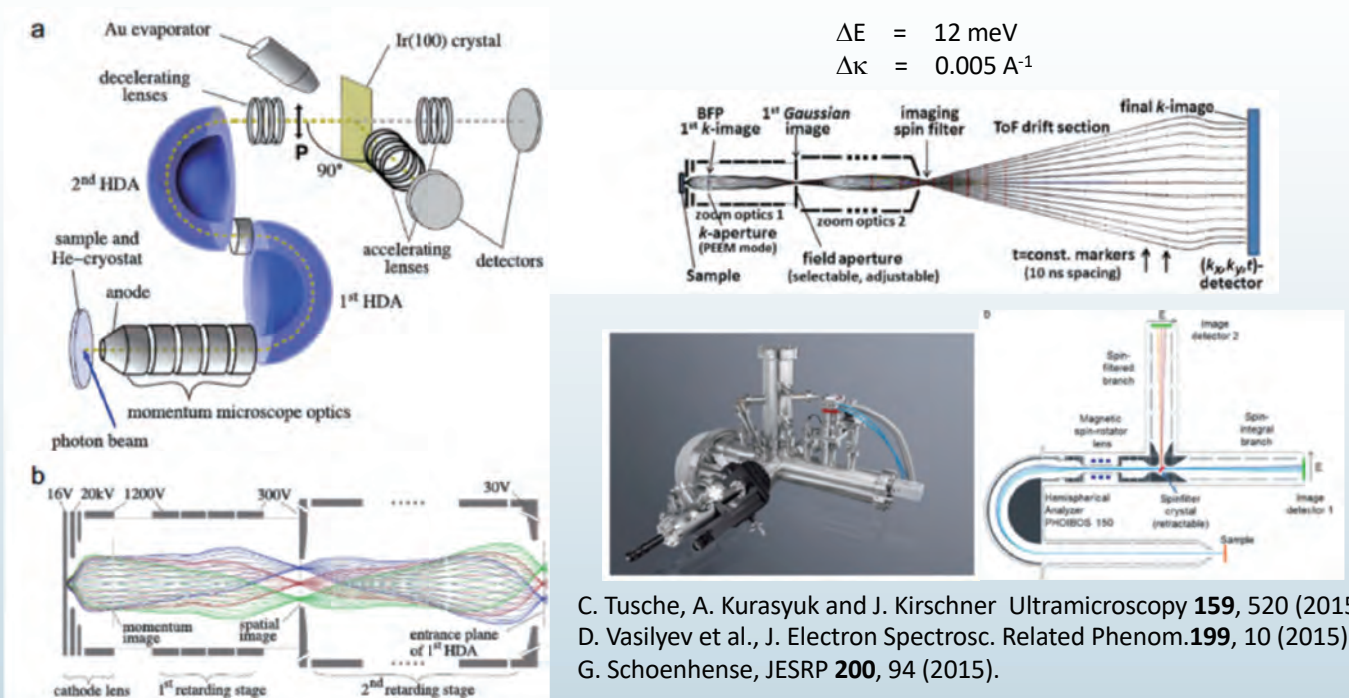
- 主なスピン分析器と特徴 (復習)  
Mott, VLEED, Au/Ir or W filter
- スピンARPESの近年の進展
- マルチチャンネル検出器の現状
- 国内外のスピンARPESの現状と将来

マルチチャンネル測定 Multichannel spin detector



S. Suga and C. Tusche, J. Electron Spectros. Relat. Phenomena **200**, 119–142 (2015).

Momentum microscope(MM) using Au/Ir(100) spin filter



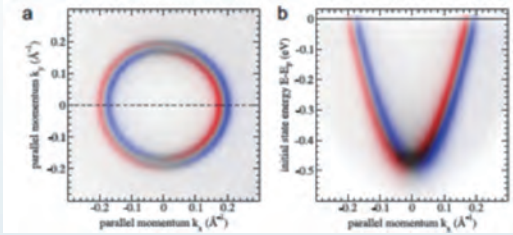
C. Tusche, A. Kurasyuk and J. Kirschner Ultramicroscopy **159**, 520 (2015).  
D. Vasilyev et al., J. Electron Spectrosc. Related Phenom. **199**, 10 (2015).  
G. Schoenhense, JESRP **200**, 94 (2015).

FOM=pixel number × FOM(single channel)  
=100<sup>2</sup> × 10<sup>-2</sup> ~100

- PEEMレンズを利用するため試料周りが高電圧
- 操作が難しい

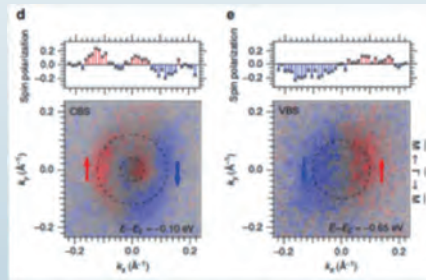
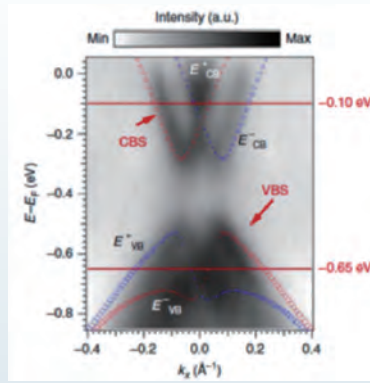
# 測定例

Au(111)  
MM+Laser (6eV)



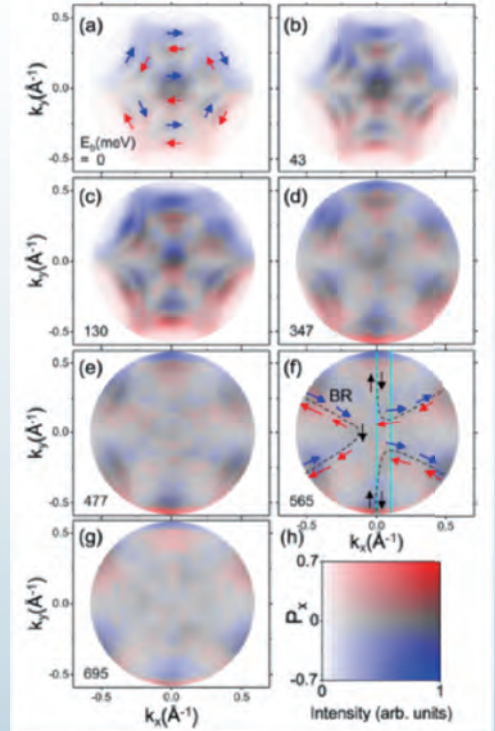
C. Tusche, A. Kurasyuk and J. Kirschner  
Ultramicroscopy **159**, 520 (2015).

BiTeI  
MM+He lamp



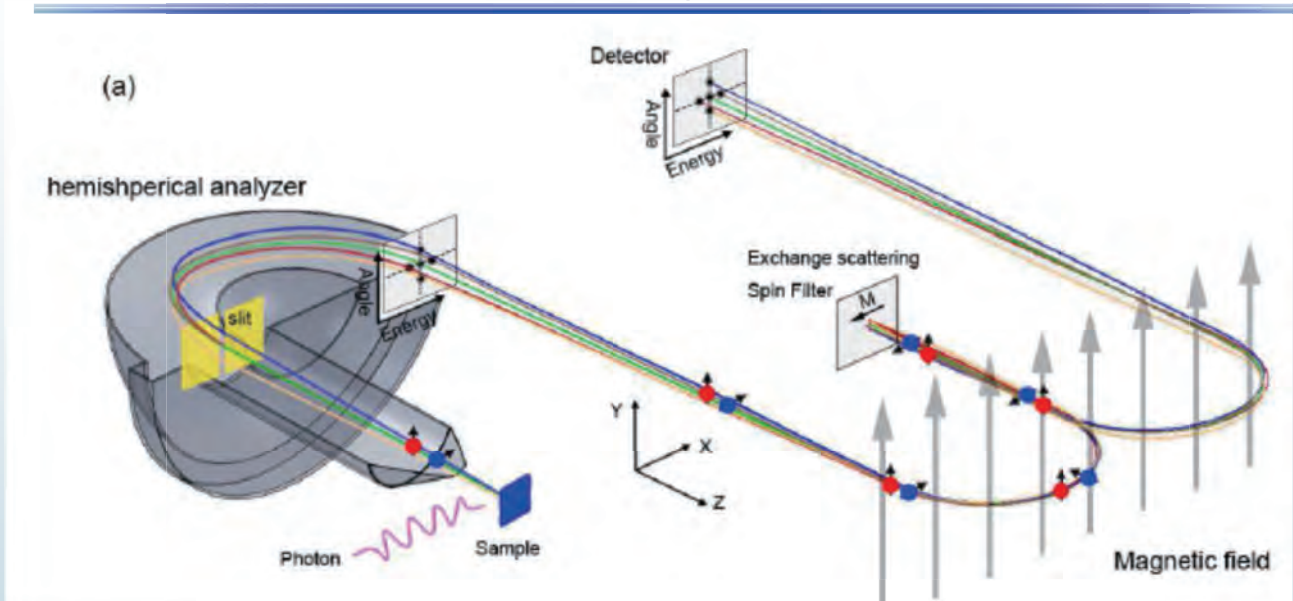
H.Maass et al. Nat. Commun. **7**, 11621 (2016).

TOF-MM+SR (BESSYII 22eV)  
 $\alpha$ -GeTe(111)



H.J. Elmers et al. , PRB **94** 201403 (2016).

## Multi channel spin detection using Fe(001)p1x1-O

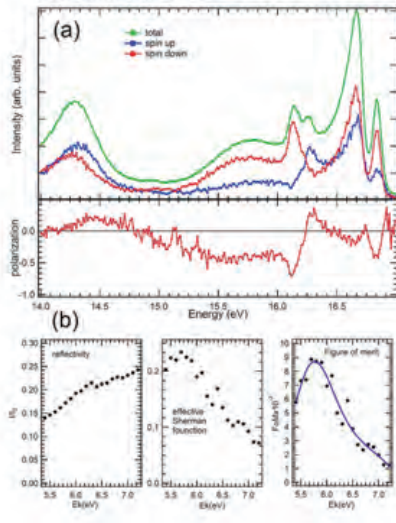


F. Ji,...S. Qiao PRL **116**, 177601 (2015).

# 測定例

## Bi(111)

Bi(111)  $\Gamma - M$  direction  
 T=78.3K acquisition time: 3 x 3h  
 A20 mode Epass=5eV

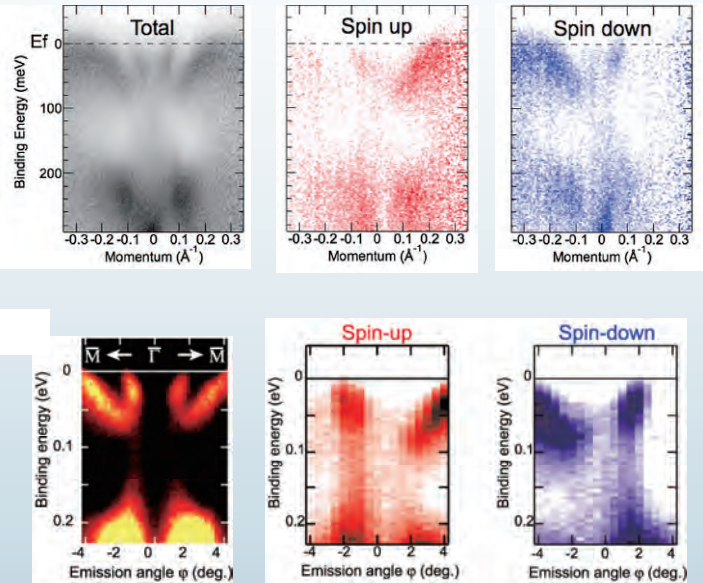


$$\text{FOM} \sim 83^2 \times 8.5 \times 10^{-3} = 57$$

$$\Delta E = < 10 \text{ meV}$$

$$\Delta \theta = 0.26^\circ (0.003 \text{ \AA}^{-1} @ 6 \text{ eV})$$

F. Ji ..... and S. Qiao PRL 116, 177601 (2016).



- まだ発展途上
- 磁場レンズがむずかしい。

# Multi channel Mott @SLS

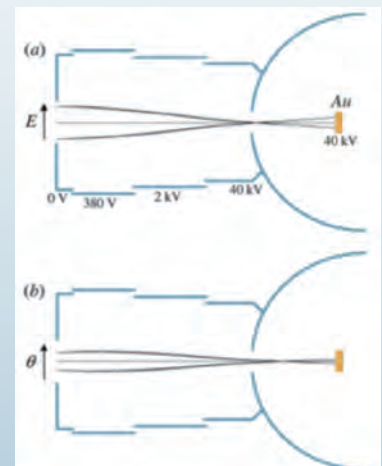
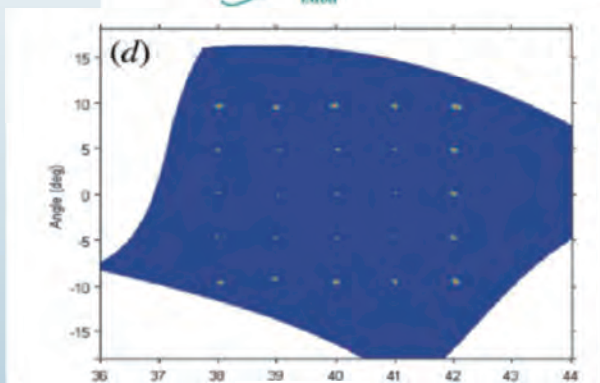
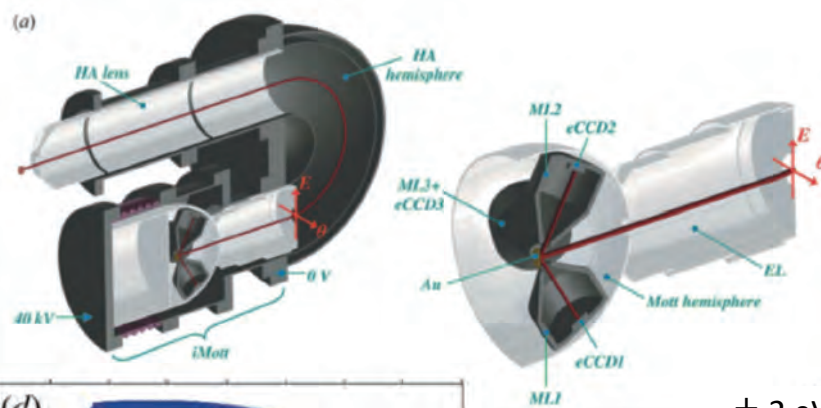
V. N. Stokov, V. N. Petrov, J. Hugo Dil, J. Synchrotron Rad. 22, 708 (2015).

### At Analyzer

Entrance slit = 0.2 mm  
 Epass = 40 eV  
 $\Delta E = 36 \text{ meV}$   
 $\Delta \theta = 0.07^\circ$

### At CCD

$\Delta E = 50 \text{ meV}$   
 $\Delta \theta = 0.63^\circ$



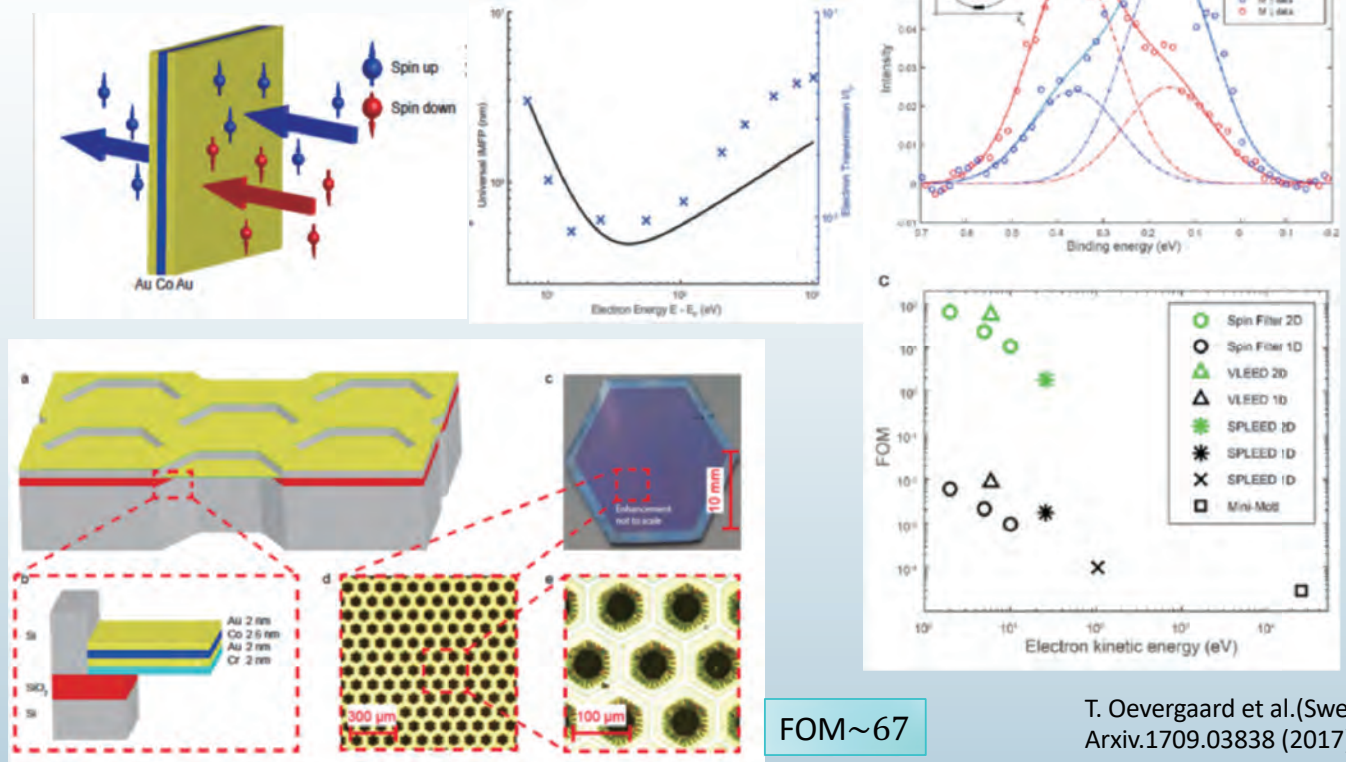
$\pm 2 \text{ eV}$

$\pm 9.5 \text{ deg}$

$\pm 9.5 \text{ deg}$

$\pm 2 \text{ eV}$

# 2Dスピンフィルター



## まとめ3：シングルチャンネル vs マルチチャンネル

	シングルチャンネル VLEED	マルチチャンネル VLEED	MM + Au/Ir filter
効率 (FOM)	△	○	◎
高エネルギー分解能	◎	○	○
高波数分解能	○	○ or ◎	◎
3Dベクトル測定	○	△	△
微小領域測定	△	○	◎
微小試料測定	◎	◎	△
時間分解測定	△	△	△
操作性・汎用性	◎	○	△

- マルチ化できると効率は飛躍的に向上 >>> 分解能も上げられる可能性
- 3Dベクトル解析はまだ未報告。
- MMは、微小領域測定は得意だが、微小試料は不得意
- 現状のシステムは時間分解測定とはやや相性悪い。(複数回測定必要)
- 操作には熟練が必要?
- 現状で市販されているのはMMのみ。



# Outline

- 主なスピン分析器と特徴（復習）

Mott, VLEED, Au/Ir or W filter

- スピンARPESの近年の進展

- マルチチャンネル検出器の現状

- 国内外のスピンARPES（ビームライン）の現状と将来

## 日本の状況

黒：稼働中、緑：開発中、青：計画中？

### UVSOR

SR  
MBS A1 +2D or 1D  
multi VLEED

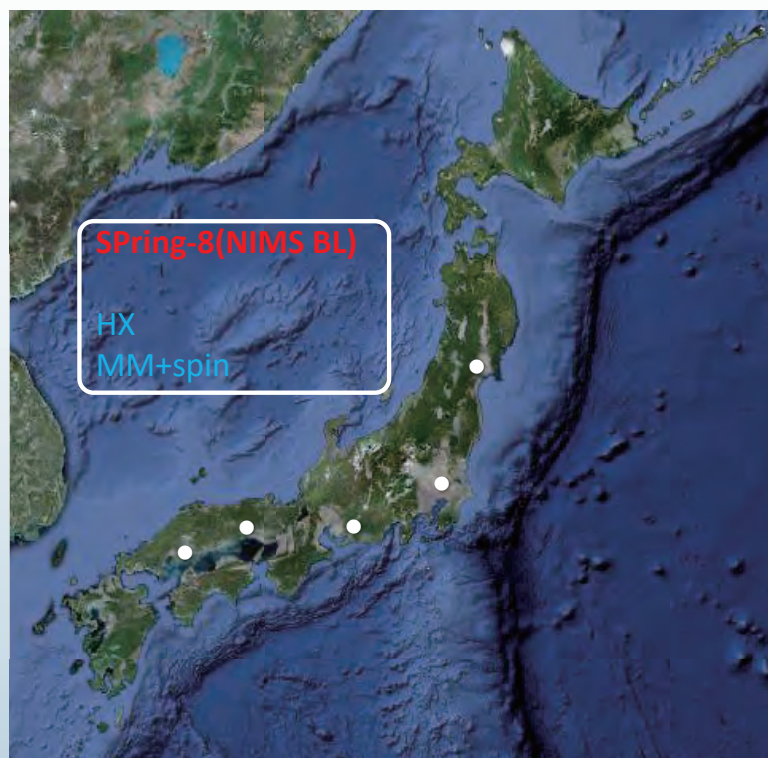
MM+spin

### HiSOR

SR 13-100 eV  
Scienta R4000 +VLEED

Laser 6 eV  
Scienta DA30+VLEED

Multi channel  
SES 2002 +VLEED



### Sato Lab.

Xe, He lamp

MBS A1+Mott  
(VLEED, 2D or 1D  
multi)

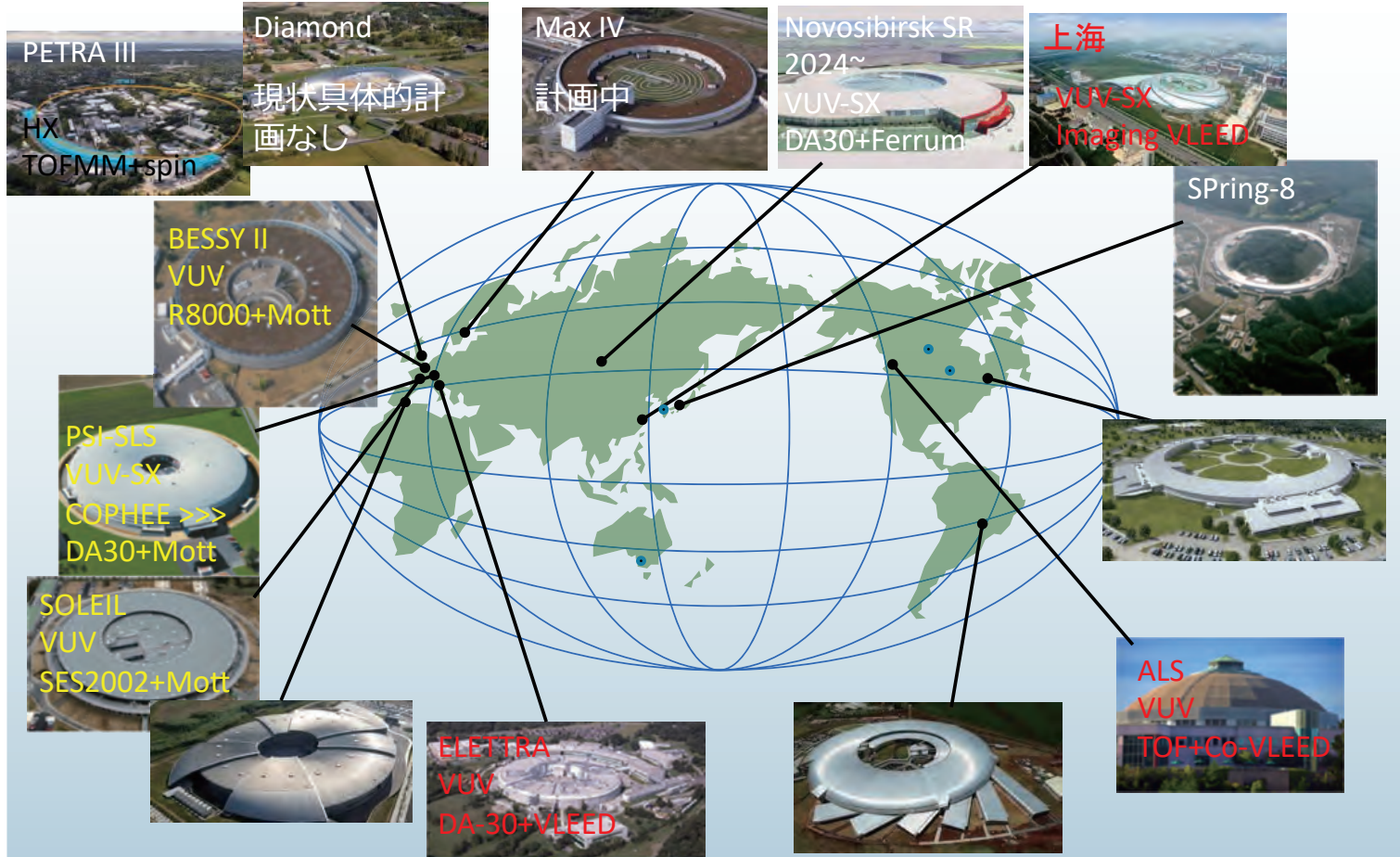
### LASOR

Laser 7 eV  
Scienta DA30 +VLEED

Laser 12 eV  
Kondo-san

Multi channel  
Yaji-san

# 世界の放射光とスピン分解光電子装置



## 世界の状況

黒：稼働中、緑：開発中、青：計画中 ☆：3GeV級

### • 中国

- ☆ 2D VLEED+Scientia R3000, 2D VLEED+Scientia DA-30? (labo.>>>上海LS)
- Mott+Scientia+Laser (Zhouグループ)

### • 韓国

- VLEED+Scientia DA-30 (PLS)

### • ヨーロッパ

- ☆ Mott+Scientia R8000 (BESSYII)
- Momentum Microscope + spin (Jurich)
- MM+TOF+spin (PETRA III)
- ☆ Mottx2+Omicron (SLS COPHEE >>> upgrade 2020>>>SLS2.0 2023 7-1000 eV T<4K, 1.6 meV, 50μm) Mottx2+Scientia DA30
- ☆ VLEEDx2+Scientia DA-30, (MM) (ELETTRA)
- ☆ Mott+Scientia SES2002 >>> FERRUM + MBS A1 (SOLEIL)
- ☆ MM+TOF+spin (Diamond LS)
- ☆ VLEED+SPECS (MAX IV) 10-1000eV

### • アメリカ

- ☆ Co\_VLEED+TOF (ALS)

# 東北3GeVのspin-ARPES計画

	計画 I	計画 II
アンジュレータ	APPLE II	Helical or APPLE II
エネルギー領域	50 ~ 1000 eV	30 ~ 1100 eV
フラックス (試料)	$10^{12}$ photons/sec	$10^{15}$ photons/sec
エネルギー分解能	10,000	>30,000
ビームサイズ	< 100 nm	30 nm
試料環境	He 冷却	4 K, オペランド

## 海外と比較して

- 低エネルギーは出さない
- ビームサイズに特徴

## コンセンサス

- 微小ビームは必須
- 極低温も重要
- 3D測定も重要
- SXを積極的に活用

## 懸案事項

- スピン検出方法は？
- 2D(1D)か0Dか？
- ビームは $\mu\text{m}$ か、nmか？
- 低エネルギーはどうするか？
- 可変偏光は必要か？

## Discussion

- マルチチャンネルにするかどうかは慎重な検討必要
  - 3次元測定が現状では報告されていない。
  - オペレーションの難しさ。
  - コントラストは得られるが、スピン偏極度の絶対値は？
- シングルチャンネルなら日本で経験豊富なVLEEDか？
- 時間分解測定にこだわるならMottもあるか？
- マルチチャンネルではMM + Au/Irフィルターが一日の長？

## まとめ (私見です)

- ビームライン 50-1000eV, 分解能10000-30000, 可変偏光
- 第1期 (or 第1ブランチ)
  - 確実に結果を残すフェーズ(orブランチ) ( $\mu$ -ARPES,  $\mu$ -SARPES)
  - ビームは数 $\mu\text{m}$ でハイスループットな実験。
  - スピン検出はVLEED方式?, 現状確立されたシングルチャンネル+ 3Dスピン測定
  - 低温もそこそこ頑張る
- 第2期 (or 第2ブランチ)
  - 挑戦するフェーズ(orブランチ) (nano-ARPES, nano-SARPES)
  - 数十nmサイズのビームを目指す
  - スピン検出はマルチチャンネル+ 3Dスピン測定
  - 極低温も目指す
  - 時間分解も検討

ナノ ARPES の研究動向  
広島大学・岩澤英明

## ナノARPESの研究動向

岩澤 英明

広島大学 理学研究科 物理科学専攻

2008~2016：広大放射光センター（HiSOR）

**2016~2018：英国放射光（Diamond Light Source）**

2018~：現所属

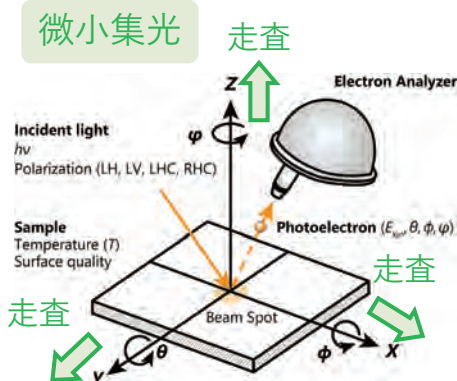


## Outline

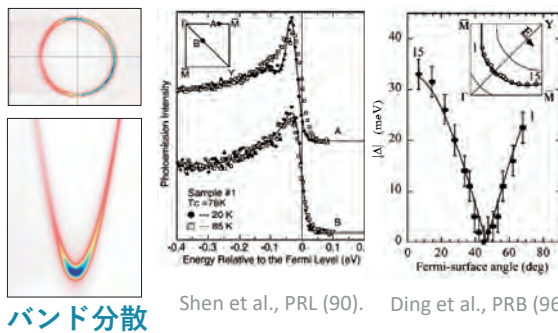
- 国内外のナノARPES・軟X線ARPESの開発状況
- Diamond Light Source
- ARPES beamline (I05)：高分解能ARPES / ナノARPES
- ナノARPESの研究動向



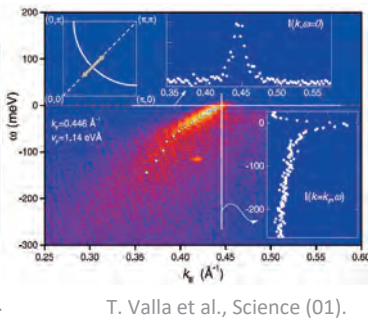
## 微小集光



## フェルミ面 超伝導ギャップ



## 多体効果



## ナノARPES

### ARPESの機能性

#### 角度分解光電子分光

ARPES : Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy

#### 高機能性 (高精度・多自由度)

- 高エネルギー・波数分解能
- 波数空間マップ (角度走査)
- 極低温
- 励起光エネルギーの可変性



### SPEMの顕微能力

#### 走査型光電子顕微分光

SPEM : Scanning PhotoEmission Microscopy

#### 顕微能力 (高空間分解能)

- 微小スポット
- 実空間マップ (位置制御精度)
- ビーム安定性
- 位置安定性

## 国内外におけるナノARPES・軟X線ARPESの開発状況

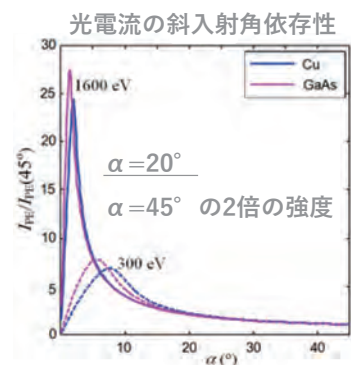
### ■ ナノARPES

	集光方法	スポットサイズ	入射光エネルギー	試料温度	試料ステージ
Elettra Spectromicroscopy	Schwarzschild	500 nm	27 eV & 74 eV	15-470 K	4軸
SOLEIL Antraes	FZP	150 nm	95 - 10000 eV 50 eV or 100 eV	60-80 K	5軸
Diamond I05	FZP	240 - 450 nm	60-150 eV	25-30 K	5軸
ALS Maestro	FZP Capillary	120 nm 450 nm	80 - 1000 eV	RT	5軸

建設中/予定 : SSRF, TPS, NSLS-2

### ■ 軟X線ARPES × イオン化断面積の減少 (2-3桁) ⇨ 斜入射実験配置 (cosの逆関数で増大)

	入射光エネルギー	偏光	分解能力	光量	スポットサイズ
SLS ADDRESS	300 - 1600 eV	可変	33,000 @ 1 keV	> 10 <sup>13</sup>	10 x 74 μm <sup>2</sup>
SPring-8 BL-25SU	220 - 1000 eV	円偏光	10,000 @ 1 keV	> 10 <sup>11</sup>	1 x 120 μm <sup>2</sup> (30 x 80)
Diamond I09	500 - 1300 eV	可変	-	-	40 x 20 μm <sup>2</sup>
PETRA-III P04	250 - 3000 eV	可変	> 30,000 @ 1 keV	> 10 <sup>12</sup>	10 x 10 μm <sup>2</sup> (1 x 1 更新予定)



V. N. Strocov et al, Springer Ser. Mater. Sci., 266, 107 (2016).

## エネルギー分解能に関して(1)

### ■ 装置のエネルギー分解能

$$\Delta E_{\text{Intrum}} = \sqrt{\Delta E_{\text{BL}}^2 + \Delta E_{\text{Ana}}^2}$$

### ■ アナライザー分解能

$$\Delta E_{\text{Ana}} \sim \frac{E_p w}{2R}$$

○  $E_p$  : パスエネルギー

$$E_{p\_min} = 20 \text{ eV } (E_{kin} < 450 \text{ eV})$$

$$E_{p\_min} = 50 \text{ eV } (450 \text{ eV} < E_{kin} < 1 \text{ keV})$$

○  $w$  : アナライザーのスリット幅

○  $R$  : アナライザーの半径

## エネルギー分解能に関して(2)

**R= 200 mm,  $E/\Delta E_{\text{BL}} = 30,000 @ 50 \text{ eV}$**

$E_p$ (eV)	$w$ (mm)	$\Delta E_{\text{Ana}}$ (meV)	$\Delta E_{\text{Tot}}$ (meV)
20	0.2	10	10.1
50	0.2	25	25.1
20	0.1	5	5.3
50	0.1	12.5	12.6

**$E/\Delta E_{\text{BL}} = 100,000$**

$\Delta E_{\text{Tot}}$ (meV)
10.0
25.0
5.0
12.5

**R= 200 mm,  $E/\Delta E_{\text{BL}} = 30,000 @ 500 \text{ eV}$**

$E_p$ (eV)	$w$ (mm)	$\Delta E_{\text{Ana}}$ (meV)	$\Delta E_{\text{Tot}}$ (meV)
20	0.2	10	19.4
50	0.2	25	30.0
20	0.1	5	17.4
50	0.1	12.5	20.8

**$E/\Delta E_{\text{BL}} = 100,000$**

$\Delta E_{\text{Tot}}$ (meV)
11.2
25.5
7.1
13.5

**R= 200 mm,  $E/\Delta E_{\text{BL}} = 30,000 @ 1 \text{ keV}$**

$E_p$ (eV)	$w$ (mm)	$\Delta E_{\text{Ana}}$ (meV)	$\Delta E_{\text{Tot}}$ (meV)
20	0.2	10	34.8
50	0.2	25	41.7
20	0.1	5	33.7
50	0.1	12.5	35.6

**$E/\Delta E_{\text{BL}} = 100,000$**

$\Delta E_{\text{Tot}}$ (meV)
14.1
26.9
11.2
16.0



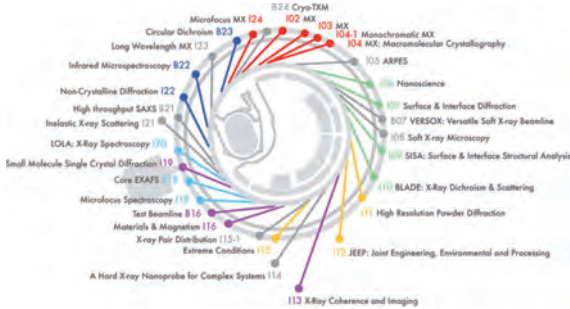
# Diamond Light Source (DLS)



- 第3世代 高輝度・中型放射光
  - 電子エネルギー : 3.0 GeV
  - 電流値 : 300 mA (Top-up)
  - 高輝度
  - 低エミッタンス : 2.7 nrad

- 2017年 : 運転後10周年
  - 更新計画 : Diamond-II (2026~)

<https://www.diamond.ac.uk/Home/About/Vision/Diamond-II.html>



## ■ I05 : ARPESビームライン

- 高分解能ARPES
- ナノARPES

岩澤英明「Diamond Light Source と ARPES ビームライン I05 の現状」  
VUV・SX高輝度光源利用者懇談会・ニュースレター (web24 2016)  
<http://vsx-community.com/letter2017/>



## ■ I09 : HAXPESビームライン

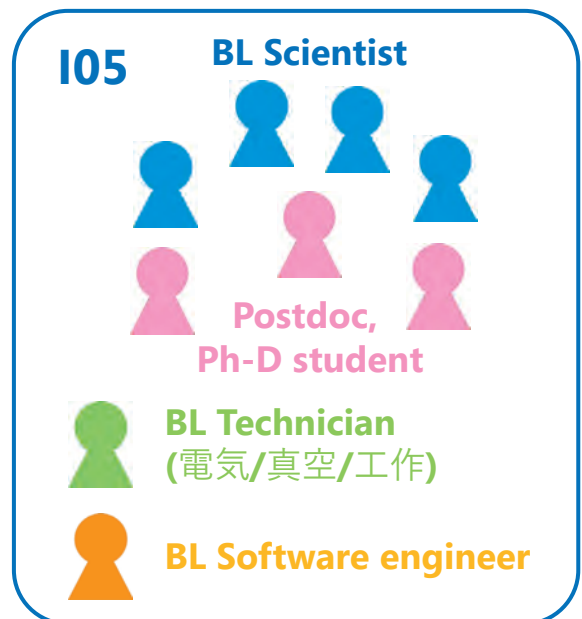
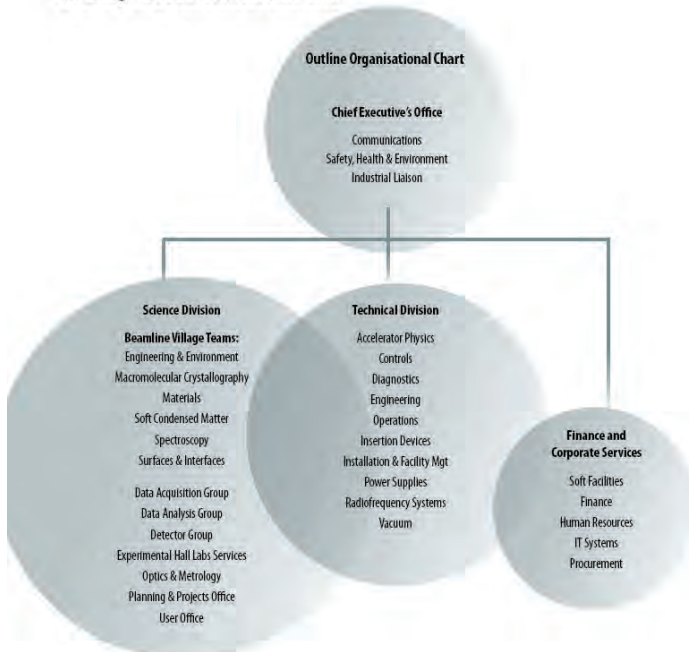
- 硬X線PES
- 軟X線ARPES + Momentum microscope  
(under designing)

# DLSの強み : 組織

## ■ 組織力

- 各分野の専門家を十分に集結
- 十分なマンパワー
- グループ間が機能的に連携

### Staffing and Financial Information



Motion group  
Vacuum group, etc.

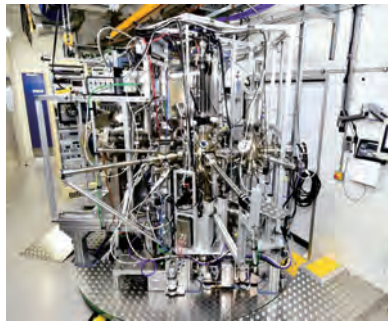
# DLSの強み：エンジニア

## ■ 大型・先端機器も内部開発

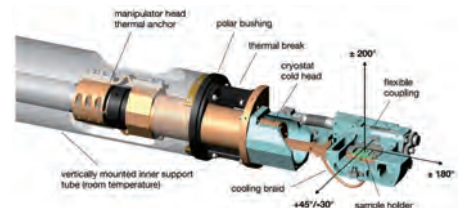
準周期Apple-IIアンジュレータ



回転型超真空計測システム



高精度・極低温6軸  
試料マニピュレータ



## ■ 装置開発・製作

BL Scientist

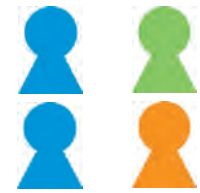


Engineering group

図面のチェック/強度計算など

Software group

プログラムの作成 / 組み込みなど



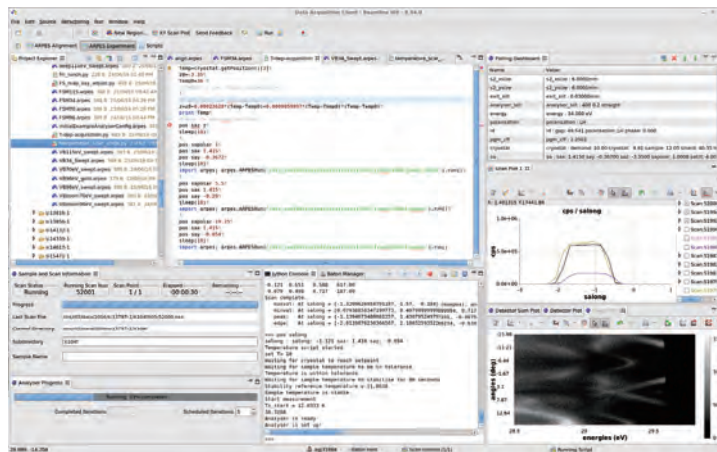
装置/ソフトウェアの開発・経験 → BLだけでなく各部門に蓄積 → 人員の流動性の確保

# DLSの強み：ソフトウェア

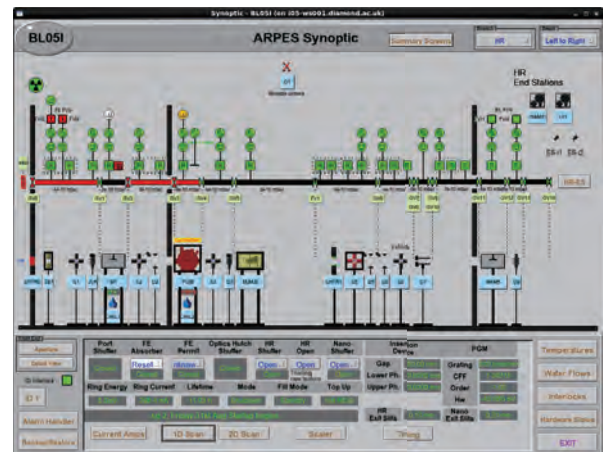
測定・Beamline制御ソフトウェアの基本部分は全ビームライン共通

## ■ 計測ソフト

GDA : General Data Acquisition



## ■ Beamline制御 (EPICS based)



## ■ 自動計測

スキャン (位置・角度)  
試料  
回折格子・ミラー  
スリット  
励起光  
偏光  
アンジュレータギャップ

検出  
アナライザ  
フォトダイオード  
MCP (カメラ)



## ■ 解析ソフト開発

DAWN

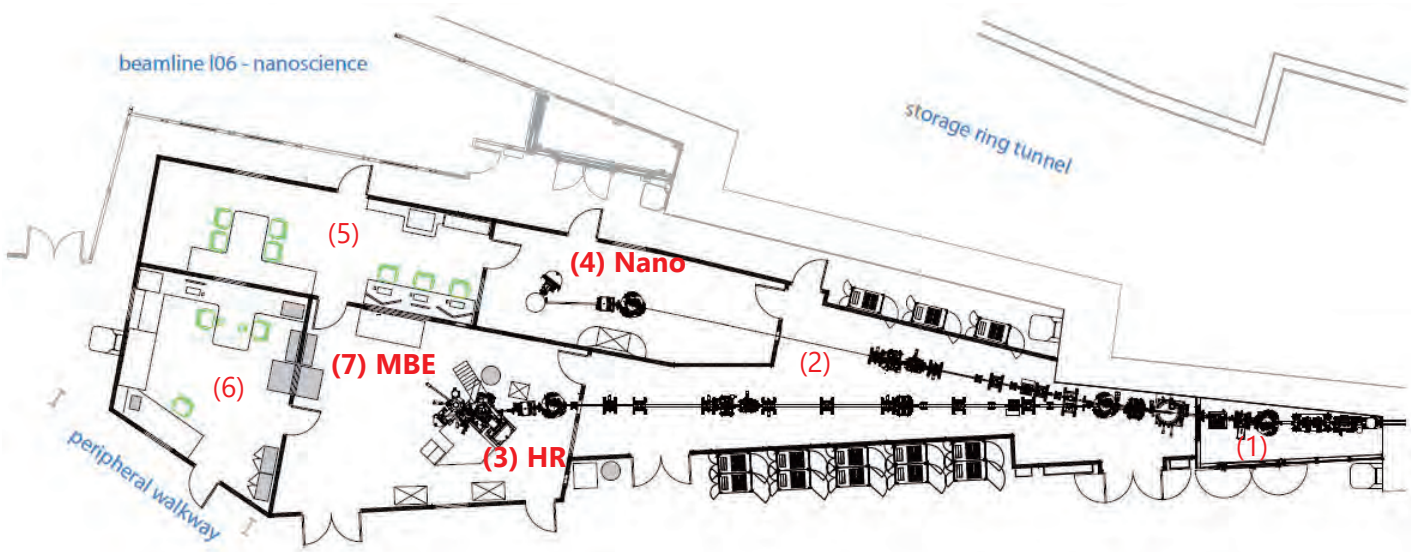
Suitable for image visualization

<https://dawnsci.org/>

大規模データ



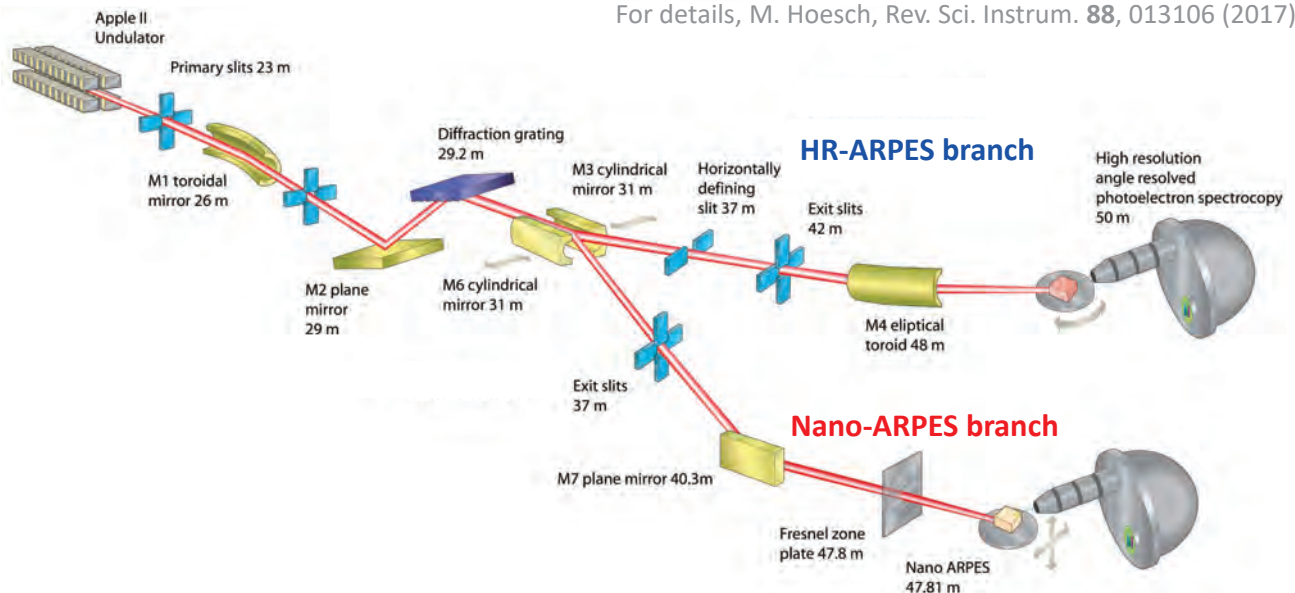
# DLS, I05 : Floor layout



- |                |             |
|----------------|-------------|
| (1) 光学ハッチ      | (4) ナノARPES |
| (2) 分光器        | (5) 実験制御室   |
| (3) 高分解能ARPES  | (6) 試料準備室   |
| (7) MBE (+XPS) |             |

## DLS, I05 : 高分解能ARPES

For details, M. Hoesch, Rev. Sci. Instrum. **88**, 013106 (2017).



- 高輝度・高分解能  
可変偏光・微小スポット
- $h\nu$  : 18-240 eV ( $>10^{12}$  photons/sec)
- APPLE-II quasi-periodic undulator  
Variable pols. (LV, LH, RCP, LCP)
- PGM ( $E/\Delta E \sim 2 \times 10^4$  for 20-80 eV)
- 60  $\mu\text{m}$  spot size

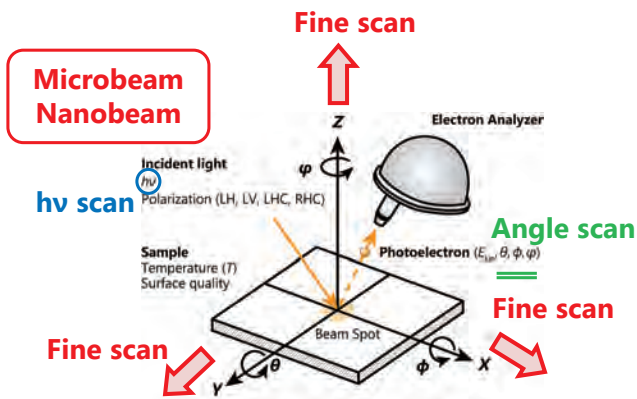
- 高分解能光電子分析器
- Scienta, R4000
- 試料マニピュレーター
- 極低温 ( $T \sim 4\text{-}300$  K)
- 広角度制御  
Tilt  $+45/-35$  deg.  
Azimuth  $\pm 180$  deg.

- 取り扱いの容易さ
- 試料導入・搬送・測定  
(1人で容易に可能)
- 自動測定  
位置/角度/励起光走査

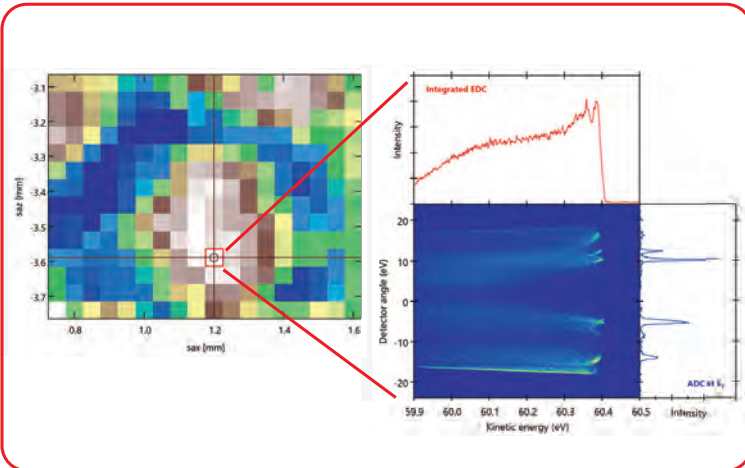


➡ ハイスループット : 25 papers (2019) , 37 papers (2018) , 34 papers (2017)

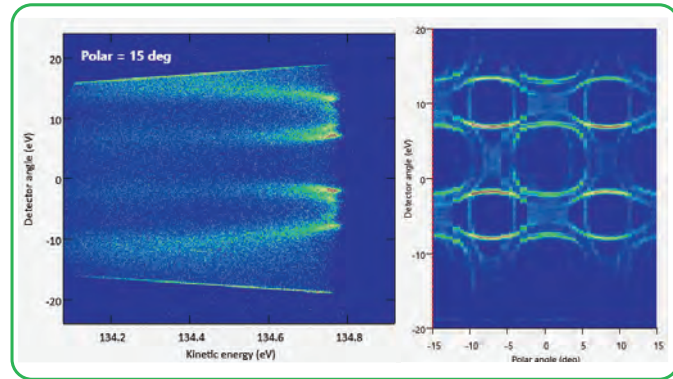
# DLS, I05における高分解能ARPES測定の効率化



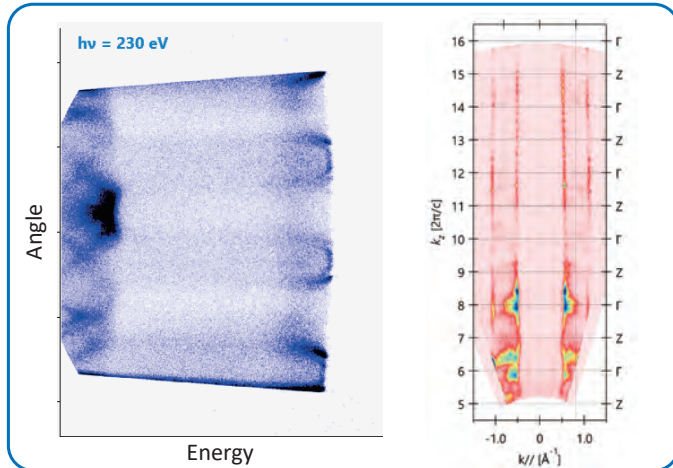
試料面マッピング (実空間)



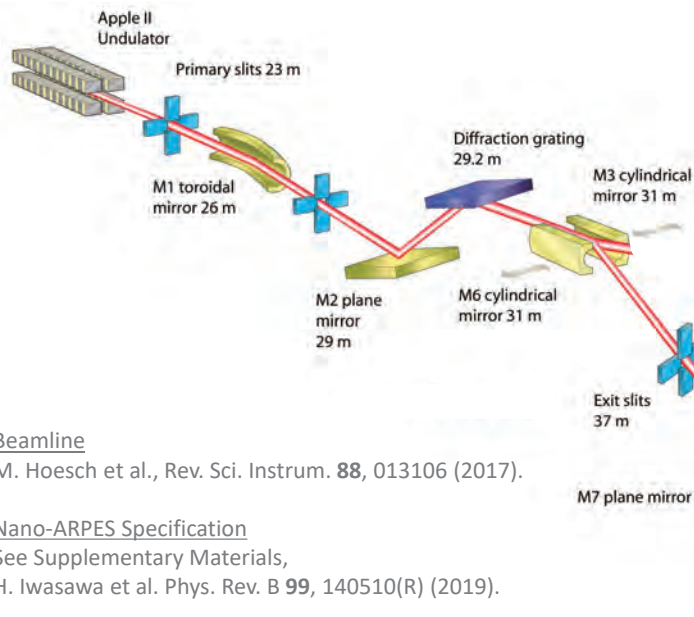
フェルミ面マッピング (試料面内)



フェルミ面マッピング (試料面外)

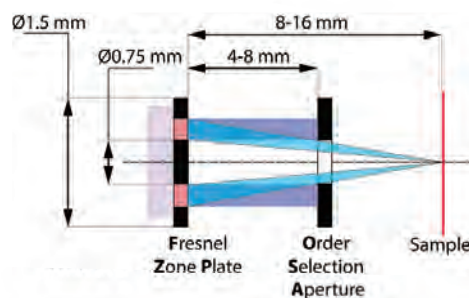


## Nano-ARPES branch



### Fresnel zone plate (SiN)

by J. Bosgra, B. Rosner, PSI, Switzerland



#### Beamline

M. Hoesch et al., Rev. Sci. Instrum. 88, 013106 (2017).

#### Nano-ARPES Specification

See Supplementary Materials,  
H. Iwasawa et al. Phys. Rev. B 99, 140510(R) (2019).

#### Basic spec.

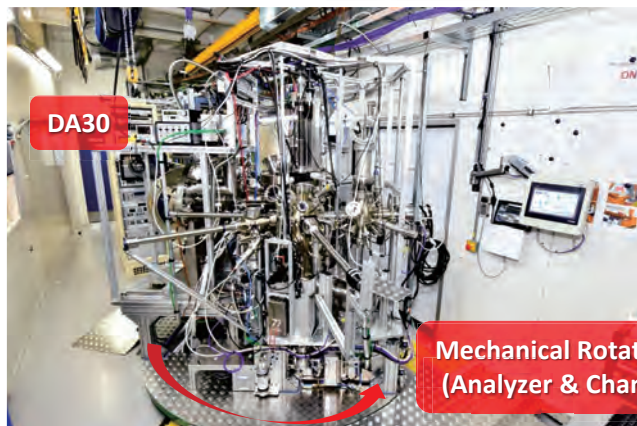
- Photon energy : 60-150 eV
- Polarization : LH, LV, LCP, RCP
- 5-axis manipulator  
Polar & Azimuthal rotation  
**T ~ 30-300 K**

#### Resolutions

- Energy (\*) : ~ 30 meV
- Spatial : < 500 nm

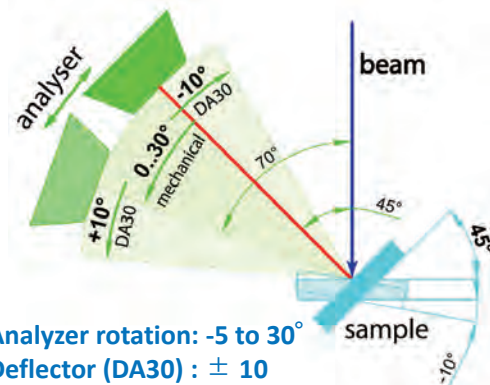
Due to Low counts (~1/700 of standard ARPES)

# ナノARPES endstation @ DLS, I05

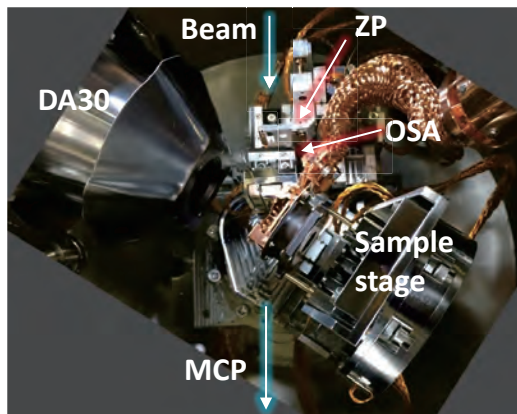
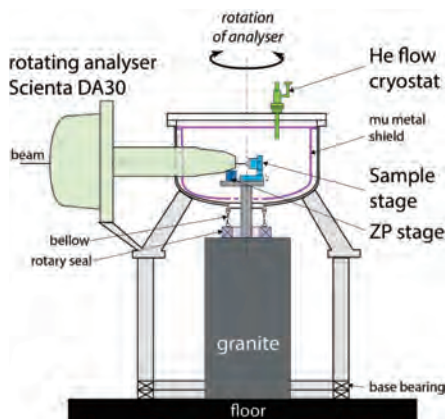


DA30

Mechanical Rotation  
(Analyzer & Chamber)



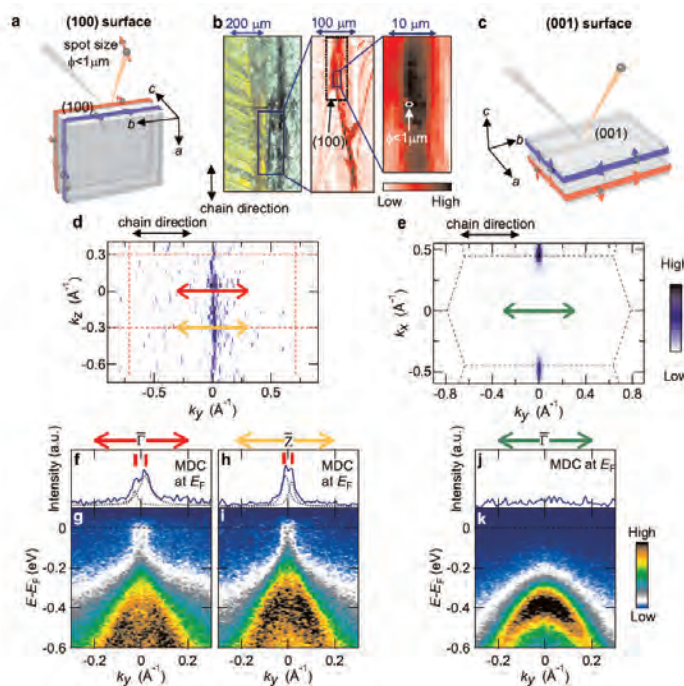
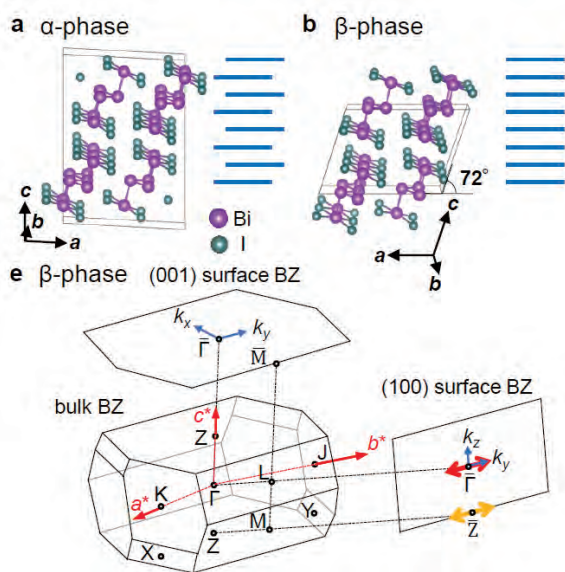
- Analyzer rotation: -5 to 30°
- Deflector (DA30) : ± 10°



試料・光の位置関係を変えずに波数マッピング可能

## ナノARPESの研究例：ピンポイント測定

側面に存在する「弱いトポロジカル電子状態」を実証

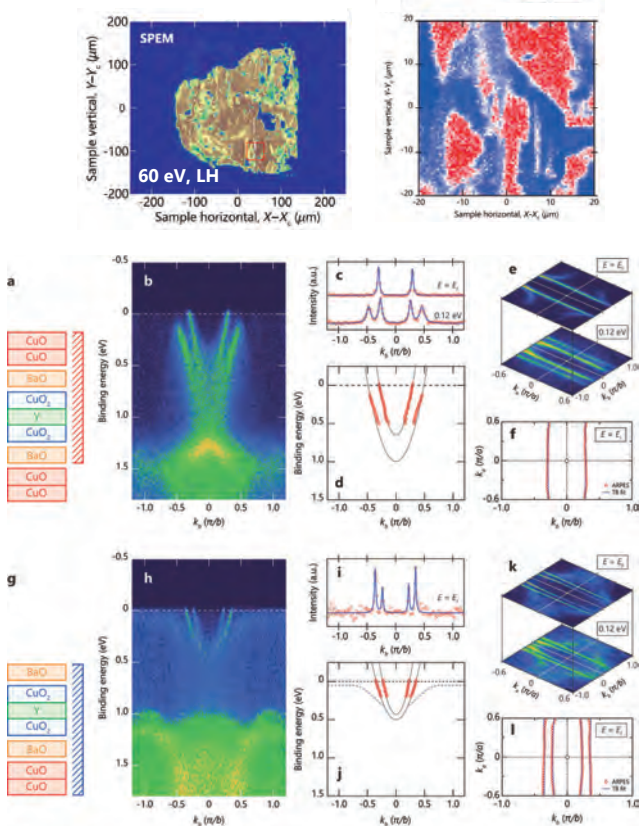


ビスマスヨウ化物  
 $\beta\text{-Bi}_2\text{Se}_3$   
 $h\nu = 85 \text{ eV}$   
 $T = 35 \text{ K}$

R. Noguchi, T. Kondo et al. (ISSP, Univ. of Tokyo)  
Nature 566, 518–522 (2019).

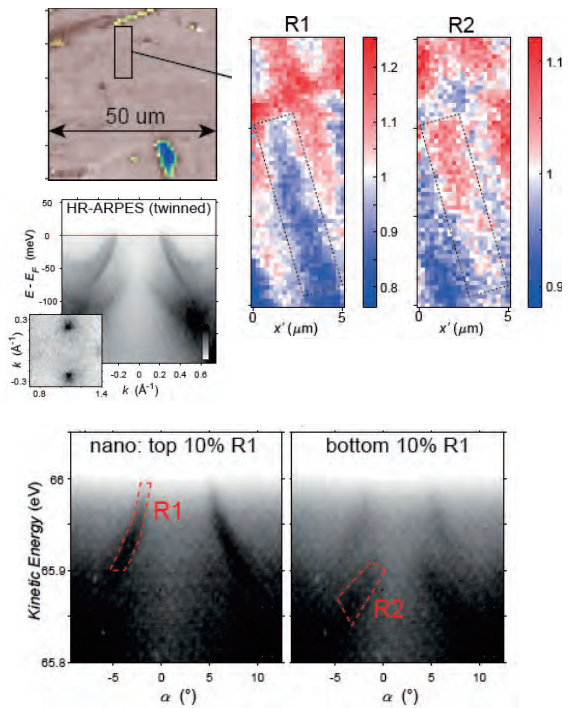
# ナノARPESの研究例：不均一表面の選択的測定

## ■ Y系銅酸化物の終端面依存性 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> (Y124)



H. Iwasawa et al. Phys. Rev. B 99, 140510(R) (2019).

## ■ 双晶ドメインの分離観測 un-detwinned BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>

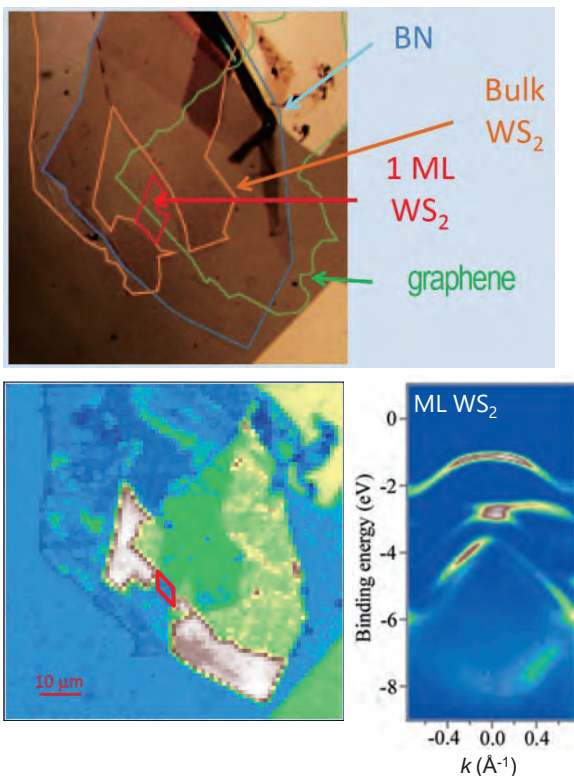


M.D. Watson et al. npj Quantum Mat. 566, 518–522 (2019).

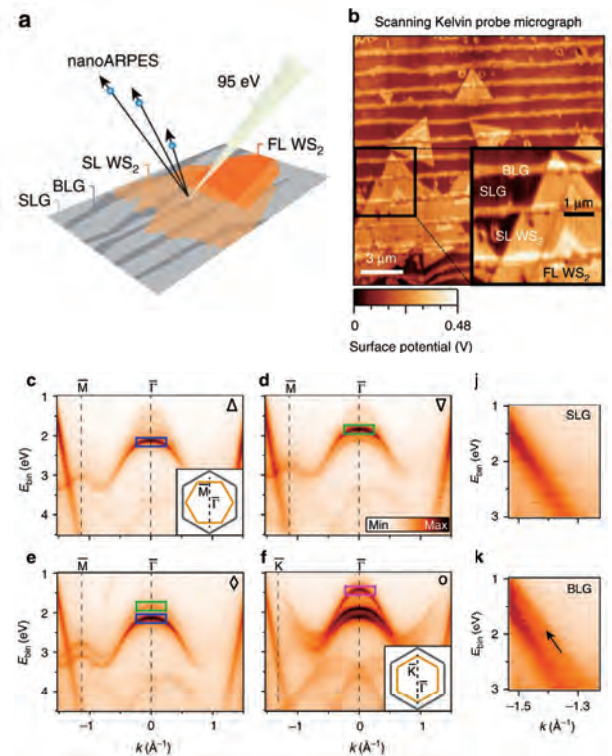
# ナノARPESの研究例：ヘテロ構造

## ■ 遷移金属ダイカルコゲナイド

Nano-scale heterostructures : Monolayer ~ few monolayer WS<sub>2</sub> / Single layer or Bilayer Graphene



B. Rösner et al., J. Synchrotron Rad. 26, 467-472 (2019).



Søren Ulstrup et al., Nat. Commun. 10, 3283 (2019).

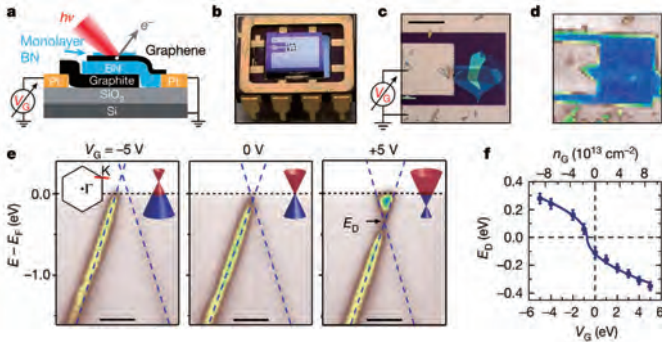
# ナノARPESの研究例：デバイス/オペランド測定

## ■ ゲート電圧印加下のナノARPES

### Elettra, Spectromicroscopy

Visualizing electrostatic gating effects in two-dimensional heterostructures.

#### Monolayer Graphene / BN

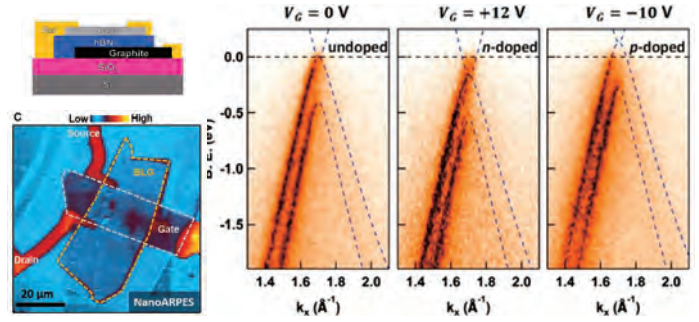


P. V. Nguyen et al., Nature 572, 220 (2019).

### SOLEIL, Antraes

Visualizing the effect of an electrostatic gate with angle-resolved photoemission Spectroscopy.

#### Bilayer graphene / hBN



F. Joucken et al., Nano Lett. 19, 2682 (2019).

同様の測定がDiamond, ALSで既に可能

## まとめ

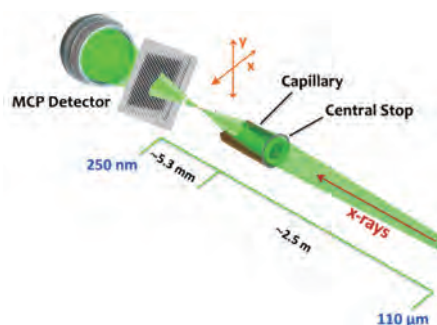
### ナノARPESの研究動向

#### ■ 高空間分解能

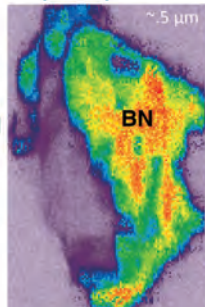
改善点

#### ➔ 局所領域のバンド分散・フェルミ面

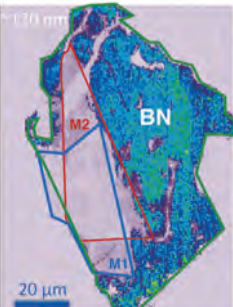
- ×低効率：フェルミ面の空間マップ、△エネルギー分解能
- ×低機能性：励起光エネルギー可変性、温度可変性、△最低到達温度



#### Capillary



#### ZP



Eli Rotenberg, SRI2018 Presentationより

➔ 集光系の発展 (Capillary / 回転楕円) 高効率集光 ➔ 高分解能・多機能化

#### ■ ARPES手法の発展・高度化

高分解能・軟X線ARPES：3D電子状態，バルク/界面の微細電子状態

高分解能・軟X線ナノARPES：局所領域のバルク/界面の微細電子状態

高効率・軟X線ナノARPES：局所領域の3D電子状態，フェルミ面の空間マップ

軟X線ナノ・スピンARPES：局所領域の電子・スピン状態

✗ オペランド  
電圧・圧力印加

**QSTにおけるスピントロニクス材料研究の展開**  
**量子科学技術研究開発機構・境誠司**



# QSTにおけるスピントロニクス材料研究の展開

量研 量子ビーム科学部門

境 誠司

次世代放射光ナノ光電子分光ワークショップ2019 2019.10.2



1990

2000

2020

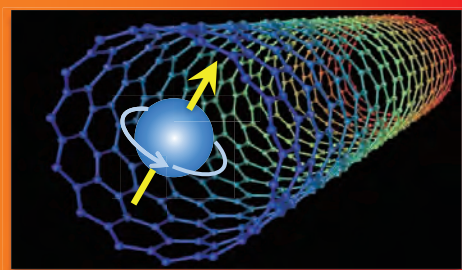
2030

2040

情報技術 エレクトロニクス **スピントロニクス**



量子テクノロジー時代

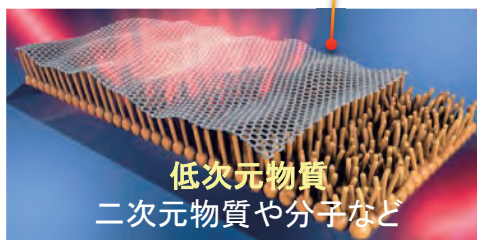


材料技術 **電子機能材料**

**量子機能材料**



三次元物質  
半導体や金属など



低次元物質  
二次元物質や分子など

**量子スピントロニクス**

- ・二次元物質スピントロニクス
- ・スピンオービトロニクス
- ・スピノットロニクス, バレトロニクス 等

情報技術と材料科学が  
量子スケールで融合

I. 量子スピントロニクス材料の研究

II. 先端量子ビーム計測技術の開発

# QSTにおけるスピントロニクス材料研究

## I. 量子スピントロニクス材料の研究

深さ分解XMCD分光による

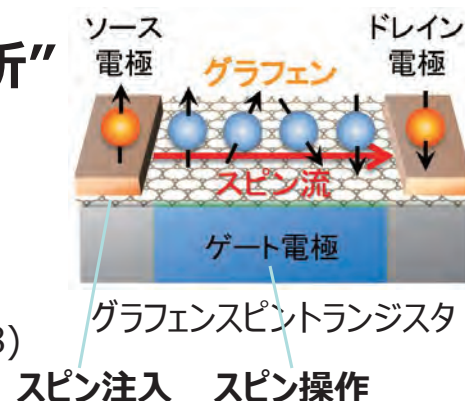
### “グラフェン/ホイスラー合金ヘテロ構造の分析”

李他, *Advanced Materials* (to be accepted)

スピン偏極Heビームで

### “磁性絶縁体YIGの近接効果を解明”

境他, *Advanced Functional Materials* 28, 1800462 (2018)



## II. 先端量子ビーム計測技術の開発

深さ分解放射光メスbauer分光により

### “鉄表面にスピンのさざ波を発見”

三井他, *Physical Review Letters* (10月投稿予定)



## I. 量子スピントロニクス材料の研究①

深さ分解XMCD分光による

### グラフェン/ホイスラー合金ヘテロ構造の分析

S. Li, P. B. Sorokin, Y. Sakuraba, P. Avramov, K. Amemiya, S. Sakai *et al.*, *Adv. Mater.*, to be accepted

# グラフェン/ホイスラー合金ヘテロ構造の創製

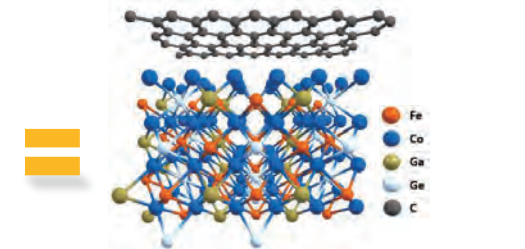
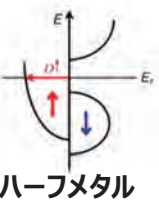
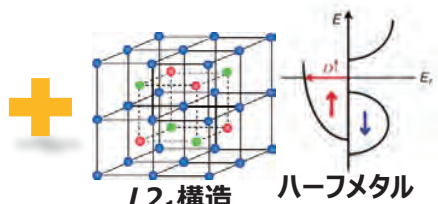
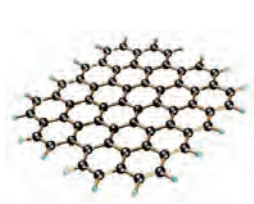
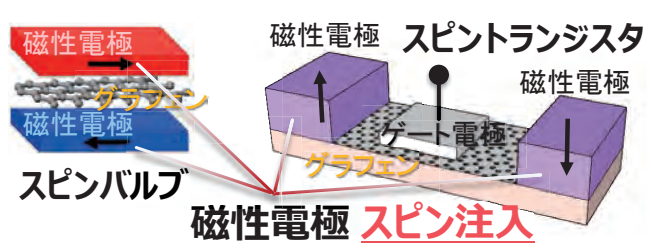
## グラフェンスピンデバイス - 磁性電極によるスピン注入の低効率

・従来の磁性電極 - Ni, Co, NiFe等

**低スピン偏極率(40%)**

・グラフェン/磁性体界面

**磁性やスピン偏極率が低下**



**グラフェンとホイスラー合金(CFGG)の複合化に成功**

**高スピン偏極率(100%)**

CFGG: Co<sub>2</sub>FeGe<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>

## グラフェン/CFGG界面 - 深さ分解XMCD分光で分析

# 深さ分解XMCD分光

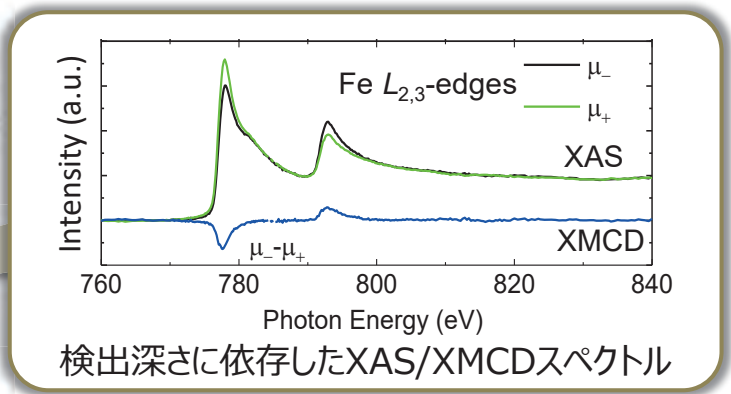
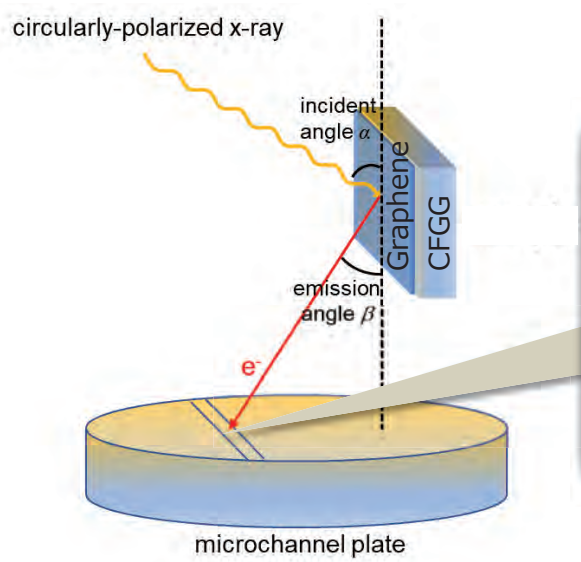
K. Amemiya, Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 10477 (2012)

XMCD分光 - 元素選択的な電子・磁気状態の計測手法



KEK-PF BL7A

**部分電子収量法をベースに深さ分解測定を実現**



検出深さに依存したXAS/XMCDスペクトル

**平均検出深さ : 0~2 nm**

X線吸収に伴う放出電子を角度分解して検出

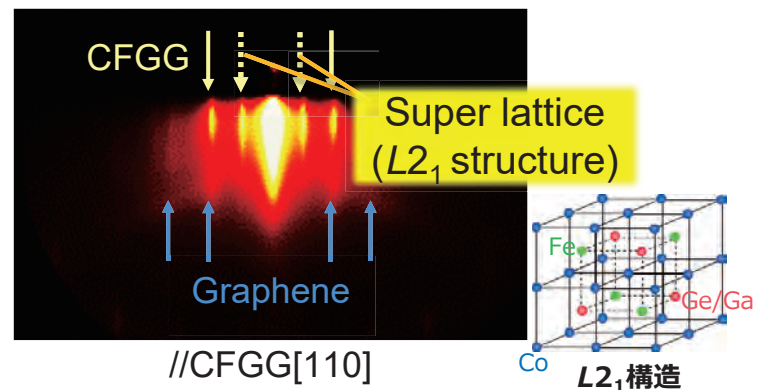
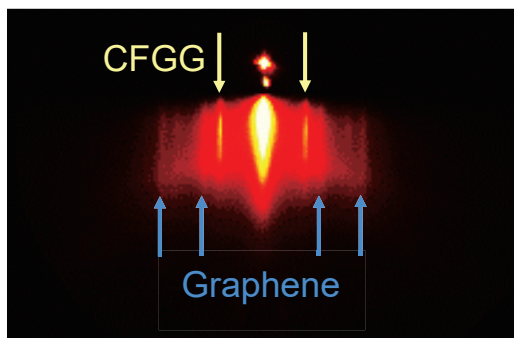
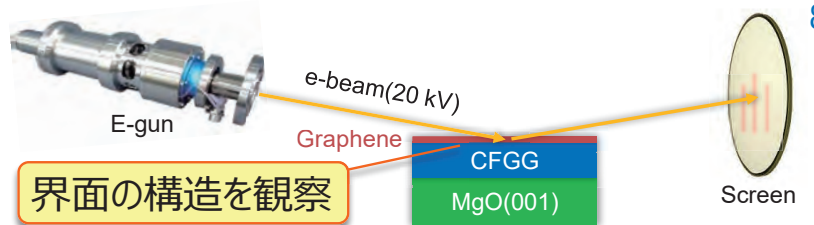
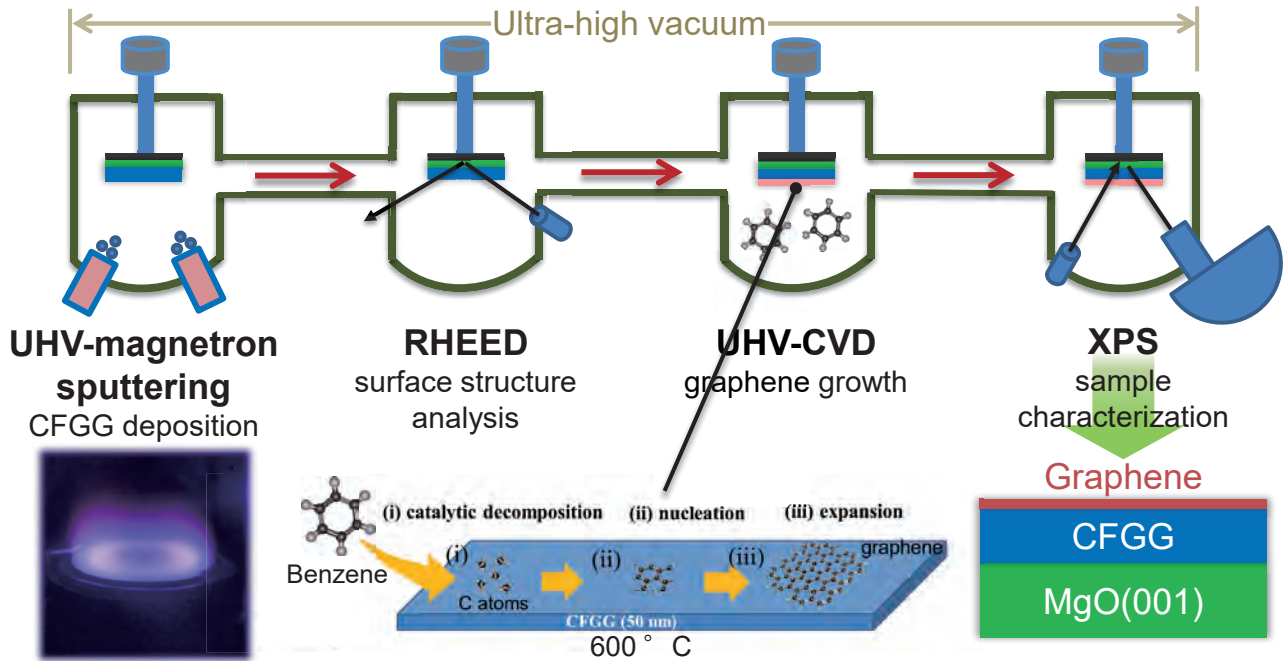
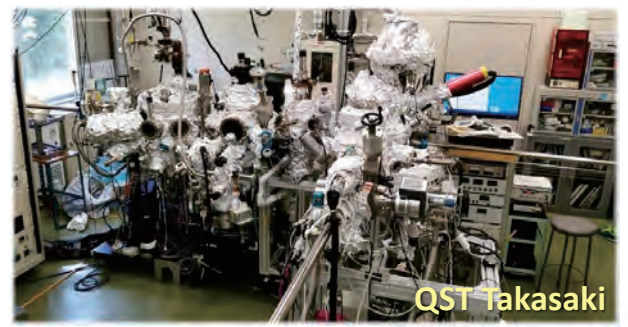
**二次元物質/磁性体ヘテロ構造の研究に利用**

# 超高真空その場成膜装置

## グラフェン/CFGGヘテロ構造を作製

CFGG( $\text{Co}_2\text{FeGe}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ )

- スピン偏極率最大のハーフメタルホイスラー合金



## RHEEDパターン

- ・ グラフェン/CFGG界面の高い平坦性
- ・ CFGGの $L2_1$ 構造(~ハーフメタル性)が保たれている
- ・ グラフェンはランダムな面内配向(多結晶)

# 深さ分解XMCD分光

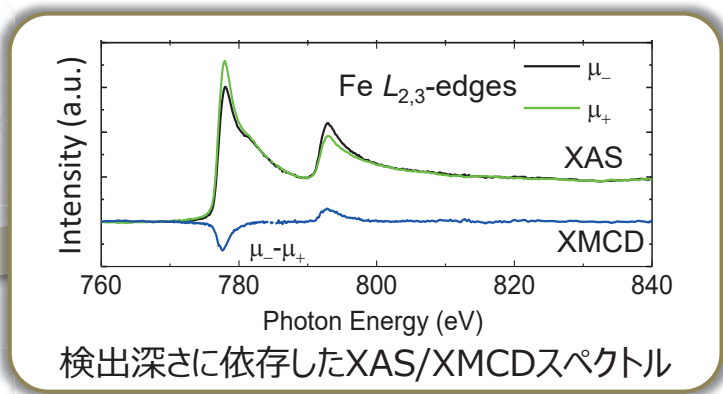
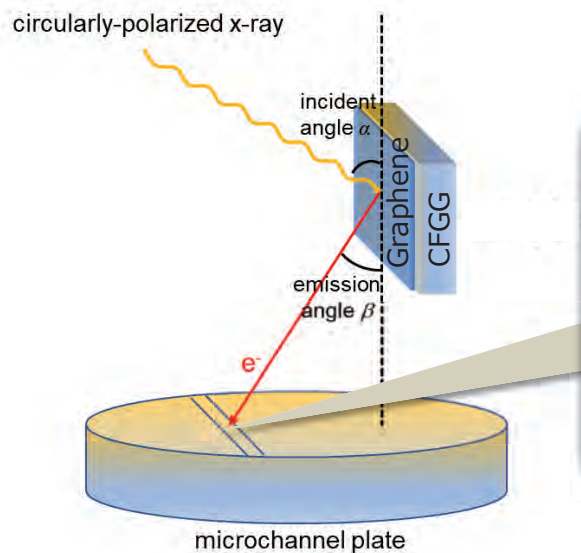
K. Amemiya, Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 10477 (2012)

XMCD分光 – 元素選択的な電子・磁気状態の計測手法



KEK-PF BL7A

## 部分電子収量法をベースに深さ分解測定を実現



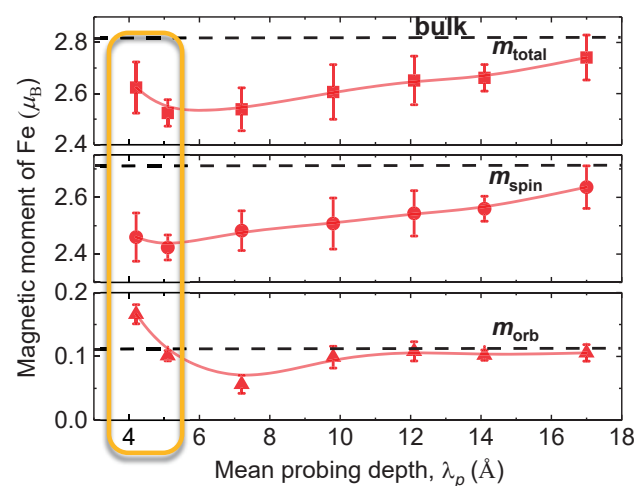
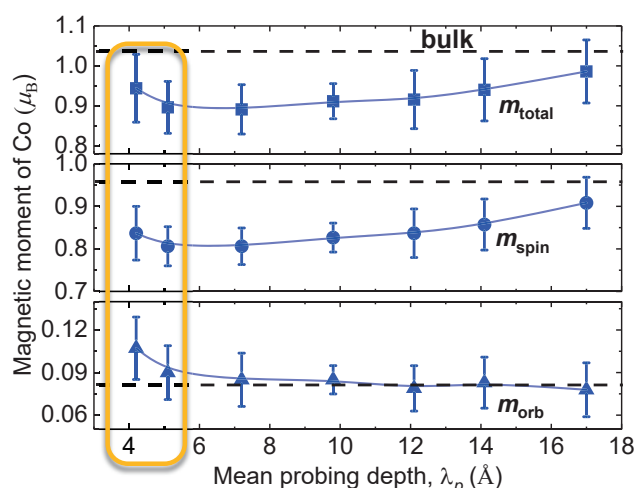
検出深さに依存したXAS/XMCDスペクトル

平均検出深さ : 0~2 nm

X線吸収に伴う放出電子を角度分解して検出

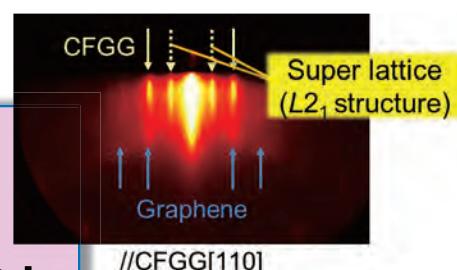
## 二次元物質/磁性体ヘテロ構造の研究に利用

# グラフェン/CFGGヘテロ構造の深さ分解XMCD分光



## Co, Feの磁気モーメントの検出深さによる変化

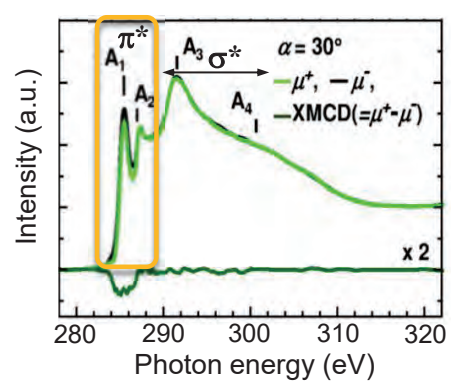
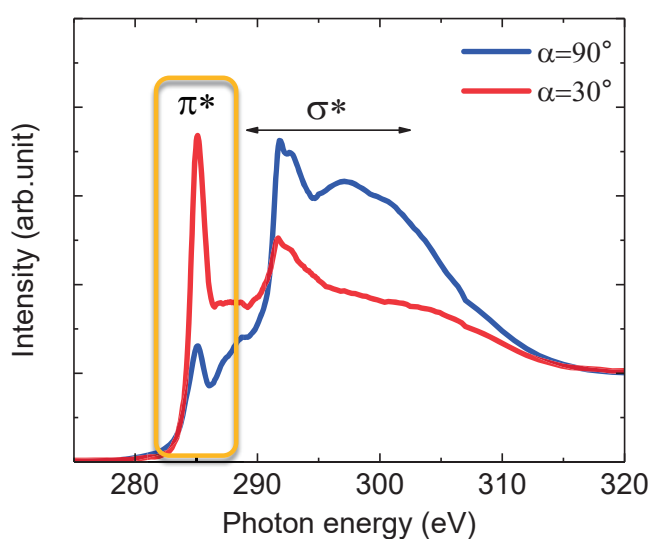
磁化方向 : 面内



### CFGG

- 界面付近でもバルクに近い磁気モーメントを保持
- 界面直下でスピンモーメントと軌道モーメントが増大

# グラフェン/CFGGヘテロ構造の深さ分解XMCD分光



参考. グラフェン/Ni(111)  
Y. Matsumoto et al., J. Mater. Chem. C 1, 5533 (2013)

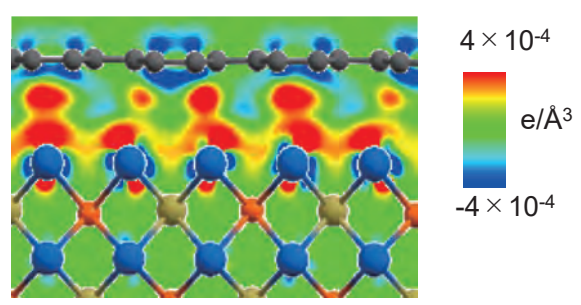
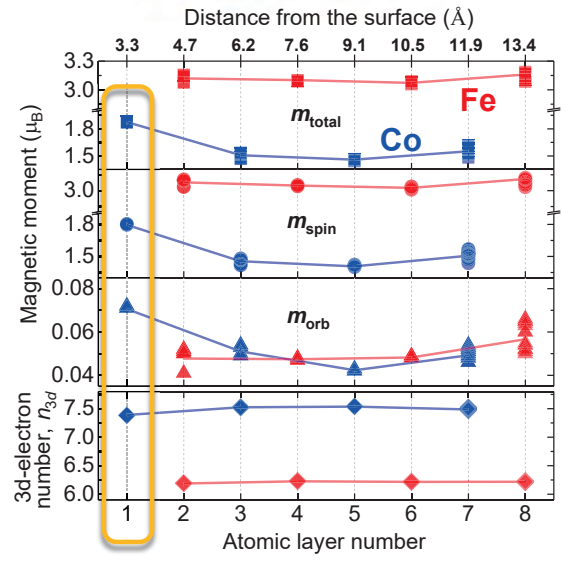
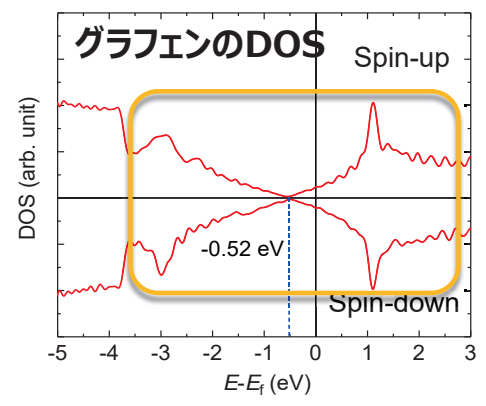
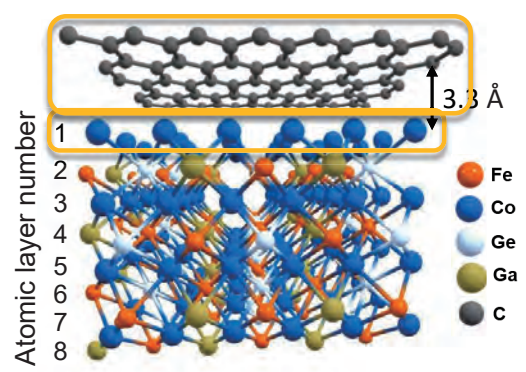
## C K-吸収端 XASスペクトル

X線入射角度  $\alpha = 30^\circ, 90^\circ$

**グラフェン**

- ・ グラファイトやグラフェン/Cuと類似のシャープな $\pi^*$ ピーク
- グラフェン/磁性金属と異なり電子状態の変調が少ない

## 考察



グラフェン/CFGG界面の相互作用  
ファンデルワールス結合 & 電荷分極

### 各原子層の磁気モーメント

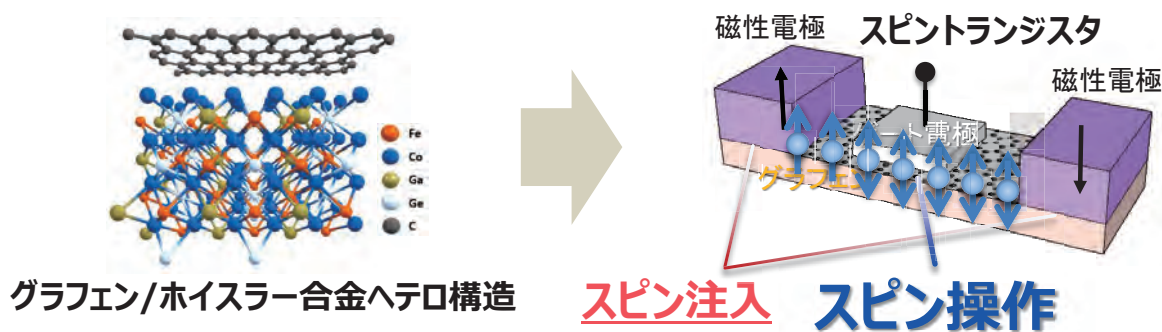
特徴的な界面相互作用がグラフェンとCFGGの性質を保護

# 結論

## グラフェン/CFGGヘテロ構造の深さ分解XMCD分光

- ・ 界面近傍におけるCFGGの磁氣的ロバストネスや高スピン偏極率
- ・ グラフェンのスピン輸送を司る $\pi$ バンド(ディラックコーン)の維持

グラフェンデバイスのスピン注入の効率化が期待



## I. 量子スピントロニクス材料の研究②

### スピン偏極Heビームで 磁性絶縁体YIGの近接効果を解明

S. Sakai, Y. Yamauchi, Y. Yamada, P. Sorokin, P. Avramov, K. Ando *et al.*,  
Adv. Funct. Mater. 28, 1800462 (2018)

# グラフェンスピンデバイスの課題

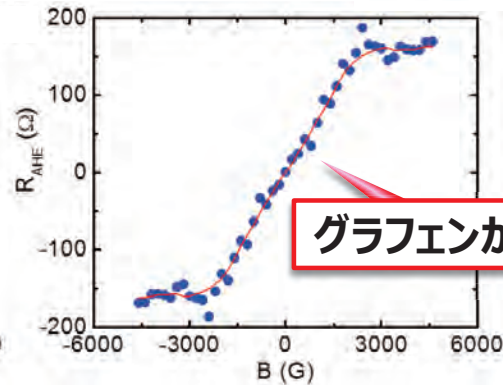
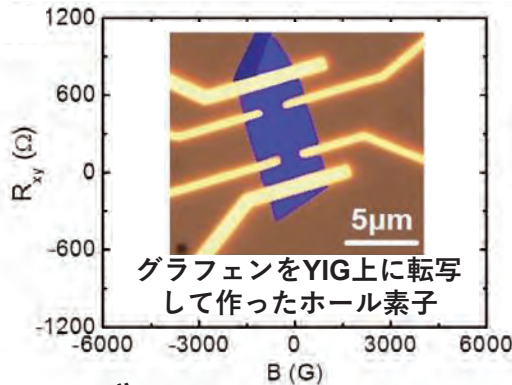
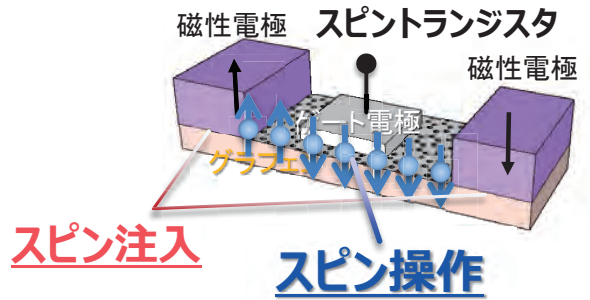
・磁性電極(金属)によるスピン注入の低効率

ホイスラー合金で解決できそう!

・ゲート電極(絶縁体)によるスピン操作

・・・スピン軌道相互作用は有効でない

磁気近接効果によるスピン操作

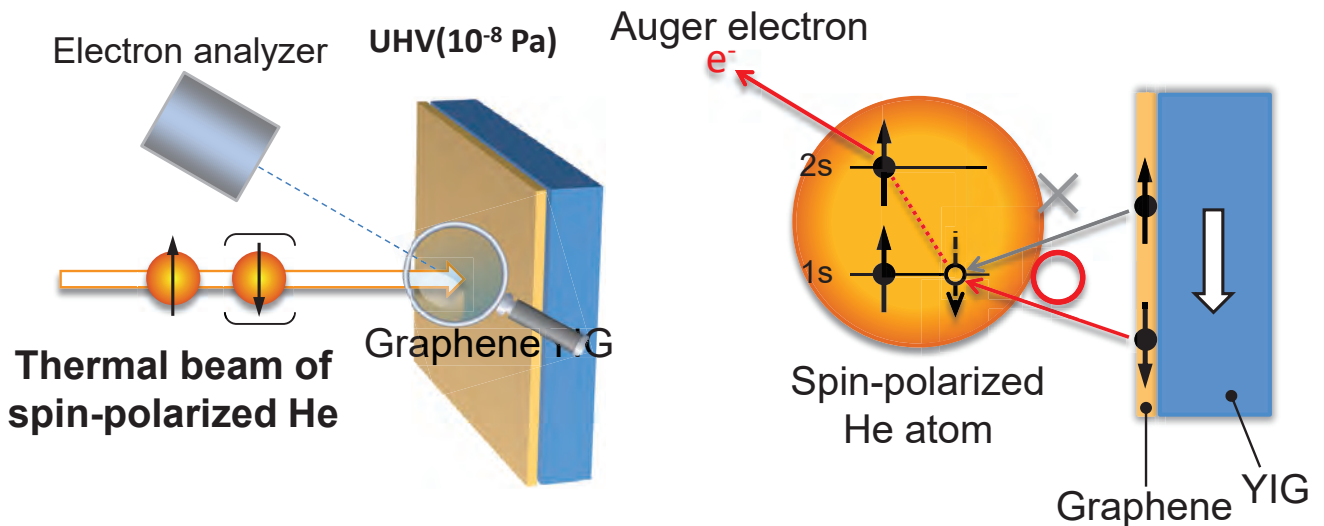


グラフェン/YIGヘテロ構造の異常ホール効果

Z. Wang, Phys. Rev. Lett. 114 016603 (2015)

## グラフェンのスピン分極状態 - スピン偏極Heビームで観測

# スピン偏極準安定He脱励起分光(SPMDS)



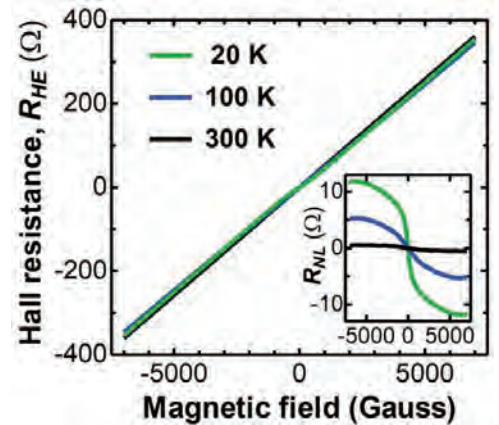
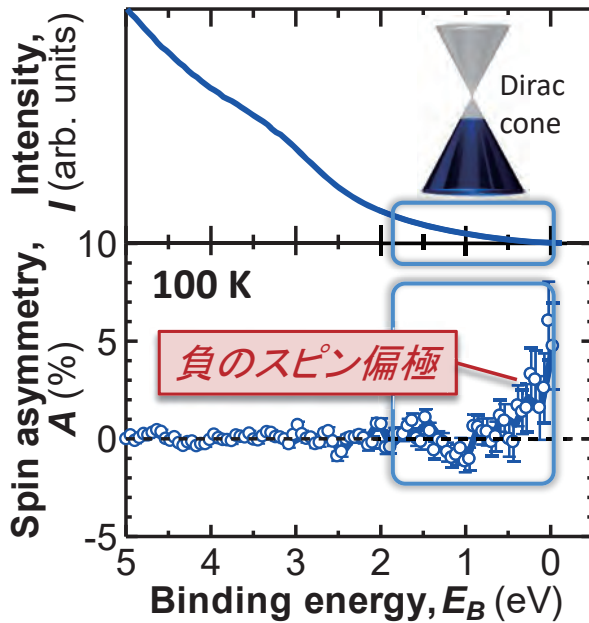
## 最表面にある原子層だけを観測

✓ オージェ電子のエネルギースペクトル(MDSスペクトル) → 状態密度

✓ スピンに依存した強度変化(スピン非対称率スペクトル) → スピン偏極



# グラフェン/YIGヘテロ構造のSPMDS



ホール効果の測定結果  
異常ホール効果を確認

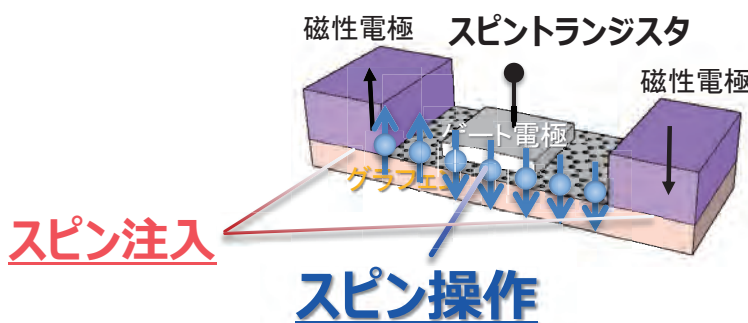
MDSスペクトル(上)とスピン非対称スペクトル(下)

グラフェンは、バンド構造を維持しつつ、  
YIGの近接効果によりディラックコーンがスピン分裂

## 結論

### グラフェン/YIGヘテロ構造のSPMDS

磁性絶縁体とのヘテロ構造を用いることで、  
グラフェンのバンド構造を保ちつつスピン偏極状態を制御できる！



グラフェンスピントランジスタのスピン操作等への応用

# 深さ分解放射光メスバウアー分光により 鉄表面にスピンのさざ波を発見

T. Mitsui, S. Sakai, M. Seto, H. Akai *et al.*, Phys. Rev. Lett., *to be submitted*

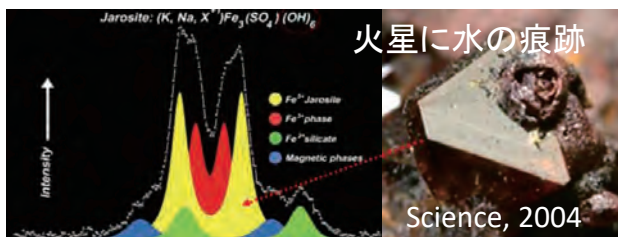
## 深さ分解放射光メスバウアー分光の開発

2017 深さ分解計測技術を開発 – 世界初の超高真空in situ実験装置



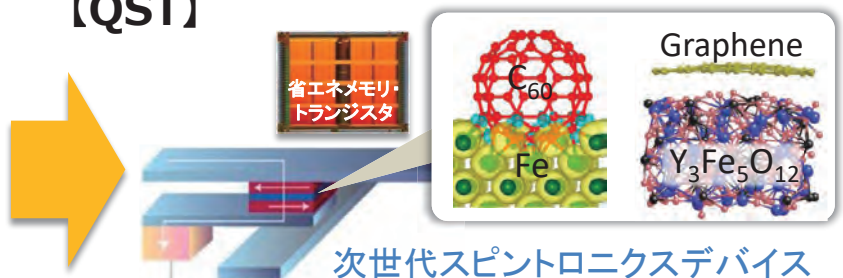
2018 超単色放射光のマイクロビーム化 – 高感度化,顕微測定を可能に

【従来】



観測対象：塊(バルク)

【QST】



観測対象：原子(表面・界面)

材料・デバイス内の量子スケールのスピンの振る舞いが計測可能に

# 鉄表面にスピンのさざ波を発見

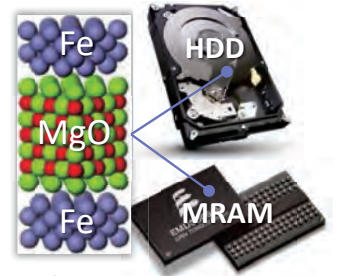
T. Mitsui, S. Sakai, M. Seto, H. Akai et al., Phys. Rev. Lett., to be submitted

## 鉄(Fe)

代表的な磁性元素、スピントロニクスデバイスで多用  
デバイス開発 - 界面の制御が鍵



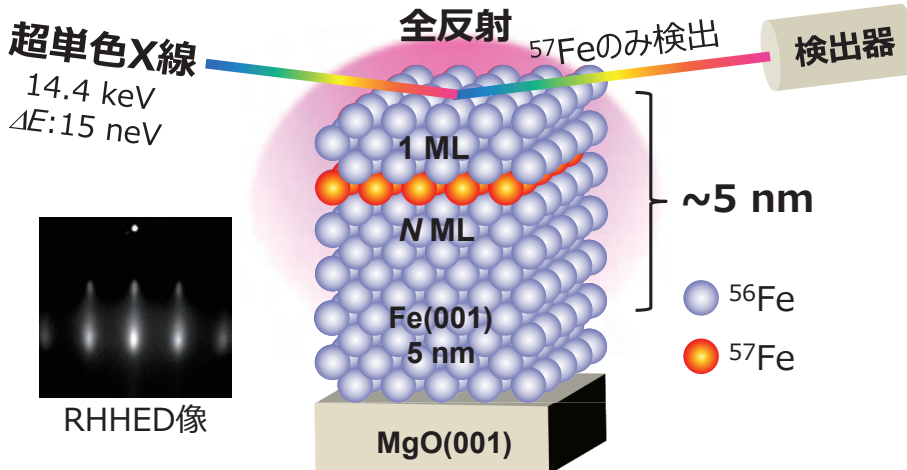
デリーの鉄柱  
紀元415年



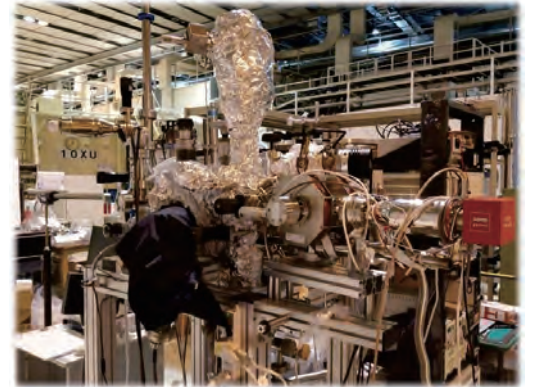
スピントロニクスデバイス  
紀元2019年

Fe表面(真空/Fe界面)の性質は古来の謎

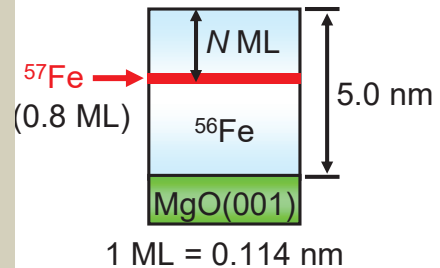
## 原子分解能深さ分解メスbauer分光



狙った深さ(1~7ML)に<sup>57</sup>Fe層(0.8ML)を埋め込み



超高真空深さ分解メスbauer分光装置  
SPring-8 QST専用BL(BL11XU)



未発表データ

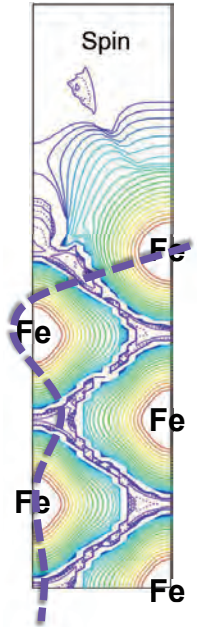
## <sup>57</sup>Fe層の埋め込み深さによるメスbauerスペクトルの変化

右図：各成分の相対強度の埋め込み深さ依存性

表面に近づくにつれてスペクトルが複数成分に分離

赤 - 1原子層目, 青 - 2原子層目, 緑 - 3原子層目以上

未発表データ



**解析結果**

**モデル計算**

**内部磁場, アイソマーシフト, 四極子分裂の深さ依存性**

モデル計算 - 磁気モーメント $\Delta M$ を併記。各データはバルクとの差を表す。

**鉄表面に原子層単位の磁気フリーデル振動が存在！**

# 結論

- **原子層分解能の深さ分解放射光メスバウアー分光技術を開発**
- **鉄表面に磁気フリーデル振動の存在を発見**

理論的予測 - C. S. Wang & A. J. Freeman, PRB (1981)

## 深さ分解放射光メスバウアー分光

真の深さ分解計測 - 見たい深さだけの情報が得られる

情報の豊富さ、複雑な材料での有効性

- サイト毎などの局所的な原子構造、電子状態やモーメントの配列

多様な計測環境 - 磁場, 電場/電流, 光, 雰囲気など(オペランド計測が容易)

**磁気ヘテロ構造界面・磁性体表面研究の新ツール**

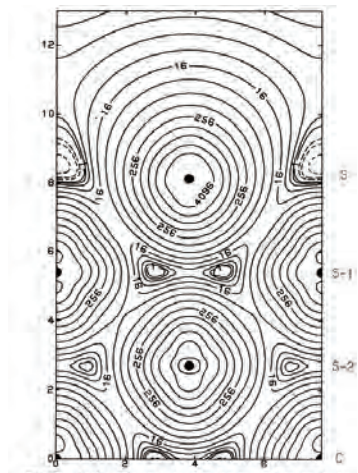


FIG. 5. Self-consistent spin-density map of seven-layer of Fe(001) in units of 0.0001 a.u. on the (110) plane. Each contour line differs by a factor of 2. The dashed lines indicate negative spin density.

Wang & Freeman (1981)

# QSTにおけるスピントロニクス材料研究

## I. 量子スピントロニクス材料の研究

深さ分解XMCD分光による

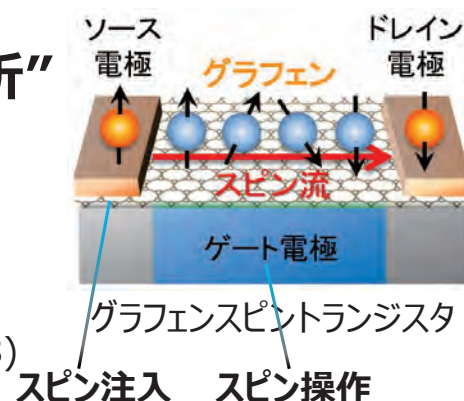
### “グラフェン/ホイスラー合金ヘテロ構造の分析”

李他, Advanced Materials (to be accepted)

スピン偏極Heビームで

### “磁性絶縁体YIGの近接効果を解明”

境他, Advanced Functional Materials 28, 1800462 (2018)



## II. 先端量子ビーム計測技術の開発

深さ分解放射光メスbauer分光により

### “鉄表面にスピンのさざ波を発見”

三井他, Physical Review Letters (10月投稿予定)



量子ビーム計測技術群でスピントロニクスの発展に貢献

## 謝辞

QST 李 松田, 三井 隆也, 上野 哲朗, 綿貫 徹 他

MISiS(Russia) Pavel B. Sorokin 他

NIMS 山内 泰, 桜庭 裕弥

東大物性研 赤井 久純

京大 瀬戸 誠 他

慶北大(韓国) Pavel V. Avramov

筑波大 山田 洋一 他

KEK 雨宮 健太

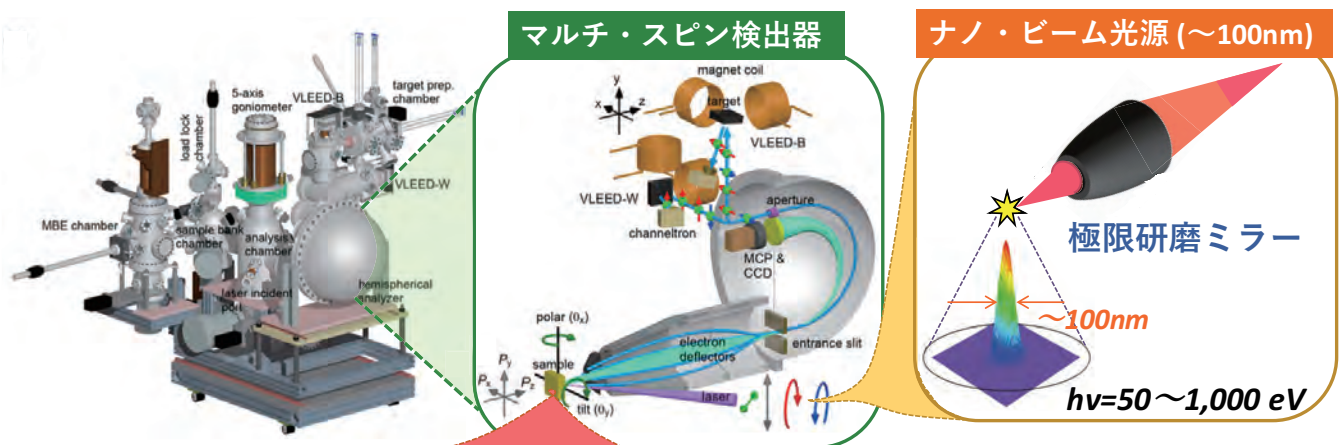
レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓  
東京大学物性研究所・近藤猛

# レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓

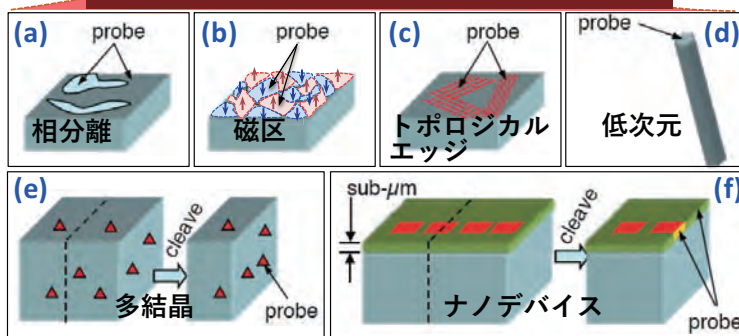
近藤 猛

東京大学物性研究所

## 「ナノ・スピンARPES 構想」



### ナノ・ドメインのスピン+バンド直接観察



### スペック

- ⇨  $50\text{eV} < h\nu < 1,000\text{eV}$   
(表面敏感からバルク敏感まで)
- ⇨ ナノ・ビーム光源 (极限研磨ミラー)
- ⇨ マルチ・スピン検知器 (高効率測定)

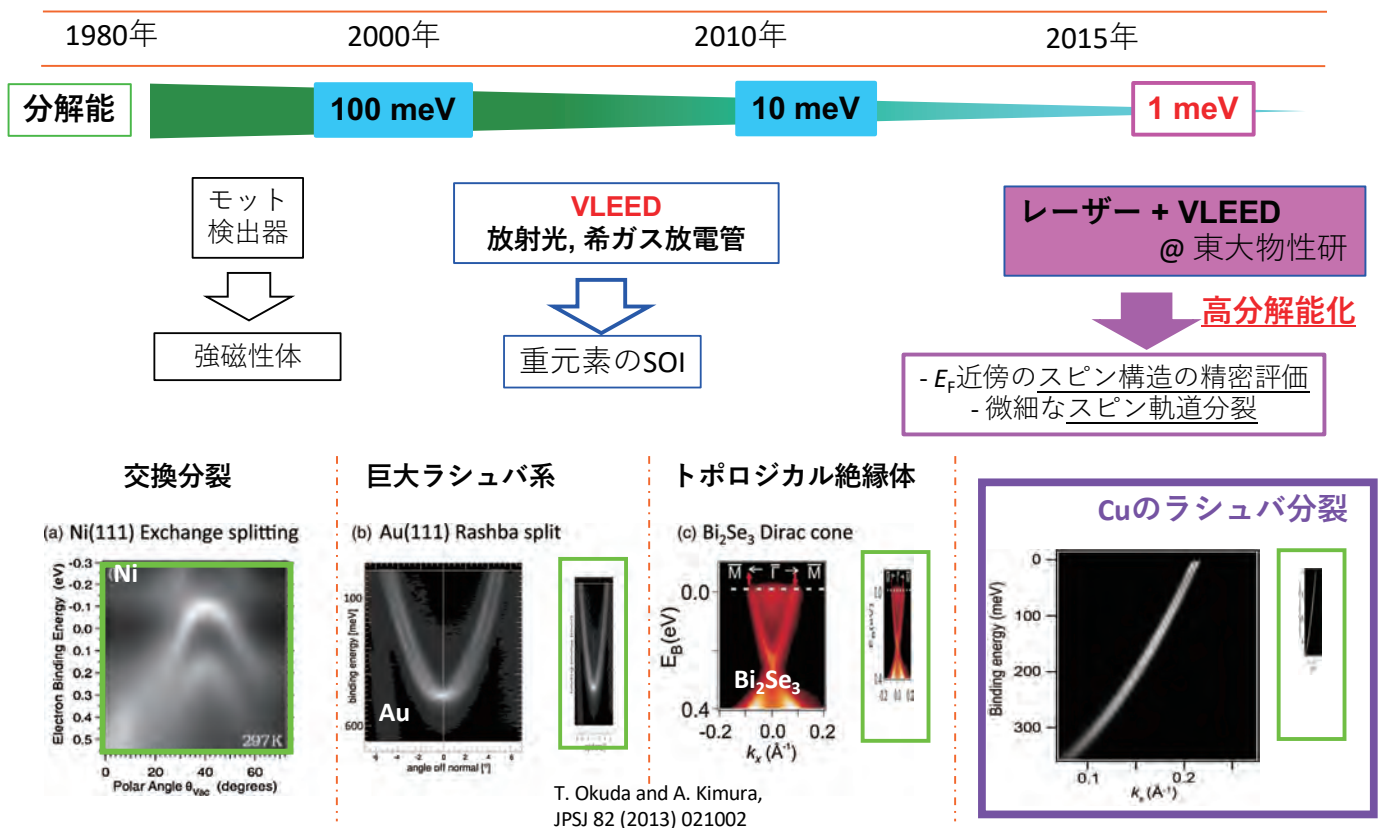
1) 高エネルギー分解能は重要である。

2) (直線)偏光可変は重要である。

3) ナノビームは重要である。

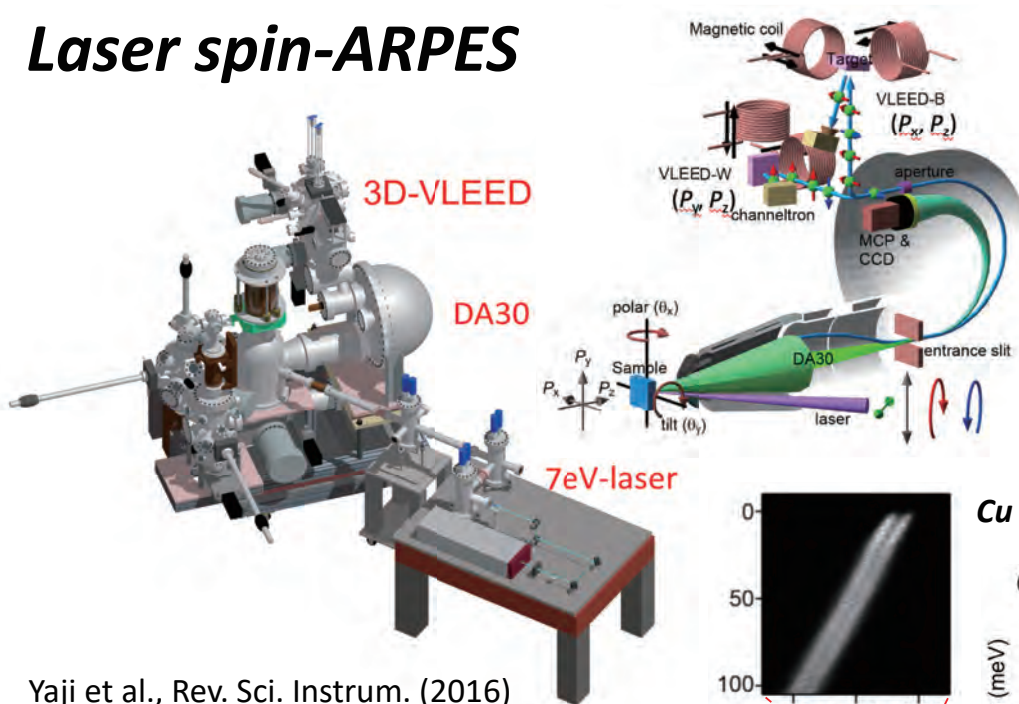
4) 50eV < hv < 1,000eVは重要である。

## スピンARPESの高性能化

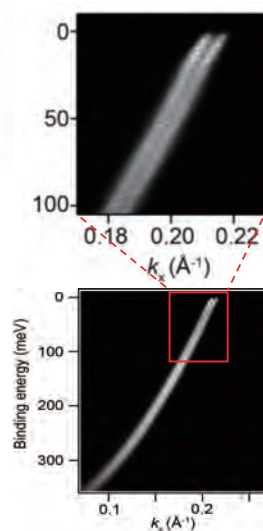
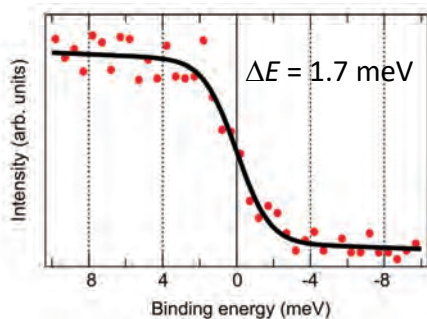




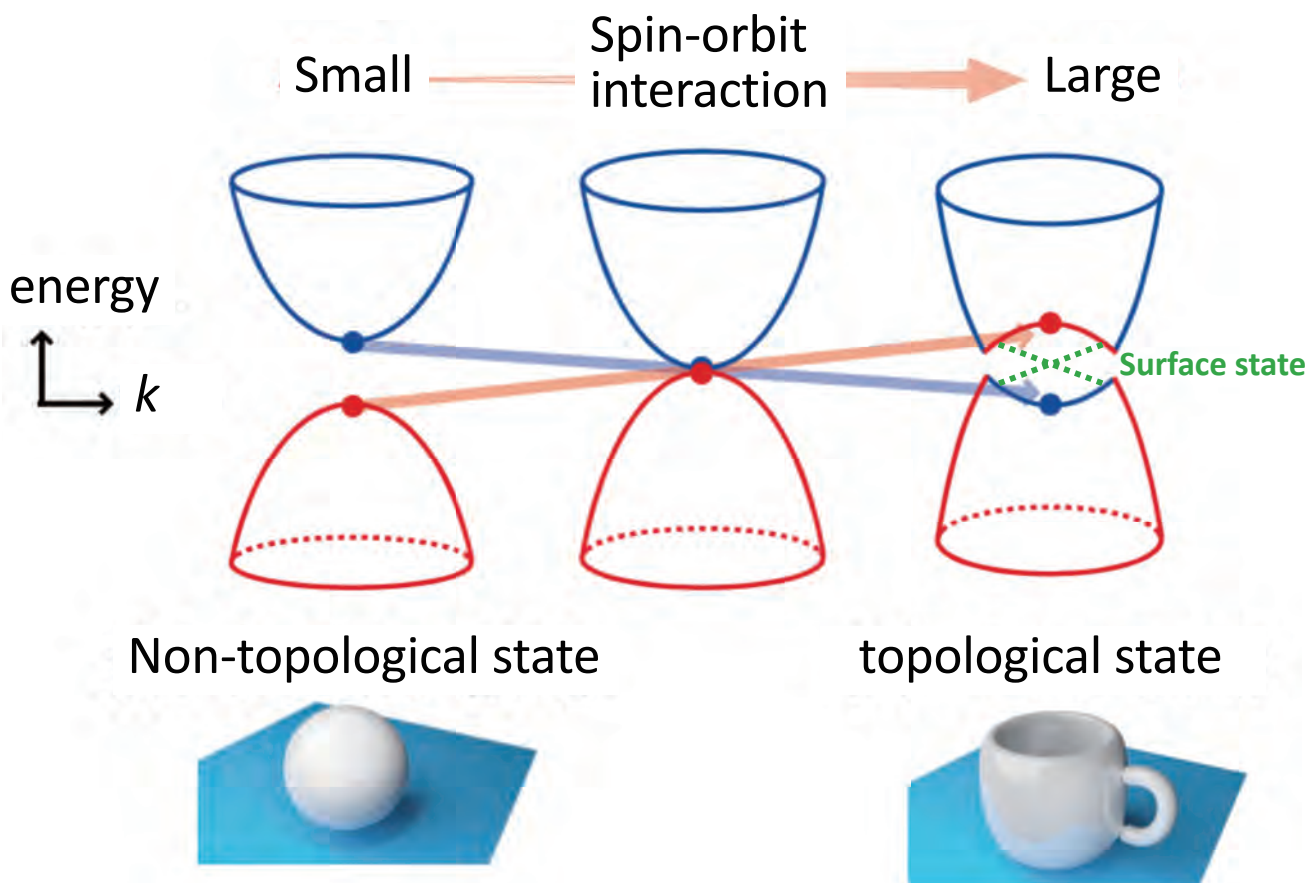
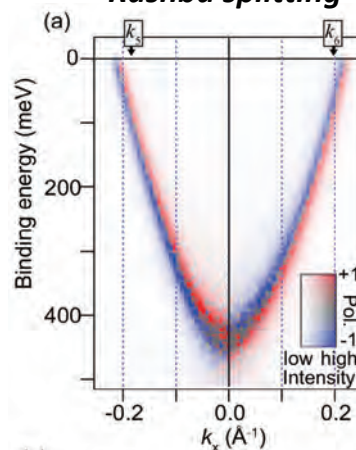
# Laser spin-ARPES

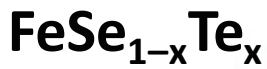


Yaji et al., Rev. Sci. Instrum. (2016)

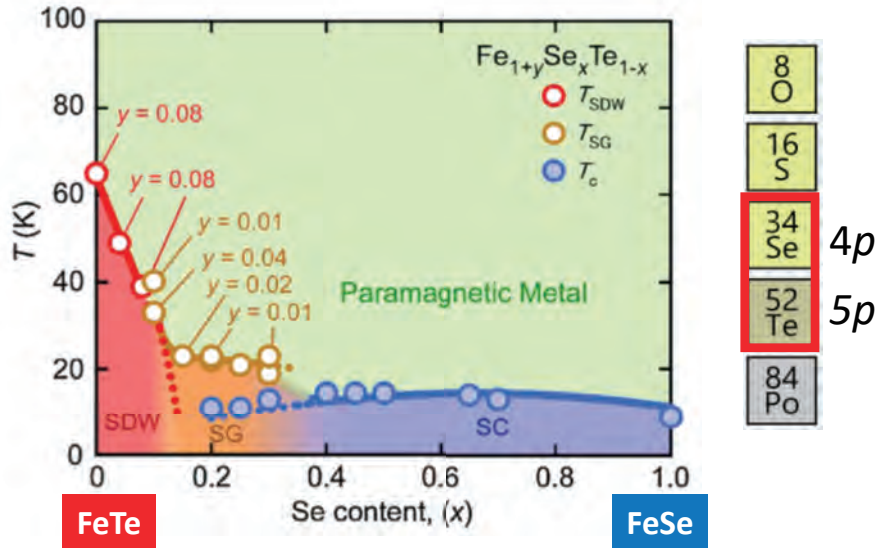
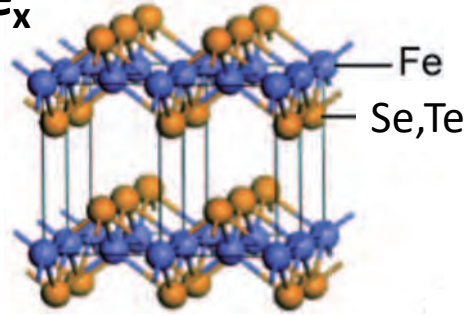


**Cu (111) surface: Rashba splitting**



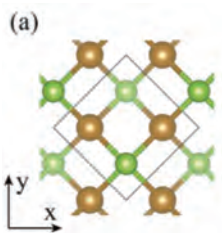


「高温超伝導」  
+  
「トポジカル物性」



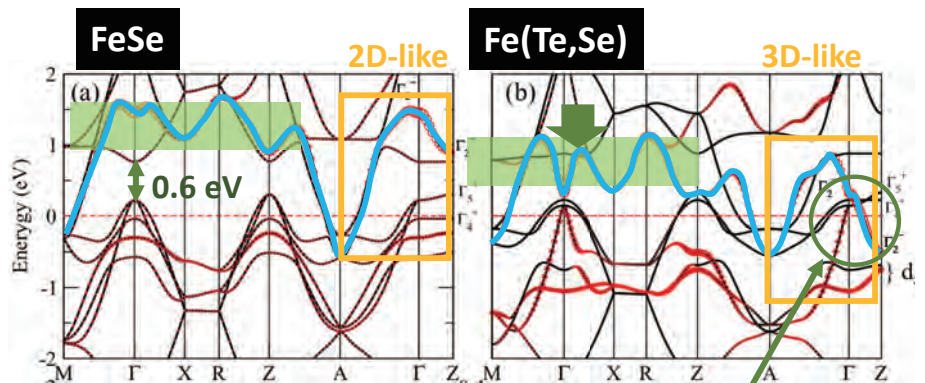
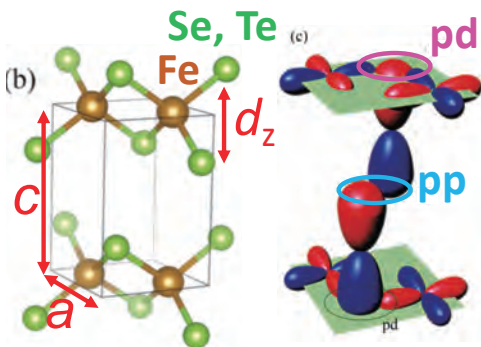
Katayama et al., J. Phys. Soc. Jpn. 79, 113702 (2010).

## Topological insulator state in Fe(Te,Se)



	$a(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$d_z(\text{\AA})$
FeSe	3.7724	5.5217	1.4759
FeSe <sub>0.493</sub> Te <sub>0.507</sub>	3.7933	5.9552	1.6192

pd coupling: position of  $p_z$  band at  $\Gamma$   
pp coupling: band width of the  $p_z$  band along  $\Gamma Z$

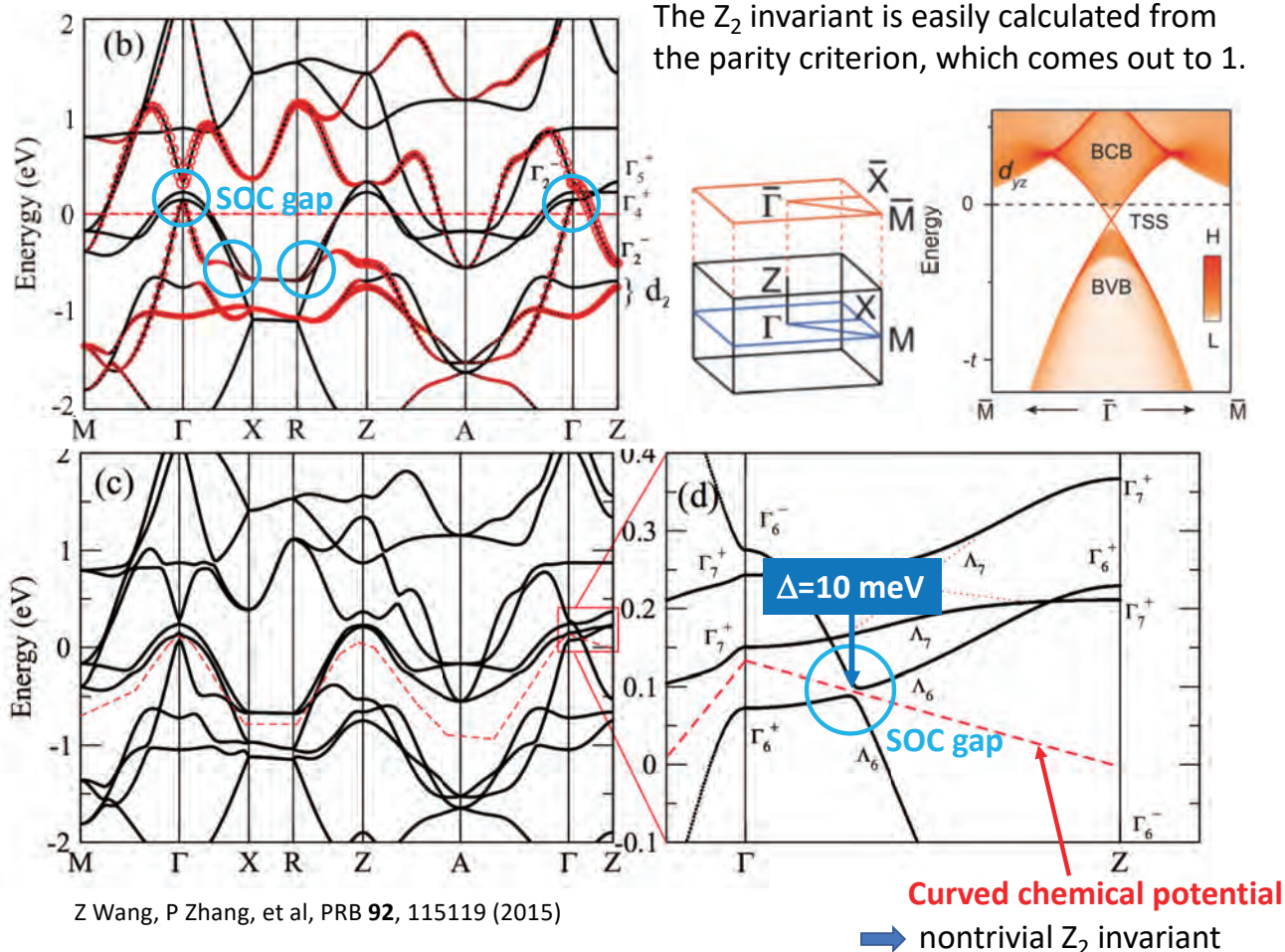


**Band inversion!!**

**→ Change topological property**

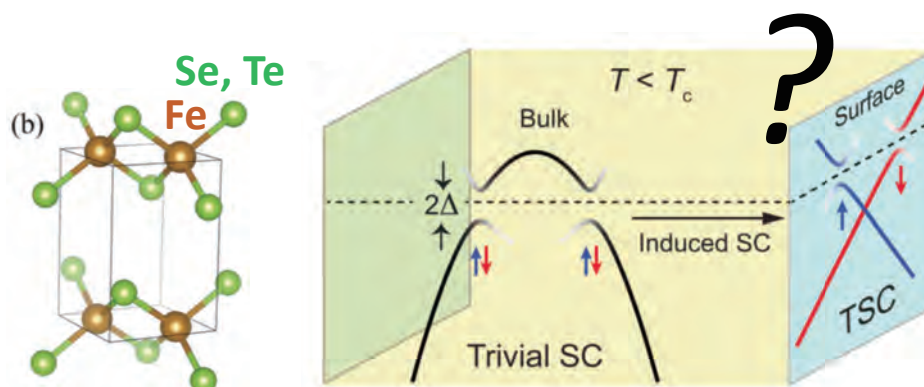
Z Wang et al, PRB 92, 115119 (2015)

## Topological insulator state in Fe(Te,Se)

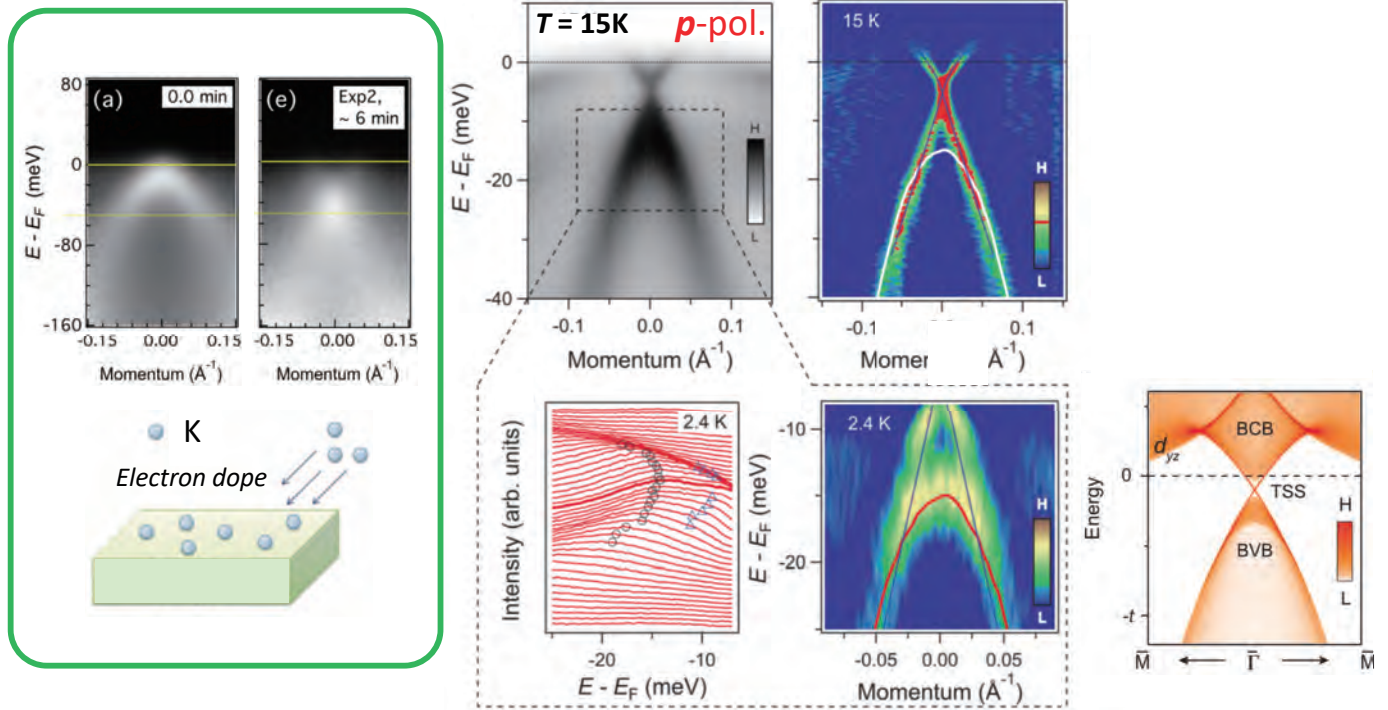


## Observation of Topological Superconductivity on the surface of Iron-based Superconductor

- (1) Dirac-cone-type surface state?
- (2) Spin-helical texture in the Dirac surface band?
- (3) Superconducting gap in the Dirac surface band?

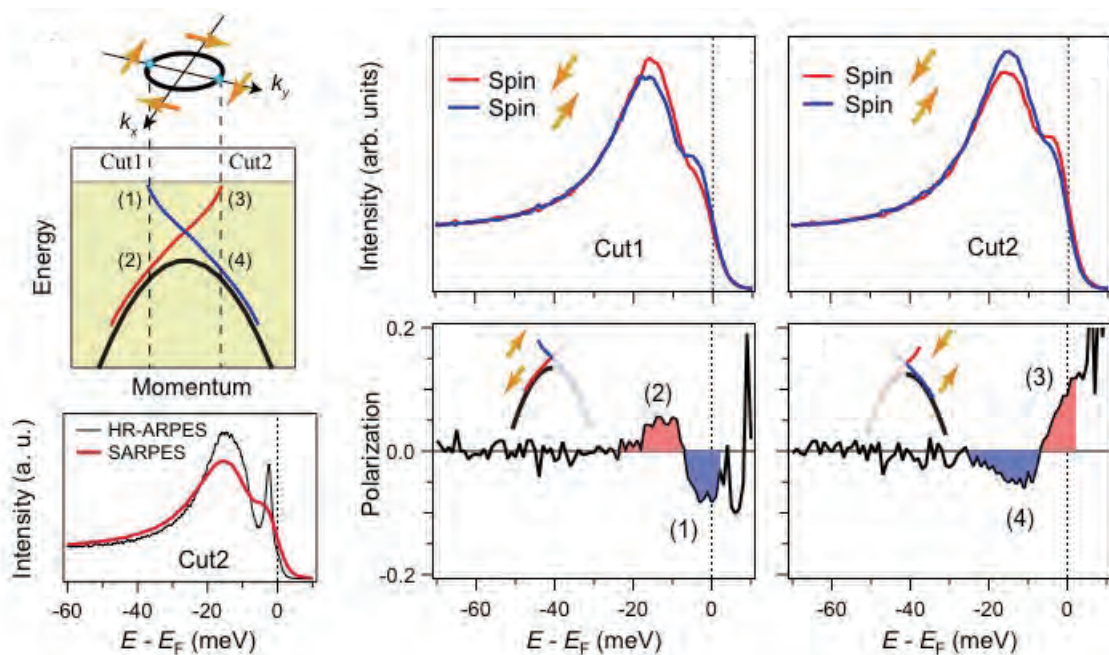


# (1) Dirac-cone-type surface state?



P Zhang et al, Science 360, 182 (2018)

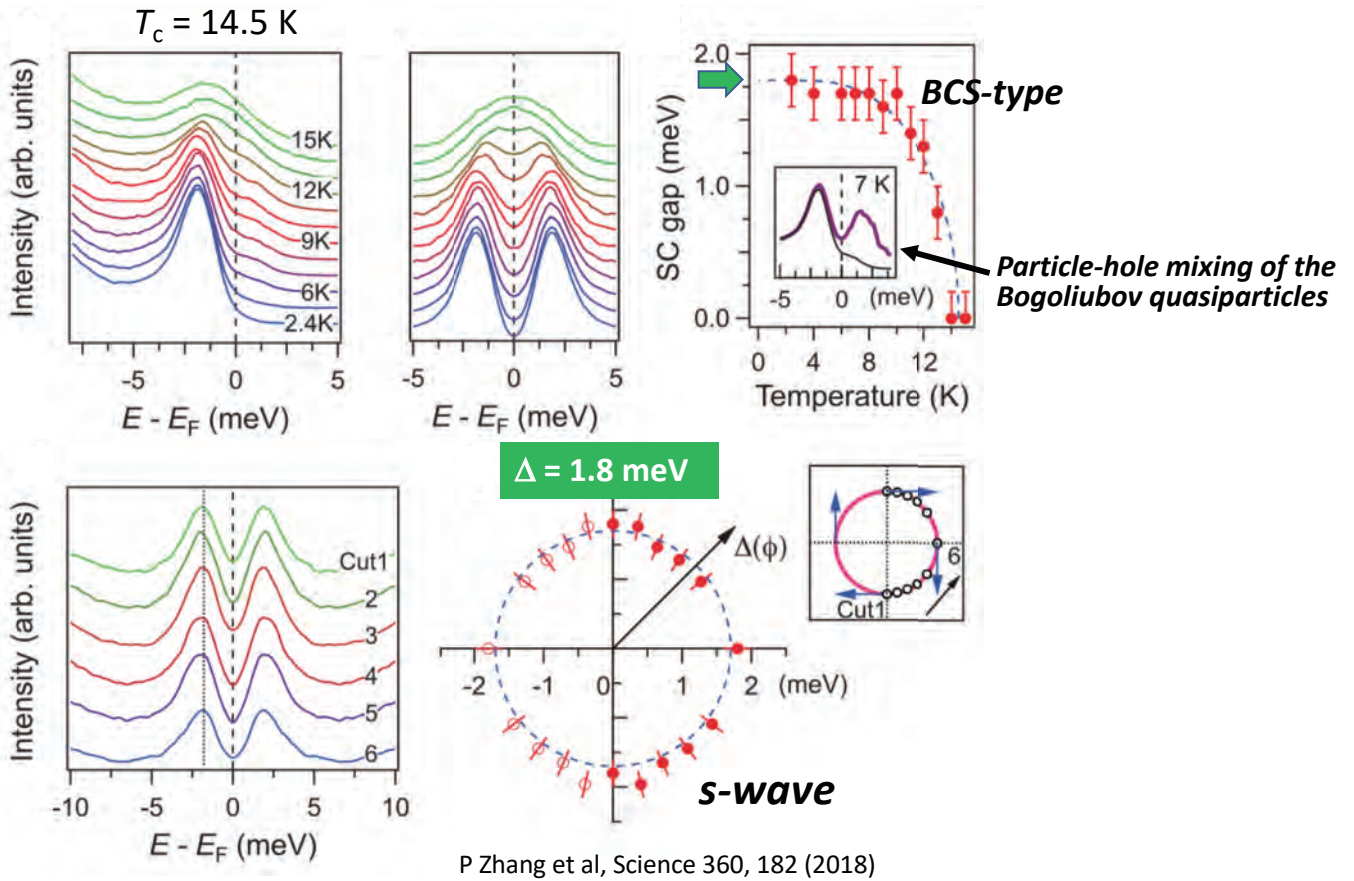
# (2) Spin-helical texture in the Dirac surface band?



P Zhang et al, Science 360, 182 (2018)

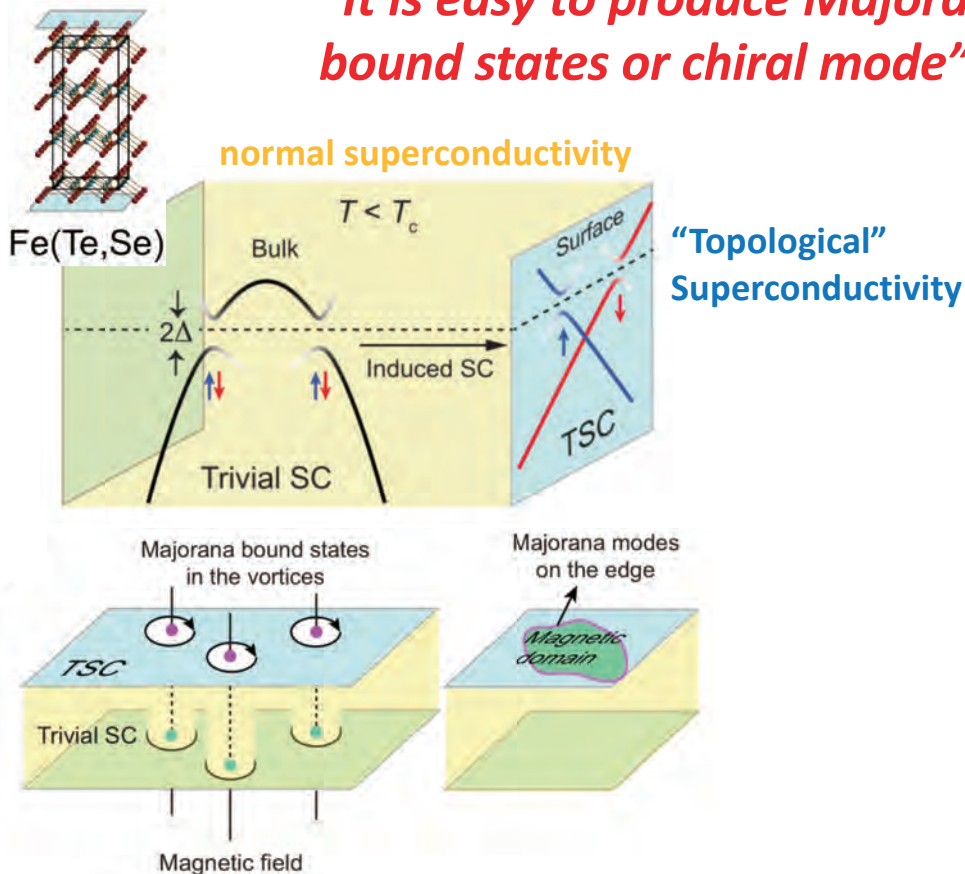
The surface states are spin-helical.

### (3) Superconducting gap in the Dirac surface band?



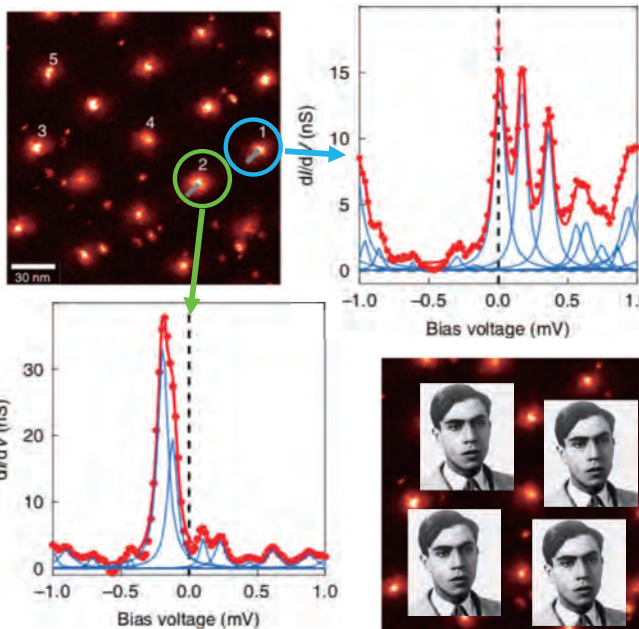
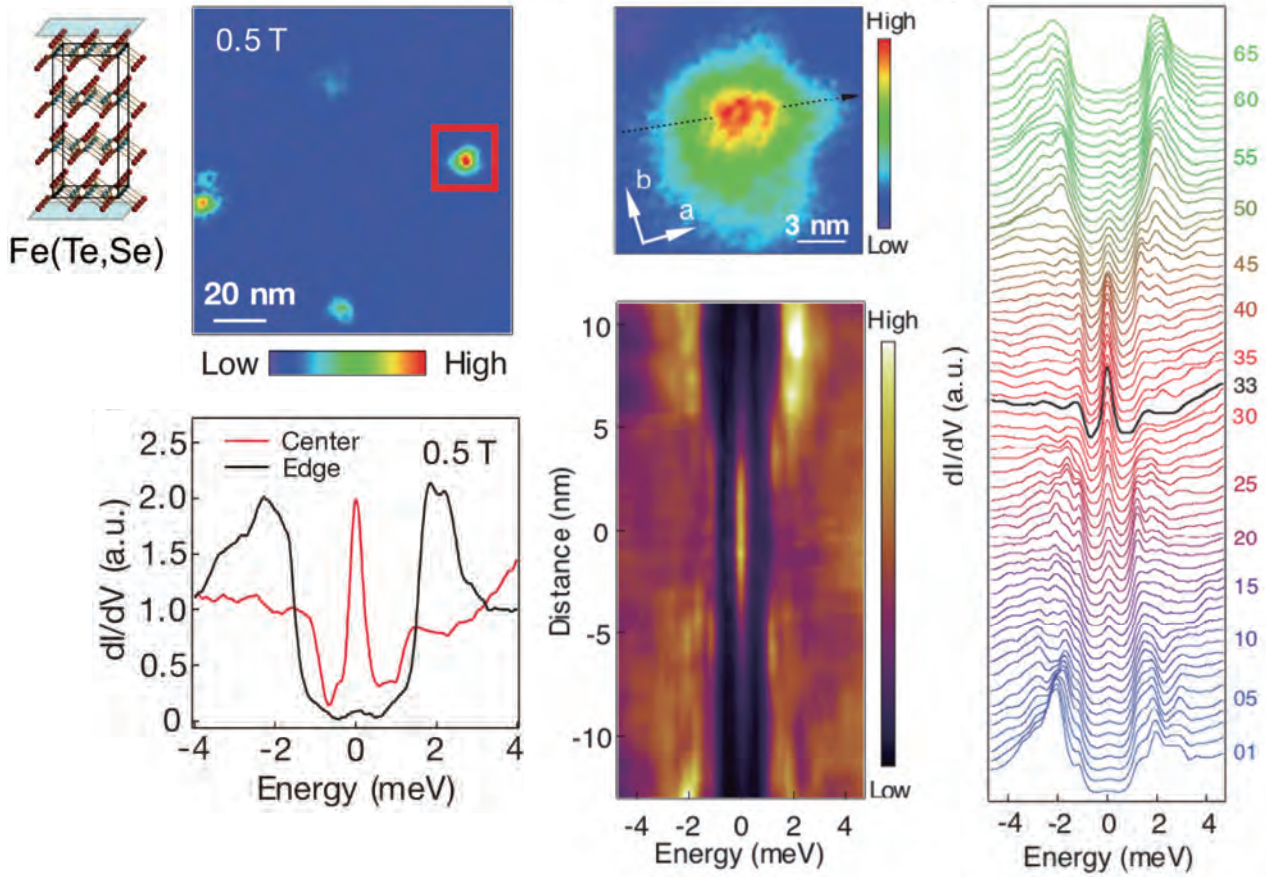
### TSC on surface and realization of Majorana fermions

***“It is easy to produce Majorana bound states or chiral mode”***



# STM measurements

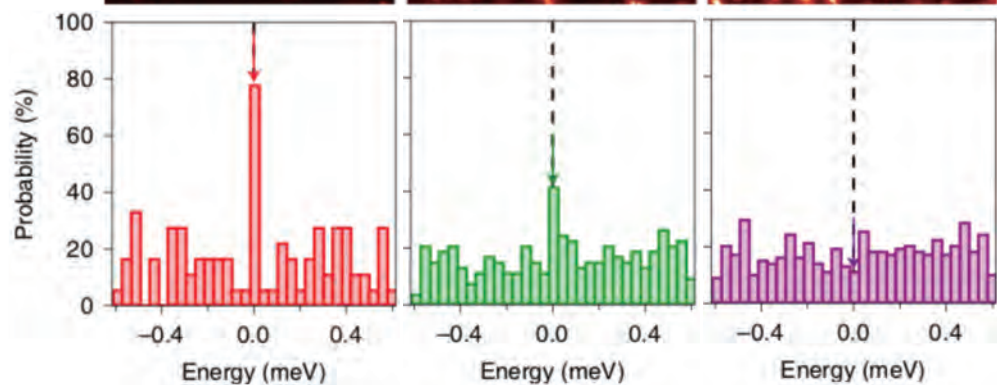
D. Wang et al., Science 362, 333 (2018).

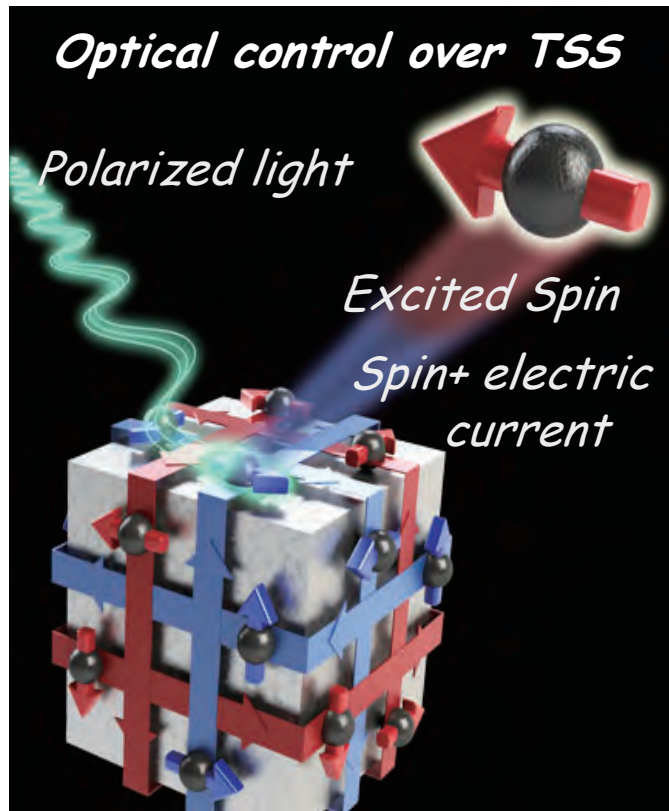


Zero-energy vortex bound state in the superconducting topological surface state of Fe(Se,Te)

T. Machida et al., *Nature Mater.* **18**, 811 (2019).

高エネルギー分解能は重要である。

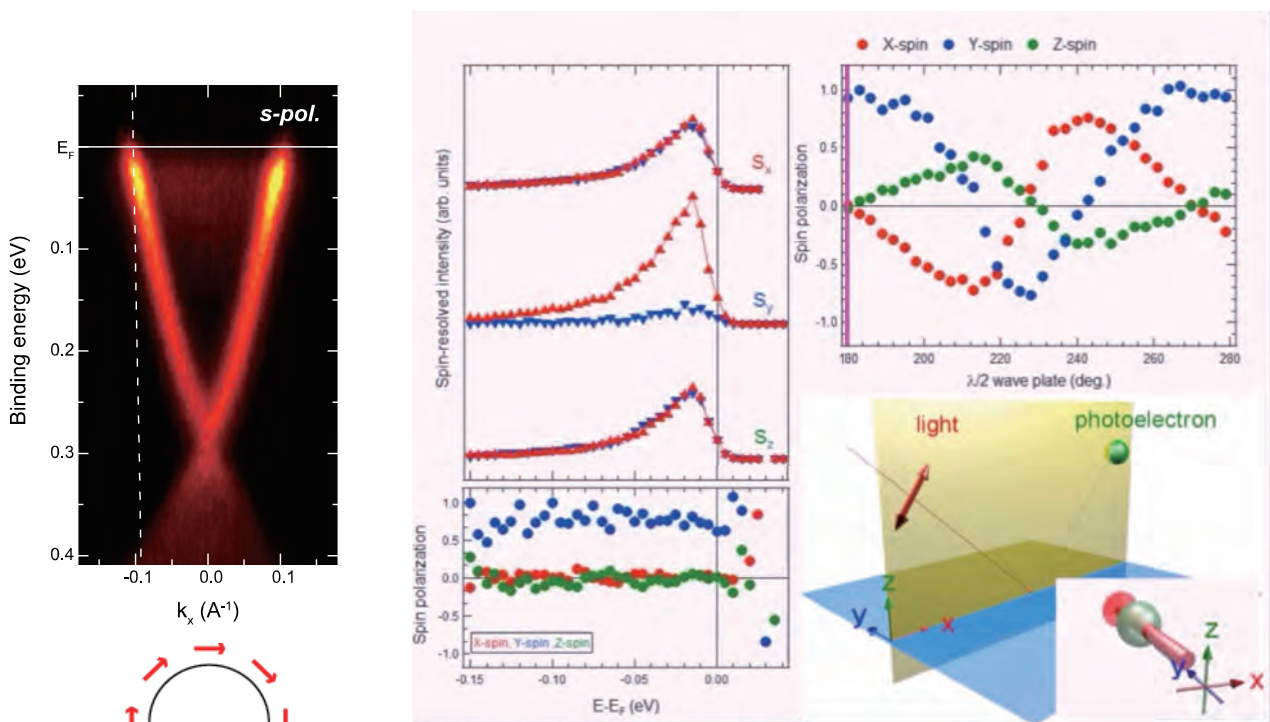




<https://newscenter.lbl.gov/2013/03/12/photoelectron-polarization-tis/>

直線偏光は重要である。

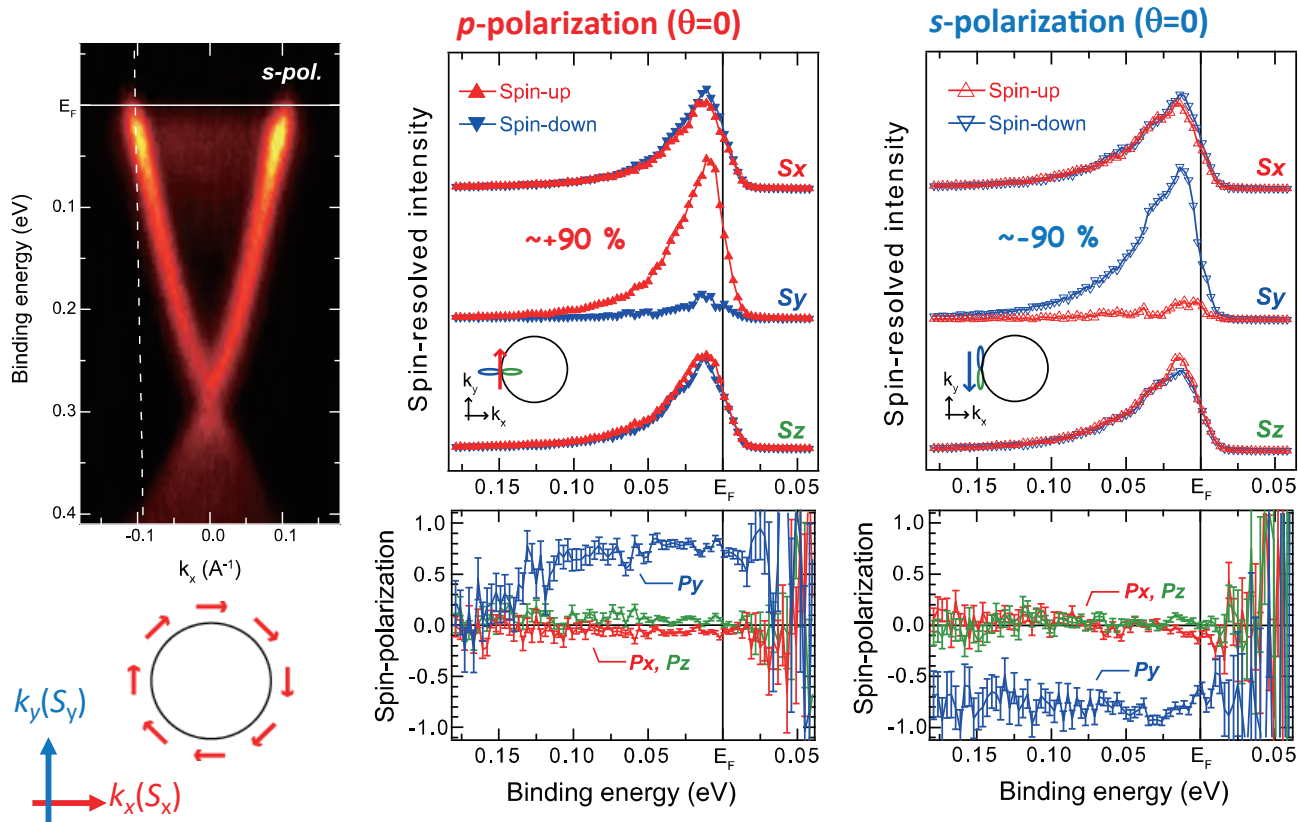
## 3D photoelectron spin polarization in laser-photoemission



K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 081103(R) (2016).

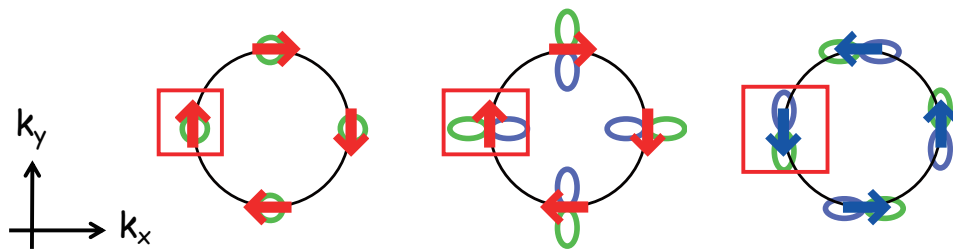
直線偏光は重要である。

# Laser based spin-resolved ARPES (Laser-SARPES)



## Origin of the polarization dependence

**Strong SOC**  $\rightarrow$  **Different spin and orbital symmetry are mixed.**

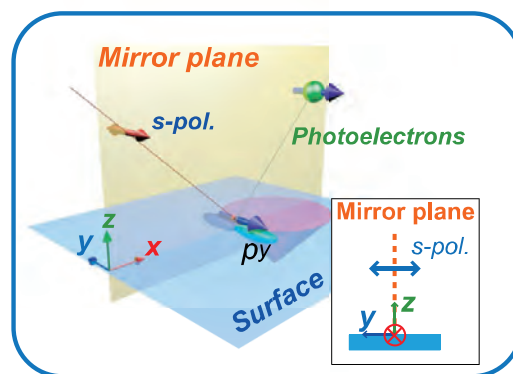
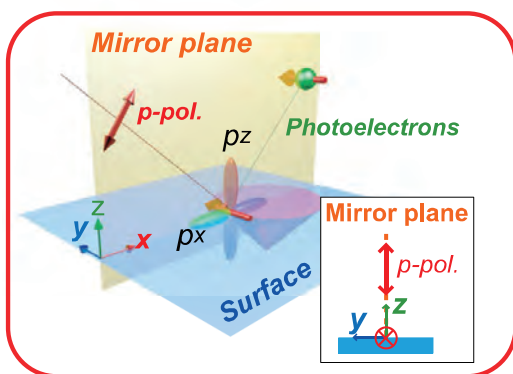


H. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 066801 (2013).

$$|\Psi\rangle = |\text{even}, \uparrow_y\rangle + |\text{odd}, \downarrow_y\rangle$$

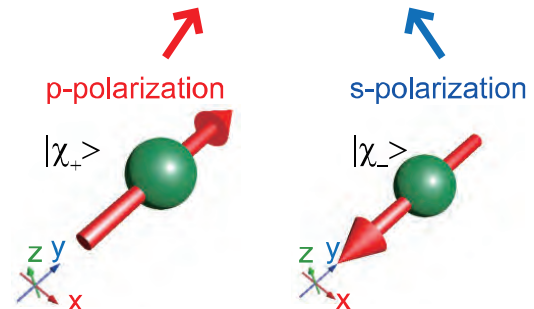
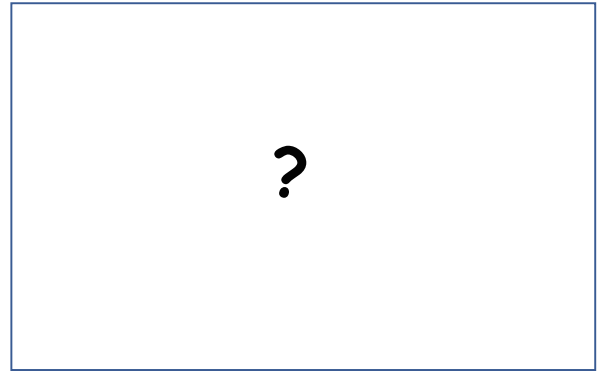
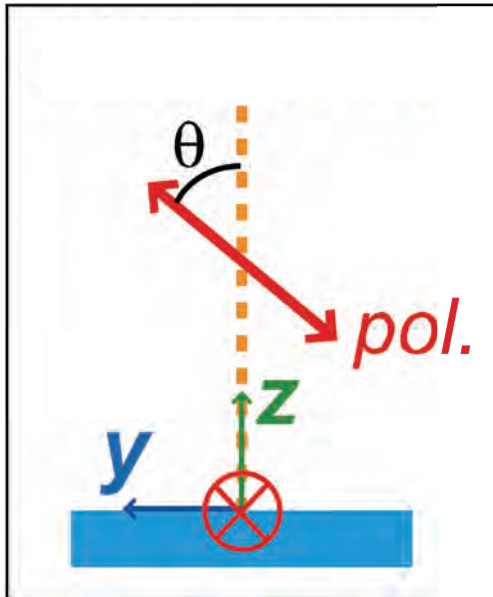
**p-pol. -sensitive**

**s-pol. -sensitive**



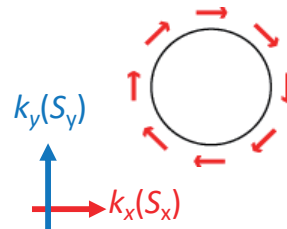
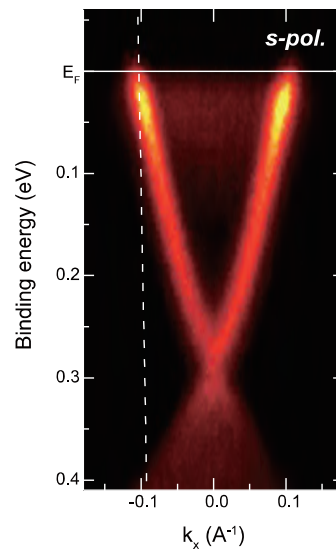
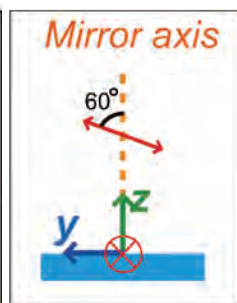
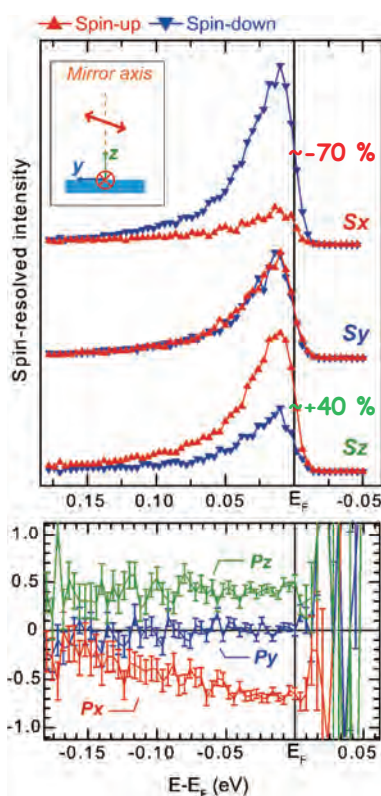


# Linear polarization between $p$ - and $s$ -polarization

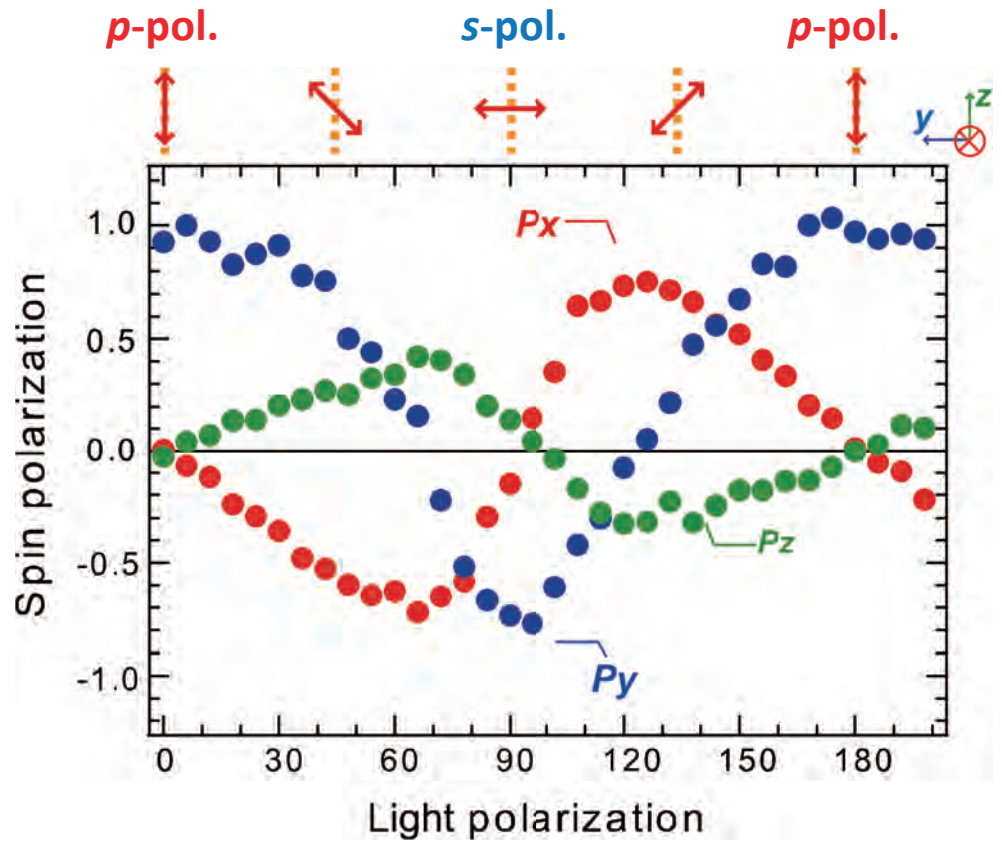
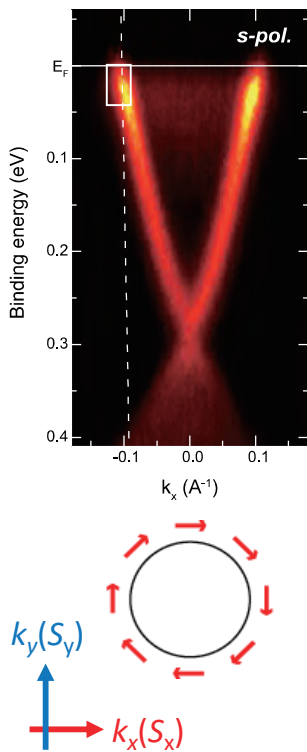


K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 081103(R) (2016).  
 K. Yaji *et al.*, Nature Commun. **8**, 14588 (2017).

# 3D SARPES result for the asymmetric set-up



# Spin-polarization evolution of linear polarization angle



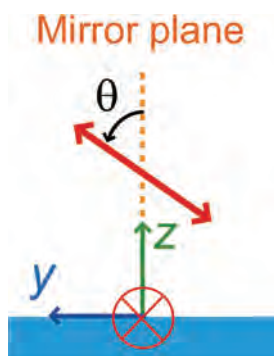
K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 081103(R) (2016).

# 3D photoelectron spin polarization in laser-photoemission

$$P_x = \frac{2 \operatorname{Im}(m_{\uparrow} m_{\downarrow})}{I_{total}} \sin 2\theta$$

$$P_y = \frac{2(|m_{\uparrow}|^2 \sin^2 \theta - |m_{\downarrow}|^2 \cos^2 \theta)}{I_{total}}$$

$$P_z = \frac{2 \operatorname{Re}(m_{\uparrow} m_{\downarrow})}{I_{total}} \sin 2\theta$$

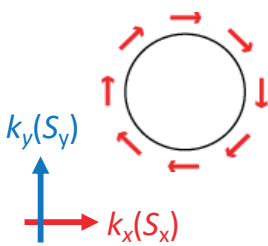
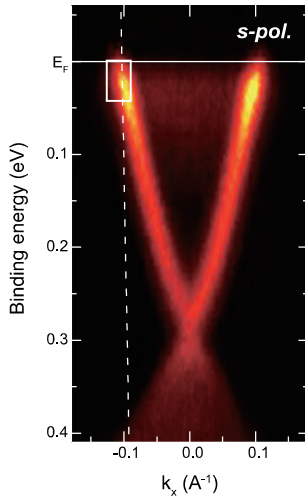
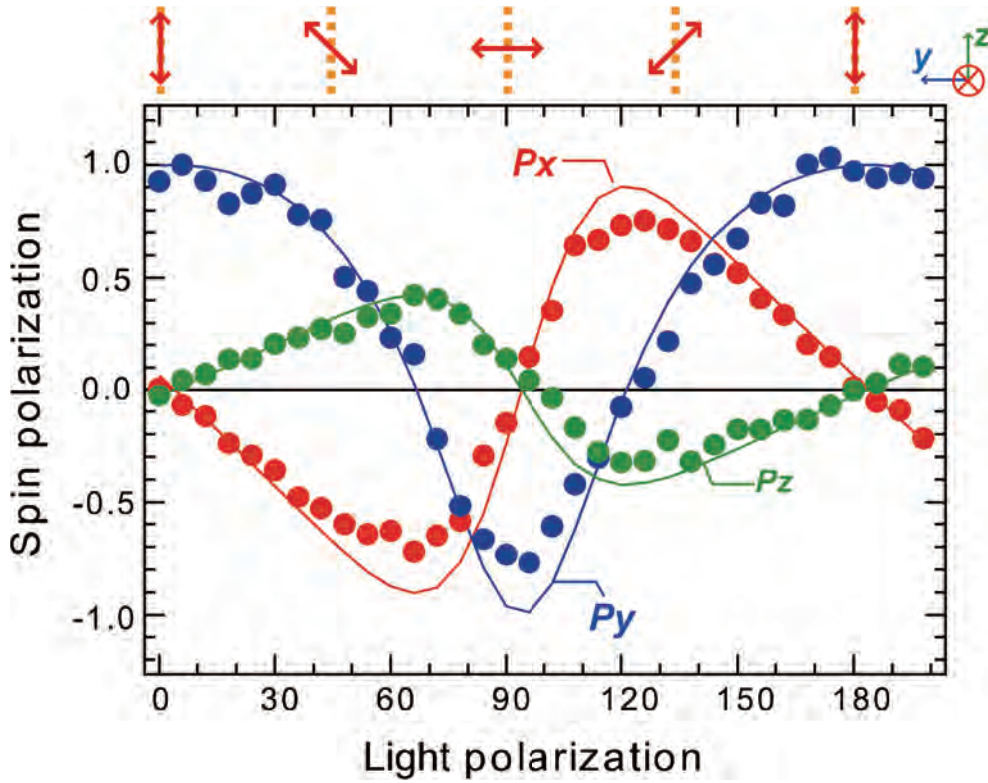


photoelectron  $m_{e,\uparrow} |\uparrow\rangle + m_{o,\downarrow} |\downarrow\rangle$

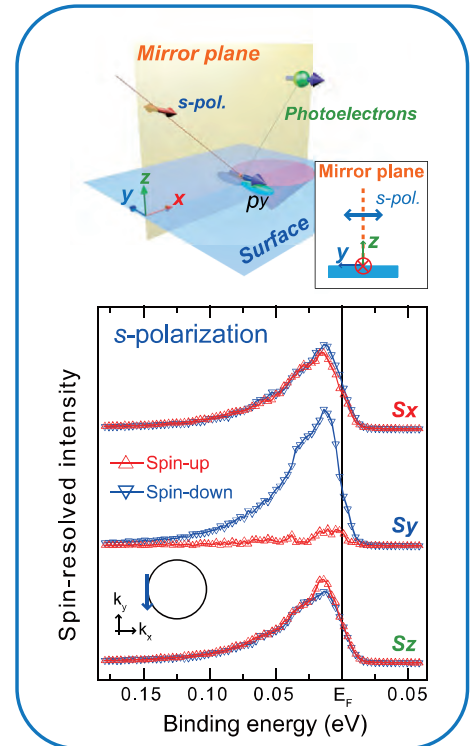
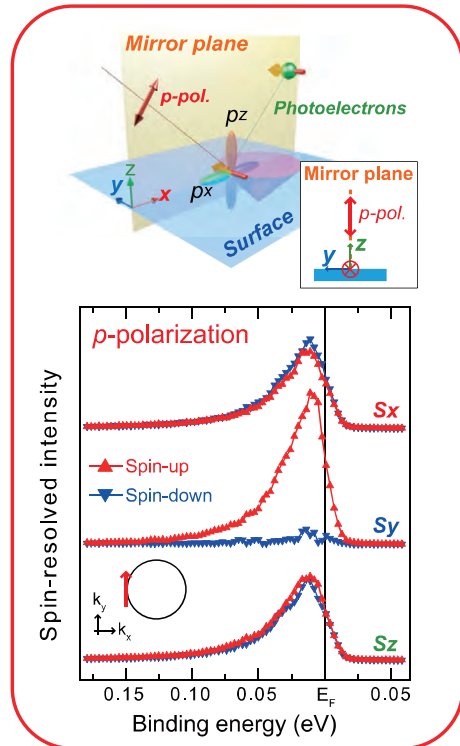
$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  p-polarization  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  s-polarization

$$|\psi_k\rangle = w_{e,\uparrow} |even, \uparrow\rangle + w_{o,\downarrow} |odd, \downarrow\rangle$$

# The model vs the experimental result

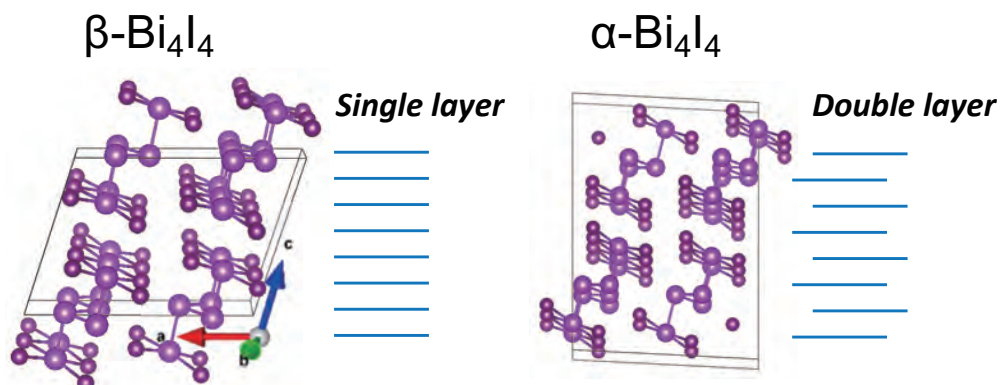


$$|\Psi\rangle = \underbrace{|even, \uparrow_y\rangle}_{p\text{-pol. -sensitive}} + \underbrace{|odd, \downarrow_y\rangle}_{s\text{-pol. -sensitive}}$$



直線偏光は重要である。

# なぜナノビームが必要か？



A weak topological insulator state in quasi-one-dimensional bismuth iodide

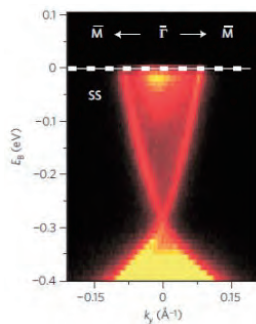
*R. Noguchi et al., Nature 566, 518 (2019).*

## 3次元物質の トポロジカル絶縁体

「強い」トポロジカル絶縁体

Examples:

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$   
 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$   
 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$   
 $\text{TlBiSe}_2$   
 $\text{PbBi}_2\text{Te}_4$   
As



Y. Xia et al.,  
Nat. Phys. 5, 398 (2009)

「弱い」トポロジカル絶縁体

実在するか？



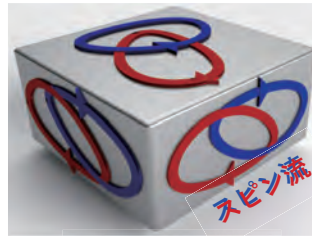
通常の絶縁体



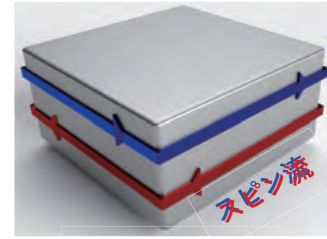
「強い」トポジカル絶縁体



「弱い」トポジカル絶縁体



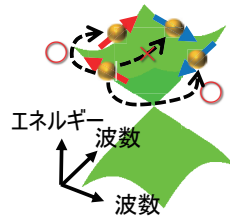
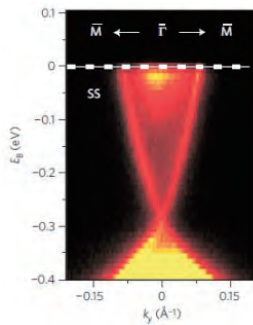
2D Dirac cone



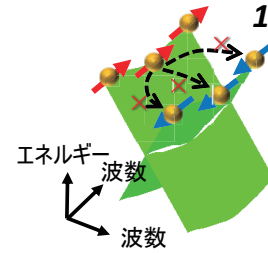
1D Dirac cone

Examples:

- $\text{Bi}_2\text{Se}_3$
- $\text{Bi}_2\text{Te}_3$
- $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$
- $\text{TlBiSe}_2$
- $\text{PbBi}_2\text{Te}_4$
- As



エネルギー  
波数  
波数  
スピン流はあらゆる方向に拡散され、指向性がない



エネルギー  
波数  
波数  
散逸が無く一方向に流れるスピン流が実現

Y. Xia et al., Nat. Phys. 5, 398 (2009).

超高速・超指向性・完全無散逸の3拍子がそろった理想スピン流の創発

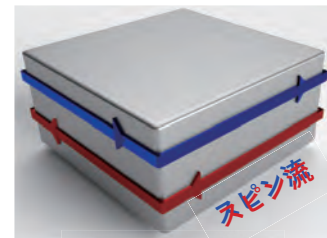
「弱い」トポジカル絶縁体

実在するか？

側面が劈開できる候補物質がなかった。  
つまり、実証ができていない。

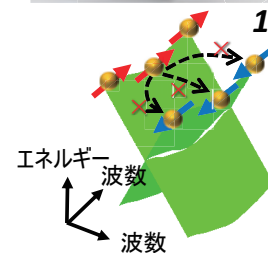
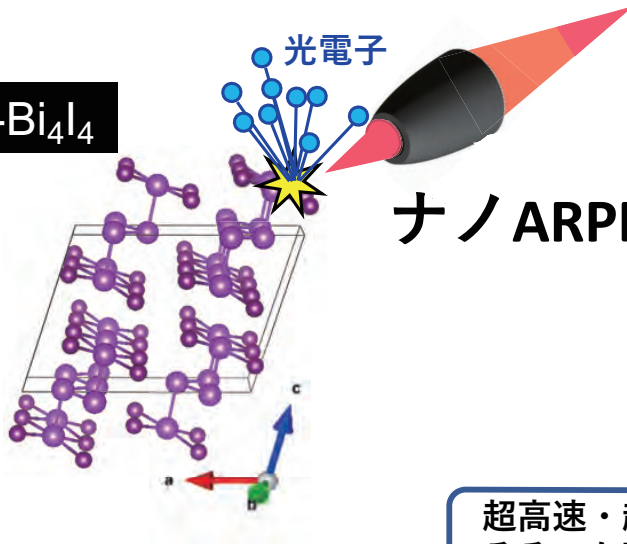


「弱い」トポジカル絶縁体



1D Dirac cone

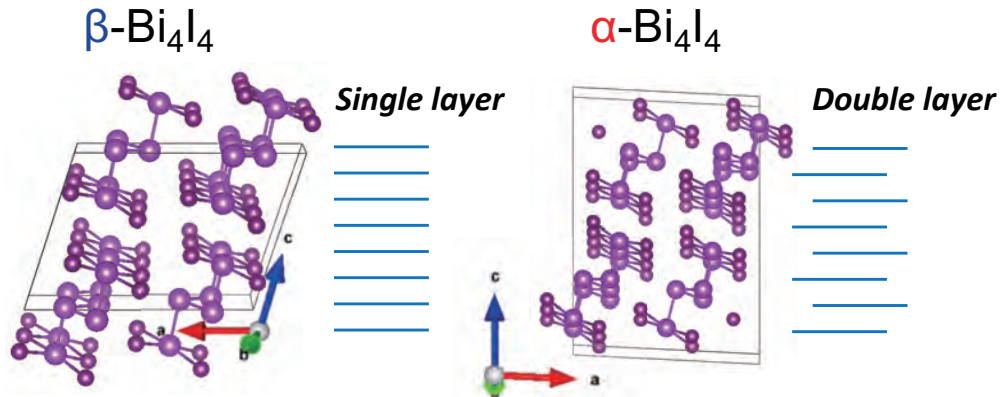
$\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$



エネルギー  
波数  
波数  
散逸が無く一方向に流れるスピン流が実現

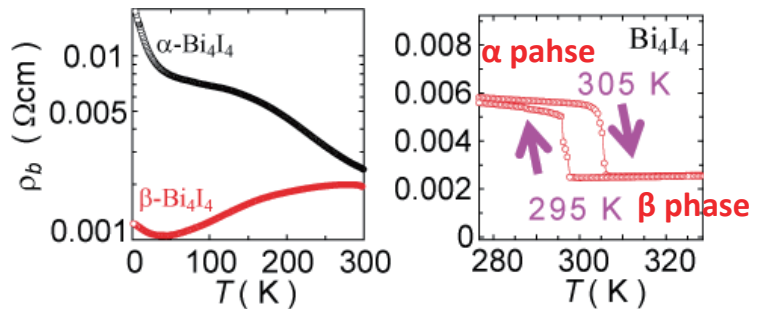
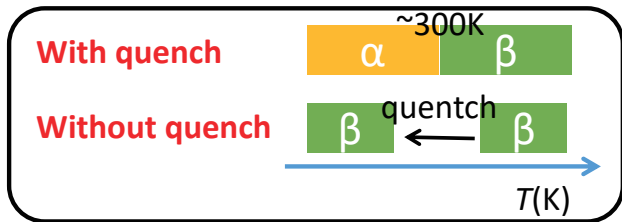
超高速・超指向性・完全無散逸の3拍子がそろった理想スピン流の創発

# quasi-1D crystal of $\text{Bi}_4\text{I}_4$



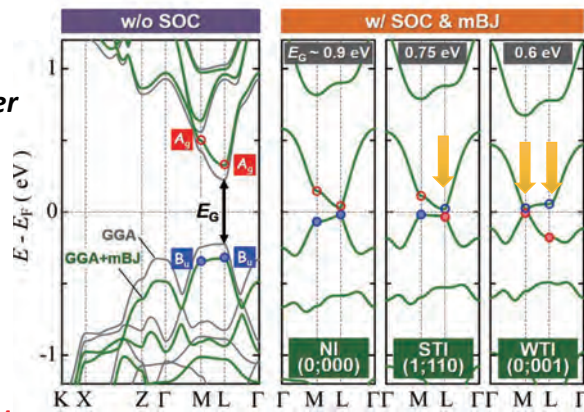
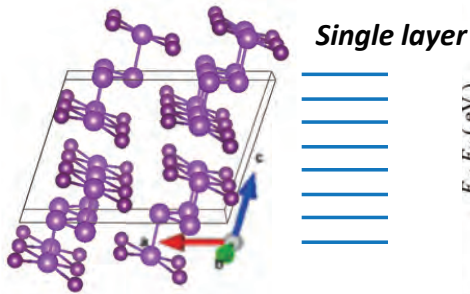
H.G. von Schnering *et al.*, Z. Anorg. Allg. Chem. 438, 37–52 (1978).

C.-C. Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 66801 (2016).



by Sasagawa

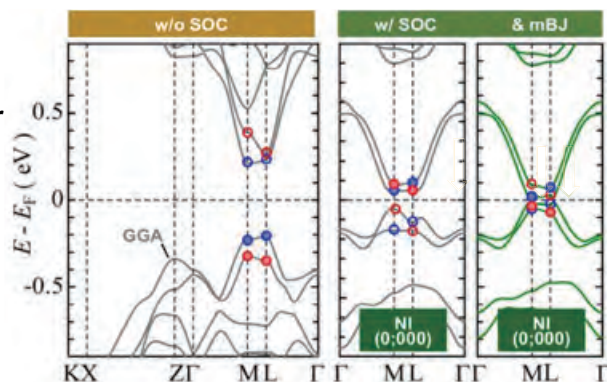
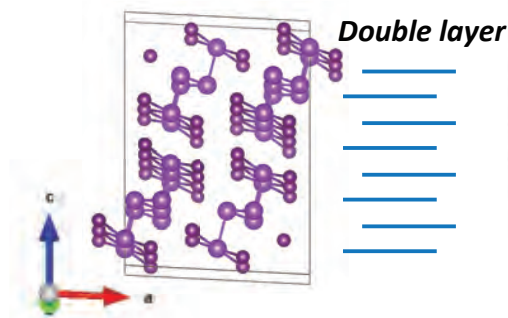
## $\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$



Determination of topology requires experiments.

通常の絶縁体      「強い」トポ絶縁体      「弱い」トポ絶縁体

## $\alpha\text{-Bi}_4\text{I}_4$

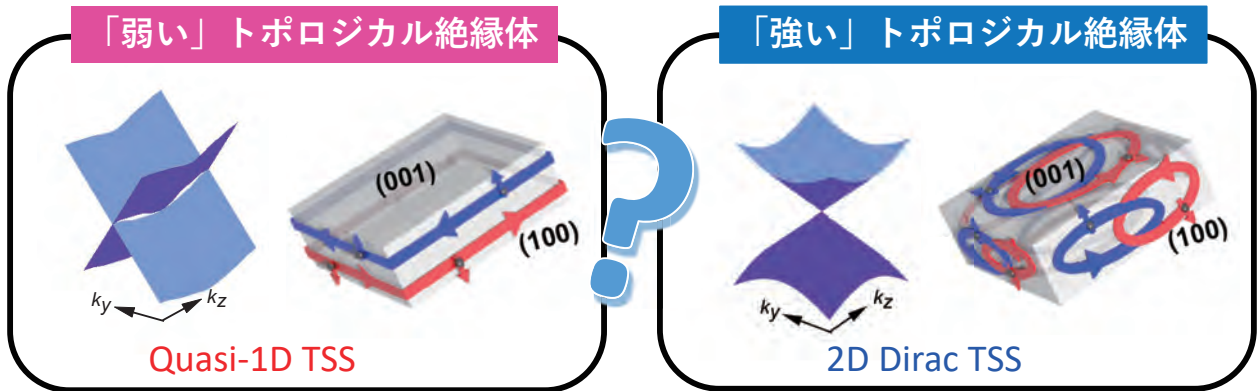


通常の絶縁体      通常の絶縁体

# Purpose

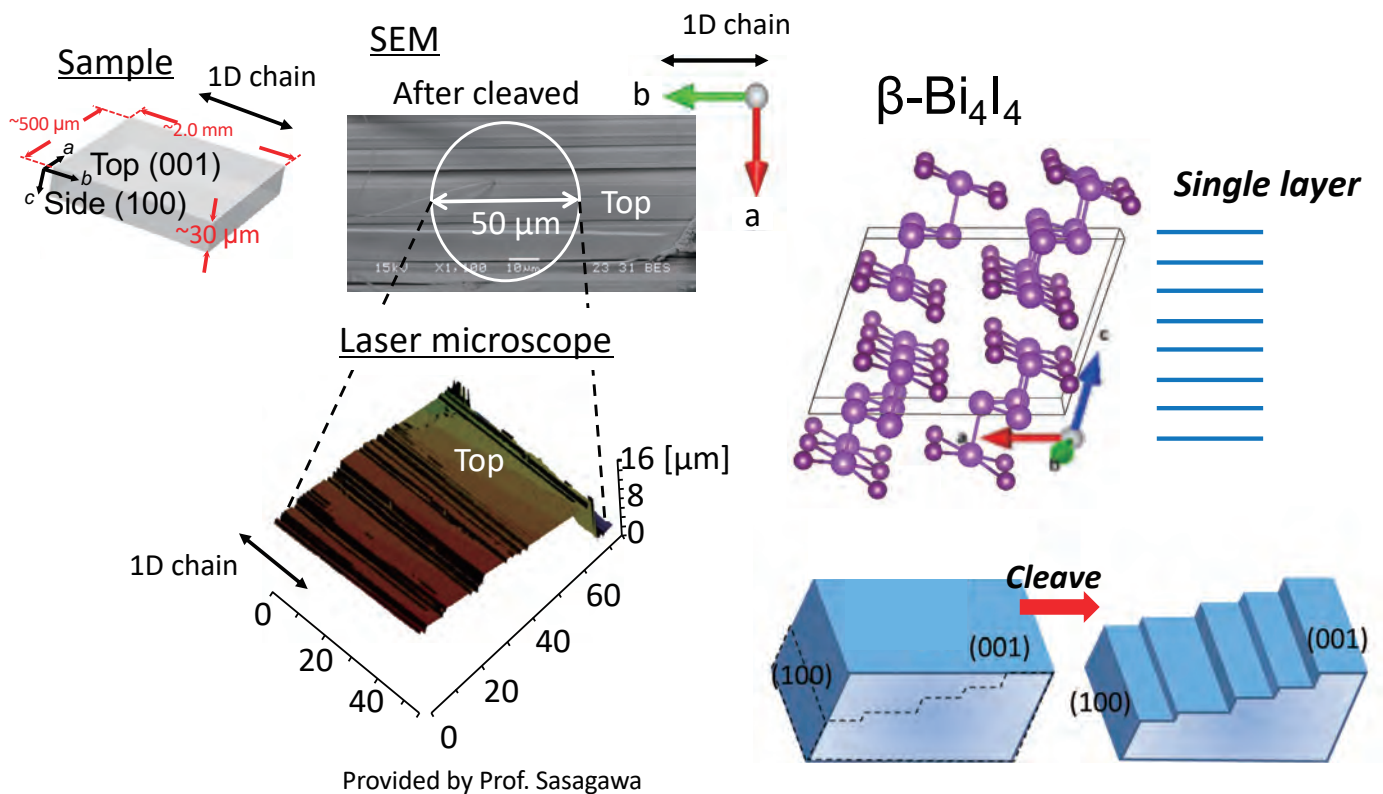
## ◆ Determine the topological phases of $\alpha$ - & $\beta$ - $\text{Bi}_4\text{I}_4$

- $\alpha$ - $\text{Bi}_4\text{I}_4$ : 通常の絶縁体?
- $\beta$ - $\text{Bi}_4\text{I}_4$ : 「弱い」 or 「強い」 トポロジカル絶縁体?

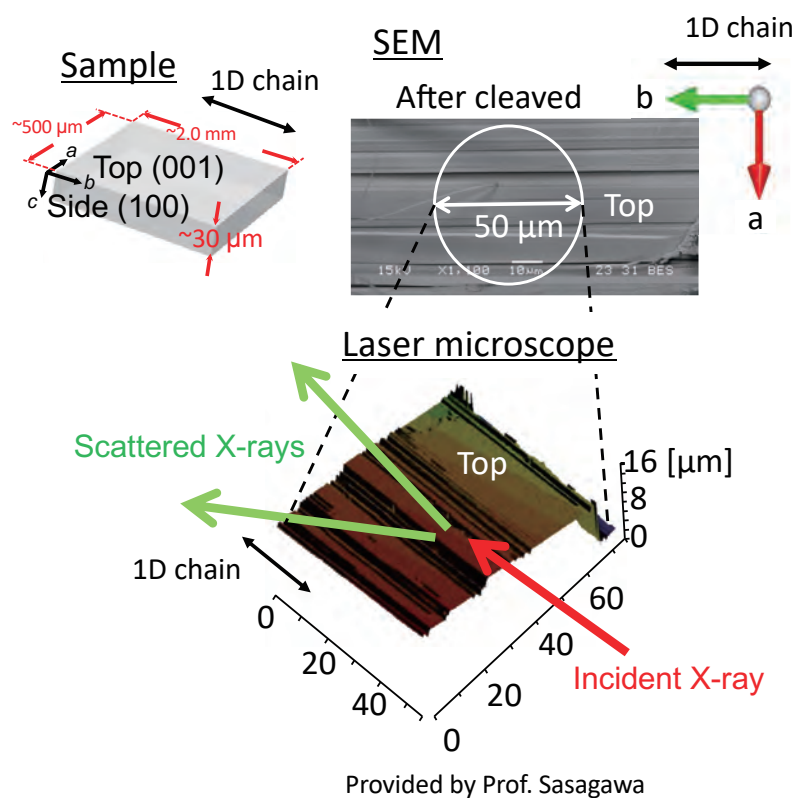


同定には実験が必要である。

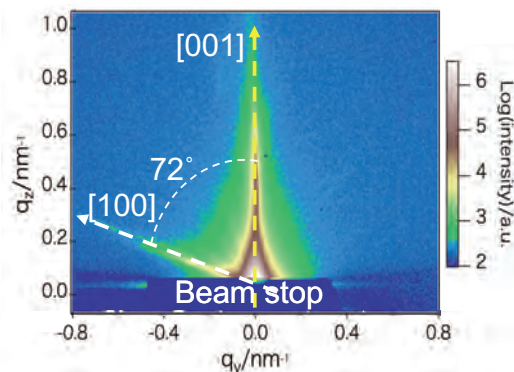
## Two cleavable surfaces of $\beta$ - $\text{Bi}_4\text{I}_4$



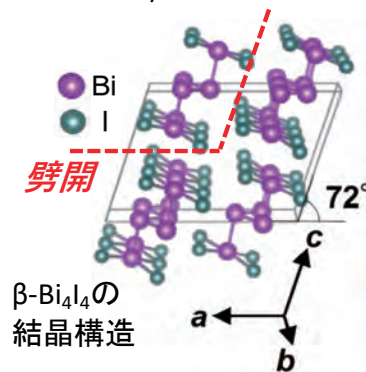
# Two cleavable surfaces of $\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$



## Grazing-Incidence Small-Angle X-ray Scattering (GISAXS)



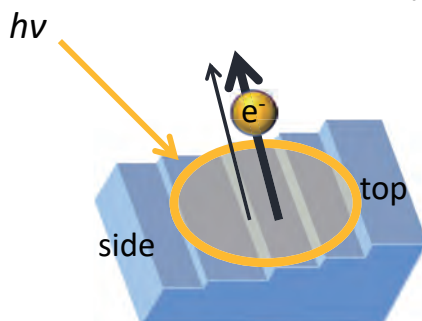
Provided by Dr. Shirasawa



# Experiments

## レーザー-ARPES

@ISSP, Univ. of Tokyo



High  $E$  and  $k$  resolution

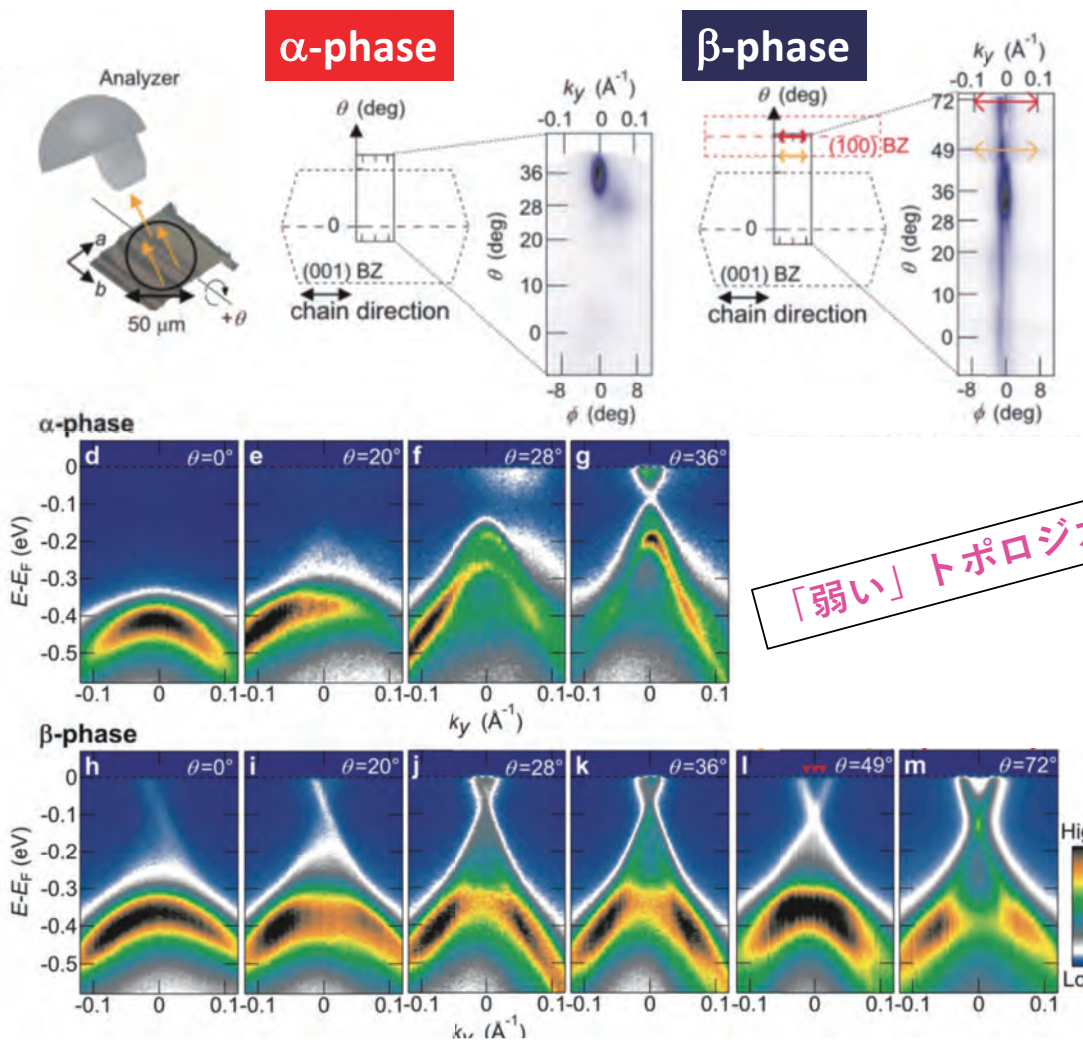
$h\nu = 7 \text{ eV}$ ,  $\Delta E \sim 5 \text{ meV}$

VLEED-type spin detectors

Spot size  $\sim 50 \mu\text{m}$

K. Yaji *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 53111 (2016).





# 本当に側面か？

「弱い」トポロジカル絶縁体

Quasi-1D TSS

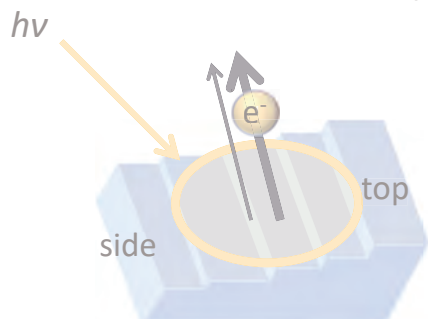
「強い」トポロジカル絶縁体

2D Dirac TSS

# Experiments

## レーザーARPES

@ISSP, Univ. of Tokyo



High  $E$  and  $k$  resolution

$h\nu = 7 \text{ eV}$ ,  $\Delta E \sim 5 \text{ meV}$

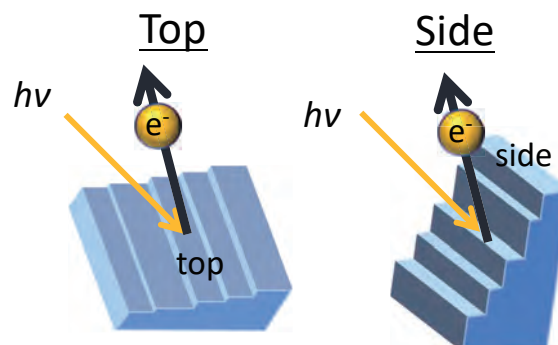
VLEED-type spin detectors

Spot size  $\sim 50 \mu\text{m}$

K. Yaji et al., Rev. Sci. Instrum. **87**, 53111 (2016).

## ナノARPES

@Diamond & @ Elettra



High spatial resolution

Spot size  $< 1 \mu\text{m}$

Surface selective measurement

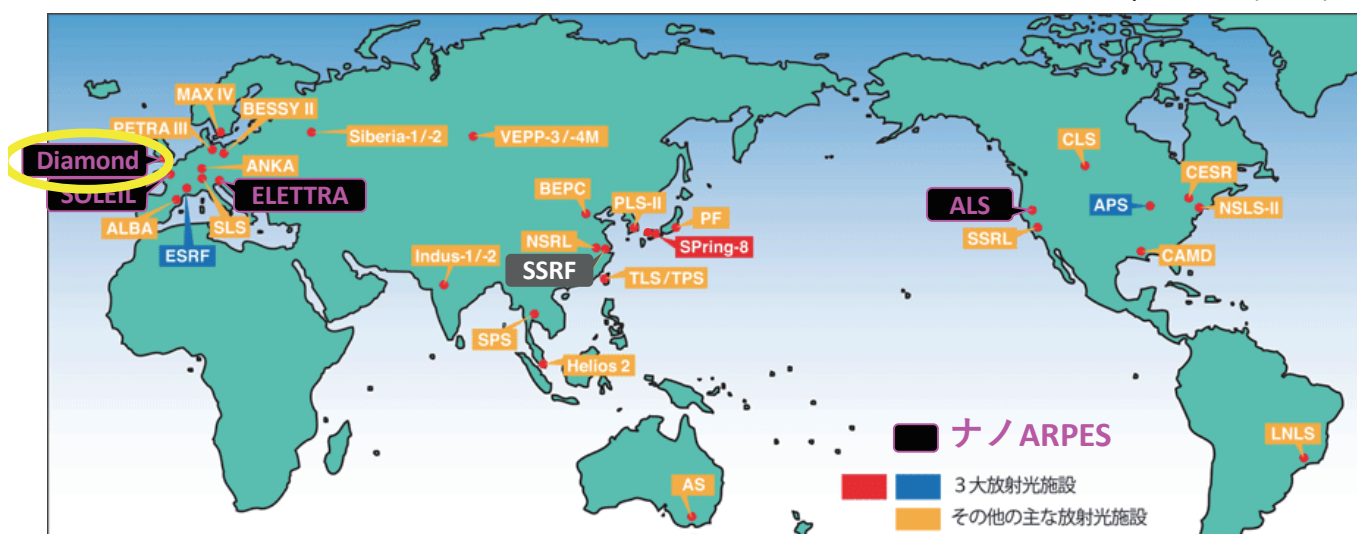
$h\nu = 74 / 85 \text{ eV}$ ,  $\Delta E \sim 60 \text{ meV}$

## ナノARPESの世界地図

□ ELETTRA, SOLEIL, ALS, Diamond

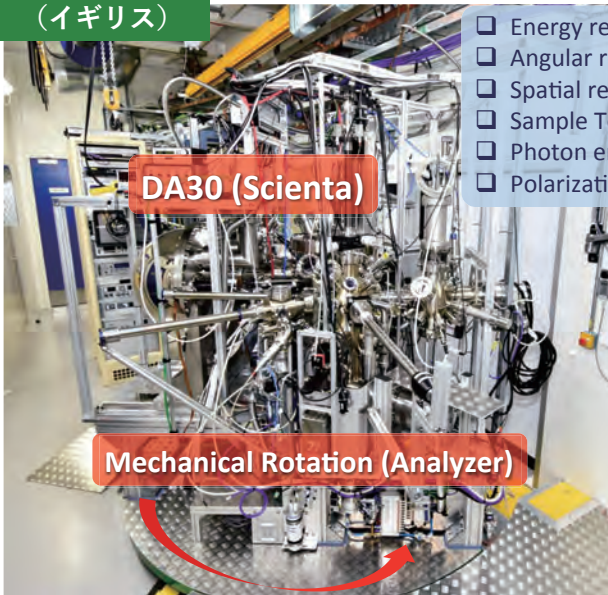
□ SSRF : commissioning towards end of 2017

by 岩澤氏 (広大)



<http://commune.spring8.or.jp/about/features.html>

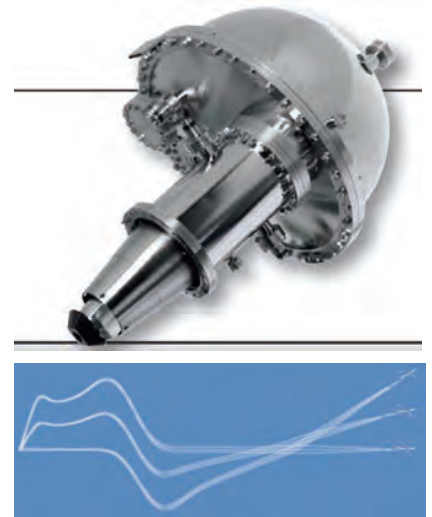
Diamond  
(イギリス)



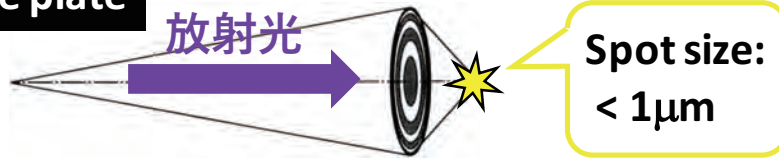
- Energy resolution : < 50 meV
- Angular resolution : < 1 deg
- Spatial resolution : < 1  $\mu\text{m}$
- Sample Temp. : 25 – 300 K
- Photon energy : 60 to 200 eV
- Polarization : LH, LV, LCP, RCP



Deflector Scan

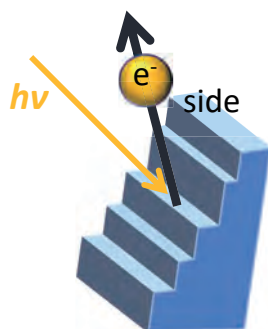
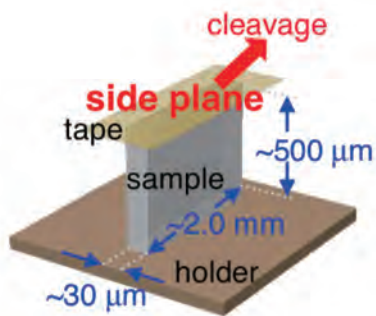
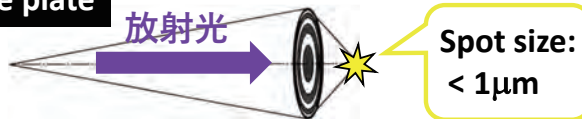


Zone plate

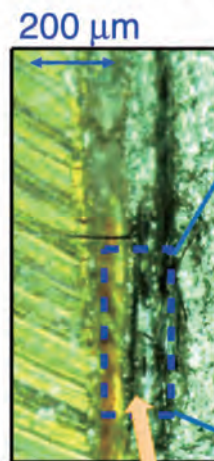


## Nano-ARPES of side surface (100)

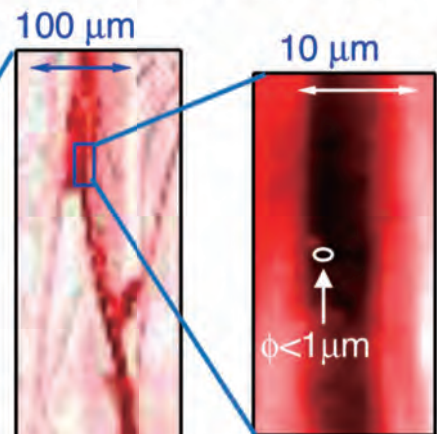
Zone plate



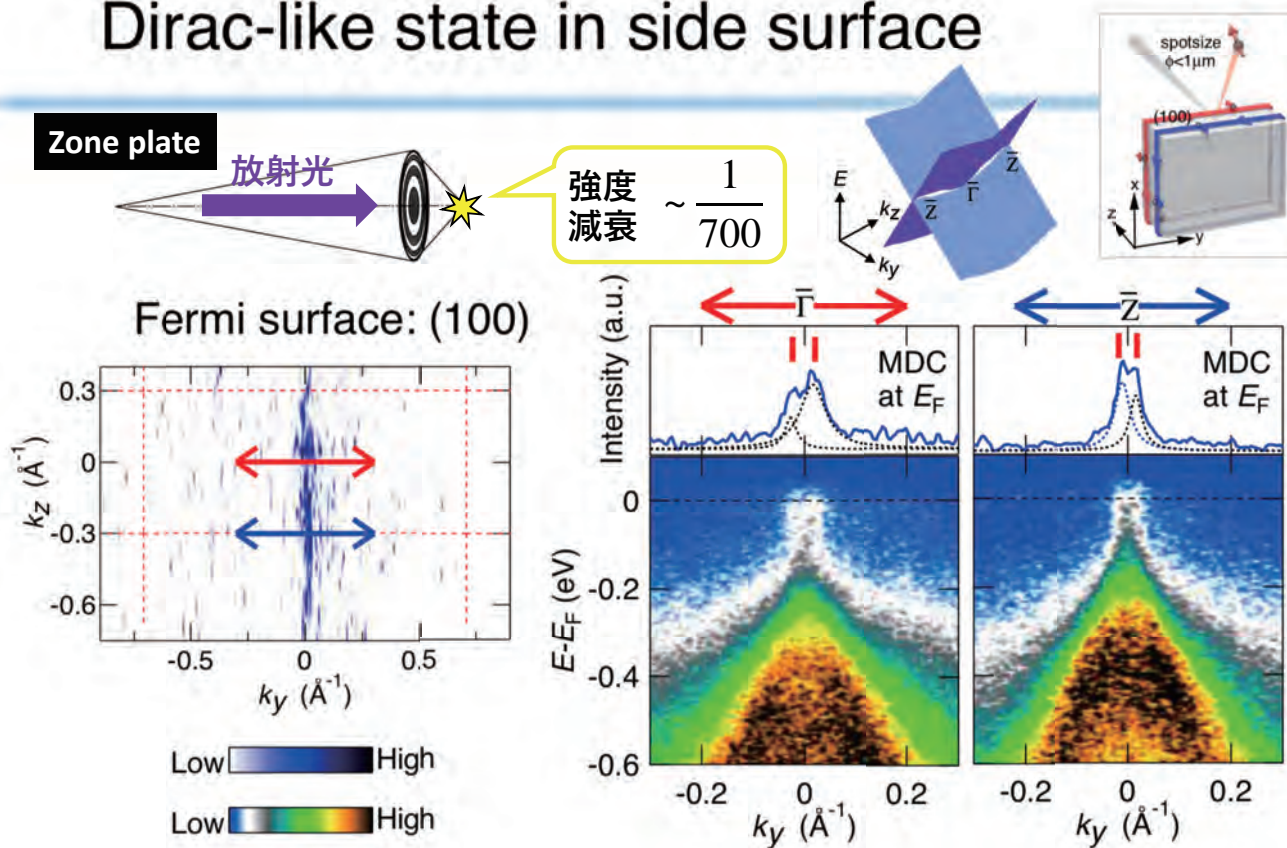
Optical microscope



Photoelectron intensity mapping

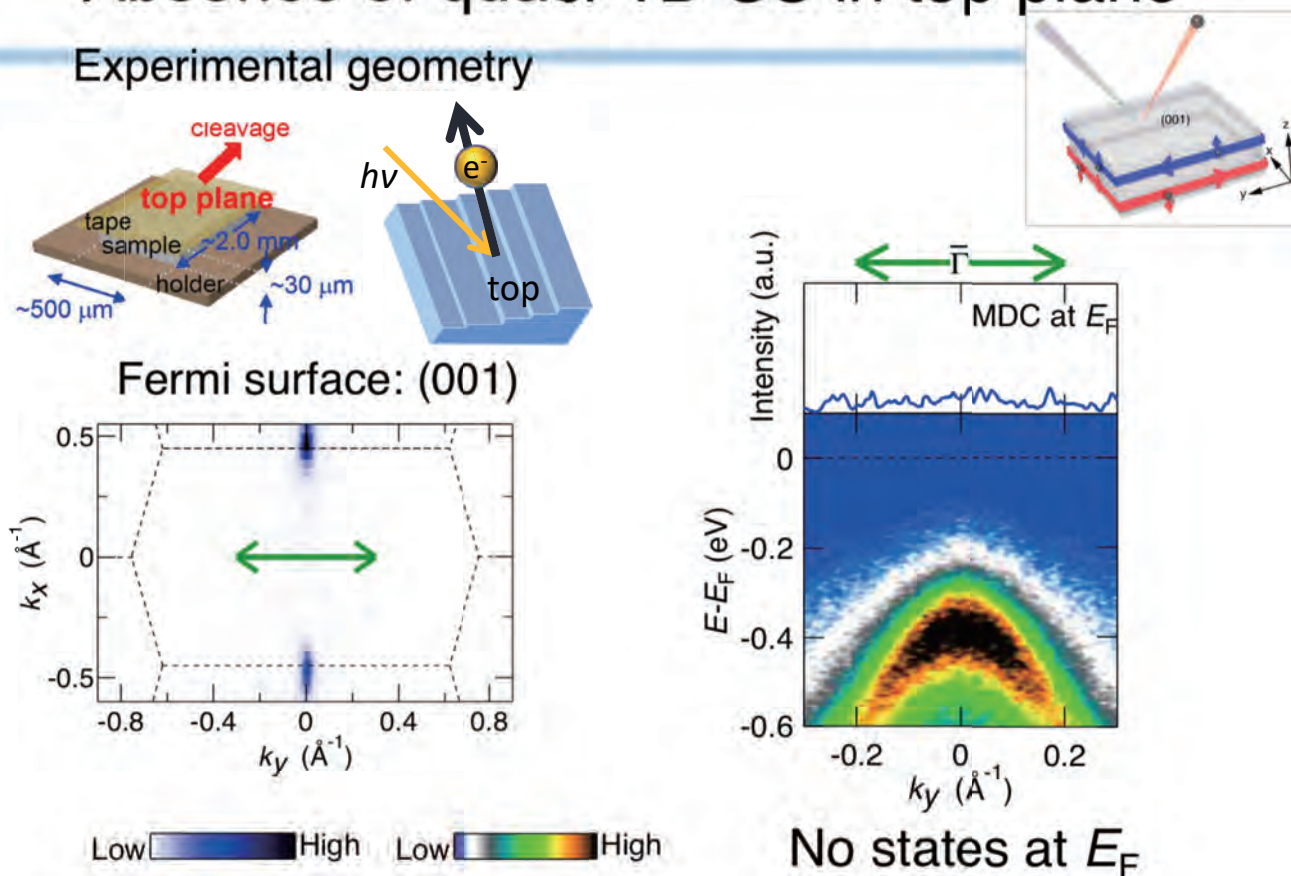


# Dirac-like state in side surface



R. Noguchi et al.,  
Nature 566, 518 (2019).

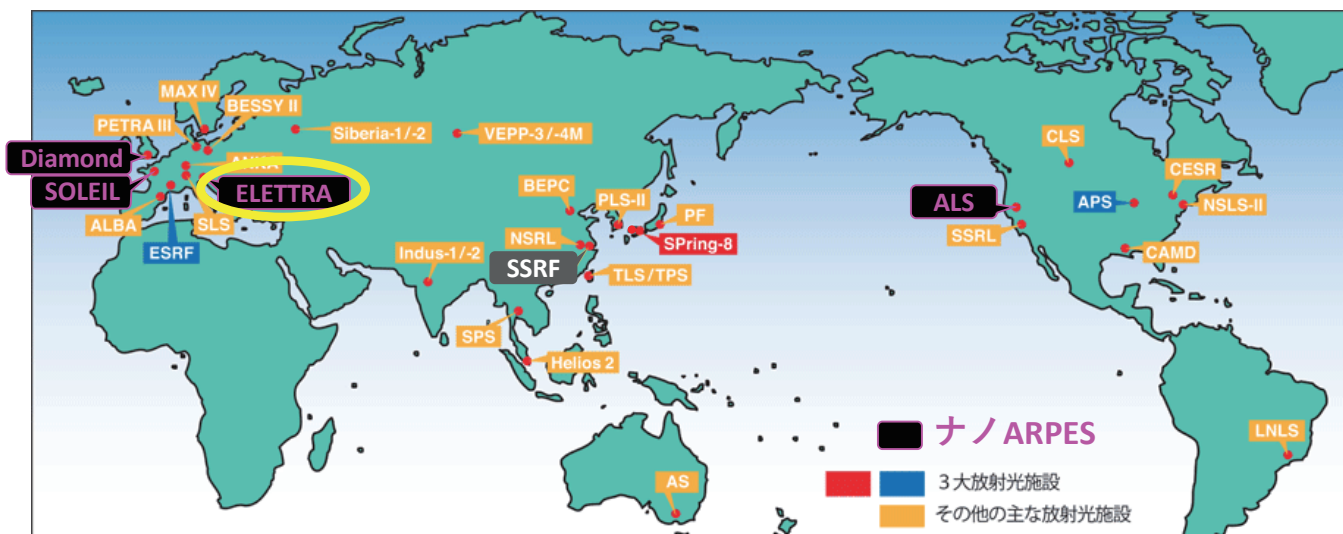
# Absence of quasi-1D SS in top plane



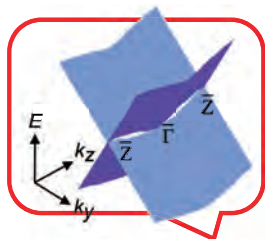
# ナノARPESの世界地図

□ ELETTRA, SOLEIL, ALS, Diamond

□ SSRF : commissioning towards end of 2017



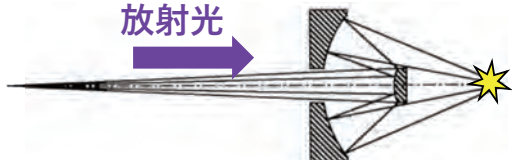
<http://commune.spring8.or.jp/about/features.html>



## Schwarzschild ミラー

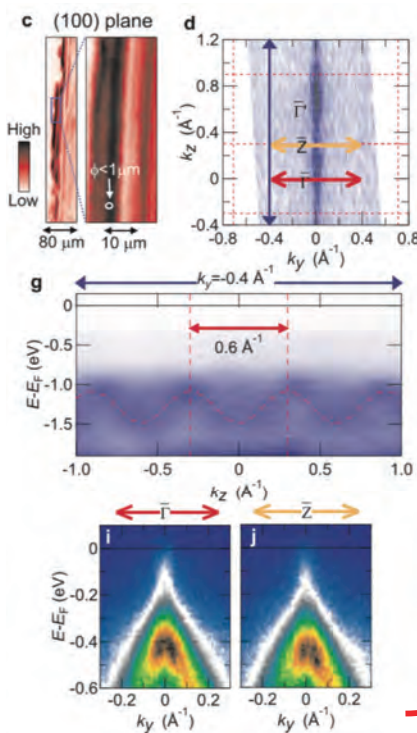
R. Noguchi et al., Nature 566, 518 (2019).

放射光

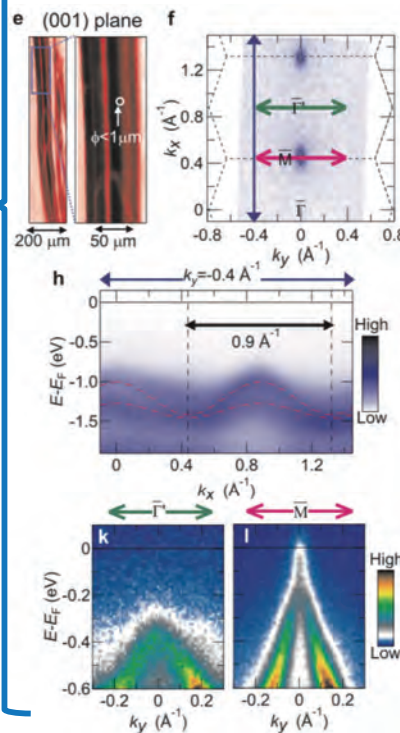


強度減衰  $\sim \frac{1}{50}$

## 結晶の「側面」



## 結晶の「正面」

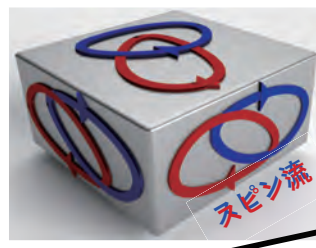




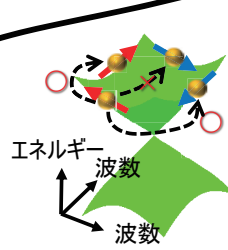
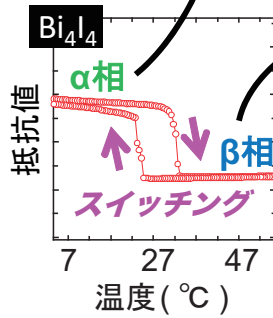
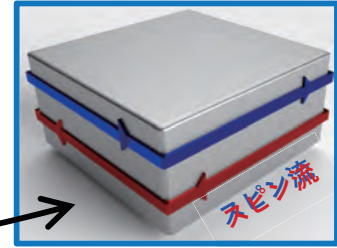
通常の絶縁体



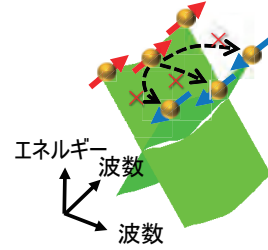
「強い」トポジカル絶縁体



「弱い」トポジカル絶縁体



スピン流はあらゆる方向に拡散され、指向性がない



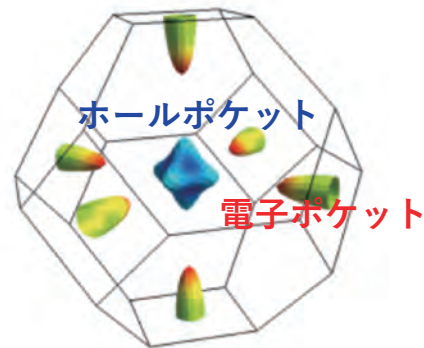
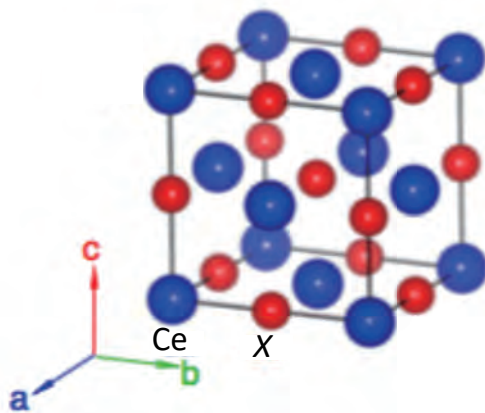
散逸が無く一方向に流れるスピン流が実現

ナノビームは重要である。

超高速・超指向性・完全無散逸の3拍子がそろった理想スピン流の創発と制御

## なぜエネルギー範囲 $50\text{eV} < h\nu < 1,000\text{eV}$ か？

CeX: (X=P, As, Sb, Bi)

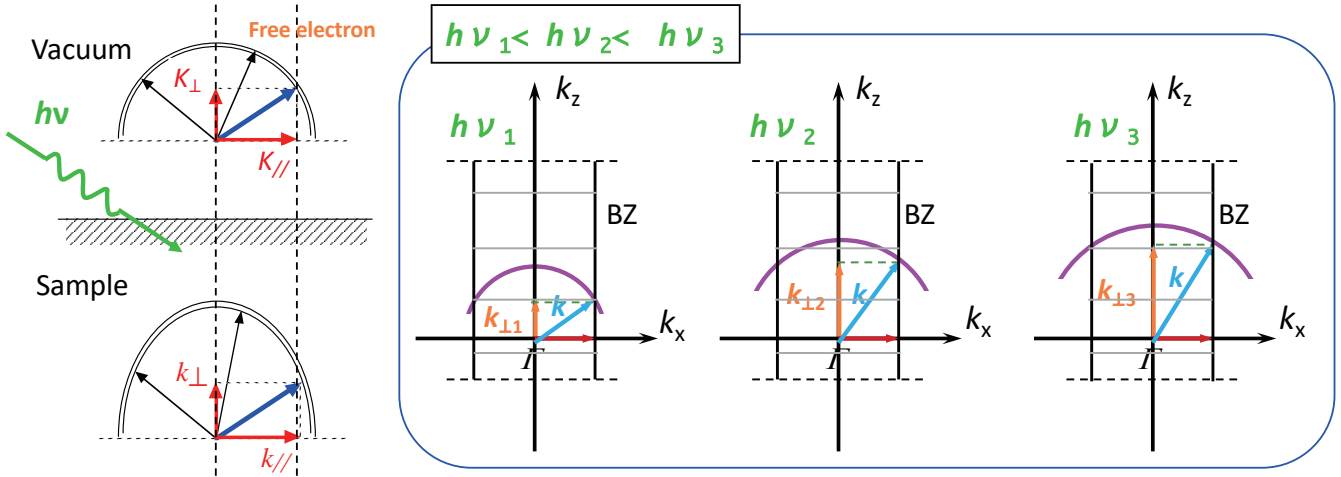


Experimental determination of the topological phase diagram in Cerium monopnictides

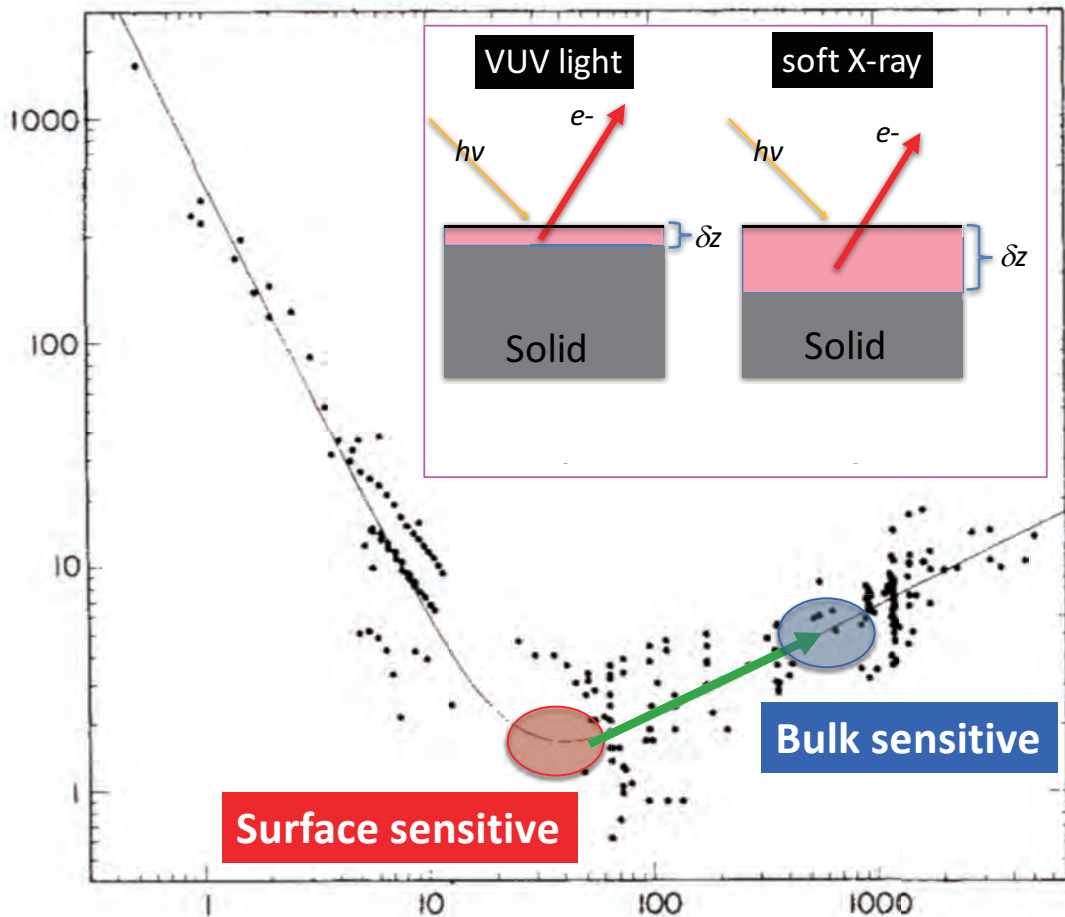
K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. Lett. 120, 086402 (2018).

# ARPES technique

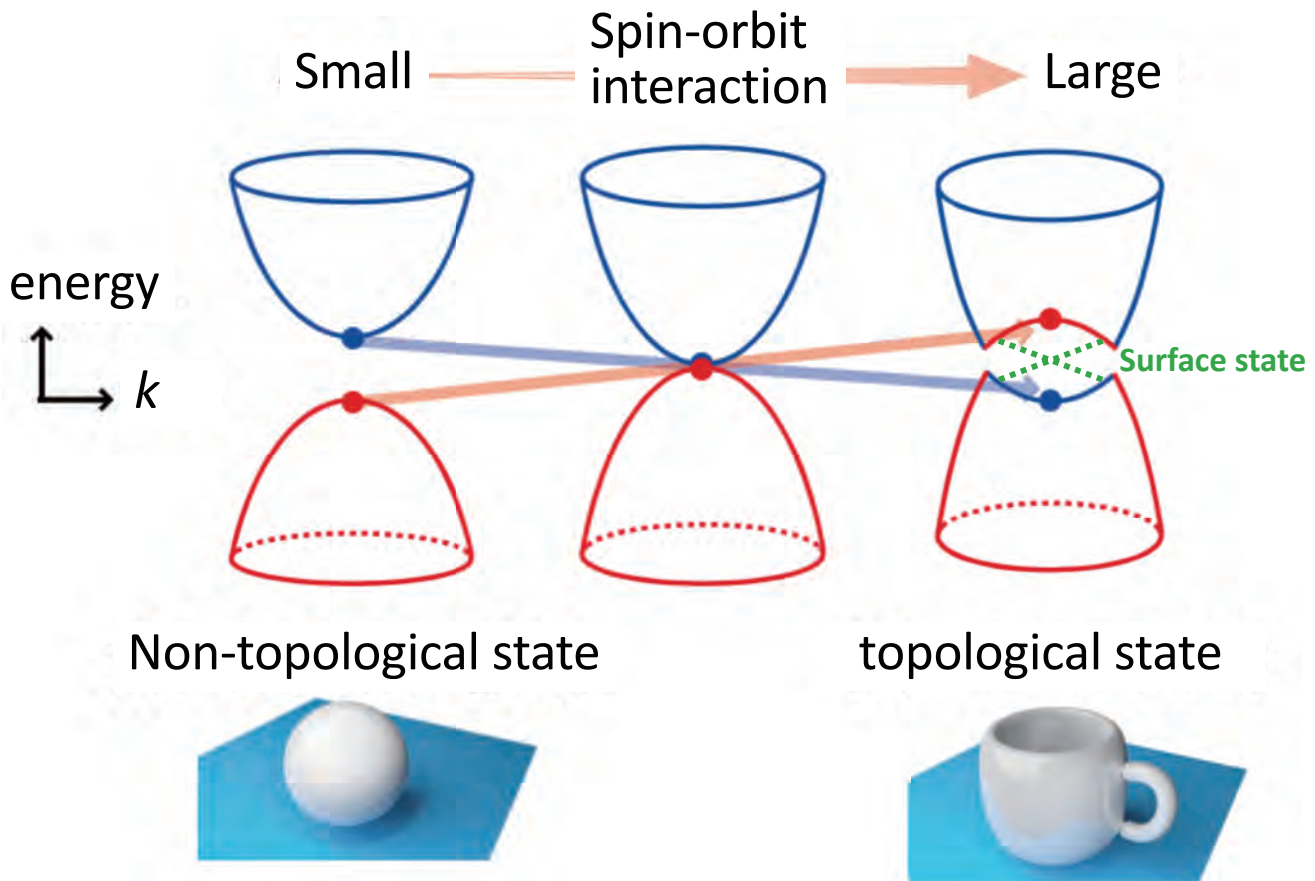
$$k_{\perp} = \sqrt{K_{\perp}^2 + \frac{2m}{\hbar^2}(W.F. + V_0)}$$



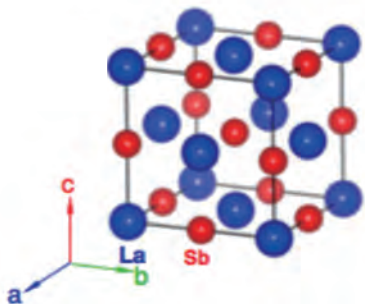
固体中の平均自由行程 (nm)



固体中電子の運動エネルギー (eV)



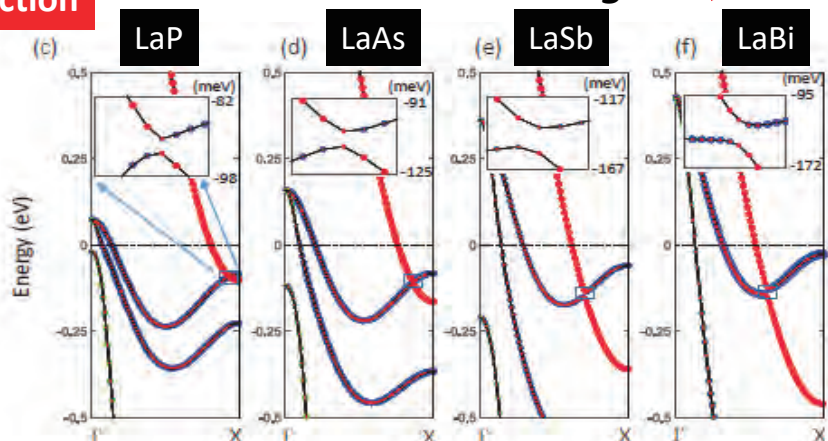
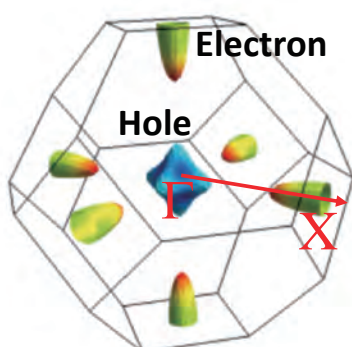
LaX: (X=P, As, Sb, Bi)



Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu	
				* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr	

Spin-orbit interaction

Stronger  $\rightarrow$



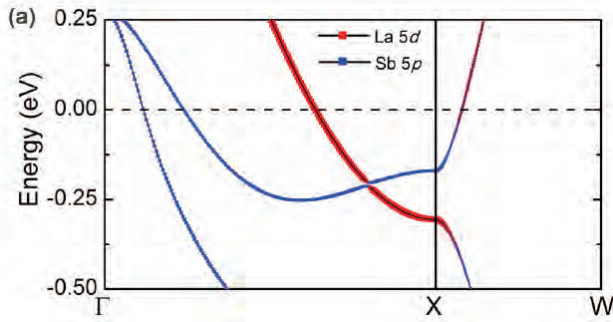
M. Zeng *et al.*, arXiv:1504.03492



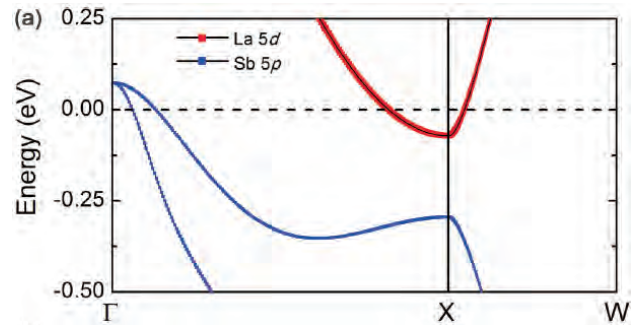
# LaSb

Gap correction: PBE

Gap correction: mBJ (more accurate)



Topological !!

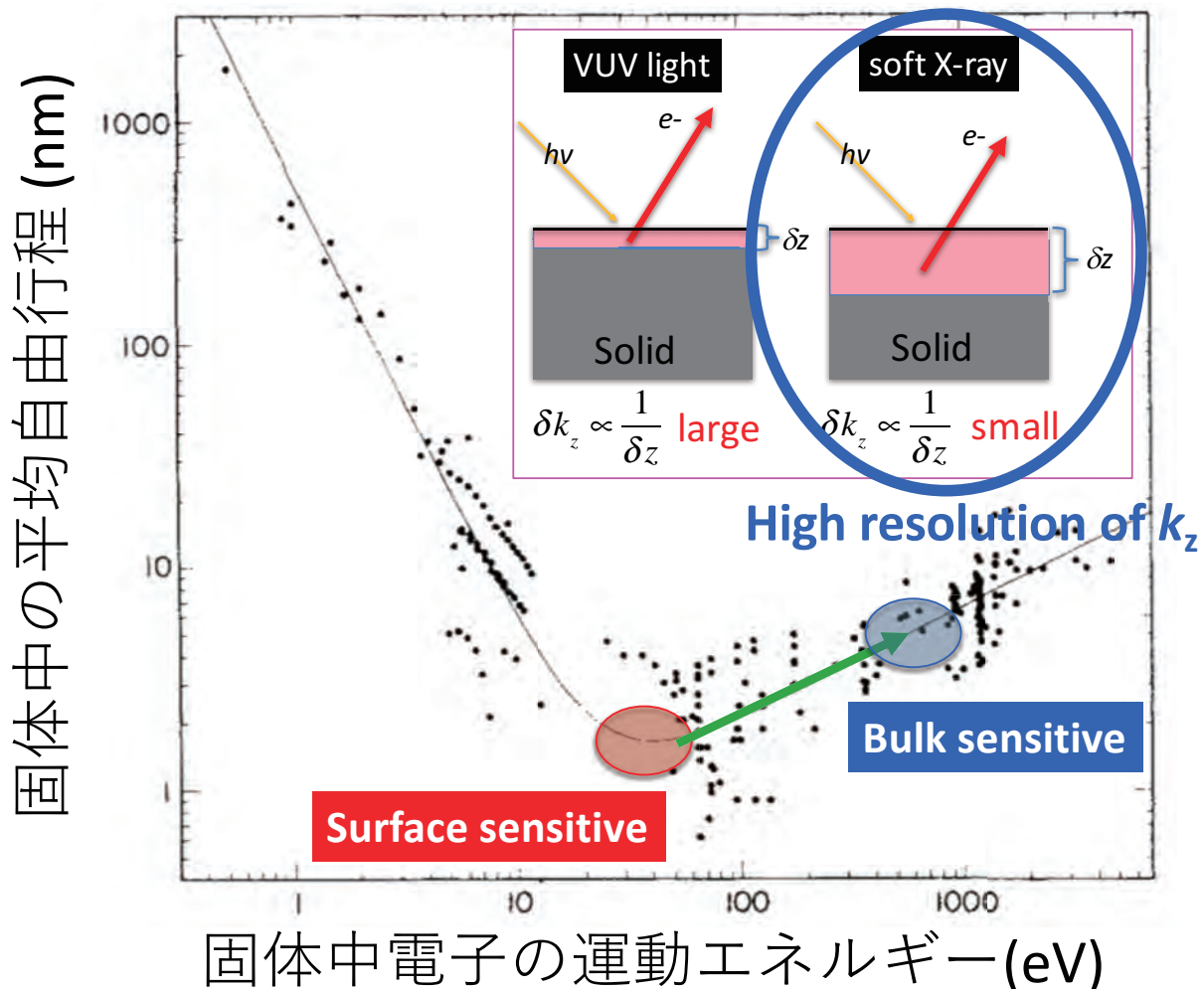


Non-topological !!

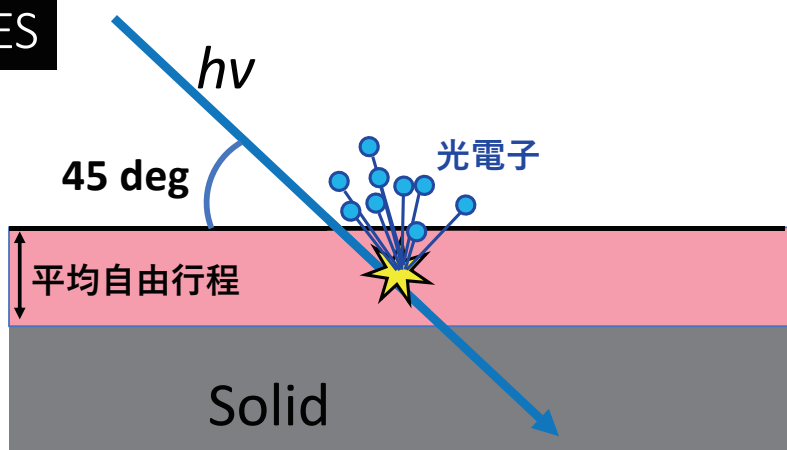
Peng-Jie Guo et al., PRB 93, 235142 (2016).

同定には実験が必要である。

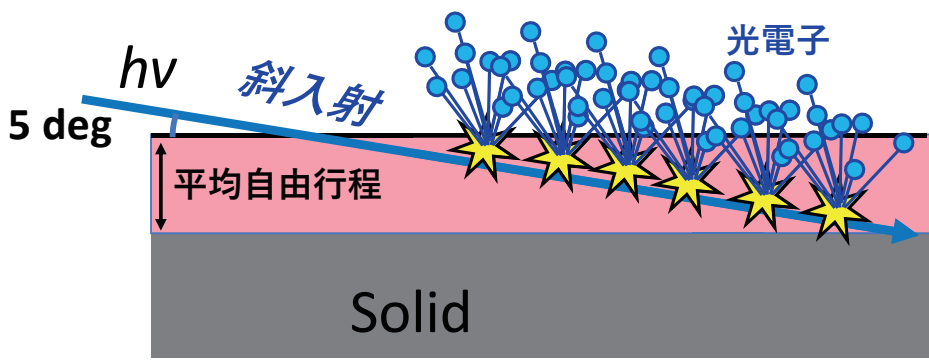
We have studied CeX: (X=P, As, Sb, Bi).



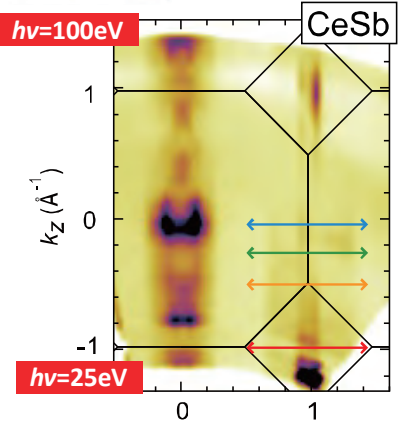
soft X-ray ARPES



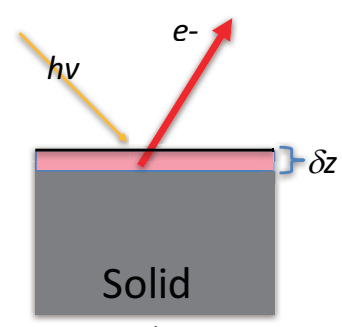
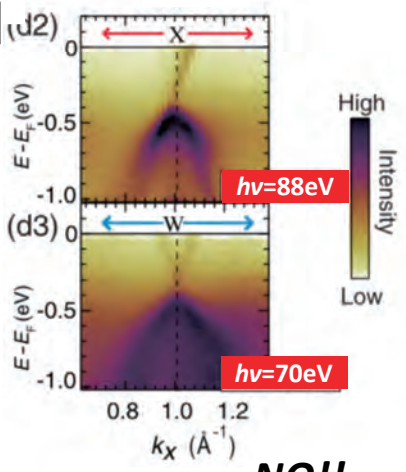
BL25SU at SPring-8



VUV light



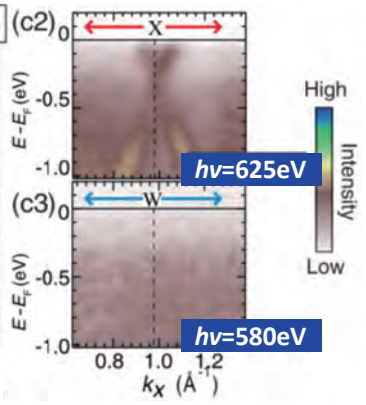
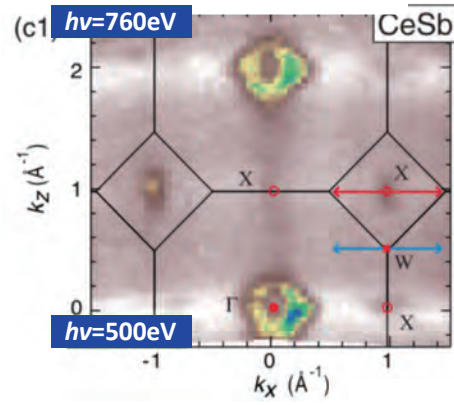
Topological Surface Dirac cone ???



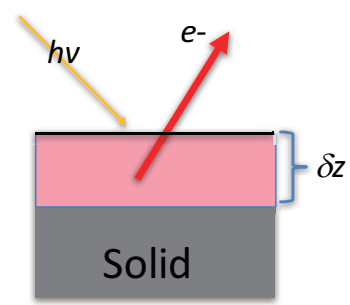
$\delta k_z \propto \frac{1}{\delta z}$  large

Low resolution of  $k_z$

Soft X-ray



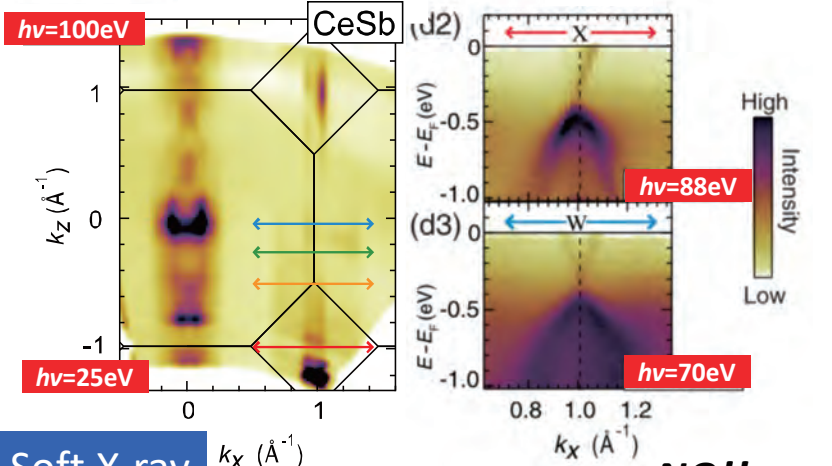
NO!!



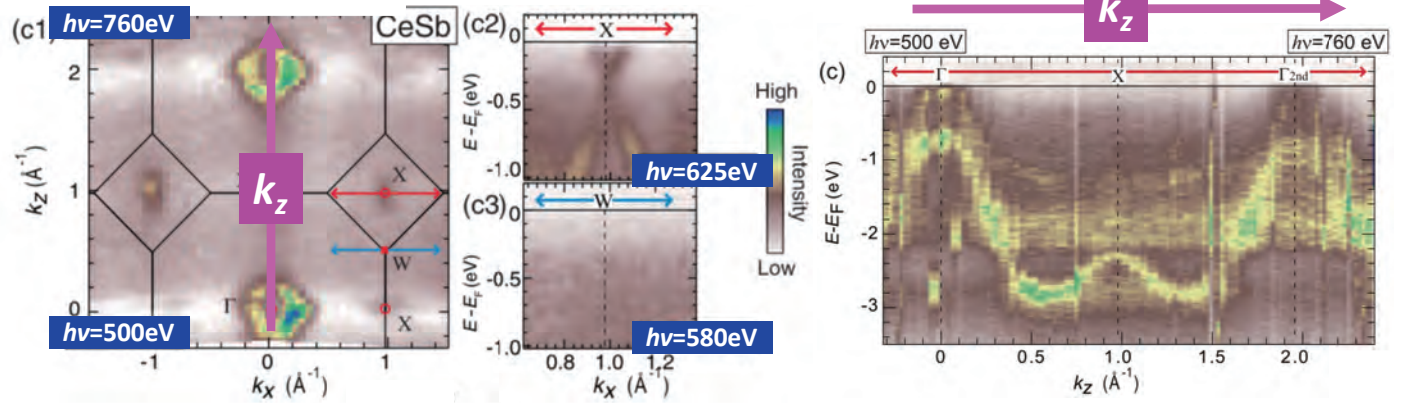
$\delta k_z \propto \frac{1}{\delta z}$  small

High resolution of  $k_z$

VUV light

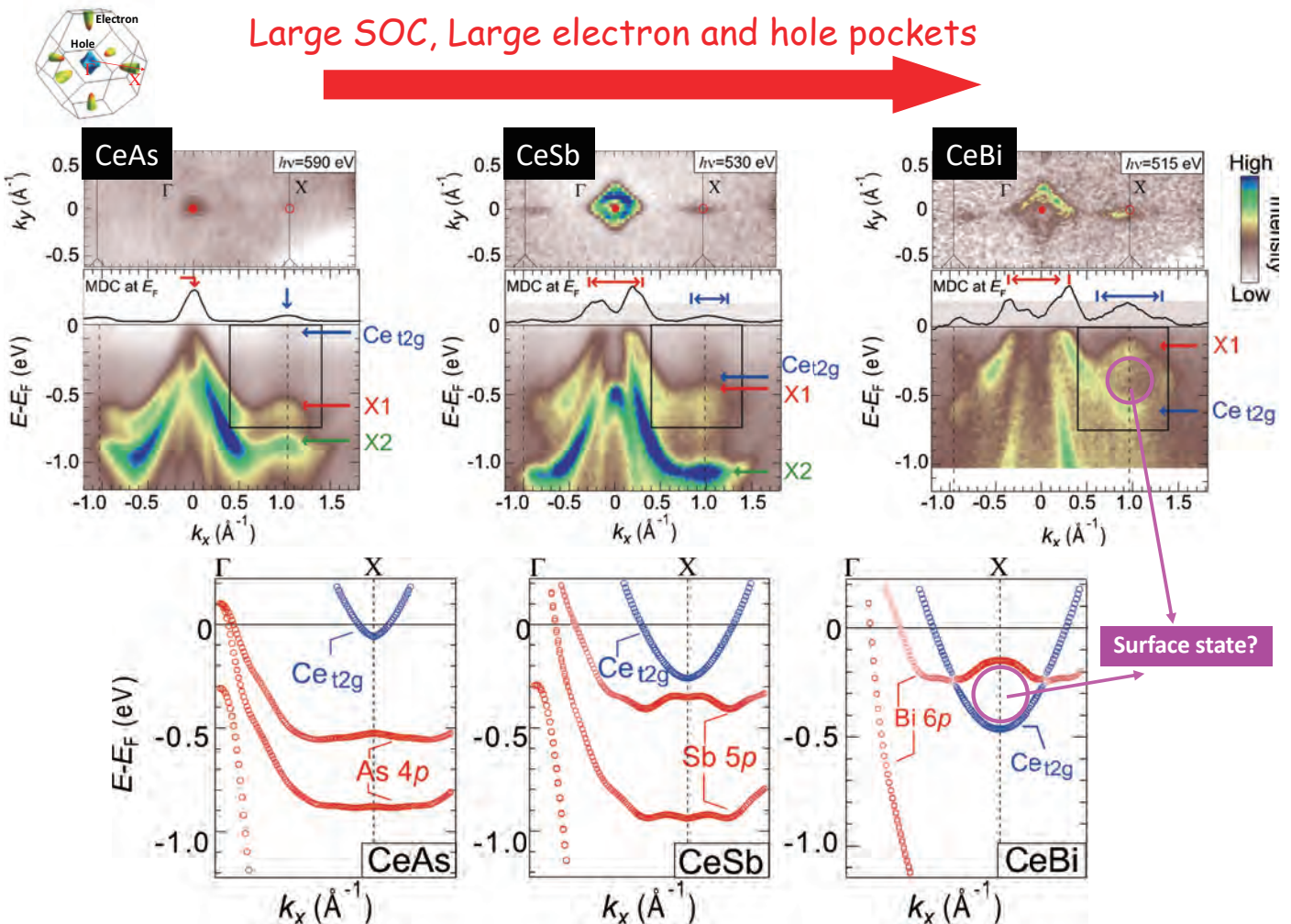


Soft X-ray



NO!!

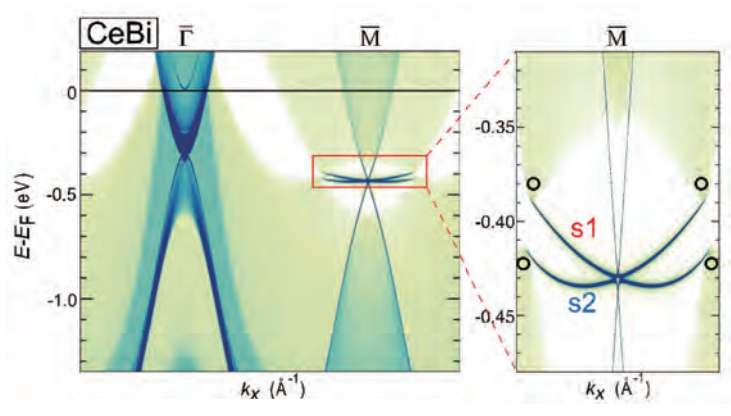
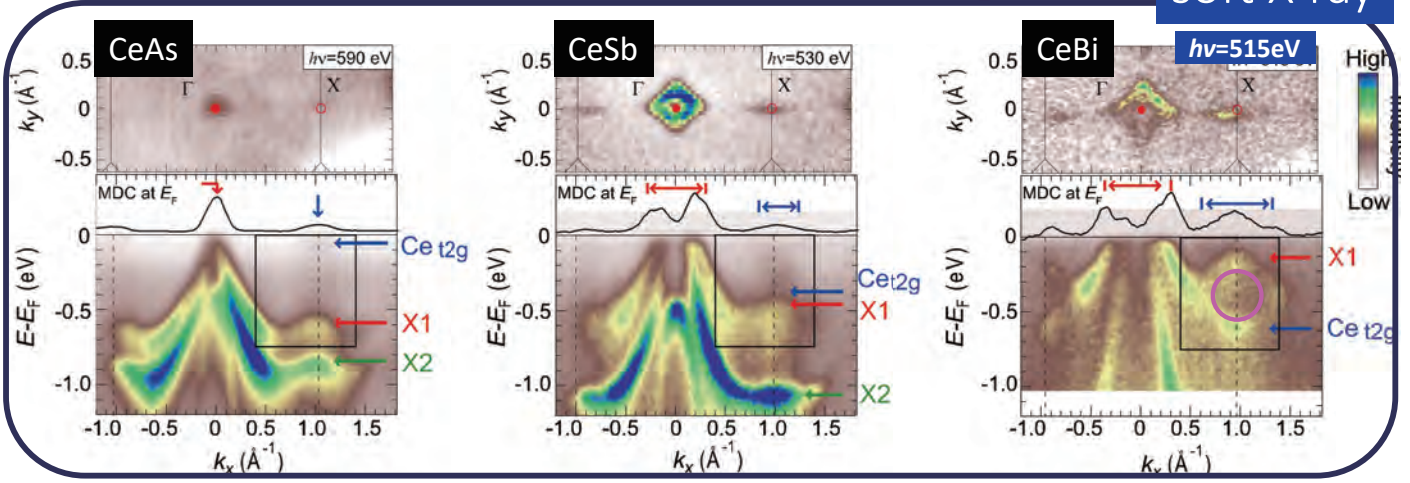
Large SOC, Large electron and hole pockets



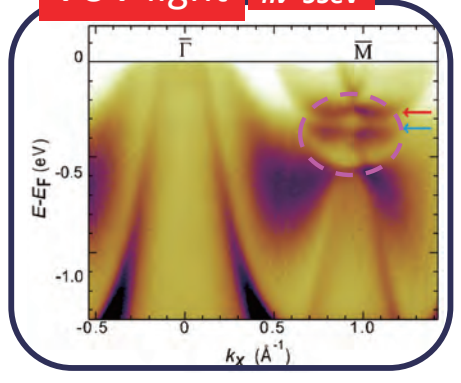
Large SOC, Large electron and hole pockets



soft X-ray

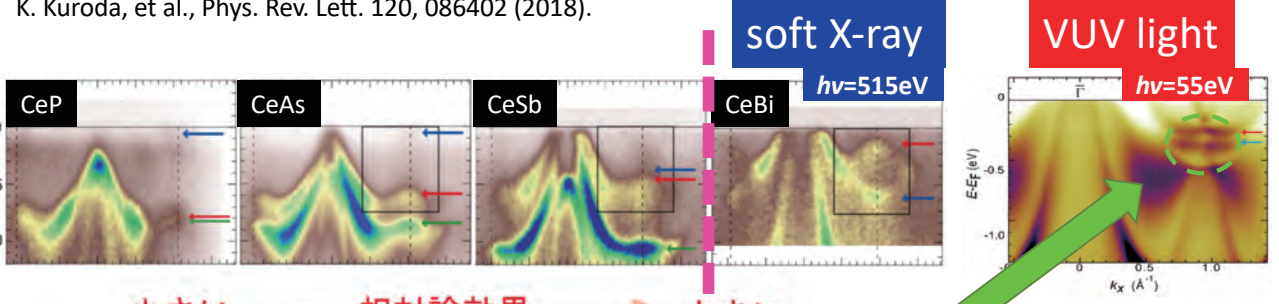


VUV light hv=55eV

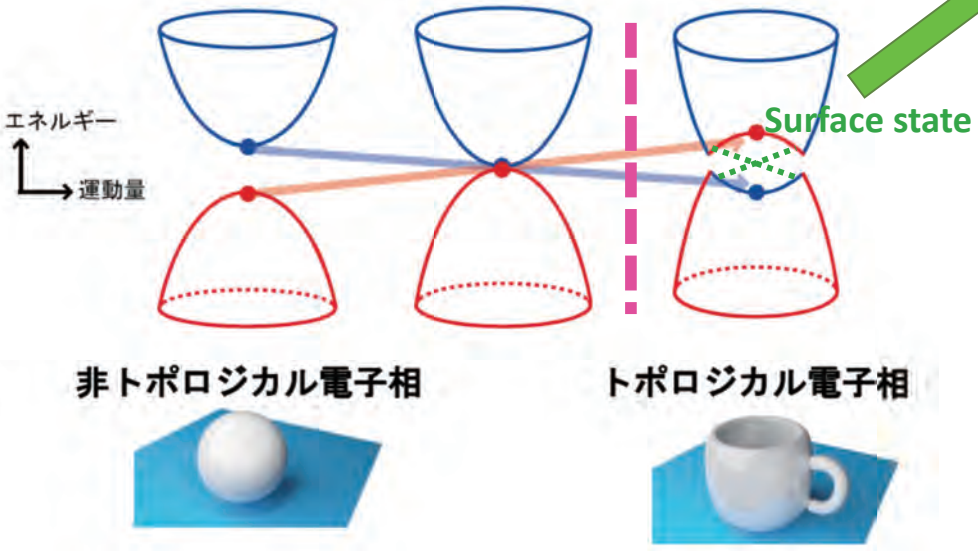


## Experimental determination of the topological phase diagram in Cerium monopnictides

K. Kuroda, et al., Phys. Rev. Lett. 120, 086402 (2018).



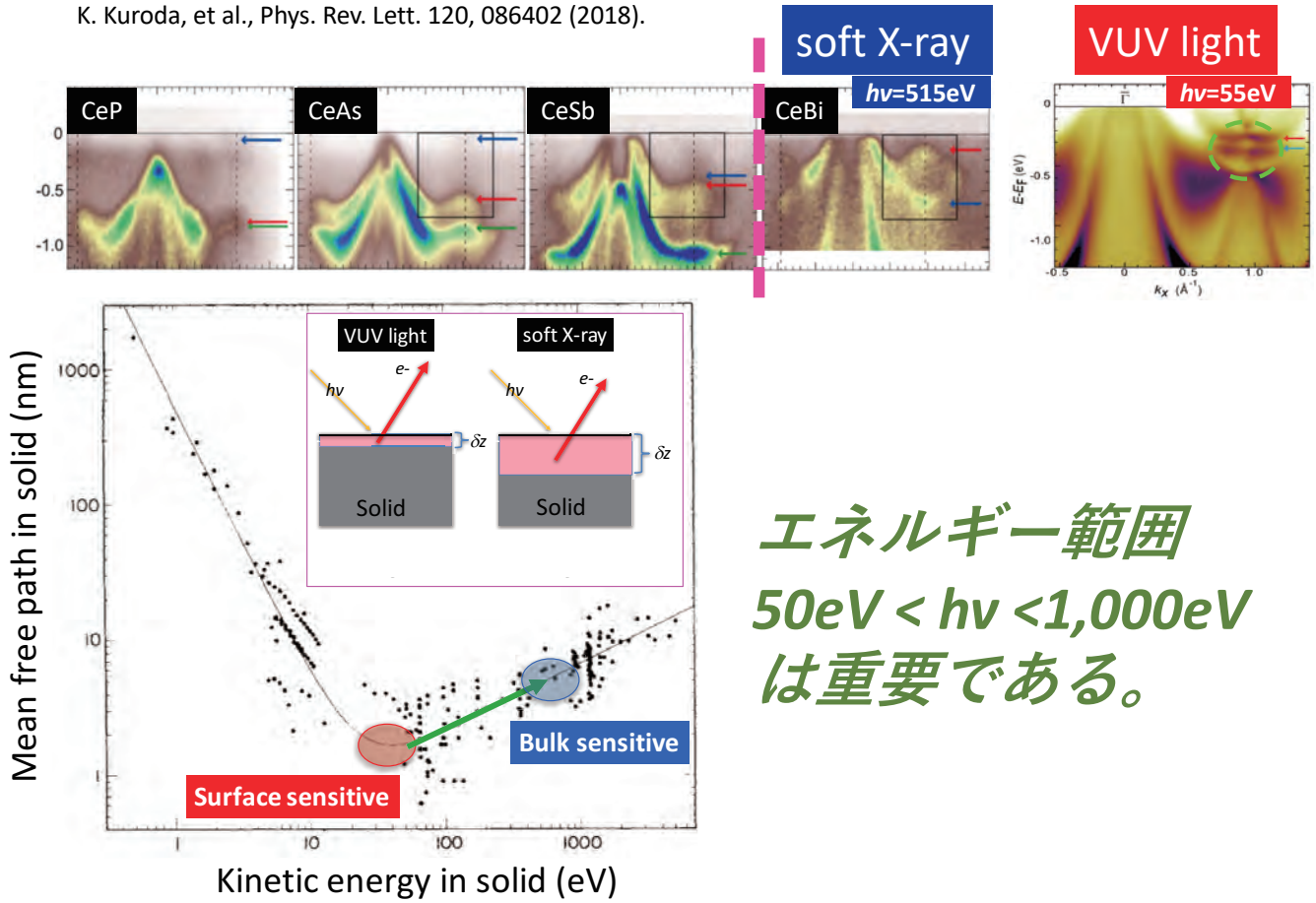
小さい → 相対論効果 → 大きい



13	14	15	16	17	18
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

# Experimental determination of the topological phase diagram in Cerium monopnictides

K. Kuroda, et al., Phys. Rev. Lett. 120, 086402 (2018).



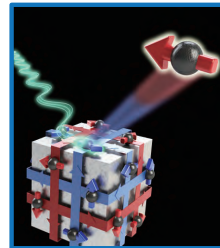
エネルギー範囲  
 $50\text{eV} < h\nu < 1,000\text{eV}$   
 は重要である。

まとめ：

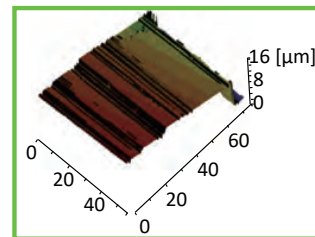
1) 高エネルギー分解能は重要である。



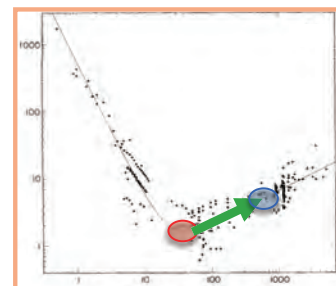
2) (直線)偏光可変は重要である。



3) ナノビームは重要である。



4)  $50\text{eV} < h\nu < 1,000\text{eV}$ は重要である。



ミラーナノ集光系に対する準備  
東京大学物性研究所・松田勲

20191002  
次世代放射光 ナノ光電子分光  
ワークショップ 2019

ミラーナノ集光系に対する準備

松田巖  
東大物性研

謝辞

三村秀和



大橋治彦、藤澤正美  
尾嶋正治

相馬清吾



堀場弘司



Nano-focusing  
mirror

情報交換

NanoESCA  
*Operando  
Machine-learning*

Beamline  
*New Materials  
Precise controls  
Robotics*

永村直佳



吹留博一



細野英司



資料



協賛: 日本放射光学会

日本放射光学会(メーリングリスト)会員向け案内文(8月27日発信)

“日本放射光学会” <jssrr@jssrr.jp> wrote:

日本放射光学会 会員各位

次世代放射光ナノ光電子分光ワークショップ 2019 の案内をいただきましたので  
会員の皆様にお知らせいたします。

日本放射光学会事務局

---

次世代放射光ナノ光電子分光ワークショップ 2019

「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書(1)」([https://www.3gev.qst.go.jp/BL\\_report.html](https://www.3gev.qst.go.jp/BL_report.html))により、次世代放射光施設の  
第 1 期整備ビームラインラインアップが提示され、それを受けて国が整備する 3 本の共用ビームラインの検討を開始し、AllJapan  
の叡智を結集した実験ステーションを建設すべく議論を重ねています。今回、ナノ光電子分光ビームラインについて、下記のワーク  
ショップを開催することにいたしましたので、多数のご参加をお待ちしております。

1. 日時: 2019年10月2日(水)13時~17時
  2. 場所: 東大本郷キャンパス山上会館2F 大会議室(120名)
  3. 主催: 量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター
  4. 参加費: 無料
  5. 参加申し込み: 当日会場にて受け付けます
  6. プログラム
- 13:00~ Opening Address: WS 趣旨説明(東大・尾嶋正治)
- 13:10~ 高輝度 3GeV 放射光の特徴と光源性能(量研・高橋正光)
- 13:30~ ナノスピン分解電子状態解析: サイエンスとビームライン提案(東北大・佐藤宇史、KEK・堀場弘司)
- 14:20~ スピン分解光電子分光の動向(広大・奥田太一)
- 14:50~ ナノ ARPES の研究動向(広大・岩澤英明)
- 15:20~ 休憩
- 15:40~ QSTにおけるスピントロニクス材料研究の展開(量研・境誠司)
- 16:10~ レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓(東大物性研・近藤猛)
- 16:40~ パネル討論
- 16:55~ Concluding Remarks
7. 本件連絡先: 加道雅孝(量研次世代放射光施設整備開発センター)

3GeV-info@qst.go.jp

<https://www.3gev.qst.go.jp/>

協賛: 日本表面真空学会

日本表面真空学会(メーリングリスト)会員向け案内文(8月27日発信)

“表面真空学会事務局” <office@jvss.jp> wrote:

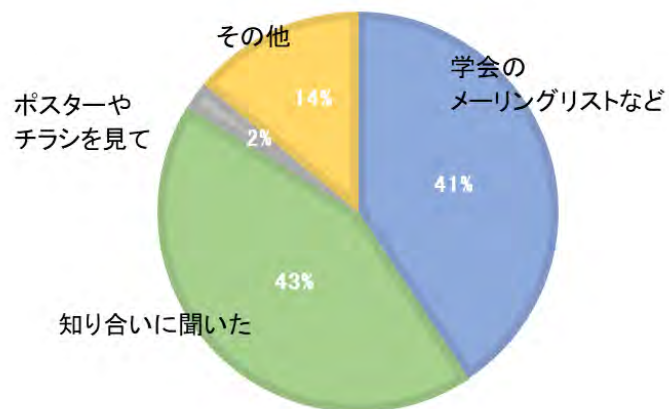
官民地域パートナーシップにより推進している「次世代放射光施設(軟X線向け高輝度3GeV級放射光源)」に関し、「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書(1)」([https://www.3gev.qst.go.jp/BL\\_report.html](https://www.3gev.qst.go.jp/BL_report.html))により、次世代放射光施設の第1期整備ビームラインラインアップが提示され、それを受けて国が整備する3本の共用ビームラインの検討を開始しました。今回、ナノ光電子分光ビームラインについてワークショップを開催いたしますので、多く方からご意見をいただけますよう多数のご参加をお待ちしております。

1. 日時:2019年10月2日(水)13時~17時
2. 場所:東大本郷キャンパス山上会館2F大会議室(120名)
3. 主催:量子科学技術研究開発機構(QST) 量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター
4. 参加費:無料
5. 参加申し込み:当日会場にて受け付けます
6. プログラム
  - 13:00~ Opening Address: WS 趣旨説明(東大・尾嶋正治)
  - 13:10~ 高輝度3GeV放射光の特徴と光源性能(量研・高橋正光)
  - 13:30~ ナノスピン分解電子状態解析:サイエンスとビームライン提案(東北大・佐藤宇史、KEK・堀場弘司)
  - 14:20~ スピン分解光電子分光の動向(広大・奥田太一)
  - 14:50~ ナノARPESの研究動向(広大・岩澤英明)
  - 15:20~ 休憩
  - 15:40~ QSTにおけるスピントロニクス材料研究の展開(量研・境誠司)
  - 16:10~ レーザー光電子分光によるトポロジカル物性の開拓(東大物性研・近藤猛)
  - 16:40~ パネル討論
  - 16:55~ Concluding Remarks
7. 本件連絡先:加道雅孝(量研次世代放射光施設整備開発センター)
  - 3GeV-info@qst.go.jp
  - <https://www.3gev.qst.go.jp/>

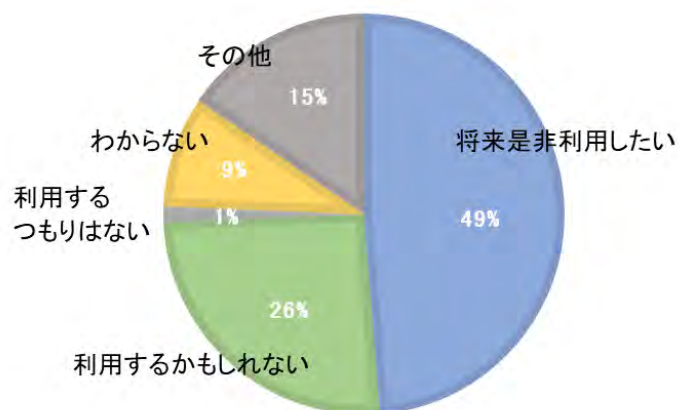
## アンケート結果

来場者数 94 人（アンケート回収率 83%）

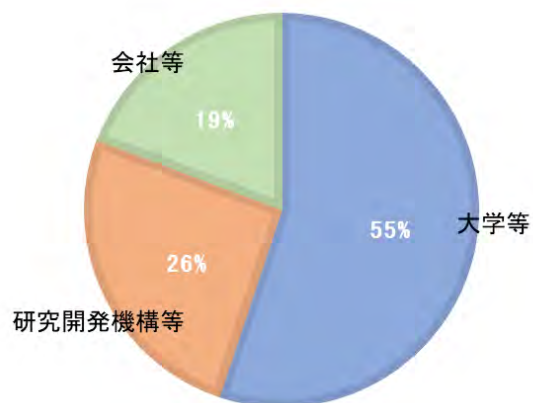
本ワークショップはどのように知りましたか。



次世代放射光施設について。



参加者の所属について。



量子科学技術研究開発機構 次世代放射光整備開発センター  
軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源(次世代放射光施設)  
<https://www.3gev.qst.go.jp/>



2019.10