

ビームライン名： ナノ光電子分光

WG 構成メンバー：主査・尾嶋正治（東大）、佐藤宇史（東北大）、堀場弘司（KEK）、境誠司（QST）、近藤猛（東大）、溝川貴司（早大）、伊藤孝寛（名大）、木村真一（阪大）、奥田太一（廣大）、

オブザーバー：小川修一（東北大）、矢治光一郎（東大）、三村秀和（東大）、石坂香子（東大）、松井文彦（分子研）、関山 明（阪大）、松田巖（東大）、吉越章隆（原子力機構）、岩澤英明（廣大）、高橋 和敏（佐賀大）、高橋正光（QST）、岡崎宏之（QST）、

事務局：安居院あかね（QST）

概要

角度分解光電子分光（ARPES）は、固体内のバンド分散を直接観測する測定手段である。本ビームラインではスピン分解、かつ 30 nm の空間分解で ARPES を行う世界でも例のない最先端ビームラインを建設し、これまで不可能であった 1) 対象物質の不均一試料への拡大、2) 電子デバイスのオペランド解析、3) 多元環境下での測定、を世界に先駆けて実現する。現状では、数 100 nm のナノ領域の電子状態を解析するナノ ARPES はすでに欧米 4 放射光施設で稼働しているが、本 spin-resolved nano ARPES は初めての試みである。これを実現するポイントは従来のフレネルゾーンプレート（FZP）に比べて約 2 桁高フラックス化と大きな working distance が可能な Wolter ミラー（東大院工三村研で開発）を使用すること、さらに高効率の Multichannel spin detector（廣大奥田研などで開発）を使用すること、の 2 点である。

本ナノ光電子分光ステーションでは、上記世界最先端、を目指すとともに、ニーズとシーズのマッチング、を重要視するため、ブランチビームラインにマイクロ ARPES 装置を設置して高効率・高生産性実験を行う（オペランド測定も可能）。

ビームライン構成は、1) APPLE-II アンジュレータ（名称：APPLE-EUV）、2) 不等間隔 PGM でエネルギー範囲は円偏光 50-1,000 eV（直線偏光は 100 eV 以上）、エネルギー分解能は 50,000 以上で、試料上光子密度は 10^{11} photons/s 以上とする。ただし、ナノ光電子分光測定では空間電荷効果および試料への放射線損傷効果を考慮する必要がある。

1. ターゲットとする研究開発

光電子分光では、物質に（軟）X 線を入射したときに放出される光電子の運動エネルギーを測定する。これにより対象物質の電子状態を観測することができる。放出光電子の放出角も測定し固体内の電子の運動量を決定する角度分解光電子分光（Angle-resolved photoemission spectroscopy、ARPES）は、対象のバンド構造やフェルミ面を観測する強力な実験法である。さらに、光電子のスピンを測定するスピン分解光電子分光は、物質中の電子のスピン状態を観測する。近年、電子の運動量とスピンの結びついたスピントクスチャを示す物質が、スピントロニクス素子やトポロジカル絶縁体などで発見が続いている。角度分解・スピン分解光電子分光はこのようなスピン構造を直接観測できる唯一の手法である。また、放出電子の波の回折・干渉現象を利用する光電子回折は元素

選択的な局所的構造解析手法である。

次世代放射光施設の利用において、ナノ光電分光ビームラインとして、数 10 nm の空間分解能で、かつスピン分解できる ARPES を行う世界でも例のない最先端ビームラインを建設することで、これまで困難であった様々な新しい実験が可能になる。具体的には、1) 多岐に亘る新規物質材料における電子状態イメージング、2) デバイスのオペランド解析、3) 多元環境下での測定、など(4)、5)、6))において世界を先導する成果が得られる。

1) 「多岐に亘る新規物質材料における電子状態イメージング」(短期目標)

微小ビームスポットを生かすことで、測定対象物質範囲の大幅な拡大が見込まれる。具体的には、これまで ARPES では殆ど測定対象とならなかった、ナノワイヤ、劈開困難試料、超微小単結晶、多結晶、粉体、不均一試料(例えば[1-3])などが新たな測定ターゲットとなる(図 1)。数 10 nm の空間分解能を生かしたスピン分解・角度分解光電子分光(ナノスピン ARPES)により、例えばトポロジカル分野においては、試料のエッジ(端)におけるバンドの直接イメージングによる 2 次元トポロジカル絶縁体の同定、弱いトポロジカル絶縁体の側面金属状態の観測、高次トポロジカル絶縁体をはじめとする新奇トポロジカル物質の同定が可能になる。また、バルク、薄膜、および原子層物質におけるバンド構造のイメージングにより、ドメイン分割した電子状態が得られる。例えば twisted グラフェンの特異物性に関する局所電子状態の直接観測や、組成・膜厚・磁区などに空間分布を持たせた薄膜試料などにおける電子構造の一括測定、機能性界面における電子状態の深さ分解計測が可能になる(ドメイン分割測定の例として[4])。

さらに、価電子帯とコアレベル空間分解計測の併用により、物質材料の機能発現に関連した電子状態と化学結合状態との関連が明らかになる。また、ナノスピン APRES による電子状態イメージングと XMCD によるスピン状態時空間イメージングを相補的に利用することで、スピントロニクス関連物質などの機能性に迫る磁氣的性質と電子状態との関連が明らかになる。高温超伝導体や新規超伝導体においては、フェルミ準位近傍における準粒子バンド分散やエネルギーギャップの空間依存性の精密観測により、多体相互作用の起源や超伝導メカニズムの同定が期待される。これらにより、新準粒子

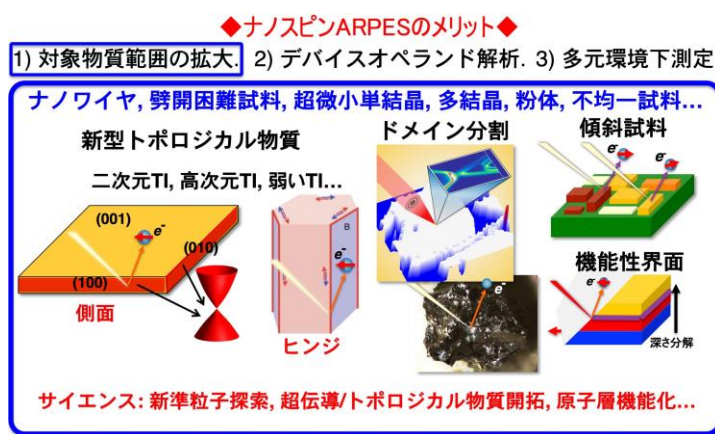


図 1 本ビームラインにおける測定対象



図 2 ナノスピン ARPES によるデバイスオペランド解析

探索、超伝導/トポロジカル物質開拓、スピントロニクス関連物質・原子層機能化などの分野において、日本初の新しいサイエンスを世界に先駆けて発信できる。

2) 「デバイスオペランド解析」(中期目標)

スピントロニクス素子などでは、外場によるピンの生成・制御、それを利用した集積回路の開発が期待されている。ナノスピン ARPES はそれらの電子状態・スピンスピンテクスチャの解明に威力を発揮する。デバイス動作時の局所電子状態および化学結合状態の解析により、多岐にわたる電子デバイスの動作原理の解明が行われ、デバイスの機能向上に密接に関係する情報が得られる(図 2)。具体例としては、グラフェンなどの原子層物質における空間分解バンドプロファイル測定(最近の例として[5])やゲート調整による伝導(金属/絶縁体)制御、トポロジカルスピンデバイス、トポロジカル接合デバイス、マヨラナ検出デバイス、スピントロニクスデバイスなどにおける局所電子状態の可視化に基づいたデバイスの性能向上が期待される。これにより、原子層物質やトポロジカル物質など、現在基礎科学分野で重点的に研究されている物質材料のデバイス化や産業応用が大きく進展すると期待される。

3) 「多元環境下での測定」(中長期目標)

これまで基本的には無電場・磁場下に限られてきた ARPES 実験を、圧力・電場・磁場印加(一軸性圧力印加の実験例として[6])などの多元環境下で測定できるように拡張することで、これまで測定が困難であった物理現象や材料機能性に初めてアクセスできるようになる(図 3)。例えば、piezo素子などを用いた一軸性圧力印加時の局所電子状態観測により、原子層物質や強相関・トポロジカル物質などにおいて、一軸性圧力印加による電子状態変調、ディラック電子制御、伝導性制御(適応可能な系の例として[7])などが行える。また、電流印加によって金属-絶縁体転移を誘起し、非平衡(準平衡)状態における電子状態解明も行える。その他、低磁場下、雰囲気下における測定なども対象となる。

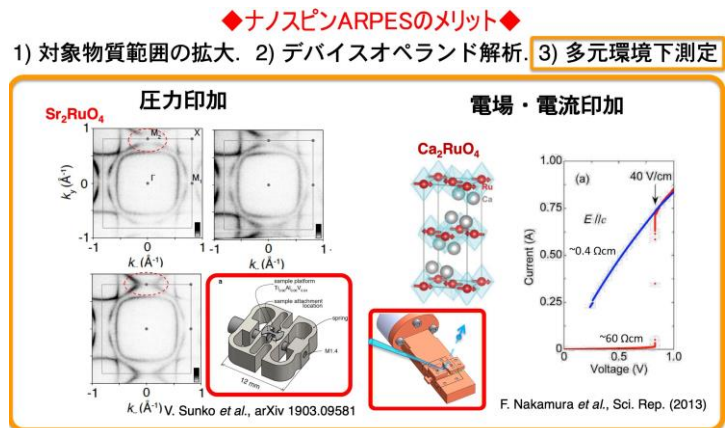


図 3 多元環境下でのナノスピン ARPES

4) ナノとスピンの組み合わせによる研究例

スピン分解測定においては、従来測定対象とされている強磁性体の交換分裂の観測や、ラシュバ・トポロジカル絶縁体などのスピン軌道相互作用の強い量子物質におけるスピンテクスチャの決定を、3次元運動量を指定してこれまでに無い高精度で行うことができる。軟X線を用いた高分解能スピン分解 ARPES 装置は世界でまだ稼働しておらず、バルク

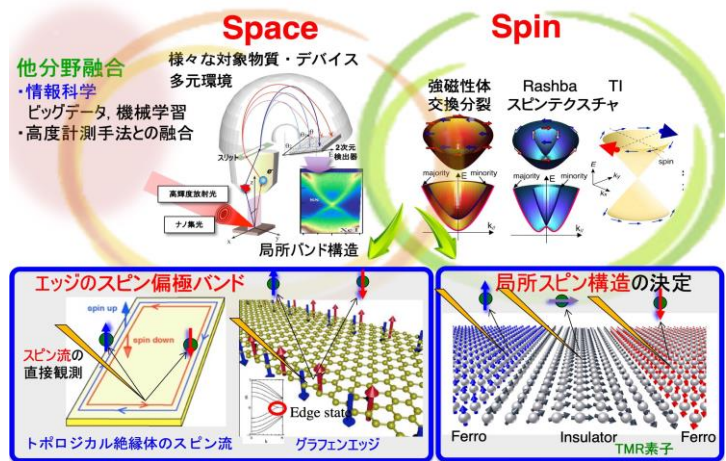


図4 ナノとスピンの組み合わせによる研究例

のスピン偏極電子状態解明において世界を先導する成果が期待される。加えて、世界に例をみない「スピン分解」と「ナノ空間分解」の同時実現により、トポロジカル絶縁体のスピン流(試料エッジのスピン偏極バンド)や、原子層物質等からなる磁気多層膜、磁気抵抗素子など先端スピントロニクス材料・デバイスにおける表面下や埋もれた界面のローカルなスピン構造の決定ができる。さら、局所高速磁化反転機構の解明やスピン電界効果トランジスタや磁壁移動型メモリにおける局所的なスピン反転や空間(実・逆)スピン制御の可視化や高精度測定がはじめて可能となる(図4)。

5) ナノスピン ARPES・XMCD・RIXS 相補利用について

ナノスピン ARPES・XMCD・RIXS の3つの手法を相補的に用いることで、量子物質、実材料、デバイスなどにおける研究のさらなる発展が期待される。具体的には、ナノスピン ARPES と XMCD を併用した表面イメージング観察で磁性体のスピン・磁気モーメント・スピン分解バンド分散を明らかにすることにより、スピントロニクス関連物質などにおける電子・スピン状態の同時解析が実現する。また、ナノスピン ARPES と RIXS の併用により、量子物質中の電子の物理量の解明や、触媒・電池材料の顕微オペランド分光による電子状態解析が行える。さらに、これら3つの手法全てを相補的に用いることにより、量子物質の占有・非占有電子状態、素励起、スピン状態の解明に加えて、デバイス、実材料の顕微オペランド分光による電子・スピン状態の解析が大きく進展する(図5)。

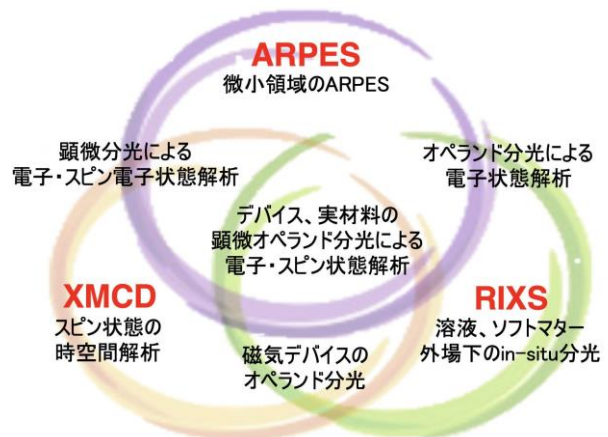


図5 3つの手法の相補利用の例

6) 光電子回折による表面構造とナノスピン ARPES による電子・スピン状態解析のシナジー

軟 X 線励起光電子分光における電子の脱出深度は 1 nm のオーダーであるため、表面感度の高さがこの手法の大きな特徴となる。価電子帯の電子状態解析に加え、内殻光電子分光による構造解析を組み合わせることで、バルクの構造・組成とは異なることに起因する表面特有の電子物性の解明が初めて可能になる。例えば磁性極薄膜のスピンの再配向転移は表面の軌道と薄膜内のスピンの両磁気モーメントのせめぎあいがマクロの世界に顔を出す好例である。Auger 電子回折と X 線磁気円二色性を融合し、原子層ごとの磁気構造[8]や軌道磁気量子数[9]が解明されている (図 6) が、ナノスピン ARPES を展開することにより磁区ドメインの局所構造を狙い撃ちした磁気科学を切り拓くことができる。

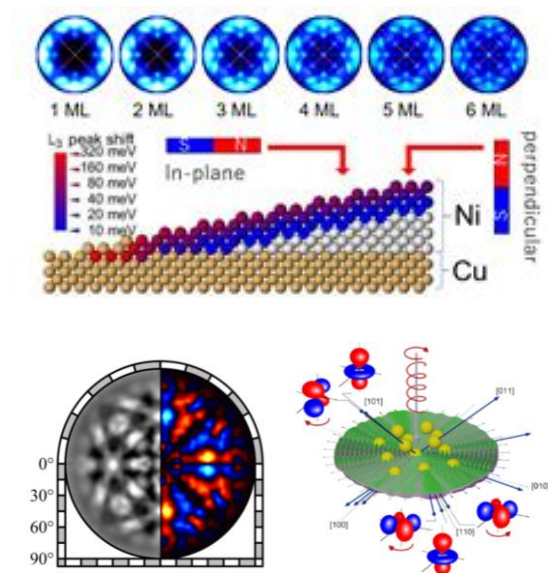


図 6 (上)Auger 電子回折による各原子層の原子・電子・磁気構造の解析例
(下)Auger 電子回折磁気円二色性による原子軌道選択励起分光の例

【参考文献】

- [1] W. Yao *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci, USA **115**, 6928 (2018).
- [2] Y. C. Arango *et al.*, Sci. Rep. **6**, 29493 (2016).
- [3] J. Avila *et al.*, Sci. Rep. **3**, 2439 (2013).
- [4] K. Nakayama *et al.*, Nano Lett. **19**, 3737 (2019).
- [5] P. V. Nguyen *et al.*, Nature **572**, 220 (2019).
- [6] V. Sunko *et al.*, arXiv:1903.09581 (2019).
- [7] F. Nakamura *et al.*, Sci. Rep. **3**, 2536 (2013).
- [8] F. Matsui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 207201 (2008).
- [9] F. Matsui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 015501 (2015).

2. 必要とされるエンドステーションの仕様

<概要>

本ビームラインのエンドステーションでは、空間分解能 30 nm 以下、エネルギー分解能 10 meV 以下での世界最高性能のナノ ARPES を行い、更にナノ集光下では世界初となるスピン分解 ARPES の実現を目指す。現状では、数 100 nm のナノ領域の電子状態を解析するナノ ARPES はすでに欧米 4 放射光施設で稼働しており (表 1 : [10-13])、台湾、中国などでも計画があるが、本 spin- resolved nano ARPES は初めての試みである。これを実現するポイントは、超精密加工技術による Wolter ミ

ラーを使用して、従来の FZP を超えるナノサイズ集光と 2 桁以上の高フラックス化を達成すること、さらに高効率の 2 次元のマルチチャンネルスピ検出器を使用すること、の 2 点である。

<ビームライン構成>

ビームラインの構成を、距離・スポットサイズの概算と共に図 7 に示す。

(1) 光源

挿入光源としては、50 eV の低エネルギーから円偏光、水平・垂直直線偏光の利用が可能な APPLE-EUV アンジュレータを採用する。ただし特に 100 eV 以下の直線偏光モードでは、軸上の放射パワーが非常に大きくなるため、熱負荷対策が課題となる。対策できなければ直線偏光での利用の低エネルギーの下限は、円偏光での利用の下限より高くし運用する。

表 1 世界のナノ ARPES 装置

	Focusing Optics	Spot size	Energy Range	Energy Resolution	Spin Resolved
Spectromicroscopy [10] (Elettra, Italy)	Schwarzschild	500 nm	27eV & 74eV (Fixed)	12.5 meV	×
Maestro [11] (ALS, USA)	FZP Capillary	120 nm 450 nm	80 - 1000 eV	50 meV	×
ANTARES [12] (Soleil, France)	FZP	150 nm	95 - 1000 eV	25 meV	×
IOS: ARPES [13] (Diamond, UK)	FZP	700 nm	60 - 150 eV	30 meV	×
本提案	超精密ミラー	30 nm	50 - 1000 eV	< 10 meV	○

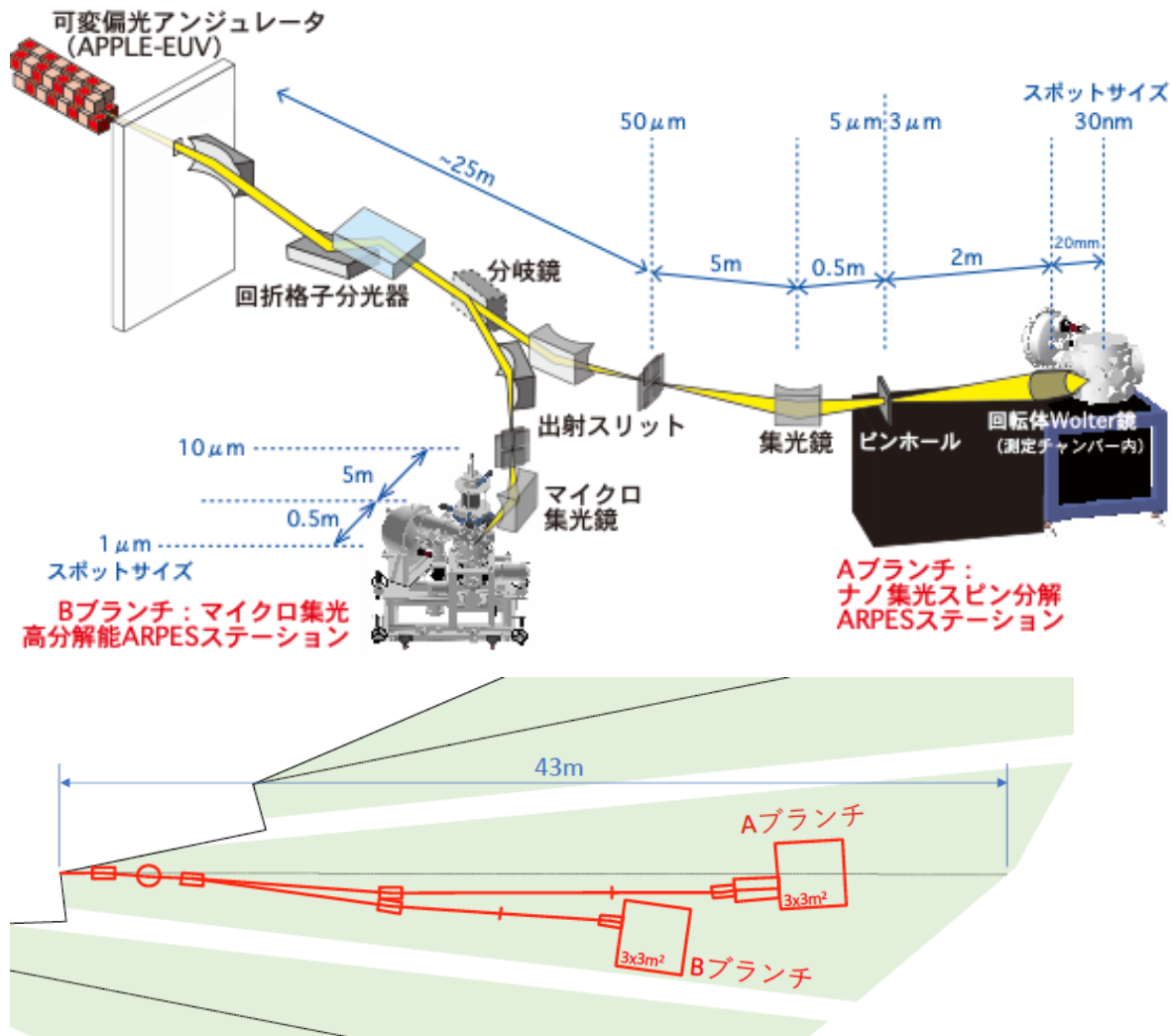


図 7 ナノ光電子分光ビームライン構成と距離・スポットサイズの概算

(2) 光学系

分光器は実績が豊富な不等間隔平面回折格子分光器を採用する。50 eV-1000 eV のエネルギー範囲において、エネルギー分解能 30000-50000 以上、試料上光子密度 10^{11} photons/s 以上の高分解能と高フラックスの両立を達成する。ミラーによるナノ集光のためには出射スリット後の集光光学系に距離が必要となるため、分光器の長さに制約が生じるが、限られた距離の中で可能な限りの高エネルギー分解能を目指す。

(3) ブランチ化

回折格子下流に分岐ミラーを設置してブランチ化し、直通ブランチ (A ブランチ) を 30 nm の極限集光を目指すナノ集光ステーション、分岐ブランチ (B ブランチ) を汎用的なマイクロ集光ステーションとする。

(4) A ブランチ集光系

A ブランチのナノ集光は、東大院工三村研が開発を進めている回転体型ミラーを採用する (図 8 参照: [14, 15])。現在、回転体型のミラーは、300 eV において、200 nm 以下の集光サイズが安定的に実現されており 100 nm 以下の集光サイズが視野に入った。また、現在は 1 回

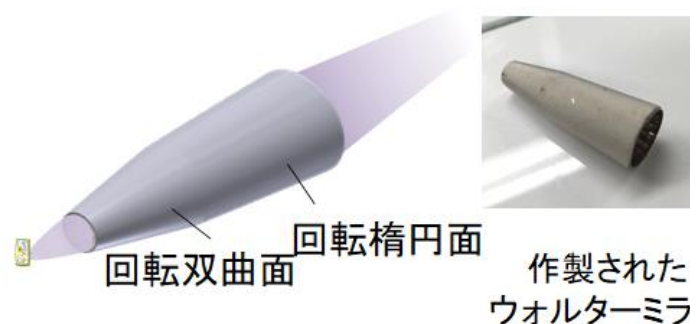


図 8 採用するナノ集光用 Wolter ミラー

反射型の回転楕円ミラーであったが、2 回反射型の Wolter 形状になれば集光性能がアライメント誤差に対して頑健となるため便性・安定性が大幅に向上し、高精度なアライメントユニットが不要となる。

Wolter ミラーを含む回転体型ミラー製造技術は民間企業への移転が進められており、2021 年度には供給体制が整う予定である。また、30 nm の軟 X 線回折限界集光を目指し、東京大学ではミラーの高精度化を精力的に進める。

Wolter ミラーを最大限活用するためには光学設計が重要となる。低 NA のマイクロ集光システムと組み合わせた 2 段集光によりフラックスロスなく軟 X 線を集光可能となる。現在、この 2 段集光システムは SPring-8、SACLA において開発が進められており、スループットの高い軟 X 線集光システムが構築されている。

Wolter ミラーは ARPES チャンバー内に設置されエンドステーションの一部として取り扱われるが、軟 X 線ナノ集光が可能になるように、分光器光学系を含むビームライン全体が一体となった光学系の設計を進める。

目標とする要求仕様は以下の通りである。

- ・エネルギー範囲：50–1000 eV の全範囲
- ・スポットサイズ：30 nm 以下
- ・Working Distance：10 mm 以上

(5) B ブランチ集光系

B ブランチのマイクロ集光は、実績のある K-B ミラーなどの汎用的なミラー集光系を用いる。ミラーは測定装置の制約を低減するために ARPES チャンバーとは別のチャンバーに設置するが、出来るだけ試料に近づける配置をとることで、1 μm 程度のスポットサイズが安定的に利用出来るようにする。ビームラインの仕様一覧を、表 2 に示す。

表 2 ビームライン仕様一覧

エネルギー範囲	50 – 1,000 eV
偏光特性	左右円偏光、水平・垂直直線偏光 (直線偏光時は熱負荷に注意)
エネルギー分解能	30,000 – 50,000
試料上光子フラックス	10^{11} photons/s以上
集光サイズ (ナノ集光ステーション)	30 nm以下
集光サイズ (マイクロ集光ステーション)	1 μm 程度

<エンドステーションの仕様>

①A ブランチ：ナノ集光スピン分解 ARPES

- ・ ± 15 度以上の 2 次元角度分解測定
- ・ 2 次元マルチチャンネルスピン検出器
- ・ 空間分解能：30 nm
- ・ 最低試料温度：30 K
- ・ エネルギー分解能：光エネルギー分解能 30000 以上、アナライザ分解能 10 meV 以下

(1) 光電子アナライザ

光電子アナライザとして、試料の角度走査をせず 2 次元角度分解測定が可能な、ディフレクター付静電半球型アナライザを採用する。取り込み角度範囲は現状の市販品で ± 15 度程度であるが、電子レンズ系の開発を行い、可能な範囲で取り込み角度を拡張することを検討する。他の方式のアナライザとしては Momentum Microscope が考えられるが、試料—アナライザ間に高電場を印加する必要があることや、ナノ集光ビームと相性が悪いことなどから、今回は採用しない。

(2) スピン検出器

スピン検出器は検出効率を考えると、高効率のスピン検出器の導入が不可欠である。そのため従来の Mott 型検出器の 100 倍の検出感度のある低速電子回折 (VLEED) 型のスピン検出器を採用する。さらに現在主流のシングルチャンネル測定 (1 角度、1 エネルギーの光電子のスピンを検出) からマルチチャンネルスピン検出 (複数角度+複数エネルギーの光電子のスピンを同時検出) も実現する必要がある。

一方で、物性を決定する上でスピン量子化軸を決定 (3次元スピンベクトル解析) することも重要であるため、スピンの 3 成分(x,y,z)観測も同時に可能にする必要がある。マルチチャンネルスピン検出器は現在広島大学奥田氏をはじめとして開発が進められているが、現状では最適な方式が確定していない状況である。また、シングルチャンネル測定では実現されているスピンの 3 成分観測をマルチチャンネルスピン検出器でも実現する方法を確立

する必要もある。そのため、2次元フルマルチチャンネルスピンドル検出器（複数角度+複数エネルギーの同時計測）による3次元スピンドル観測システムの導入を最終目標としつつ、状況に応じて1次元マルチチャンネルスピンドル検出器（複数角度同時計測）、過渡的にはシングルチャンネルスピンドル検出器を使用することも検討し、柔軟に計画を進めていく（図9参照）。

(3) 試料マニピュレータ

試料マニピュレータは、30 nmの空間分解能での測定を可能とするためには、10 nm以下の精度で精密に試料位置を制御する必要がある。真空チャンバー内で集光光学系と一体となった定盤上に設置されたピエゾ駆動ステージによりこの精度を実現する。試料部のナノメートルオーダーの位置制御と極低温冷却の両立は非常に困難な開発要素であるが、30 Kを目標に可能な限りの試料低温化を目指す。

(4) ナノ集光・装置環境

A ブランチのナノ集光系については、ビームライン構成(4)に記した。30 nmの空間分解能を達成するためには、周囲の振動対策や温度制御なども非常に重要となる。定盤の土台を周囲の振動環境から切り離す、機械動作のある真空ポンプを使用しない、測定装置は独立区画として外気の擾乱を極力排除し、周囲温度の制御を非常に高精度で行う、などの対策を行う必要がある。またレーザー干渉計によるアクティブフィードバックなども含めて検討し、最適な構成を決定する。

②B ブランチ：マイクロ集光高分解能 ARPES

- ・ ナノ ARPES 装置と互換性のある電子分析器
- ・ シングルチャンネルスピンドル検出器
- ・ 空間分解能：1 μm 以下
- ・ 最低試料温度：10 K
- ・ エネルギー分解能：光エネルギー分解能 50000 以上、アナライザ分解能 2 meV 以下

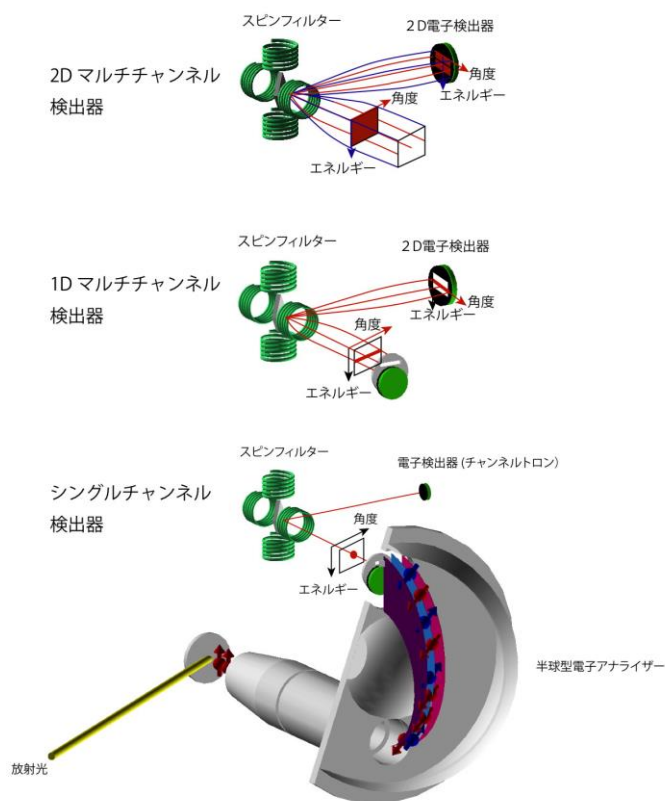


図9 シングルチャンネル、1次元マルチチャンネル、2次元マルチチャンネルスピンドル検出器の概念図

(1) 光電子アナライザ

光電子アナライザは、スピン検出器の開発やトラブル時の互換性を考慮して、ナノ ARPES 用のアナライザと同一のもの（ディフレクター付静電半球型アナライザ）とする。ただしこちらのアナライザは、より高エネルギー分解能を達成出来るような仕様とする。また検出器部分のスペースも、ナノ ARPES におけるスピン検出器の設置部分と同等に確保し、A ブランチの開発期に使用したシングルチャンネルスピン検出器を利用可能な配置にする。

(2) マイクロビーム集光

マイクロビーム集光については、光電子分光測定装置の性能や利便性を損なわないために、集光ミラーのチャンバーが光電子測定チャンバーと分離していることが望ましい。そのためには working distance を 300 mm 以上の長さで取れるような集光システムが必要である。さらに調整の簡便さなどから、現在 SPring-8 BL25SU の光電子分光装置に導入された Wolter ミラー [18] が非常に有力な候補になる。

(3) 試料マニピュレータ

試料マニピュレータは、実験上の自由度の高さや利便性を考慮して、汎用的な真空外からのステッピングモーター制御を利用したマニピュレータを採用する。ただし安定的なマイクロスポット光源利用のため、剛性の強化・光学エンコーダーの採用などにより、サブミクロンオーダーの精度での位置制御と安定性を達成する。最低試料温度 10 K 以下で試料位置・角度を 6 軸 ($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$) 制御可能な仕様とする。

(4) その他

試料搬送系なども、運用時の利便性を考慮してナノ ARPES ステーションとの互換性を重視した設計を行う。

<主な構成機器と優先順位>

(優先順位 1)

光源+ビームライン

- ・APPLE-EUV アンジュレータ
- ・ビームライン（フロントエンド・分光器・仮想光源への集光後置鏡）

(優先順位 2)

ナノ集光 ARPES ステーション

- ・ディフレクター付静電半球型アナライザ
- ・測定チャンバー・真空系・および架台
- ・試料ステージおよび光学系ステージ
- ・制御系

(優先順位 3)

スピン検出器（シングルチャンネル）

(優先順位 4)

マイクロ集光高分解能 ARPES ステーション

- ・ディフレクター付静電半球型アナライザ
- ・測定チャンバー・真空系
- ・試料マニピュレータ
- ・マイクロ集光光学系・チャンバー

(優先順位 5)

ナノ集光高度化用レーザー干渉計

(優先順位 6)

スピン検出器 (2次元マルチチャンネル) (開発費含む)

<必要とされる周辺機器>

- (1) どちらのステーションにおいても、低温実験時に液体ヘリウムの利用は必須となる。供給体制や回収ラインを整備する必要がある。
- (2) ナノ ARPES ステーションにおいては、実験装置に独立の区画と空調設備が必要となる。
- (3) ARPES 実験のための試料準備に用いる設備として、グローブボックス・ラウエ測定装置・実体顕微鏡・走査電子顕微鏡・ドラフトなどが必要である。これらは共通設備でも構わないが、ビームラインの近傍にあることが望ましい。

<その他検討事項>

ナノ集光光電子分光測定では、特に低エネルギーでは励起光電子密度が非常に大きくなるため、スペースチャージ効果によるエネルギー分解能低下に留意する必要がある。実際にいくつかの実測例やシミュレーションによる試算結果[17, 18]などが報告されているが、SX 放射光をナノ集光したことによる影響を実測した例はなく、試算では光電子脱出深さなどの影響が考慮されていないことなど、試算がどの程度正確かは未知数な部分もある。現実問題としてスペースチャージ効果が起こった場合には、その影響を弱めるには放射光分光器のスリットを閉めることや光をデフォーカスしてビームサイズを大きくするなどして光子密度を減らす以外に方法はなく、空間分解能とエネルギー分解能をどこまで妥協出来るかは測定対象によって異なる。重要課題としてナノ集光での空間電荷効果(スペースチャージ効果)および放射線損傷の定量評価を行い、最適な測定条件のデータベースをユーザーコミュニティで共有する。また、試料への放射線損傷効果についても検討を行う。

<付加システム>

また、研究対象を広げるため、薄膜成長装置、および評価装置からなる付加システムをナノ集光スピン分解 ARPES 装置@A ブランチとマイクロ集光高分解能 ARPES@B ブランチの間に設置し、両方のステーションと UHV で接続する。この付加システムについては、国(QST)が用意できなければユーザーグループが外部資金を獲得して設置することとする。

<建設計画>

本ビームラインの建設スケジュールの計画を表3に示す。

表3 計画表

年度	2020年度			2021年度			2022年度			2023年度			2024年度			2025年度		
光学系	設計 発注			据え付け			調整			First Beam								
Aブランチ スピナノARPES	設計 建設						据え付け			調整			不均一試料解析			デバイス解析		
Bブランチ マイクロARPES				設計 建設						据え付け			調整			付加システム		

【参考文献】

- [10] P. Dudin *et al.*, J. Synchrotron Rad. **17**, 445 (2010).
- [11] <https://sites.google.com/a/lbl.gov/maestro/>
- [12] Jose Avila *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser., **425**, 192023 (2013).
- [13] M. Hoesch *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **88**, 013106 (2017).
- [14] H. Motoyama *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **48**, 244002 (2015).
- [15] H. Mimura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **114**, 131901 (2019).
- [16] Y. Senba *et al.*, The 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2018), C4.7.
- [17] J. Graf *et al.*, J. Appl. Phys. **107**, 014912 (2010).
- [18] E. Rotenberg and A. Bostwick, J. Synchrotron Rad. **21**, 1048 (2014).

3. その他

必要とされる光源、光学系及び検出器系の仕様、その他特別な要望等があれば

高精度の光電子分光スペクトルの測定には、励起光分解能、純度が重要である。とくに50-100 eV程度の利用時では高次光除去が重要となるので、ビームライン分光器の設計の際に検討する必要がある。このような低エネルギー直線偏光の測定は物質の表面状態、価電子帯を行うスピン ARPES 実験に非常に有用である。本ワーキンググループとしては、直線偏光モードでは第一光学素子への熱負荷等を鑑み、円偏光のエネルギーに比べ、直線偏光のエネルギーを高くすることを容認したができるだけ低エネルギーでも直線偏光が利用できるようにしたい。

想定されるデータサイズや希望するデータマネジメントについて

ナノスピン ARPES 測定では、単純なスペクトルの測定に留まらず、実空間・運動量空間のマッピングが主な測定となることを想定している。このため、データ量も従来型の測定に比べ飛躍的に増加すると予想される。データの形式にもよるが、1日10GB以上のデータ取得を想定した方がよい。(例、Synchrotron SoleilのANTARESビームラインでnano-ARPESデータを測定したときは、5日のビームタイムで50GBくらい、3日間Diamond I05ビームラインのビームタイムで、空間(x,y)スキャン無しの場合は、データ総量は5GB。また、ElettraのSpectromicroscopyビームラインで1日測定すると300MB程度のデータ量(テキストの生データのみ)、100x100の

各点で EDC が入っているような画像 1 枚で 1 MB 程度、1 点フェルミ面を測定すると 10 MB 程度)。データ量がこれより桁で増えるようならば AI を使うようなデータ解析手法の導入が必要であろう。

また、ソフトウェアについて、似たような機能を有するソフトウェアを各々のビームラインで個別に用いるのは、装置開発やビームラインの運用において明らかに非効率である。ユーザーも覚えることが少なく済むよう、ソフトウェアの共通化をできる限り進めて複数のビームラインでシェアできるように整備してほしい。(位置依存性、2次元ARPES、励起エネルギー依存性などのそれぞれのマッピングについては、自動測定に対応できるようなソフトを整備することが、施設運用やトラブル軽減の上で重要。)

建屋の環境 (振動対策、温度・湿度制御、等)・インフラ (電気系統、LAN、圧空等) について

- ・ ARPES装置では液体ヘリウムの利用は必須である。施設の共通設備として液体ヘリウムの回収・再凝縮などを整備する必要がある(2. 必要とされる周辺機器参照)。
- ・ 試料準備用にある程度のスペース・器具 (ホットプレート・電子天秤・顕微鏡/マイクロスコップ・グローブボックスなど) 背面反射ラウエX線回折装置が、ビームライン近傍にあるのが望ましい。
- ・ ナノ集光を生かすために除震が必要である。局所的な対策はビームラインにおいて行うが、建物として、周辺機器の振動が伝わりにくい構造にする。室温に揺らぎを小さくする、など、ビームラインでの対策が最小ですむように全体の対策を行っておいて欲しい。(2.の振動除去参照)。電気的なノイズについても同様であり、高分解ARPES実験のために、分解能を悪くするようなノイズを出す機器は排除し、実験装置とコントローラ系は一点アースにする等の必要がある。
- ・ 高精度の実験のため室内の温度および冷却水は一定に保たれるのが望ましいが、必要に応じてビームラインに局所的な恒温設備・冷却水循環設備を設ける必要がある。
- ・ 圧空設備は標準的に必要。

エンドステーションの整備や運転・管理等への特別な配慮 (スキル、人数等) の必要性について

- ・ 施設全体としての話になるが、ハードウェア・ソフトウェア・エンジニア、各分野に専門家が配置され、機能的・効率的に動けるような組織体制(人材)を構築することが必要と考える。
- ・ ブランチ化したビームラインをうまく利用し、学生などの教育にうまく生かす仕組みづくりを期待する。

その他、自由記載

試料まわりの共通化について、最近、MBE で作製した薄膜試料の *in situ* 測定、UHV スーツケースによって超高真空搬送された試料の測定、磁性・スピントロニクス材料などにおける XMCD と ARPES の相補的測定などの研究が始まりつつあり、より多くのユーザーの多岐に亘る実験ニーズに答えるためにも、試料フォルダの共通化の重要と考える。(しかしこれらの研究は既存の手法で進めることを想定したものがほとんどで、多元環境下測定、デバイスオペランド測定、極低温測定など、より先鋭化した分光実験に制約が生じる場合には共通化はむしろマイナスなので、共通化に重きを置き過ぎる必要もない。)

以上