

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい
計測・分析基盤技術」
研究課題「バルク敏感スピン分解超高分解能
光電子分光装置の開発」

研究終了報告書

研究期間 平成17年10月～平成23年3月

研究代表者：高橋隆
（東北大学原子分子材料科学高等研究機構，
大学院理学研究科・教授）

§ 1 研究実施の概要

高温超伝導体などの新機能物質の物性発現に直接関与する物質本来のバルク電子構造を、高いエネルギー分解能で運動量とスピンにまで分解して測定する「バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置」の開発を行った。建設した装置は主に、バルク敏感測定を可能とする高輝度キセノンプラズマ放電管、超高分解能測定のための電子エネルギー分析器、スピン分解測定を行うモット検出器、さらに、極低温マニピュレーター、試料準備・作成槽、およびパルスレーザー堆積薄膜作成装置からなる。開発したキセノンプラズマ放電管は、マイクロ波を励起源としてプラズマを生成させ、そこからの発光を利用する新たな光源で、バルク敏感性と高分解能測定を同時に達成するものであるが、プラズマによる放電管内部の激しい浸食が大きな問題となった。我々は、放電管全体のデザイン、キャピラリーの形状、マイクロ波の入力方向、プラズマ位置、強制冷却法など、あらゆる原因要素を検討して放電管の製作改良を行い、超高分解能測定に十分耐えうる 1,000 時間以上の安定発光に成功した。また、従来型放電管に比べて 100 倍の高強度を達成し、スピン非分解時で 1meV を切る超高エネルギー分解能を達成した。また、キセノン放電管による超高分解能測定とスピン分解測定を両立できる新型電子エネルギー分析器を開発すると同時に、その後段に、電子偏向器を通してモット検出器を配置したスピン分解測定システムを開発した。電子偏向器においては、数値シミュレーションや電子エネルギー分析器との幾何学的配置の調整などにより 100%のトランスミッタンスを達成した。モット検出器においてはターゲット改良、ノイズ対策、漏洩磁場評価などを行い、電子散乱効率 $I/I_0=4.6 \times 10^{-2}$ を達成した。さらに電子分析器、電子偏向器、モット検出器、キセノン放電管、試料マニピュレーターを含むシステム全体でマッチング調整を行い、スピン分解光電子分光装置として世界最高のエネルギー分解能 8 meV を達成した。装置のスピン分解測定性能を評価するため、標準試料である Sb(111)と Au(111)のスピン分解光電子分光を行い、表面ラッシュバ効果によりスピン分裂したバンドを明確に観測することに成功した。また、スピン分解測定用パルスレーザー堆積薄膜作成装置の製作と調整を行って全システムに接続し、銅酸化物やマンガン酸化物の単結晶薄膜を育成して、その高分解能光電子分光測定を行った。

建設した装置を用いて、鉄系超伝導体やグラファイト層間化合物などを中心とした新規超伝導体、グラフェン、表面ラッシュバ系、トポロジカル絶縁体などの新機能性物質やスピントロニクス関連物質の高分解能角度分解光電子分光実験を行い、フェルミ準位近傍における微細電子構造を決定し、物性発現機構との関連を明らかにした。例えば、鉄系超伝導体においては、世界に先駆けて超伝導ギャップの波数依存性の直接観測に成功し、超伝導電子対の対称性が s 波であることを確立して超伝導機構と反強磁性相互作用の密接な関連を明らかにした。また、トポロジカル絶縁体においては世界に先駆けてタリウム系三元カルコゲナイド TlBiSe_2 がこれまで発見された物質中で最もバンドギャップの大きいトポロジカル絶縁体であることを明らかにした。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

近年の光電子分光の高エネルギー分解能化の進展は目覚ましいものがある。高温超伝導体の発見とその後の爆発的な研究展開に触発され、光電子分光のエネルギー分解能は20年ほどの前の0.3 eVから現在は1 meVを切るという、2桁以上の向上を達成した。しかし、この「強力な現在の超高分解能光電子分光」には2つの大きな欠点(欠陥)がある。1つは、その「表面感性」である。現在の超高分解能光電子分光で使われる励起光は主にヘリウム放電管領域の20-40 eVであり、この励起光で励起されたフェルミ準位近傍の光電子は、せいぜい5-10 Å程度という極端に短い表面からの脱出深さ(escape depth)しか持たない。このことから、測定された光電子スペクトルは主に表面第1層の電子状態を反映して、必ずしもその物質固有のバルク物性を反映したものとはなっていないことが度々指摘されてきた。また、現在の高分解能光電子分光のもう1つの短所は、スピン分解の測定を行うことが難しいことである。電子の持つ「スピン状態」は、物質の物性を理解する上で、エネルギー、運動量とともに不可欠の情報である。従来型のスピン検出器は検出効率が悪く、エネルギー分解能を大幅に犠牲にして主に角度非分解型で測定されている。

我々は、このような現状をふまえ、物質固有の固体バルク電子構造を、運動量とスピンにまで分解して超高分解能で測定する「バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置」を開発する研究計画を立案した。上記2点の問題点を克服して、物質固有のバルク電子構造を運動量とスピンにまで分解して高精度で完全決定するために、(1) 超高輝度の低エネルギー単色光を発生する「マイクロ波励起キセノンプラズマ放電管」、(2) 光電子のエネルギーと運動量を高精度で測定する「2次元エネルギー分析器」、さらに、(3) 電子のスピン状態を測定できる「モット検出器」を開発し、それらを合体させた「バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置」の開発を目指した。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

開発したバルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置の能力を最大限引き出し、新機能物質の機能発現機構の研究を推進するためには、測定装置各部(キセノン放電管、電子分析器、モット検出器)の高性能化を図るとともに、測定対象としてより広範な新機能物質を開拓する事が極めて重要である。キセノン放電管とモット検出器については当初の予想以上の性能が得られる可能性があったので、それぞれの要素技術について更なる高性能化を行った(平成19-22年度)。また、当初計画においては、スピン分解測定の対象として主にバルク単結晶を想定していたが、測定対象を薄膜単結晶に拡張できれば、酸化物磁性体をはじめとするより広範な機能物質にまでスピン分解測定が可能となり、開発研究をより大きく展開することができる。この目的のため、光電子分光装置に直結する「スピン分解測定用パルスレーザー薄膜作成装置」の設計と製作および装置へのドッキングを行い、高品質薄膜単結晶を育成してその高精度の光電子分光測定を行った(平成20-22年度)。

§ 3 研究実施体制

(1) 高橋研究グループ

① 研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|----------------|------|------|--------------|
| 高橋 隆 | 東北大学 | 教授 | H17.10～ |
| 石井久男 | 東北大学 | 准教授 | H17.10～H18.3 |
| 高桑雄二 | 東北大学 | 准教授 | H17.10～H20.3 |
| 佐藤宇史 | 東北大学 | 助教 | H17.10～ |
| 相馬清吾 | 東北大学 | 助教 | H18.4～ |
| 松井浩明 | 東北大学 | 助教 | H18.4～H 19.3 |
| Satyabrata Raj | 東北大学 | 研究員 | H17.10～H20.3 |
| Tian Qian | 東北大学 | 研究員 | H20.3～H.21.7 |
| 寺嶋健成 | 東北大学 | 大学院生 | H18.4～H20.3 |
| 菅原克明 | 東北大学 | 大学院生 | H18.4～ |
| 中山耕輔 | 東北大学 | 大学院生 | H19.4～ |
| 荒金俊行 | 東北大学 | 大学院生 | H20.4～ |
| 高山あかり | 東北大学 | 大学院生 | H22.4～ |

② 研究項目

- キセノンプラズマ放電管の設計・製作・調整
- 二次元電子エネルギー分析器の設計・製作・調整
- 極低温マニピュレーター設計・製作・調整
- スピン分解システムの設計・製作・調整
- 超高真空測定槽および排気系の設計・製作
- 試料準備・作成槽の設計・製作
- 全システムのドッキングと調整
- 総合調整、試料測定、データ解析、性能向上

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 超高分解能バルク敏感スピン分解光電子分光装置の建設 (東北大学 高橋グループ)

高温超伝導体などの新機能物質の物性発現に直接関与する物質本来のバルク電子構造を、高いエネルギー分解能で運動量とスピンにまで分解して測定する「バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置」の開発を行った。図 1 に、建設した装置の概要を示す。装置は主に、高輝度の低エネルギー励起光を発生する「マイクロ波励起高輝度キセノンプラズマ放電管」、試料から脱出した光電子のエネルギー分析を行う「静電半球型 2 次元電子エネルギー分析器」、電子のスピンを高精度で決定する「スピン分解小型モット検出器」、ブリルアンゾーンの任意の波数点におけるスピン分解角度分解光電子分光測定を実現する「極低温マニピュレーター」、スピン分解光電子分光測定のための薄膜試料を超高真空中で作成する「試料作成評価真空槽」、パルスレーザー堆積法を用いて酸化物を中心とした薄膜試料を育成するための「PLD 薄膜作成槽」および、それらの超高真空排気システムからなる。実際の試料の測定は、まずバルク試料の場合はバルク試料準備槽に試料を導入した後に、測定槽に搬入する。薄膜試料の場合は、試料作成評価真空槽と PLD 薄膜作成槽において単結晶薄膜を作成し、高エネルギー反射電子線回折(RHEED)および低速電子線回折(LEED)を用いて試料の結晶性を評価した後、大気に曝すことなく測定槽に搬入する。光電子分光測定は、キセノンプラズマ放電管によって得られる低エネルギーの複色光を、球面型回折格子を備えた分光器を通して単色化し、得られた高輝度の単色光を極低温マニピュレーターによって低温に保たれた試料に照射することによ

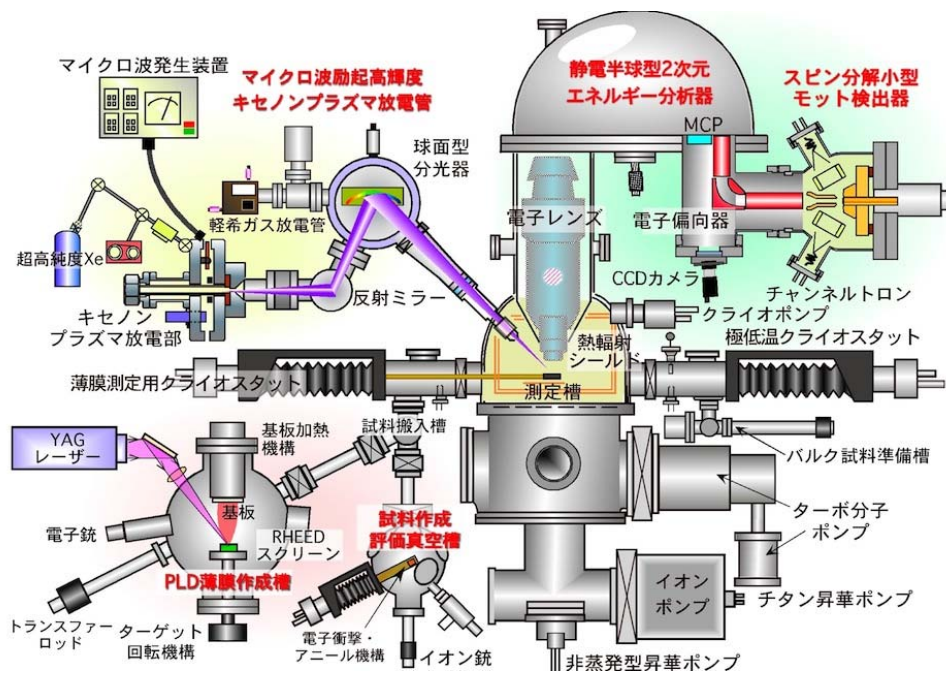


図 1 超高分解能バルク敏感スピン分解光電子分光装置の概略図

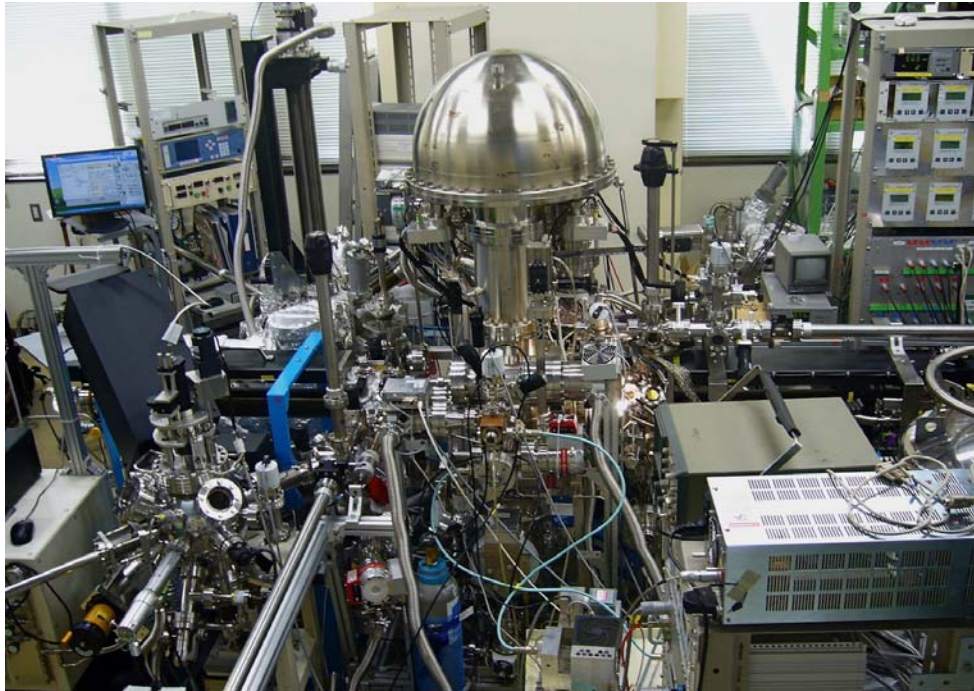


図2 建設した超高分解能バルク敏感スピ分解光電子分光装置

って行う。低エネルギー紫外線の照射による外部光電効果によって結晶外に放出された光電子を、試料の直上に位置する電子レンズによってエネルギー選別を行い、一定速度(一定エネルギー)をもつ光電子のみが電子入射スリットを通して静電半球型2次元電子エネルギー分析器に導入される。光電子はこの分析器によってさらにエネルギー選別され、非常に狭いエネルギー幅を持つ光電子のみが、マイクロチャンネルプレート(MCP)に到達する。スピ分解型の通常の光電子分光測定は、MCPに到達した電子像をCCDカメラで高速に取り込む事によって行う。一方、スピ分解測定は、MCPの横に配置されたスピエントランス(4mmの穴)を通して電子偏向器に導入した電子を90°偏向させ、さらにその電子を25 keVに加速して、スピ分解小型モット検出器の中心部にあるAuターゲットに衝突させ、後方散乱された電子を4つのチャンネルトンにより検出することによって行う。MCPとモット検出器の配置上、本装置ではスピ分解の角度分解光電子分光測定とスピ分解光電子分光測定を同時に行う事が可能である。

図2に、実際に建設した超高分解能バルク敏感スピ分解光電子分光装置の写真を示す。以下の§4.2から§4.6では、各要素技術開発の研究実施内容について記す。具体的には、§4.2でキセノンプラズマ放電管の設計と製作、§4.3でスピ分解システムの設計と製作、§4.4で極低温マニピュレーターの設計と製作、§4.5でPLD薄膜作成装置の設計と製作について述べる。さらに§4.6で、開発した装置を用いて行った主な研究成果についての内容を記す。

4.2 キセノンプラズマ放電管の設計と製作 (東北大学 高橋グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

4-2-1. キセノンプラズマ放電管の開発目的

近年の光電子分光における高分解能化の進展は目覚ましいが、表面敏感性が高いという問題があり、バルク物性の理解の妨げとなっている。これは、ヘリウム放電管などの従来型の光源の励起エネルギー(20-40 eV)では、光電子の平均自由行程(脱出深さ)が非常に短くなるためである(図3)。光電子分光の脱出長を上げるべく、新しい光源として、第三代放射光リングからの高エネルギー領域の高輝度X線(1k-数 keV)や、低エネルギー領域で高い輝度を持つ準連続型レーザーの高調波(6-7 eV)などが用いられている。しかしながら、前者は高分解能の達成が難しく、超伝導ギャップなどの微細電子構造の観測が困難という問題があり、後者は励起エネルギーが低すぎてブリルアンゾーン全体を網羅する測定が難しく、高温超伝導体の *d* 波超伝導ギャップのように、ブリルアンゾーンの境界周辺の電子構造が重要な物質では大きな問題となる。

このような現状を踏まえ、本研究では物質のバルク特異物性に関わる微細電子構造の決定を可能にするために、10 eV 付近の低エネルギー励起光を発光する「キセノンプラズマ放電管」の開発を行った。表1に、各種希ガスの主な共鳴線の発光エネルギーを示す。これらを比較すると、キセノンの共鳴線が、他の共鳴線と最も良く分離されており、かつ最も高いバルク敏感性を持っている事が分かる。さらにキセノンは原子質量が重く、発光共鳴線の主要なブロードニング機構であるドップラー広がり最も小さくなるので、高分解能光源としても最も適した光源であると考えられる。

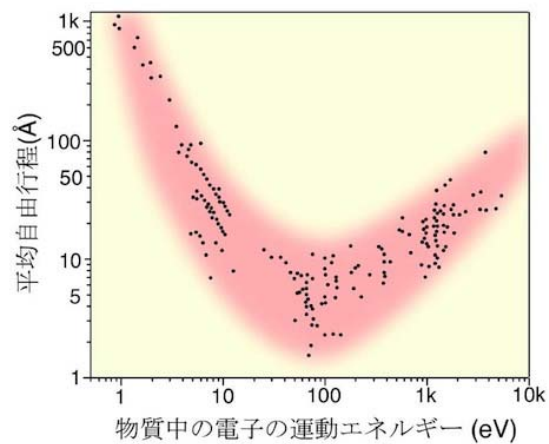


図3 物質中における電子の平均自由行程

| 共鳴線 | エネルギー (eV) | ΔE (eV) | 光電子の脱出深さ |
|-------------------------------|------------------|-----------------|----------|
| He I α He I β | 21.218 23.087 | > 1.869 | 10 Å |
| Ne I α Ne I β | 16.848 16.671 | > 0.177 | 25 Å |
| Ar I α Ar I β | 11.624 11.828 | > 0.204 | 35 Å |
| Kr I α Kr I β | 10.032 10.635 | > 0.603 | 40 Å |
| Xe I α Xe I β | 8.437 9.570 | > 1.133 | 50 Å |

表1 各種希ガスの主要な共鳴線

4-2-2. キセノンプラズマ放電管の概要

物質のバルク物性に関わる微細電子構造を決定するために、高バルク敏感性と高分解能を両立できるキセノンプラズマ放電管の開発を行った。その特徴は以下の 6 つにまとめられる。

- (1) 8.4-10.7 eV の範囲にある複数の共鳴線を発光する。このエネルギー領域の光で励起した光電子の脱出深さは比較的長く (50 Å, 図 3 参照)、測定した光電子スペクトルはバルク電子状態を比較的良く反映すると期待される。
- (2) 希ガス共鳴線の発光を用いているので、発光のエネルギー幅が本来的に狭く、超高分解能光電子分光に適する。キセノン原子の質量が大きいことから、発光のドップラー広がりがある他の軽い希ガスを用いる場合に比べ圧倒的に小さく、ドップラー広がりによる分解能低下を抑えることができる。さらに、低いガス圧でもプラズマ発光を長時間持続できるように放電管を設計し、分解能を落とす原因となる自己吸収を抑えている。
- (3) 8-11 eV の励起光を用いた光電子測定では、バルク敏感性を保ちつつ、全ブリルアンゾーンを網羅する測定が可能である。
- (4) 放電管の発光は時間的連続光であるため、放射光や紫外レーザーのようなパルス光源で問題となる空間電荷効果を見逃すことができる。
- (5) キセノン原子からの発光である Xe I 共鳴線(8.4 eV)は、球面型回折格子により単離され、測定試料上にφ3mm 内に集光する。試料上で光強度は 2×10^{13} photons/sec で、放射光施設のアンジュレーター等の光源の強度に匹敵する。
- (6) 放射光やレーザーのような規模の大きい実験設備と比べると、装置自体がコンパクトかつ安価であるため、種々の実験装置への導入が簡易であり汎用性が高い。

図 4 に、開発したキセノンプラズマ放電管の模式図を示す。放電管は、円筒型の空洞共振部、その中心軸上に設置されセラミック管のキャピラリー部、キャピラリー下流の真空排気部の 3 つのパーツに主に構成されている。発光に用いるキセノンガスは、キャピラリーと開口部の間から導入する。キセノンガスの流量はマスフローコントローラーにより 10 sccm に調整され、マグネトロンで生成した周波数 2.45 GHz、出力 500 W のマイクロ波によりキセノンプラズマを発生させる。このマイクロ波は空洞共振器内において TM₀₁₀ モードの共振電磁場に変換されてキセノンガスを励起する。空洞内の共振周波数は、共振器に取り付けたプランジャで調整する。TM₀₁₀ モードの電場ベクトルは軸方向のみの成分を持ち、その強度はセラミックス管が配置された中心軸上で最大値を持つ。このマイクロ波共振電場によって管内の電子は上下方向の加速を受けるが、ここに更に、図 4 に示すように SmCo₅ 磁石で横方向に強力な磁場を加え、管内電子をサイクロトロン運動させる。従来の直流型放電管では電子の走行距離は対電極間の数 cm のみであるが、

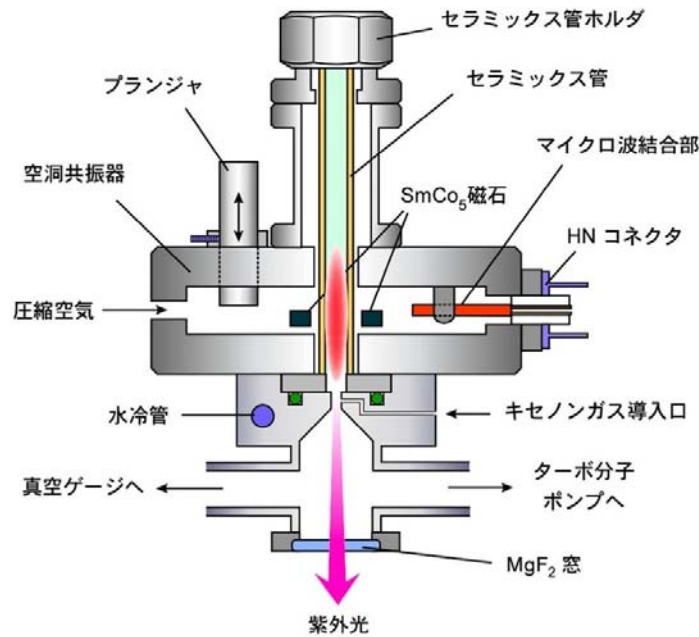


図4 キセノンプラズマ放電管の概略図

サイクロトロン運動させる事で電子の走行距離は飛躍的に伸び、管内のキセノン原子/イオンとの衝突確率は桁違いに上昇する。これによりキセノンプラズマ放電管は従来型の直流放電管に比べて低いガス圧を保ちながら高密度のプラズマを発生し維持する事ができ、飛躍的に増大した発光強度を得る事が可能となっている。

開発したキセノンプラズマ放電管の各要素技術と性能評価について、以下の順序で詳しく後述する。

4-2-3. キセノン共鳴線の理論分解能、4-2-4. キセノンプラズマ放電管の試作と改良、4-2-5. キセノン共鳴線発光の評価、4-2-6. 光学系の設計と製作、4-2-7. バルク感性の評価、4-2-8. エネルギー分解能の評価、4-2-9. 高温超伝導体試料による性能評価

4-2-3. キセノン共鳴線の理論分解能

市販のキセノン放電管は可視から紫外にまでわたる無数の励起準位間遷移による白色光の発光が主な用途であるのに対し、高分解能光電子分光に用いる放電管では、単離されたエネルギー幅の狭い共鳴線の高輝度発光が要求される。共鳴線は基底状態にあるキセノン原子によって強い自己吸収を受けるので、高いエネルギー分解能を得るためには、自己吸収の効果を正確に取り入れて、放電管の設計指針を得る必要がある。

希ガス共鳴線のエネルギー広がりを与えるのはドップラー効果と自己吸収効果が主要因で、他の効果（自然幅、圧力効果、シュタルク効果）は数 μeV 以下である事が既に知られている(J.A.Samson, RSI **40**, 1174 (1969))。ドップラー効果は、 $\Delta E_D = 7.2 \times 10^{-7} E \sqrt{T/M}$ で表されるローレンツ型の広がりを与えるが、気体温度 $T=2000\text{ K}$ と仮定した場合、 $\text{He I}\alpha$ ($E=21.2\text{ eV}$, $M=4$) の場合は $\Delta E_D=0.4\text{ meV}$ となるのに対し、 $\text{Xe I}\alpha$ ($E=8.4\text{ eV}$, $M=131$) の場合は $\Delta E_D=0.02\text{ meV}$ と計算されることから、キセノン放電管ではこの効果も無視できるほど小さい。

以上よりキセノン共鳴線の line profile $I(\nu)$ は、自己吸収効果を考慮して次式で与えられる。

$$I(\nu) = C(1 - e^{-\sigma(\nu)nl})e^{-\sigma(\nu)nL} \quad (\text{式 1})$$

$I(\nu)$: 共鳴線強度, C : 任意定数, n : キセノン原子の数密度 (m^{-3}),

l : プラズマ領域の長さ, L : 非励起ガス領域の長さ, $\sigma(\nu)$: 共鳴線の吸収断面積

図 5 に、ガス圧力を 5 Pa として計算した、キセノン共鳴線 (8.4 eV) の自己吸収広がりシミュレーションを示す。細長いキャピラリー内のプラズマ領域から発光した共鳴線は、同じキセノンの非励起ガス領域を通して、測定試料へ向かう。この非励起ガス領域での自己吸収効果により、共鳴線の line profile は真ん中がくぼみ、発光強度の低下およびエネルギー幅の増加が引き起こされる。

シミュレーションに基づいて設計したキセノンプラズマ放電管のキャピラリー部の概略図を図 6 に示す。光源のスポットサイズはプラズマ開口部の寸法に依存するので、数 mm の試料に放電管光源からの共鳴線を集光するために、この面積を $\phi 2\text{mm}$ とした。このとき、キセノンガスの排気速度は開口部のコンダクタンスから 0.09 L/s となる。これより、キャピラリー内のガス圧を

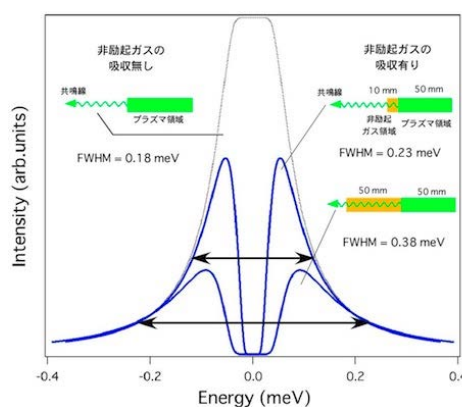


図 5 自己吸収効果による $\text{XeI}\alpha$ 共鳴線の line profile シミュレーション

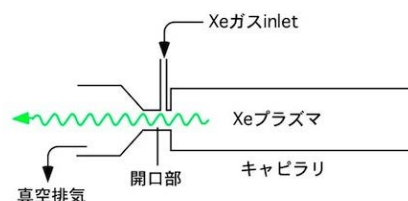


図 6 キャピラリー部の概念図

5 Pa に保つのに必要なガス流量は 0.25 sccm と試算した。実際のガス流量は、光電子分光実験による強度とエネルギー分解能が最適になるように調整した結果、10 sccm と求められた。この放電条件に基づくと、キャピラリー内圧力は 2 Pa、キセノン共鳴線の理論分解能は 0.15 meV と見積もられる。

4-2-4. キセノンプラズマ放電管の試作と改良

キセノンプラズマの安定発光条件を求めるために、共振周波数の調整レンジが比較的広い同軸型空洞共振器を基にした第 1 号機 (図 7) を試作し、発光強度と安定性、キャピラリーの寿命、プラズマ発光部分の壁面の侵食の程度を調べた。標準試料を用いた光電子分光のテスト実験の結果、キセノン原子及びイオンからの複数の共鳴線 (励起光エネルギー 8.4 eV, 9.5 eV, 9.9 eV) の発光を確認した。しかし、発光から数十分でキャピラリーのひび割れがおり、リークによる放電条件の変化、不純ガスによる内部浸食が観測された。特に、キセノンプラズマの発光部を内部観察した結果、この共振器ではプラズマが同軸の中心に固定されてしまい、キャピラリー開口部から離れてしまうために、発光強度の減衰、スペクトル分解能の低下などを引き起こしていることが見出された。

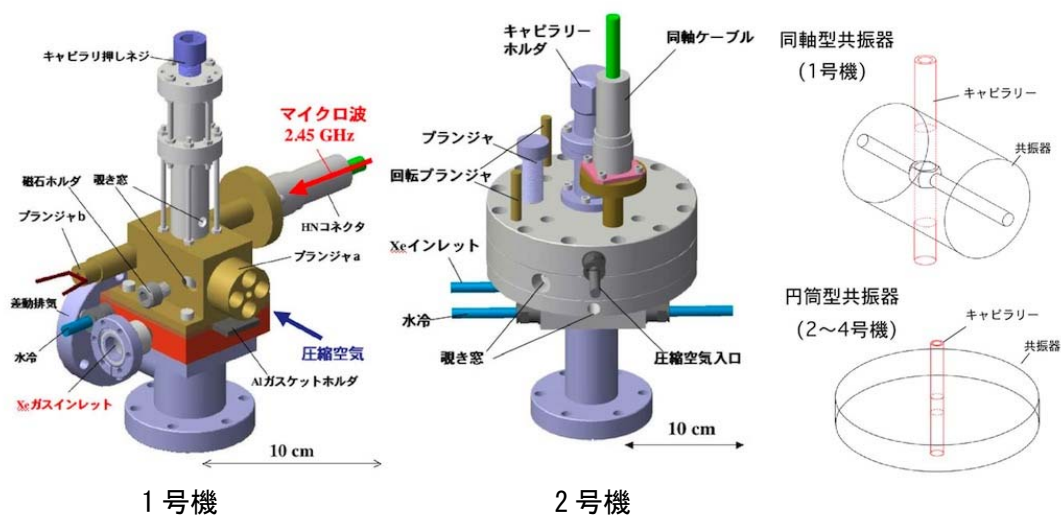


図 7 キセノンプラズマ放電管の試作機

1 号機の同軸型共振器の問題は、キャピラリーの中央部のみに電場が集中しやすく、異常加熱による破壊とプラズマ位置の固定を招いていると考え、キャピラリーのより広い範囲に電場をかけることのできるように、円筒型空洞共振器に垂直にキャピラリーを差し込んだ放電管 2 号機 (図 7) を設計製作した。その結果、キャピラリーの寿命が格段に延び、100 時間以上の安定発光を実現することに成功した。

プラズマ放電が起きるキャピラリーには、プラズマの浸食に強いアルミナセラミックスを用いた。セラミックスは熱伝導率が低いためマイクロ波の誘導加熱による発熱を冷却するのが容易でないという欠点がある。また水のマイクロ波吸収があるため、水冷機構を空洞共振部内に設置する事は出来ない。試作機3号機では、これに対処するために、圧縮空気をキャピラリーに直接吹き付ける空気冷却機構を取り入れた。3号機ではさらに、空洞共振器の形状や寸法のより精密な最適化、真空シール材の再検討、キセノンプラズマへ耐性の強い材料の検討を行うことで、新た実用的な高分解能光電子分光測定に必要な、 2×10^{13} photons/sec の高輝度と、1,000時間以上の安定発光を達成した。

試作機4号機(図8)では、実際の光電子分光実験での使い易さとプラズマ発光の更なる安定化を図り、プラズマ漏洩マイクロ波の遮蔽をより高めた設計を行い、そこへ自動プランジャ微調機構と、光強度モニタを組み込み、さらに安全性向上のために空冷インターロックを組み込んだ。

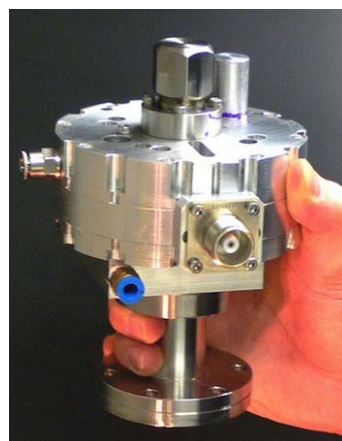


図8 キセノンプラズマ放電管4号機

4-2-5. キセノン共鳴線発光の評価

キセノンプラズマ放電管の発光特性を評価するため、放電管からの紫外光を非分光の状態高分解能光電子分光装置に導入して実験を行った。測定試料にはフェルミ準位近傍で比較的単純な状態密度を持つ金属バナジウムを用いた。図9に、キセノンプラズマ放電管を用いて温度30 Kにおいて測定した金属バナジウムの光電子スペクトルを示す。運動エネルギー4.0-6.3 eVの範囲でA-Hと名付けた幾つかの鋭いエッジ構造が明確に観測されている。これらのエッジ構造は、キセノンプラズマ放電管の発する異なるエネルギーの紫外光によって励起された金属バナジウムのフェルミ端構造に帰属することができる。エネルギー保存則により、各フェルミ端の運動エネルギーに電子分析器の仕事関数を加える事で、A-H構造を励起した光のエネルギーを求める事ができる。表2に、A-Hの各フェルミ端における電子の運動エネルギー、それから実験的に求めた励起光のエネルギー、対応するキセノン共鳴線の文献値(E. B. Salomon, J. Phys. Chem. Ref. Data 33 (2004) 765)、および各フェルミ端の相対強度比を示した。この表から、キセノンプラズマ放電管が発光する光のエネルギー範囲が8.437 eVから10.702 eVである事が分かる。励起光エネルギーの測定値は、キセノン原子もしくは一価イオンの共鳴線(Xe IもしくはXe II)の文献値と非常に良く一致しており、放電管からの発光が全てキセノンプラズマからのものである事を示している。8-10 eVの範囲では、放電管にリークがあると、窒素や酸素の輝線による構造が現れるはずであるが、図8の光電子スペクトルにそのような構

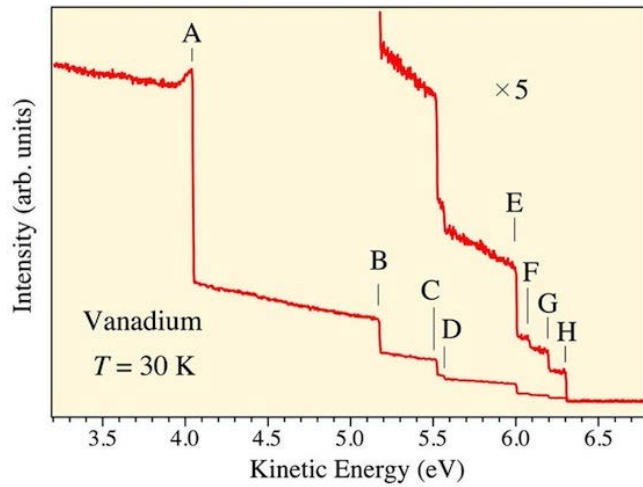


図9 キセノンプラズマ放電管で測定した金属バナジウムの光電子スペクトル。高運動エネルギー側にある構造(D-H)を見やすくするため、強度を5倍に拡大した。

| フェルミ端構造 | 運動エネルギー (eV) | 光のエネルギー (実験値) | | 光のエネルギー (文献値) | | 相対強度 |
|---------|--------------|---------------|-------|---------------|-------|------|
| | | (eV) | (nm) | (nm) | | |
| A | 4.045 | 8.437 | 147.0 | 147.0 | Xe I | 100 |
| B | 5.178 | 9.570 | 129.6 | 129.6 | Xe I | 18 |
| C | 5.526 | 9.917 | 125.0 | 125.0 | Xe I | 8.6 |
| D | 5.570 | 9.961 | 124.5 | 124.5 | Xe II | 1.6 |
| E | 6.009 | 10.401 | 119.2 | 119.2 | Xe I | 5.6 |
| F | 6.089 | 10.480 | 118.3 | 118.3 | Xe II | 0.6 |
| G | 6.202 | 10.594 | 117.0 | 117.0 | Xe I | 1.5 |
| H | 6.311 | 10.702 | 115.8 | 115.8 | Xe II | 2.3 |

表2 A-Hの各フェルミ端における電子の運動エネルギー、それから実験的に求めた励起光のエネルギー、対応するキセノン共鳴線の文献値、および各フェルミ端の相対強度比

造は全く観測されておらず、キセノン放電管の真空シールが非常に良い事を示している。スペクトル中で最大の強度を持つフェルミ端構造はAで、その励起エネルギーは8本の励起光の中で最も低い8.437 eVである。これは中性キセノン原子の $5p^5(2P_{2/3})6s$ 励起状態から $5p^6$ 基底状態への遷移の際の発光に対応する。測定結果から光強度自体を求めるため、光励起断面積を考慮した上でヘリウム ECR 型放電管で報告されている光強度の文献値(He I α 5×10^{12} photons/s)と比較した結果、キセノン放電管の8.437 eV励起光の光強度として 2×10^{13} photons/sの値を得た。Aの次に強いフェルミ端構造Bはエネルギー9.570 eVの光で励起された構造で、強度はAの18%程度である。A、B両構造は、それぞれが他の構造のエネルギー位置とよく離れたところに位置しているので、分光器によってこの二つの強い共鳴線を分離することは十分可能である。一方、より高いエネルギー励起光によるフェルミ端構造(D-H)の強度は比較的弱くなっているが、これはMgF₂窓の透過

率が高エネルギーになるほど低くなるためと考えられる。これらの励起光は高エネルギーの励起状態からの遷移に対応しており、より高出力のマイクロ波でプラズマを励起することで、その相対強度を上げる事ができる。

4-2-6. 光学系の設計と製作

図 10 に、キセノンプラズマ放電管から発光するキセノン共鳴線(8-11eV)を、試料上に 3mm に集光するために製作した光学系の概略図を示す。各光学素子のパラメーターは以下のとおりである。

球面型回折格子

反射材：Al+MgF₂
 曲率(2R):405.20 mm
 サイズ：30 × 40 mm²
 刻印数：1200/mm
 ブレイズ波長：150 nm

円筒型ミラー

材質：Al+MgF₂
 曲率(2R):289.41 mm
 サイズ：30 × 25 mm²

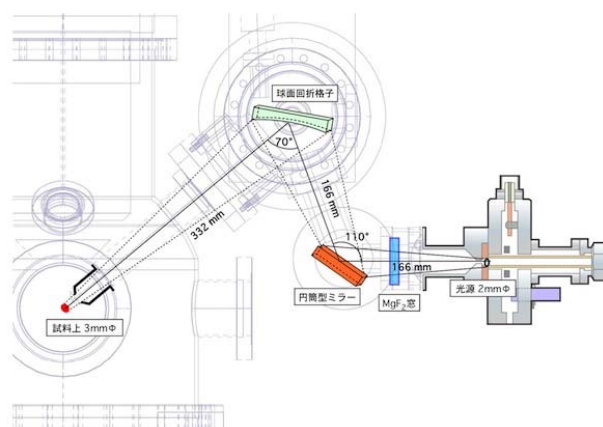


図 10 キセノンプラズマ放電管の光学系

図 11 に、金属ニオブのフェルミ端構造を用いて測定した、分光前と分光後の光電子スペクトルを示す。この結果から、キセノン放電管より発光された複色共鳴線が、明確に単離されており、設計した分光器が機能している事を確認した。特に最も強度の高い 8.437 eV と、次に強度の高い 9.570 eV の光電子スペクトル端は非常に良く単離されており、高分解能測定において十分な単色性が得られていることを示している。一方、9.917 eV のスペクトルは下端にさらに高エネルギー(9.961 eV)の構造が観測されている。これを分離するには、さらに分解能の高い回折格子が必要であると考えられる。

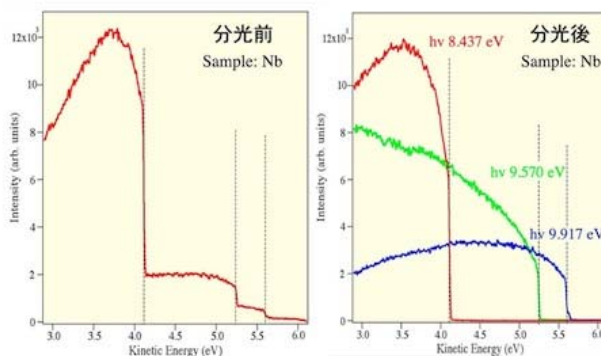


図 11 Nb における分光前(左)と分光後(右)の高分解能光電子スペクトル

4-2-7. バルク感性の評価

キセノン放電管のバルク感性を評価するため、バルクと大きく異なる表面電子状態

を形成する事で知られる金属イットリビウム(Yb)について実験を行った。図 12 に、キセノンプラズマ放電管(Xe I:8.437 eV)を用いて測定したYb 4f電子状態の光電子スペクトルを示す。比較のため、同一実験条件で測定したヘリウム放電管(He I α : 21.218 eV)の実験結果も示した。まずヘリウム放電管のスペクトルを見てみると、1.2 eV に単一のピーク構造が観測されており、さらに高結合エネルギーの 1.6-2.0 eV の範囲に幾つかのピークが重なり合っている構造がある。文献値との比較によると、前者はバルク Yb 4f電子軌道の 7/2 終状態に、後者は表面において配位数が少なくなる等の理由で形成される Yb 4f 電子軌道の表面電子状態に帰属される。ヘリウム放電管の実験結果では表面電子構造の強度がバルクと同程度であり、光電子スペクトルに表面電子構造が強く反映されている事を示している。一方、キセノンプラズマ放電管で測定した光電子スペクトルでは、この表面電子構造の強度がバルクに比べ大幅に減少している。この事は、キセノンプラズマ放電管の 8.437 eV 励起光が非常に高いバルク敏感性を有していることを示している。

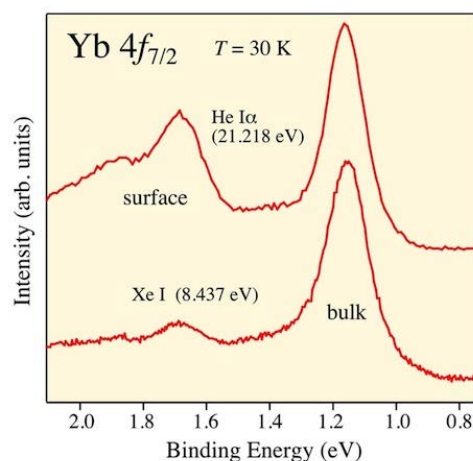


図 12 He I α (21.218 eV)及び Xe I(8.437 eV)により励起した金属イットリビウムの光電子スペクトル

4-2-8. エネルギー分解能の評価

図 13(a)に、建設したキセノン放電管の性能を評価する目的で測定した、3.5 Kにおける金(Au)のフェルミ端の光電子スペクトルを示す。清浄試料表面は、超高真空中で試料基板に Au を蒸着することにより得た。図から明らかなように、観測されたフェルミ端は、フェルミ準位をはさんで $\pm 1\text{meV}$ 以下で急峻に変化しており、本測定においてエネルギー分解能が十分高く、かつ試料上の温度も低いことがわかる。そこで、得られたフェルミ端形状を数値シミュレーションで再現する事により、フェルミ分布関数によるブロードニング効果を除いた実効エネルギー分解能 ΔE_{total} を見積もった結果、900 μeV という分解能を得た。また、Auで得られたエネルギー分解能を他の物質においても確認するために、9.2 Kで超伝導転移を示すニオブの超伝導ギャップの測定も行った。図 13(b)に示すように、温度 3.5 Kにおいて状態密度に急峻な超伝導準粒子ピークが観測され、スペクトル端の中心が高結合エネルギー側にシフトしてフェルミ準位上の強度が大きく抑制されている事から、超伝導ギャップが開いている事がわかる。得られた状態密度を BCS 関数によって数値シミュレーションをした結果、金と同様 900 μeV のエネルギー分解能が得られ

た。このエネルギー分解能値は、これまで使用されていた室内型ヘリウム放電管を用いた測定における最高分解能 1.3 meV に比べて更に向上しており、キセノン放電管と建設した電子エネルギー分析器の両方の性能が発揮されて初めて達成されたといえる。ここで、測定されたエネルギー分解能 $\Delta E_{\text{total}} = 900 \mu\text{eV}$ は、キセノン放電管の光のエネルギー幅 ΔE_{lamp} と電子エネルギー分析器(アナライザ)自身の持つエネルギー分解能 ΔE_{ana} を用いて、 $\Delta E = \sqrt{(\Delta E_{\text{lamp}})^2 + (\Delta E_{\text{ana}})^2}$ で表される。キセノン放電管のエネルギー幅が理論値通りであるとする $\Delta E_{\text{lamp}} = 150 \mu\text{eV}$ であるので、上式から $\Delta E_{\text{ana}} = 890 \mu\text{eV}$ と見積もられ、これにより観測されたエネルギー分解能は電子エネルギー分析器の分解能に支配されていると考えられる。今後、電子エネルギー分析器の更なる改良、具体的には新型電子入射スリットの作成や電子レンズパラメータの調整などによって、電子エネルギー分析器の分解能の底上げができれば、 $500 \mu\text{eV}$ を切る実効エネルギー分解能の実現も可能であると考えられる。

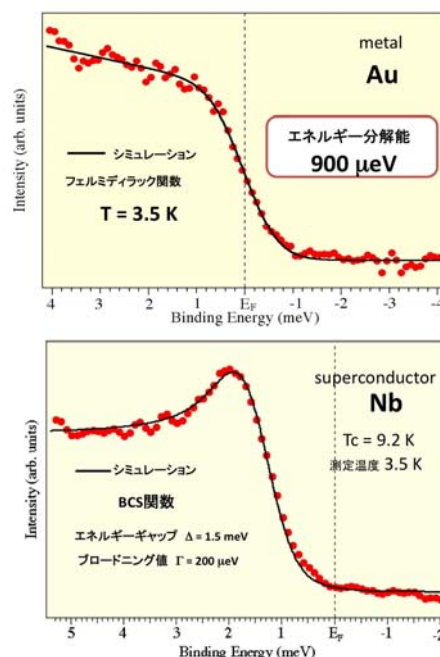


図 13 (a)金と(b)ニオブのフェルミ準位極近傍の光電子スペクトル

4-2-9. 高温超伝導体試料による性能評価

開発したキセノンプラズマ放電管の評価を目的として、単層系銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ (Bi2201) の角度分解光電子分光を行った。Bi2201 は、超伝導転移温度が低く、かつ超伝導ギャップのエネルギースケールも小さいため、これまでの光電子分光装置では超伝導ギャップの測定が困難であるとされてきた物質である。図 14(a) に示すように、キセノン放電管を用いた角度分解光電子分光測定では、過去に開発された準連続レーザー光源では到達が不可能であったブリルアンゾーンの $(\pi, 0)$ 点のフェルミ面まで明確にマッピングできている事がわかる。この違いは、本キセノン放電管がレーザー ($h\nu = 6\text{-}7\text{eV}$) に比べて、励起エネルギーが若干高く (8-11 eV)、それにより測定で網羅できるブリルアンゾーンの波数領域が拡大したためである。とりわけ銅酸化物高温超伝導体では、ブリルアンゾーンの $(\pi, 0)$ 点近傍の状態が超伝導に密接に関係している事が明らかになっているが、本実験結果は、キセノン放電管を用いた角度分解光電子分光実験が超伝導機構に直結する電子状態を解明する上で有用であることを明確に示している。また、図 14(b) に示すように、キセノン放電管を用いると、従来では測定困難であった 10 meV 以下の超伝導ギャップの波数依存性を高精度で決定する事も可能である。この実験から、Bi2201 の超伝導ギャップが擬ギャップと連続的に繋がり、観測された擬ギャップが超伝導と類似

の機構で生成される事が明らかになった。

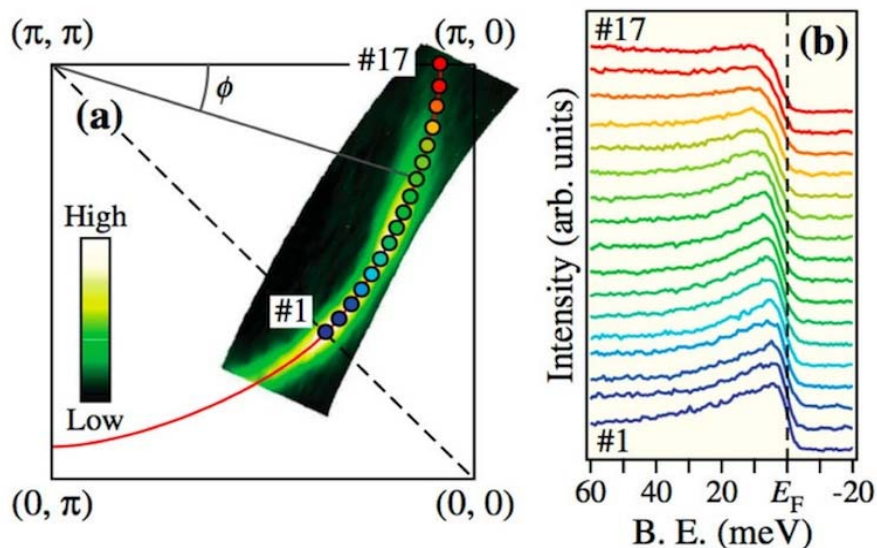


図 14 銅酸化物高温超伝導体 Bi2201 の(a)フェルミ面と(b)超伝導ギャップの波数依存性

(2)研究成果の今後期待される効果

本研究により、重希ガスキセノンプラズマからの高輝度共鳴線の 1000 時間以上の安定発光技術が確立され、10 eV 以下の低エネルギー領域での高分解能の実験室光源が実現した。今後、これを用いた超高分解能バルク敏感角度分解光電子分光測定から、様々な新奇物質の全ブリルアンゾーンに亘る微細なバルク電子構造を明らかにすることで、その特異物性の発現機構が進展するものと考えられる。さらに、キセノンプラズマ放電管の高いバルク敏感性を用いる事で、これまで光電子分光測定が困難であったより広い領域の物質についても、光電子分光を用いた電子状態の観測が可能となることが期待される。

4.3 スピン分解システムの設計と製作 (東北大学 高橋グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

4-3-1. スピン分解システムの概要と測定原理

通常の角度分解光電子分光(ARPES)装置では、Multi Channel Plate (MCP)を内球と外球の間に設置し、二次元的に光電子のエネルギー分布と角度分布を同時に測定する事で、高い測定精度(エネルギー・角度分解能)と、高い測定効率を達成している。これに対し、現在用いられているスピン分解光電子分光装置のデザインは、MCP 検出器の位置にモット検出器などのスピン検出装置を直接取り付けられているため、MCP 検出による 2 次元電子検出の利点を生かせていない。この問題点を解決するため、本研究では、MCP を 1 cm ほど内球側にずらし、空いたスペースに電子をモット検出器へ移送する「電子偏向器」の電子取り込み(スピnEnterランス)を設置するデザインを考案した(図 15)。MCP 上の電子分布イメージは、真空ビューポートを通して、大気側に設置した CCD カメラに取込まれた後、測定コンピューターに送られる。この CCD カメラは電子偏向器との干渉を避けるため、MCP より 35cm 離れた位置に設置した。到達した MCP 上でのエネルギー分解能は 0.9 meV、角度分解能は 0.2°であり、放電管光源を用いた最先端 ARPES 装置の性能と比べても同等以上の性能である事を確認した。

スピン分解システムはミニモット検出器と電子偏向器の 2 つの要素により構成されている。スピnEnterランスを通過した光電子は、電子偏向器により 90 度進行方向を変えてモット検出器に入射する。モット検出器は、電子の入射方向に対して直交する 2 成分までのスピン偏極度の決定が可能である。このモット検出器を、従来型のスピン分解装置と同様に、直接 MCP の後段に接続する配置にすると、スピンの偏極方向は図 15 における x,y 方向までしか決めることができない。これに対し、本研究の装置配置では電子偏向器を用いて 90 度傾けてモット検出器を接続した。この配置と、試料を z 軸周りに 90 度回転する機構を組み合わせることで、試料のスピン偏極度を、x,y,z 方向について全て決定することが可能となる。

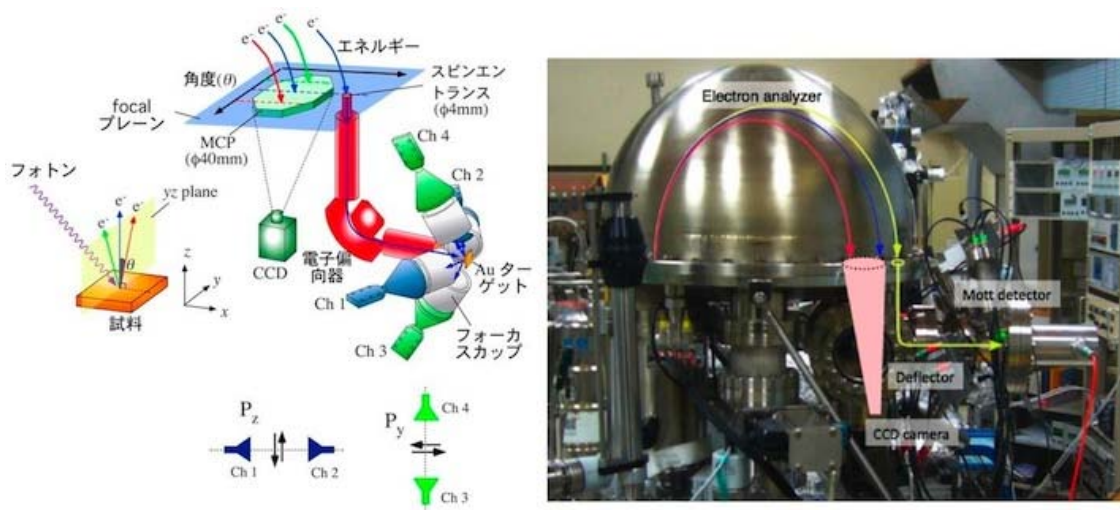


図 15 スピン分解システムの概要図(左)と写真(右)

電子のスピンの測定には、高速電子を金などの原子番号の大きい原子で散乱させて、その散乱非対称性からスピン偏極度を測定する「モット散乱法」を用いた。モット散乱法は、(1)高速電子を用いるため、測定スピン偏極度がターゲットの表面状態などにより影響を受けにくく、安定性・信頼性が高い、(2)ターゲットまでの電子の収束が比較的容易なので、散乱電子の非対称性からモット散乱以外の非本質的な要素を取り除き易い、という利点がある。

図 16 にモット散乱法の原理図を示す。測定する電子のスピン偏極度 P は、

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \quad (\text{式 2})$$

で与えられる。 N は、散乱平面に対し垂直方向のスピンアップ/ダウンの電子の個数である。これに対し、ターゲットからの左右の後方散乱電子強度を図 16 のように定義すると、散乱電子非対称性 A は、

$$A = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R} \quad (\text{式 3})$$

となる。モット散乱法においてこの二つの量は関係式

$$P = A/S_{\text{eff}} \quad (\text{式 4})$$

により関係付けられる。 S_{eff} は有効シャーマン関数と呼ばれる、実験装置に依存する、スピン偏極度の校正値である。

従来のモット検出器を用いたスピン分解光電子分光装置は、モット検出器における高速電子散乱の効率の低さのために測定精度を犠牲にせざるを得ず、エネルギー分解能は精々 100 meV 程度であった。本研究では、測定効率を向上させるために、

- (1) キセノンプラズマ放電管の高輝度キセノン共鳴線による光励起
- (2) 大型静電半球アナライザー(2R=40cm)による光電子シグナルの高スループット化
- (3) トランスミッタンス 100%の電子偏向器の設計・製作・調整
- (4) モット検出器における後方散乱電子の大立体角(+/- 15°)取り込み
- (5) 種々の放電対策によるバックグラウンドノイズの低減 (<0.1 cps)

などの技術開発により、以下の装置性能を達成した。

- エネルギー分解能; 8 meV
- 散乱電子強度(I/I₀); 4.6 × 10⁻²
- シャーマン関数(S_{eff}); 0.07
- figure of merit (S_{eff}² I/I₀); 2.2 × 10⁻⁴

スピン分解光電子分光装置でエネルギー分解能が 10 meV を切ったのは世界初の成果であり、現在用いられているスピン分解光電子分光装置の分解能を遥かに凌駕している。

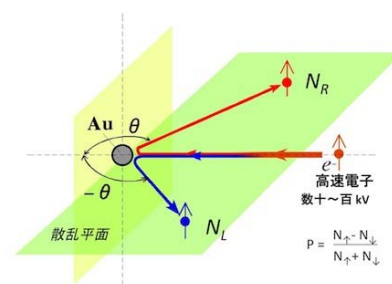


図 16 モット散乱の原理

開発したスピン分解システムの各要素技術と性能評価について、以下の順序で詳しく後述する。

4-3-2. 電子偏向器の設計と製作、4-3-3. モット検出器の設計と製作、4-3-4. 放電対策、4-3-5. エネルギー分解能の評価、4-3-6. スピン分解性能・シャーマン関数の評価

4-3-2. 電子偏向器の設計と製作

製作した電子偏向器は、電子分析器内でエネルギー・角度分別された光電子を、スピン分析を行うモット検出器まで移送するために、以下の性能を満たす。

- (1) スピンエントランスに入射した電子を 90° 偏向させて 100% の透過率でモット検出器に移送する。
- (2) 入射電子を、電子分析器内のパスエネルギー (1~50 eV) から、モット散乱に必要な 25 keV まで加速する。
- (3) $\phi 4\text{mm}$ のスピンエントランスに入射した電子を Au ターゲット上に $\phi 1\text{mm}$ に収束する。
- (4) スピン分解測定のエネルギー分解能は、パスエネルギー (E_p) $\times 8\text{ meV}$ で与えられる。
- (5) スピン分解測定のエネルギー分解能は、電子分析器の入射スリットにおける角度分散 ($\Delta\theta/\text{mm}$) $\times 3\text{mm}$ で与えられる。

(4)と(5)のエネルギー分解能・角度分解能については、電子偏向器内において電子の損失や電子軌道のぶれがない限り、スピンエントランスの大きさと、電子分析器のパスエネルギー・角度分散により与えられる。従って、パスエネルギー 1 eV、角度分散 $1^\circ/\text{mm}$ の場合、スピン分解時のエネルギー分解能の理論値は 8 meV、角度分解能の理論値は 3° となる。

上記の要件を満たすために、電子偏向器は前段レンズ、偏向器、後段レンズの 3 要素により構成した (図 17)。レンズ電極の構成とレンズパラメーターは、シミュレーションにより求めた。図 18 に、スピンエントランス上において、divergence= 10° , $N=5000$, 初速度 50 eV とした場合の、ターゲット上での電子スポットのシミュレーション結果を

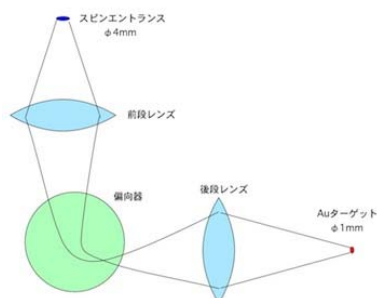


図 17 電子偏向器の構成

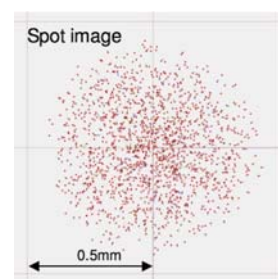


図 18 ターゲット上の電子スポットのシミュレーション

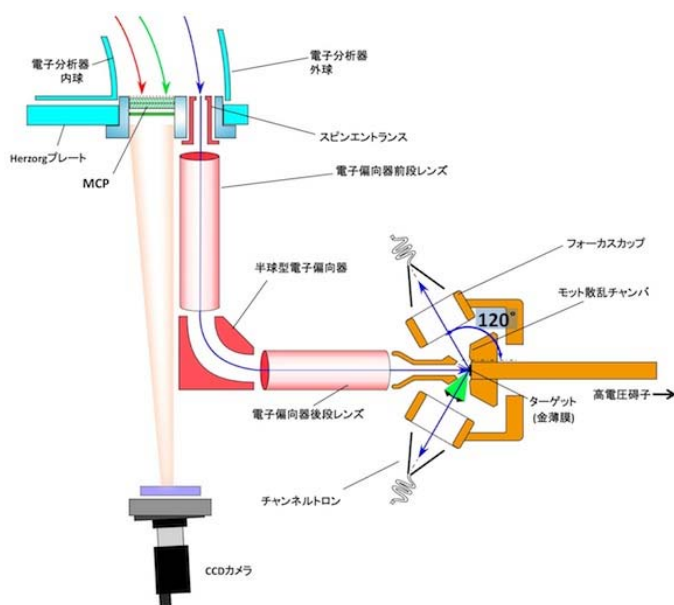


図 19 電子偏向器の概要

図 19 に、製作した電子偏向器の概要を示す。図の赤い部分は電子偏向器を構成するエレメントに対応し、黄色の部分はモット検出器に対応する。ターゲットを配置しているモット散乱チャンバの電位は最終加速電圧である 25 keV に保たれる。モット散乱チャンバは電子の入射口が漏斗形をしており、電子偏向器と併せて、25 keV 加速と電子収束のためのレンズシステムの構成要素となっている。

電子偏向器のトランスミッタンスの評価・最適調整を行うため、図 19 のモット検出器の代わりにチャンネルトロンを設置して、偏向器を通過した電子数を直接計測した。その際の試料には Au 4f 準位の XPS スペクトルを用いた。偏向器後段におけるカウント数が最大となるようレンズパラメータを調整した結果、そのカウント数は 1400 cps となった。比較のため MCP 上で同一スペクトルの強度を評価したところ 750 cps であり、チャンネルトロンと MCP の検出効率の違い(チャンネルトロン 100%、MCP 50%)を考慮すると、電子偏向器のトランスミッタンスは、ほぼ 100% を達成したと結論した。

ターゲット上の電子スポットを評価するために、ターゲットの位置に Au 薄膜の代わりに、蛍光剤を銀ペーストで塗り固めたものを設置し、さらに図 19 の後方散乱電子の検出機構からチャンネルトロンを取り外し、その代わりにビューポートおよび CCD カメラを設置して、蛍光ターゲット上の電子スポットを直接観測した。その結果、 $\phi 1\text{mm}$ 内に電子スポットが収束していることを確認した(図 20)。



図 20 ターゲット上の電子スポット

示す。最終速度は Au ターゲットの電位(25 keV)に固定される。初速度を電子偏向器のパスエネルギー(1,2,5,10,20,50 eV)と変えた場合も、Au ターゲットに $\phi 1\text{mm}$ 以内に収束することを確認した。電子偏向器は、スピントランス上の電子イメージの結像のために静電半球型を採用したが、MCP と CCD カメラの間の空間に干渉しないようにするため、切削型の静電半球型偏向器を設計・製作した。

4-3-3. モット検出器の設計と製作

製作したミニモット検出器は、高効率でスピン分析を行うために以下の性能を満たす。

- (1) 25 keV で Au ターゲットに入射して、120°後方散乱した電子の強度を検出する。
- (2) 4 方位にチャンネルトロンを設置し、電子の入射方向に対して直交する 2 方位までのスピン偏極度の測定を行う。
- (3) チャンネルトロン電位は設置電位から 0-2000 V まで調整可能で、後方散乱電子の非弾性成分を 0-2000 eV まで任意にカットすることができる。
- (4) ターゲットとチャンネルトロン間に設置したフォーカスカップ電極により、120°後方散乱した電子を大立体角で取込むことができる。この電極の印可電圧を変える事で、取込み立体角は 0° から最大 $\pm 15^\circ$ まで調整可能である。
- (5) ターゲットを容易に交換できるように、高電圧碍子とターゲットを一体化し、散乱チャンバ内から脱着可能である。
- (6) 加速電圧 25 kV、フォーカスカップ電圧 2000 V(取込み角 $\pm 15^\circ$)、チャンネルトロン電圧(1300 V)における諸性能は以下のとおりである。

シャーマン関数 (S_{eff}); 0.07
 散乱電子強度 (I/I_0); 4.6×10^{-2}
 figure of merit ($S_{\text{eff}}^2 I/I_0$); 2.2×10^{-4}

現在、スピン分解光電子分光装置で主流となっているスピン分解装置は、モット散乱を用いるモット検出器と、強磁性薄膜を用いる低速電子散乱(VLEED)検出器の二つである。本研究では、高エネルギー分解能を達成するため、電子軌道のふらつきが少なく、ターゲットの安定性・信頼性が高いモット検出器を用いた。

モット散乱のターゲットは、安定性と原子番号の大きさから Au ターゲットを採用した。Au 原子のシャーマン関数は図 21 (S.R.Lin, Phys.Rev. **133** (1964) 965.)のように計算されており、120°後方散乱において最も高いスピン検出効率を得られる。モット検出器を光電子分光装置の接続に適したサイズにするため、ターゲットと電子検出器ともに 100 kV 程度の高電位に保つ従来型モットではなく、ターゲットのみを 25 kV 程度に保ち、電子検出器は接地電位近傍に保つミ

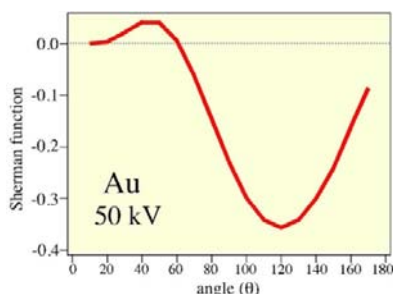


図 21 Au 原子のシャーマン関数

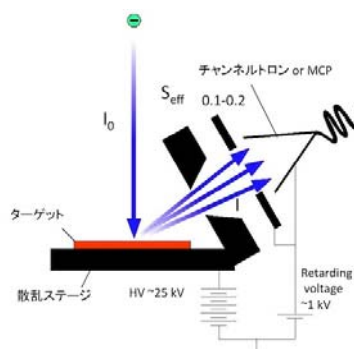


図 22 ミニモット検出器の原理図

ニモット検出器のデザインを取り入れた(図 22)。ターゲットからチャンネルトロンまでに阻止電圧がかかることで、電子のスピンの情報を失った非弾性散乱電子をある程度の割合で取り除くことができる。これに基づき、設計製作したミニモット検出器の概観を図 23 に示す。モット散乱チャンバとフォーカスカップ電極は、ポリイミドで絶縁された電極台の上にそれぞれ取り付けられており、これらは ICF152 フランジの上にマウントされている。4 つのチャンネルトロンは、図 15 に示す方位に取り付けた。各チャンネルトロンは、それぞれ ICF70 フランジにマウントされており、入力電圧端子(0-2000 V)、ゲイン電圧端子(0-2000 V)、信号検出端子は同じ ICF70 フランジの導入端子から取っている。モット検出器の取り外しは、全チャンネルトロンを外した後、ICF152 フランジを引き抜くことで一度に行うことができる。

モット検出器の性能は散乱ターゲットの状態に強く依存するので、様々な形状・材質のターゲットを交換して性能を評価する必要がある。従来のデザインのミニモット検出器(Burnett *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **65** (1994) 1893)ではターゲットを散乱チャンバに固定する方式をとっているため、ターゲット交換の際はモット検出器自体を取り外し分解する必要があり、この時の組立精度によるターゲットへの入射電子軌道への影響が懸念される。この問題に対応するために、図 23 の茶色で示したターゲット電極を 50 kV 用の高電圧碍子と一体化させて散乱チャンバから脱着可能にした。

散乱電子の検出効率を高めるために、大きな立体角で散乱電子を取込むことのできるフォーカスカップ電極を設置した。図 21 の Au 原子のシャーマン関数などを参考にして、装置のシャーマン関数が低くなりすぎない範囲で出来るかぎり大きな立体角を検討した結果、装置の取り込み立体角を $\pm 15^\circ$ とした。ターゲットの散乱チャンバ(25 kV)、チャンネルトロン(1300 V)、フォーカスカップ電極(2000 V)の形状・配置・電圧は電子軌道シミュレーションにより求め、実際の設計製作を行った。

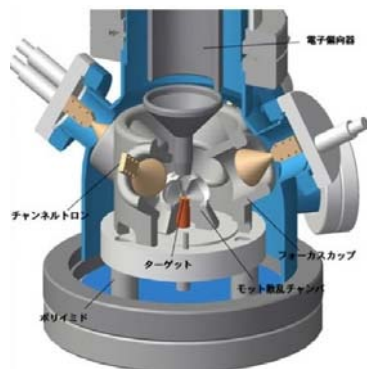


図 23 (上)ミニモット検出器の概観(立体図)と(下)電子偏向器側から見た写真

4-3-4. 放電対策

ミニモット検出器は、通常の光電子分光装置に比べて遥かに高い印可電圧で動作するので、開発時には種々の放電問題に直面した。スパークを伴う放電現象は、大気側の高電圧碍子と高電圧用ケーブルの接続部で観測され、真空側ではモット散乱チャンバに初めて 10 kV 以上の電圧を印可したときに観測された。これらは材料表面の研磨と洗浄、および電極形状の工夫で解決した。一方、スパークを伴わない暗流放電も真空側のチャンネルトロンで観測された。光電子分光は本来、カウント数が nA～pA のオーダーの現象であり、モット検出器においてカウントされる電子数はさらに数桁低いものとなるので、このような暗流もすべて取り除く必要がある。

暗流発生の原因は、故意/過失に拘らず電極表面に残った蛍光剤やグラファイトなどの塗布物によるものと、モット検出器の電極形状・配置によって発生する強電界によるものの二つに分けられた。前者は、装置の分解・再洗浄により解決したが、後者に関しては原因部の特定と解決のために、モット検出器の設計と使用材質の再検討にまで立ち返る必要があった。図 24 に暗流が発生したと考えられる強電界部を示す。モット散乱チャンバ内において後方散乱した電子を大立体角でとりこむためには、フォーカスカップ電極(2 kV)を散乱チャンバ(25 kV)から 10 mm 程度近傍に設置する必要がある。チャンネルトロンに観測された暗流は、フォーカスカップ電極の電位に強く依存する事から、この部位が放電発生部と特定した。真空中の放電であること、放電現象自体は装置の真空度によらないことから、放電のきっかけは低電位側のフォーカスカップ電極先端部における電子の電界放出であると考えた。局所的な強電界を弱めるために、その先端部に念入りに機械研磨を施した。また、この電極に用いた材料であるアルミニウムは柔らかい金属であり暗電流が比較的発生しやすいという可能性も考慮し、切削工具表面の硬質化によく用いられる TiC コーティングを施した。さらにモット散乱チャンバと、そこに近い電極である電子偏向器の後段レンズについても、機械研磨と再洗浄を行い、装置を組み上げた後、数回ベーキングを行った。その結果、改良前は 18 kV 印可で 100,000cps 以上であった暗流放電は、モット検出器の動作電圧 25 kV 印可時で 0.1cps 以下まで低減させることに成功した。4-3-5 節の図 25(b)に示すように、このノイズレベルであれば、最高分解能(8 meV)の動作時においても十分なデータ測定が可能である。

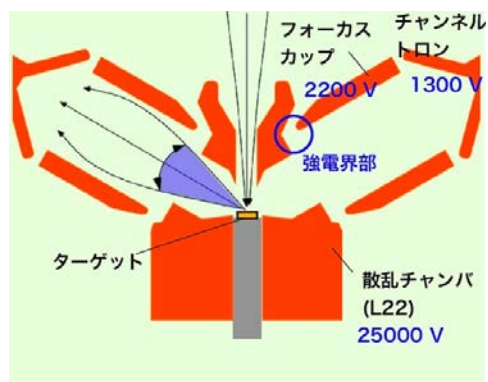


図 24 モット検出器の放電部位

4-3-5 エネルギー分解能の評価

モット検出器における後方散乱電子の非対称性と、エネルギー分解能を評価するため、極低温試料マニピュレーターの先端に蒸着した金薄膜を用いて光電子分光実験を行った。金薄膜は非磁性の多結晶試料であるので、異なるチャンネルトロンに現れる差異は、実験装置に起源を持つ散乱非対称性に対応する。そのような装置非対称性はスピン分解実験において測定信頼度の低下をもたらす。図 25(a)に、He I α 共鳴線(21.218 eV)で励起した、金の価電子帯の光電子スペクトルを示す。結合エネルギー4 eVと6 eVのピーク構造はAu 5*d*バンド、2 eVからフェルミ準位にかけての平坦な構造は Au6*s* バンドに帰属される。これらはよく知られている光電子分光の結果と一致する。図 25(a)で観測されているスペクトル構造は全てのチャンネルトロンで全く同一であることから、フェルミ準位から数 eV に亘るエネルギー領域において、有意の装置非対称性はないと判断した。

図 25(b)にフェルミ準位近傍のエネルギー領域(図 25(a)の赤い領域)で測定した光電子スペクトルを示す。測定にはキセノンプラズマ放電管を用い、電子分析器のパスエネルギー(E_p)を 1 eV に設定した。得られたフェルミ端構造について、フェルミディラック分布関数で温度の効果を取り入れて数値フィッティングを行った結果、チャンネルトロン A-D においてエネルギー分解能が 6.8-8.5 meV(平均値 7.7 meV)である事を見出した。同様の実験を $E_p=2$ eV で行ったところ、エネルギー分解能は 15.6 meV と見積もられた。これらの実験分解能と、スピンエントランスの大きさから見積もられる理論分解能($8 \times E_p$ meV)の値との非常に良い一致は、電子偏向器・モット検出器内において軌道のふらつきなどにより分解能の低下は起こっていないと考えられる。

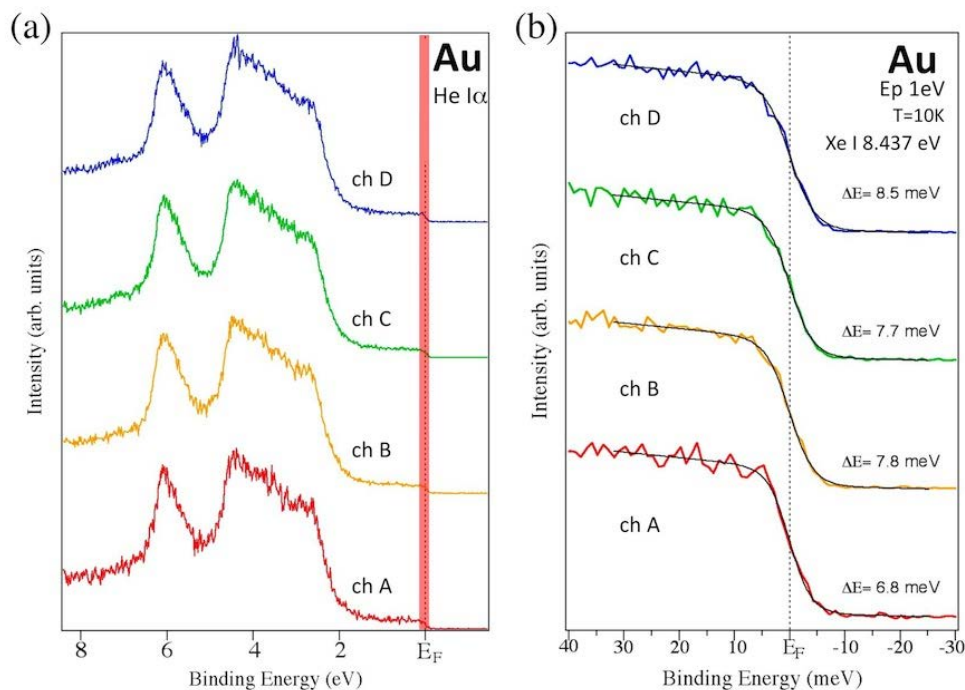


図 25 モット検出器で測定した金薄膜の(a)価電子帯および(b)フェルミ準位近傍の光電子スペクトル。

4-3-6 スピン分解性能・シャーマン関数の評価

製作したモット検出器のスピン分解性能を確認する目的で、V 族半金属 Sb(111)表面のショックレー準位について、表面平行方向と垂直方向の 2 方向についてスピン分解角度分解光電子分光実験を行った。測定に必要な清浄試料表面は、単結晶を劈開する事により得た。図 26 の挿入図は、スピン分解測定と同時に測定した Sb(111)のフェルミ面で、中央の六角形状のフェルミ面と外側の葉巻型のフェルミ面は、表面ラシュバ効果により分裂したバンドである。スピン分解測定は、挿入図中の青丸で示す点で行った。表面電子バンドが表面平行方向にのみスピン偏極している様子が明確に観測された事から、装置が試料のスピン方向を正しく測定している事を確認した。

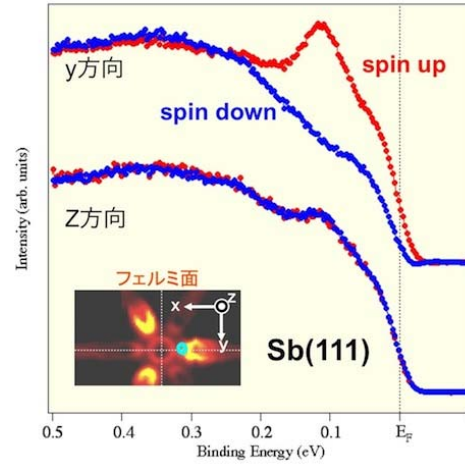


図 26 Sb(111)表面の y 方向および z 方向のスピン分解 ARPES スペクトル. 挿入図はフェルミ面.

装置の有効シャーマン関数を見積もるために、励起する光電子のスピン偏極度が既知(M. Hoesch *et al.*, PRB **69** (2004) 241401(R))である試料として、Au(111)表面のショックレー準位のラシュバ分裂バンドについてスピン分解 ARPES 実験を行った。試料表面は単結晶をスパッタ・アニールすることにより得た。1×1 の LEED パターンから表面の清浄性を確認した。27(a)に、Au(111)表面バンドのスピン分解 ARPES スペクトルを示す。測定は、スピンの y 方向にのみ偏極している波数点において行った。表面バンドがスピン up/down 成分に分裂している様子が明確に観測されている。それぞれのバンドを surface band 1,2 とすると、それぞれが up/down に完全偏極していることから、理論的なスピン偏極度 $P(E)$ と、非対称関数 $A(E)$ は、(式 2, 4)を用いて以下ようになる。

$$P(E) = \frac{N_{\uparrow}(E) - N_{\downarrow}(E)}{N_{\uparrow}(E) + N_{\downarrow}(E)} \quad (\text{式 5})$$

$$A(E) = P(E)/S_{\text{eff}} \quad (\text{式 6})$$

$N_{\uparrow}(E)$; surface band 1 の強度
 $N_{\downarrow}(E)$; surface band 2 の強度
 E ; エネルギー
 S_{eff} ; 有効シャーマン関数

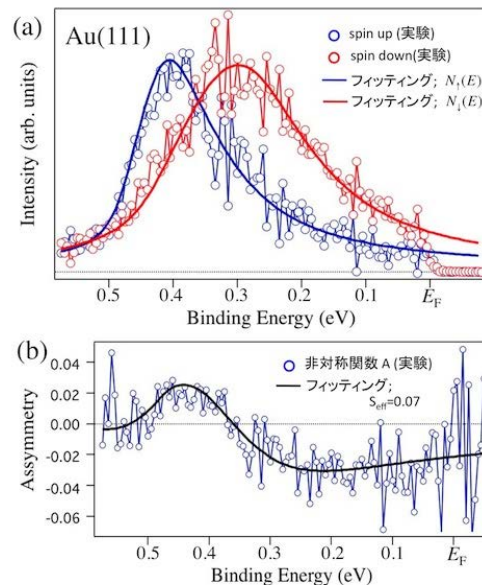


図 27 (a)Au(111) 表面バンドのスピン分解 ARPES スペクトル (b)非対称関数スペクトル

分裂した表面バンドのそれぞれの光電子スペクトルは、スピン非分解能の実験スペクトルに装置分解能の効果を取り入れる事で、精密な形状を求める事ができる。一方、実験的な非対称関数 A は、モット検出器によって(式 4)を用いて直接求められる。非対称関数 A についてフィッティングを行った結果が図 27(b)であり、その結果、装置の有効シャーマン関数が $S_{\text{eff}} = 0.07$ である事を見出した。

(2) 研究成果の今後期待される効果

今後、開発した超高分解能スピン分解光電子分光装置により、これまでは観測ができなかった様々な機能性物質のスピン分解電子状態の精密な決定が可能となり、電子のスピンが引き起こす様々な物質現象の解明が急速に進展するものと期待される。現在、次世代の超高速・超低消費電力素子として強力に推し進められているスピントロニクス素子開発において、その素子を構成する物質のスピン分解電子状態を測定することで、スピン偏極度の大きなスピントロニクス材料として適切な物質を選別し、またその結果に基づいたより高性能な物質の開発が可能となると考えられる。また、磁場ではなく電場によりスピン信号の制御を行う次世代スピントロニクス素子では、その動作原理としてスピン軌道相互作用により電子の運動量とスピン偏極度が密接に結びつくことが指摘されており、そのような系として、ラッシュバ金属表面、二次元電子界面、また最近ではトポロジカル絶縁体などが大きな注目を集めている。開発した装置によりバンド構造、フェルミ面、さらに各波数点におけるスピン偏極度を精密に決定することで、機能素子としての動作原理を明らかにして、新しいスピントロニクス素子の開発に大きく貢献できると考えられる。

4. 4 極低温マニピュレーターの設計と製作 (東北大学 高橋グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

建設した装置で光電子分光測定を行う新機能性物質の中には、低温で相転移する物質が多い。例えば、鉄ニクタイトにおける超伝導転移や低温において磁性転移を示す物質がその典型例である。このような相転移現象に伴う電子状態の変化を高精度で捉えるためには、試料の低温化が必要不可欠である。また、測定温度の低温化は、実質分解能を向上するうえでも重要になる。本研究では、極低温測定を可能にする熱輻射シールド機構と極低温マニピュレーターの開発を行った。

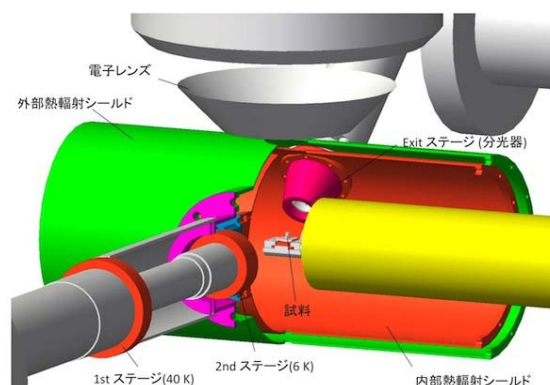


図 28 真空槽において構築したラディエーションシールドの模式図

図 28 に、開発した熱輻射シールドの概略図を示す。光電子分光では通常液体ヘリウムを使用して試料冷却を行うが、試料温度の低温化のためには、試料周りの真空槽やアナライザーからの室温のラディエーションを極力抑える事が非常に重要になる。本研究では、図 28 に示すように、試料槽内部に無酸素銅製の二重のラディエーションシールドを配置してヘリウム循環型クライオポンプと接続し、かつ、15 K 程度まで冷却されたラディエーションシールドで試料を見る大立体各部分を覆う事により、試料温度の低温化を図った。さらに、試料クライオスタットにもラディエーションシールドを取り付ける事により、合計で 3 重のシールドシステムを構築した。また、本装置は低速電子を扱うため、磁場の影響を受けやすい。そのため、シールドを金メッキするための前処理として従来行われているニッケルメッキを行わず、直接手作業で無酸素銅を磨いて光沢を出した後に、金メッキ処理を行った。これにより、材質に磁性元素を使用することを避けて低速電子に対する磁場の影響を極力回避した。

スピン分解角度分解光電子分光を行う上では、試料の低温化と並行して、ブリルアンゾーン全体においてバンド分散・フェルミ面を測定するシステムを構築する必要がある。そのためには、複数の回転軸を持つ試料回転システムが必要となる。これまで用いられてきた従来型の試料回転装置は、ロータリーステージに載せた試料冷凍機をロータリーステージの軸周りにまわす 1 軸回転のみであった。この場合、幅広い波数領域や複雑な形状を有するフェルミ面やバンド構造に対してブリルアンゾーンの様々な波数領域で測定する事が難しく、測定効率が著しく低かった。そこで、ロータリーステージ中心の回転軸に加えて冷凍機先端部のみで 2 軸回転を行う事ができるような 2+1 軸回転 (面内回転 azimuth と、煽り回転 tilt) が可能な角度分解光電子分光用 6 軸マニピュレーターの

開発を行った。動作原理としては、従来型の 1 軸回転（試料冷凍機自身の回転）に加え試料ヘッド先端に 2 軸回転機構を取り付ける事で 3 軸回転を行うものとした。また先端部の二軸回転機構には、2 つ傘歯車で一つの傘歯車の回転軸を制御することが可能な差動歯車方式を採用した。図 29 に、差動歯車による回転制御の原理の模式図を示す。基本的に、2 つの傘歯車②は同じ角速度で同方向（図中 A に対応）もしくは逆方向（図中 B に対応）に回転する。二つの傘歯車②の間にある傘歯車①は傘歯車②が A 方向に回転している時には、傘歯車②の中心を軸として

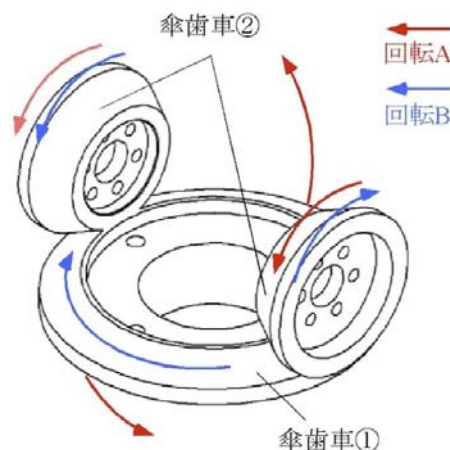


図 29 試料 2 軸回転機構に採用した差動歯車機構の概念図

回転する（図中赤矢印の回転運動に対応）。一方で、傘歯車②が B 方向に回転している時には、傘歯車①の中心を軸として傘歯車①が回転する（図中青矢印の回転運動に対応）。このように、二つの傘歯車②の回転方向を A 方向及び B 方向にする事により傘歯車①の 2 軸の回転が実現できる。本研究においては、傘歯車①を測定時の試料回転ステージとして使用する事を元にして設計・開発を進めた。

図 30 に、今回製作した低温マニピュレーターの全体像を示す。図(a)中に示すように、2 軸回転機構は取り付け部が ICF114 である従来型の液体 ^4He 連続流入式試料冷凍機の先端に取り付け、外部に取り付けたステッピングモーター①・②を改造した超高真空用回転導入機と結合させ、ユニバーサルジョイントを使用して歯車の回転を行う。シャフトの材質に関しては、回転時のシャフトのねじれ応力による回転精度の低下を防ぐために強度の強い SUS を使用した。また、回転時のシャフトのぶれを抑制するために、試料冷凍機の 2 カ所にシャフトガイドを設計・設置した。試料冷凍機先端部には、先端部への外部からの熱量の流入を防ぐ目的で円筒型の熱輻射シールドを取り付け、その先端部分を加工する事により 2 軸回転機構を直接取り付けた。(d)に示すように、歯車の回転に関しては、傘歯車-回転導入の間に、平歯車とウォーム歯車を設置した。ウォームギアの歯車比は 1:20 であり、ステッピングモーターの回転精度からさらに 20 倍の角度分解能で傘歯車②を動かす事が可能となる。平歯車は、同じ歯数のものを組み合わせてあり、これは、回転先端の大きさを小さくするために使用した。また、歯車はモジュール 0.3 のものを使用し、装置全体の小型化及び高精度化の両立を図った。さらに、各歯車及びシャフトの回転軸にはベアリングを使用し、回転動作時の摩擦や脱ガス、超高真空中の動作時における焼き付きの可能性の抑制を図った。極低温化のために、試料冷凍機の先端に

熱伝導性の高い銅で製作した冷却延長部材を取り付けた。超高真空中で動作確認をしたところ、試料上の温度約 25K において、真空中の脱ガスやギアの焼き付きなどの問題が無く角度分解光電子分光測定が行える事を確認した。

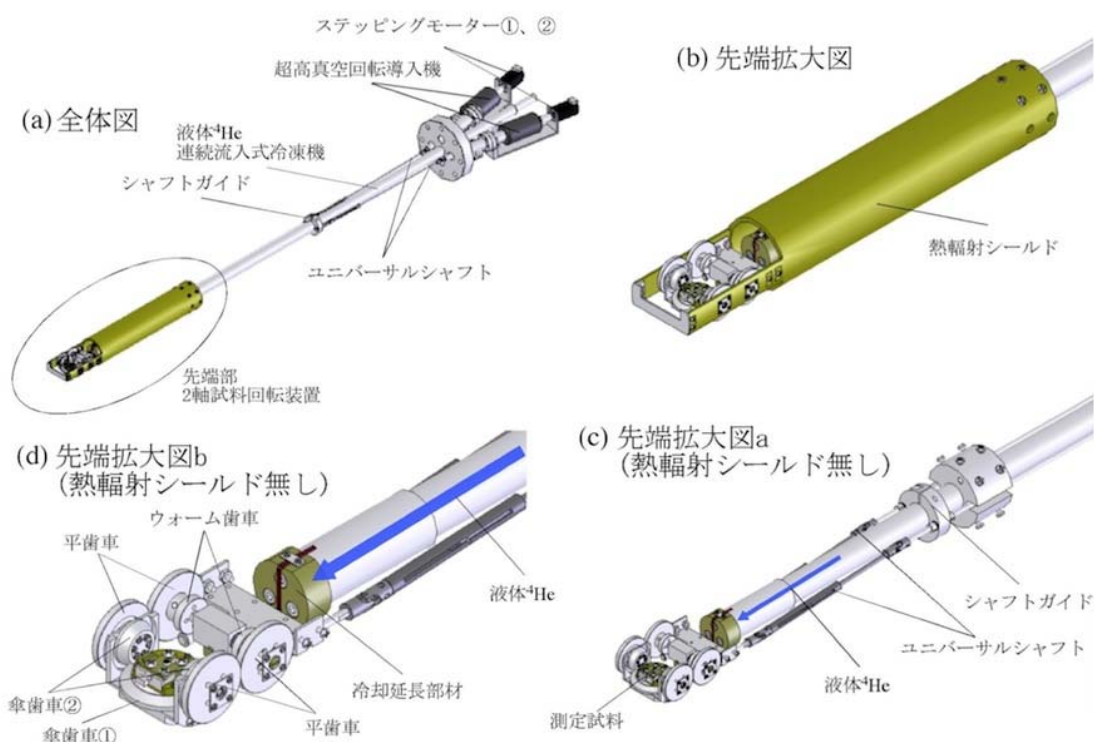


図 30 製作した極低温マニピュレーターの(a)全体図。(b)(c)(d)は回転装置の先端部の拡大図。

(2)研究成果の今後期待される効果

今後、本研究で開発した極低温マニピュレーターを用いてブリルアンゾーンにおける自在の波数点を網羅する角度分解光電子分光実験を行う事により、新機能物質のフェルミオロジーと物性発現機構の関係についての解明が加速すると期待される。とりわけ、鉄ニクタイト超伝導体やグラフェン等の物質では、ブリルアンゾーンの全体を網羅する実験が異常物性発現機構を明らかにする上で鍵になるが、開発した極低温マニピュレーターを用いたフェルミ面、多体効果、超伝導ギャップの測定は、それらの物質の物性発現機構を同定する上での大きな糸口を与えると考えられる。また、開発したマニピュレーターに新たにミューメタルを芯とするコイルを利用した試料磁化システムを組み込む事により、磁性体やハーフメタル等におけるスピン偏極フェルミ面を高精度で決定する事が可能となり、磁気転移機構に対する新たな知見が得られると期待される。

4. 5 PLD 薄膜作成装置の設計と製作 (東北大学 高橋グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

建設した装置の特性を十分に生かすには、種々の高性能単結晶薄膜を自ら作成し、そのスピン依存電子状態をスピン分解 ARPES を用いて高精度で決定する事が非常に有用である。上記の目的のために、パルスレーザー堆積法を用いた単結晶薄膜作成装置を建設し、光電子分析装置とドッキングする事で、作成した単結晶薄膜を大気に曝すことなく超高真空中で輸送して光電子分光測定を行うシステムを開発した。具体的には、MBE チェンバー、レーザーアブレーションシステム、試料加熱機構、超高真空チェンバー、ターゲットステージの取り付けと調整を行

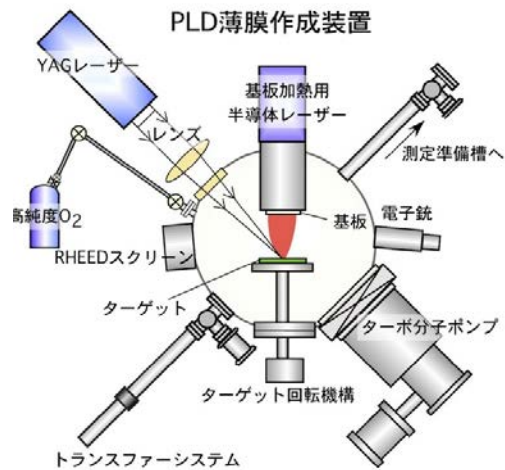


図 31 PLD 薄膜作成装置の概念図

った。製作した PLD 装置の性能を確認するため、代表的な機能酸化物である強磁性ペロブスカイト酸化物 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ と、銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\text{Tm}}$ の作成を行った。原子間力顕微鏡(AFM)により、作成した薄膜の表面が原子層レベルで平坦である事を確認した。また、新たに薄膜試料の輸送特性を評価するために 4 端子法を用いた薄膜電気抵抗測定装置を開発し、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\text{Tm}}$ がバルク試料と同様の相転移を示す事を確認した。さらに、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ については角度分解光電子分光を行い、 $\text{O}2p$ バンドにおいて明確なバンド分散を見出した事から、良質な単結晶表面が得られている事を確認した。

(2) 研究成果の今後期待される効果

今後は、PLD 装置で育成した高品質薄膜の ARPES 実験により、マンガン酸化物におけるハーフメタリシティーの検証、絶縁体ヘテロ接合における界面超伝導、銅酸化物超伝導薄膜における物理的圧力効果と特異物性の起源に焦点を当てた研究の進展が期待される。

4. 6 開発した装置による研究成果 (東北大学 高橋グループ)

○ 鉄ニクタイド高温超伝導体

2008年2月の東京工業大学の細野教授らのグループによる $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ における超伝導の発見を契機に、鉄系超伝導体(鉄ニクタイド)における超伝導の研究が爆発的に加速している。発見当初 32 K であった超伝導転移温度(T_c)は既に 55K を超え、その高温超伝導機構の解明と更に高い T_c を有する超伝導体の物質探索が現在急ピッチで進められている。開発した光電子分光装置を用いて、ホールドープ型の鉄系高温超伝導体 $(\text{Ba},\text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶の超高分解能 ARPES 実験を行い、エネルギーバンド構造とフェルミ面を決定し、さらに、超伝導ギャップの運動量・温度・軌道依存性を直接決定する事に初めて成功した。図 32 に、本研究で得られたフェルミ面(下図)および超伝導ギャップの温度・運動量・フェルミ面依存性をまとめた概略図を示す。ブリルアンゾーンの Γ 点を中心とした 2 枚のホールのフェルミ面(α, β)と、M 点中心の 1 枚の電子的フェルミ面(γ)が明確に観測された。また、超伝導状態において、 α -, β -, γ -フェルミ面上で、それぞれ、12, 6, 12 meV のほぼ等方的な s 波超伝導ギャップが開いている事を明らかにした。母物質の反強磁性ベクトルにより比較的良いネスティングを示す α, γ フェルミ面の超伝導ギャップサイズが強結合的な値を示す一方、ネスティング条件を満足しない β フェルミ面のギャップは弱結合的であることから、 BaFe_2As_2 系鉄ニクタイド超伝導体の超伝導メカニズムには、反強磁性バンド間相互作用が密接に関

係していると結論した。関係する論文(EuroPhys. Lett.)の引用数は出版後 2 年半を経た 2010 年 11 月現在で既に 300 を超えており、国際的にも高い評価を受けている。

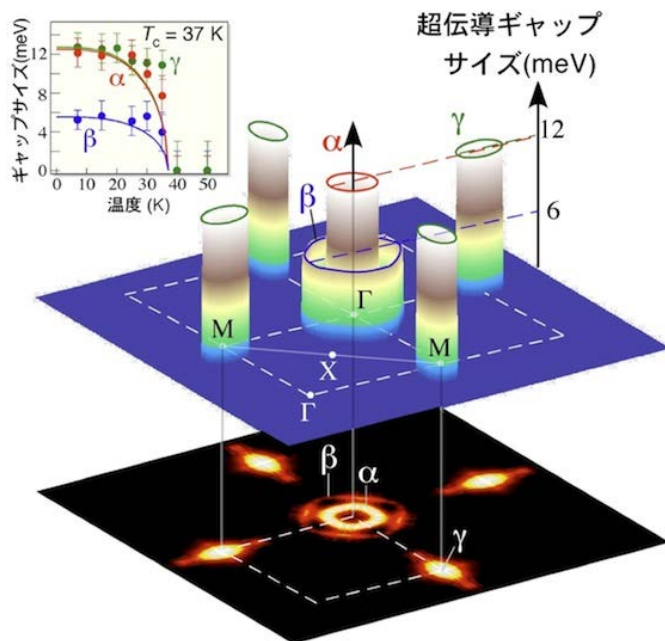


図 32 ARPES で決定した鉄系超伝導体 $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ のフェルミ面と超伝導ギャップ

鉄系超伝導体は現在までで数多くの物質が発見され、大きく分けて、1111系、122系、111系、111系とペロブスカイト挿入型の5種類の存在が明らかにされている。その一方、超伝導機構がこれらの物質群で共通かどうかは大きな問題で、複数の系における超伝導ギャップ対称性を決定する事が重要と考えられている。建設した装置を用いて、鉄系超伝導体の中でも最も単純な結晶構造を持つ11系Fe(Se,Te)の高分解能ARPES実験を行い、フェルミ面(図33)および超伝導ギャップの直接観測を行った。その結果、フェルミ面はBaFe₂As₂と同様 $Q=(\pi, 0)$ の波数ベクトルで良く繋がれると同時に、超伝導ギャップの対称性は122系と同様s波対称性を示し、さらに Γ 点のホール面上で強結合的な値を示すことを明らかにした。この実験結果から、鉄系超伝導の超伝導メカニズムは基本的には物質によらず共通の枠組みで説明できると結論した。

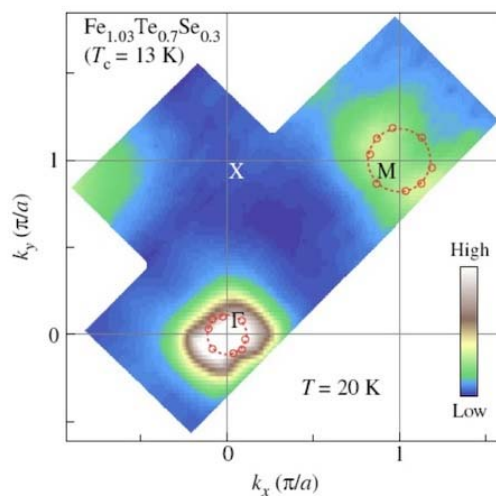


図 33 ARPES で決定した鉄系超伝導体 Fe_{1.03}Te_{0.7}Se_{0.3} のフェルミ面

○ グラファイト層間化合物 C₆Ca

黒鉛(グラファイト)は、それ自体は超伝導を示さない半金属としてよく知られているが、層の間にカリウム (K) 原子を入れると超伝導を示すことが40年前に発見されたが、その超伝導機構は不明のままであった。2005年に、これまで絶対温度で高々2K程度であった超伝導転移温度 (T_c) が、カルシウム (Ca) をグラファイト層間に入れると、一気に11.5 Kまで急上昇することが報告されこれまでの常識が覆されて、現在、基礎科学の立場からも物質開発の立場からも、黒鉛超伝導体の超伝導メカニズムの解明が急がれて

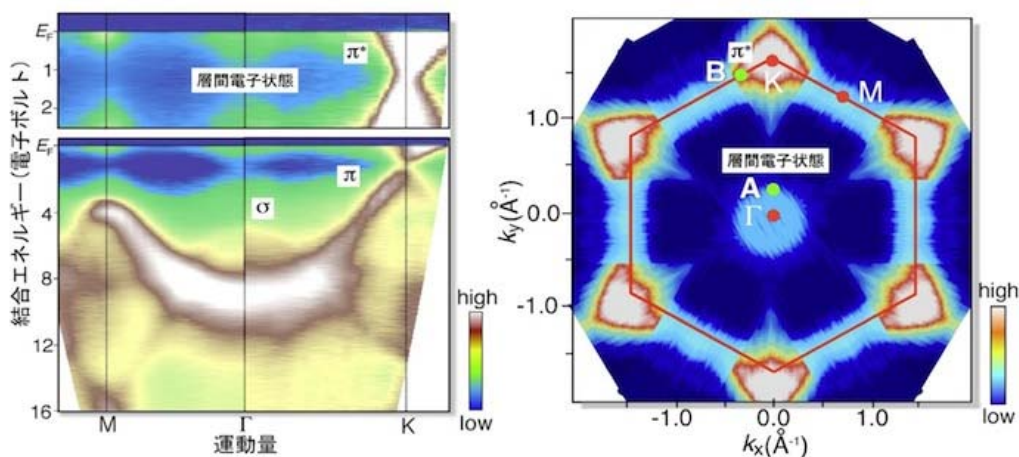


図 34 C₆Ca のエネルギーバンド構造とフェルミ面

いる。

建設した装置を用いて、カルシウムを入れた黒鉛超伝導体 (C_6Ca) 中の電子状態の観測を行い、フェルミ準位近傍のエネルギーバンド構造とフェルミ面(図 34)の直接観測に成功した。その結果、観測されたフェルミ面は Ca を置換しないグラファイトとは大きく異なり、ブリルアンゾーン中の K 点だけでなく Γ 近傍に「層間電子」による新たなバンドが出現する事が明らかになった。さらに、 T_c 以下の超伝導状態で、フェルミ面上の電子のエネルギー状態を精密に観測した結果、グラファイト層が重なり合うことで層の間に新たに形成される「層間電子状態」においてのみ明確な超伝導ギャップが観測された。この実験結果は、グラファイト単独層に存在する π 電子や σ 電子ではなく、「層間電子状態」に存在する電子が超伝導を担う事を示しており、今回の成果は、理論的に予言されていた層間電子の存在を確認すると同時に、その超伝導への寄与を明らかにしたもので、黒鉛超伝導の長年の難問を解決したものと言える。

今後、本研究結果に基づいて、 Ca などの挿入原子と炭素原子がどのように協力して高い T_c を実現しているのかの研究が急速に進むものと期待される。その結果、 Ca 以外の原子や分子を入れたり、グラファイトの炭素を他の元素で置換したりすることで、さらに高い T_c を持つ超伝導体が見出されることが期待される。

○ グラフェン

単層グラファイトシートであるグラフェンはゼロギャップ半導体になる事が理論的に示唆されており、移動度が他の半導体に比べて桁違いに大きく、超高速のスピントロンクスデバイス等への応用が期待されている。6H-SiC(0001)基板上に高品質の単層および多層グラフェンを積層し、開発した装置を用いてその電子状態を精密に決定した。図 35 に、SiC 上に育成した(a)単層グラフェンと(b)2層グラフェンについて、そのブリルアンゾーン K 点周辺での

π と π^* バンドのエネルギー分散を ARPES から実験的に決定したものが示す。単層グラフェンにおいては、 p_z 軌道に由来した結合 π バンドと反結合 π^* バンドがそれぞれ一本のみ観測されるのに対して、2層グラフェンでは、 π バンドが 2 本に分裂していることが分

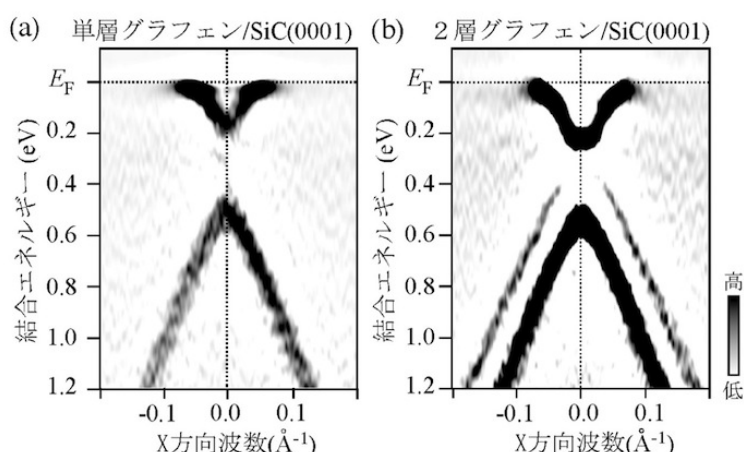


図 35 ARPES から決定した、ブリルアンゾーン K 点周辺の(a)グラフェンと(b)2層グラフェンのバンド分散

かる。この分裂は層同士の相互作用に起因すると考えられる。また、単層グラフェンにおいて、理論予測に反して有限のバンドギャップが観測された。このバンドギャップの起源はグラフェンと基板との相互作用によると結論した。

今後、単層・多層グラフェンにアルカリ金属などを蒸着することによって、フェルミ面と多体効果の関係や、薄膜超伝導の可能性についての研究が進展すると期待される。

○ トポロジカル絶縁体

トポロジカル絶縁体は、強いスピピン軌道相互作用によりバルクは絶縁体である一方で、表面で特殊な金属状態が現われる。この特殊な表面状態はバルクのバンドギャップ内に現われ、トポロジカルに保護されたギャップレス状態を形成すると考えられている。この量子状態は、その物理的な新規性に加え、超低消費電力のスピントロニクスデバイスやエラーの無い量子コンピューターなどへの応用にも役立つと期待されている。開発

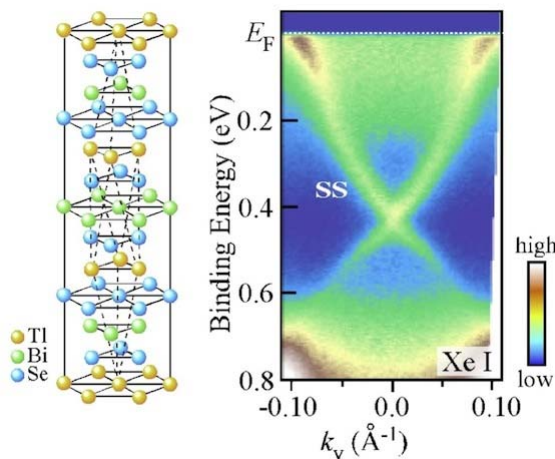


図 36 TlBiSe₂の結晶構造(左)とエネルギー分散のディラックコーン(右)

したスピン分解光電子分光装置を用いて、新型のトポロジカル絶縁体の候補と理論的に提案されていたTl系三元カルコゲナイドTlBiSe₂単結晶の高分解能ARPES実験を行った。その結果、価電子帯のバンド構造を決定する事に成功し、本物質が3次元ブリルアンゾーン中のΓ点近傍で0.35 eVの間接バンドギャップを有する絶縁体であることを見出した。また、キセノンプラズマ放電管の高エネルギー分解能(2 meV)・高運動量分解能(0.001Å⁻¹)を用いて精密測定を行った結果、Γ点におけるエネルギーギャップが0 meVであるディラックコーンのバンド分散を観測する事に初めて成功した(図 36)。また、このバンドのフェルミ面がΓ点以外では観測されない事から、本物質は不純物等の摂動に対して非常に強い3次元のトポロジカル絶縁体であることがわかった。この結果およびバンドギャップがこれまで観測された他のどのトポロジカル絶縁体(Bi_{1-x}Sb_x, Bi₂Se₃, Bi₂Te₃)と比べて大きい事から、本物質が室温におけるトポロジカル量子現象の解明やデバイス応用に非常に適していると結論した。

今後は、様々なトポロジカル絶縁体における表面状態の3次元スピン構造の波数依存性を完全決定し、表面電子状態の準粒子ダイナミクスをこれまでに無い精度で決定することにより、種々のトポロジカル絶縁体の特異物性発現機構の総合的解明が進むと期待される。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 63件)

- 1 “Fermi surface and anisotropic spin-orbit coupling of Sb(111) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, M. Arai, and T. Sasaki
Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 046411-1-4.
- 2 “Impurity effects on electron-mode coupling in high-temperature superconductors”
K. Terashima, H. Matsui, D. Hashimoto, T. Sato, T. Takahashi, H. Ding, T. Yamamoto, and K. Kadowaki
Nature Physics **2** (2006) 27-31.
- 3 “Fermi surface and edge-localized states in graphite studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, and H. Suematsu
Phys. Rev. B **73** (2006) 045124-1-4.
- 4 “Angle-resolved photoemission spectroscopy of the insulating Na_xWO_3 : Anderson localization, polaron formation, and remnant Fermi surface”
S. Raj, D. Hashimoto, H. Matsui, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, D. D. Sarma, P. Mahadevan, and S. Oishi
Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 147603-1-4.
- 5 “Shadow bands in single-layered $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Nakayama, T. Sato, T. Dobashi, K. Terashima, S. Souma, H. Matsui, T. Takahashi, J. C. Campuzano, K. Kudo, T. Sasaki, N. Kobayashi, T. Kondo, T. Takeuchi, K. Kadowaki, M. Kofu, and K. Hirota
Phys. Rev. B **74** (2006) 054505-1-6.
- 6 “High-intensity xenon plasma discharge lamp for bulk-sensitive high-resolution photoemission spectroscopy”
S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, and P. Baltzer
Rev. Sci. Instrum. **78** (2007) 123104-1-4.
- 7 “Xenon-plasma-light low-energy ultrahigh-resolution photoemission study of $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ ($x = 0.075$)”
T. Sato, S. Souma, K. Sugawara, K. Nakayama, S. Raj, H. Hiraka, and T. Takahashi
Phys. Rev. B **76** (2007) 113102-1-3.
- 8 “Bulk and surface low-energy excitations in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Nakayama, T. Sato, K. Terashima, H. Matsui, T. Takahashi, M. Kubota, K. Ono, T. Nishizaki, Y. Takahashi, and N. Kobayashi
Phys. Rev. B **75** (2007) 014513-1-7.
- 9 “Anomalous quasiparticle lifetime and strong electron-phonon coupling in graphite”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, and H. Suematsu
Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 036801-1-4.

- 10 “Anisotropic spin-orbit interaction in Sb(111) surface studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, M. Arai, and T. Sasaki
J. Mag. Mag. Mat. **310** (2007) 2177-2179.
- 11 “Metal-insulator transition in sodium tungsten bronzes Na_xWO_3 studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
S. Raj, D. Hashimoto, H. Matsui, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, A. Chakraborty, S. Ray, D. D. Sarma, P. Mahadevan, S. Oishi, M. H. McCarroll, and M. Greenblatt
J. Mag. Mag. Mat. **310** (2007) e231-e233.
- 12 “Electronic structure of LaAgSb_2 and CeAgSb_2 studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Arakane, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, Y. Watanabe, and Y. Inada
J. Mag. Mag. Mat. **310** (2007) 396-398.
- 13 “Magnetic isotope effect in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Terashima, T. Sato, H. Matsui, T. Takahashi, H. Ding, T. Yamamoto, and K. Kadowaki
Physica C **460-462** (2007) 934-936.
- 14 “Origin of shadow bands in single-layered $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Nakayama, T. Sato, T. Dobashi, T. Takahashi, T. Kondo, T. Takeuchi, K. Kudo, and N. Kobayashi
Physica C **460-462** (2007) 931-933.
- 15 “Bogoliubov quasiparticle and low-energy dispersion kink in the superconducting state of $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ ”
T. Sato, K. Terashima, K. Nakayama, T. Takahashi, K. Kadowaki, M. Kofu, and K. Hirota
Physica C **460-462** (2007) 864-865.
- 16 “Photoemission study of the superconducting-gap symmetry in electron-doped high- T_c superconductors”
H. Matsui, T. Sato, T. Takahashi, K. Nakayama, K. Terashima, M. Fujita, and K. Yamada
Physica C **460-462** (2007) 862-863.
- 17 “Electronic structure of sodium tungsten bronzes Na_xWO_3 by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
S. Raj, H. Matsui, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, S. Ray, A. Chakraborty, D. D. Sarma, P. Mahadevan, S. Oishi, W. H. McCarroll, and M. Greenblatt
Phys. Rev. B **75** (2007) 155116-1-11.
- 18 “Fermi surface and band dispersions of M_xCoO_2 (M: Na, K, and Rb) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, H. Ding, T. Fujii, and A. Asamitsu
J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 054704-1-5.
- 19 “Single-particle excitation gap in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ studied by high-resolution angle-resolved photoemission”
Y. X. Xiao, T. Sato, K. Terashima, H. Matsui, T. Takahashi, M. Kofu, and K. Hirota

- Physica C **463-465** (2007) 44-47.
- 20 “Origin of shadow bands in high- T_c cuprate superconductors studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, T. Fujii and A. Asamitsu
Physica C **463-465** (2007) 149-151.
- 21 “Electronic structure of $M_x\text{CoO}_2$ (M: Na, K, and Rb) studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Nakayama, T. Dobashi, T. Sato, T. Takahashi, T. Kondo, T. Takeuchi, K. Kudo, and N. Kobayashi
Physica C **463-465** (2007) 48-51.
- 22 “Anomalous momentum dependence of the superconducting coherence peak and its relation to the pseudogap in $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ ”
K. Terashima, H. Matsui, T. Sato, T. Takahashi, M. Kofu, and K. Hirota
Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 017003-1-4.
- 23 “Evolution of the pseudogap across the magnet-superconductor phase boundary of $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ ”
H. Matsui, T. Takahashi, T. Sato, K. Terashima, H. Ding, T. Uefuji, and K. Yamada
Phys. Rev. B **75** (2007) 224514-1-4.
- 24 “Electronic structure of quasi-one-dimensional conductors Nb_3Xc_4 (Xc = S, Se, Te) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
T. Dobashi, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, H. Kaneko, Y. Ishihara, and H. Okamoto
Phys. Rev. B **76** (2007) 045121-1-8.
- 25 “Universality of low-energy mass renormalization in the superconducting state of hole-doped high- T_c superconductors”
T. Sato, K. Terashima, K. Nakayama, H. Matsui, T. Takahashi, K. Kadowaki, M. Kofu, and K. Hirota
J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 103707-1-4.
- 26 “Anomalous superconducting-gap symmetry of noncentrosymmetric La_2C_3 observed by ultrahigh-resolution photoemission”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, and A. Ochiai
Phys. Rev. B **76** (2007) 132512-1-4.
- 27 “Fermi arc in the superconducting state of impurity-doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ”
T. Sato, K. Terashima, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, T. Yamamoto, and K. Kadowaki
Phys. Rev. B **78** (2008) 100502(R)-1-4.
- 28 “Observation of Fermi-surface-dependent nodeless superconducting gaps in $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”
H. Ding, P. Richard, K. Nakayama, K. Sugawara, T. Arakane, Y. Sekiba, A. Takayama, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, Z. Wang, X. Dai, Z. Fang, G. F. Chen, J. L. Luo, and N. L. Wang
Europhys. Lett. **83** (2008) 47001-1-4.

- 29 “Superconducting gap and pseudogap in iron-based layered superconductor $\text{La}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{FeAs}$ ”
T. Sato, S. Souma, K. Nakayama, K. Terashima, K. Sugawara, T. Takahashi, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono
J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 063708-1-3.
- 30 “Effect of Zn impurities on the electronic structure of $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Terashima, T. Sato, K. Nakayama, T. Arakane, T. Takahashi, M. Kofu, and K. Hirota
Phys. Rev. B **77** (2008) 092501-1-4.
- 31 “Cooperative structural and Peierls transition of indium chains on Si(111) surface”
Y. J. Sun, S. Agario, S. Souma, K. Sugawara, Y. Tago, T. Sato, and T. Takahashi
Phys. Rev. B **77** (2008) 125115-1-4.
- 32 “Low-energy excitations in graphite studied by ultrahigh-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, and H. Suematsu
Physica B **403** (2008) 1531-1533.
- 33 “Universal character of CoO_2 plane studied by high-resolution angle-resolved photoemission”
T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, H. Ding, T. Fujii, and A. Asamitsu
Physica B **403** (2008) 1086-1088.
- 34 “Band structure and Fermi surface of heavy Fermion compounds Ce_2TlIn_8 (T=Co, Rh, In) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
S. Souma, S. Raj, J. C. Campuzano, T. Sato, T. Takahashi, S. Ohara, and S. Sakamoto
Physica B **403** (2008) 752-754.
- 35 “Doping induced evolution of Fermi surface in low carrier superconductor Tl-doped PbTe”
K. Nakayama, T. Sato, T. Takahashi, and H. Murakami
Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 227004-1-4.
- 36 “Direct evidence for hidden one-dimensional Fermi surface of hexagonal $\text{K}_{0.25}\text{WO}_3$ ”
S. Raj, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, D. D. Sarma, Priya Mahadevan, J. C. Campuzano, M. Greenblatt, and W. H. McCarroll
Phys. Rev. B **77** (2008) 245120-1-5.
- 37 “Doping dependence of pseudogap in $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ”
T. Sato, K. Nakayama, Y. Sekiba, T. Arakane, K. Terashima, S. Souma, T. Takahashi, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono
J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. C, 65-68.
- 38 “High-resolution angle-resolved photoemission study of bulk electronic states in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ”
K. Nakayama, T. Sato, T. Takahashi, T. Nishizaki, Y. Takahashi, and N. Kobayashi
J. Phys. Chem. Solids **69** (2008) 2967-2970.
- 39 “Many-body interactions in hole-doped high- T_c cuprates studied by high-resolution ARPES”

- T. Sato, K. Terashima, K. Nakayama, T. Arakane, H. Matsui, and T. Takahashi
J. Phys. Chem. Solids **69** (2008) 2949-2955.
- 40 “Quasiparticle lifetime in graphite studied by ultrahigh-resolution ARPES”
 K. Sugawara, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, and H. Suematsu
J. Phys. Chem. Solids **69** (2008) 2996-2999.
- 41 “Angle-resolved photoemission spectroscopy of the Fe-Based $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ high temperature superconductor: Evidence for an orbital selective electron-mode coupling”
 P. Richard, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, Y.-M. Xu, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, and H. Ding
Phys. Rev. Lett. **102** (2008) 047003-1-4.
- 42 “Fermi-surface-dependent superconducting gap in C_6Ca ”
 K. Sugawara, T. Sato, and T. Takahashi
Nature Physics **5** (2009) 40-43.
- 43 “High-resolution photoemission study of NaV_2O_4 ”
 T. Qian, K. Nakayama, Y. J. Sun, T. Sato, T. Takahashi, K. Yamaura, and E. Takayama-Muromachi
J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 024709-1-4.
- 44 “Electronic structure of heavily electron-doped $\text{BaFe}_{1.7}\text{Co}_{0.3}\text{As}_2$ studied by angle-resolved photoemission”
 Y. Sekiba, T. Sato, K. Nakayama, K. Terashima, P. Richard, J. H. Bowen, H. Ding, Y.-M. Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, and T. Takahashi
New J. Phys. **11** (2009) 025020-1-8.
- 45 “Superconducting-gap symmetry of $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
 K. Nakayama, T. Sato, P. Richard, Y.-M. Xu, Y. Sekiba, S. Souma, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, H. Ding, and T. Takahashi
Europhys. Lett. **85** (2009) 67002-1-5
- 46 “Evolution of pairing-induced pseudogap from superconducting gap in $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ ”
 K. Nakayama, T. Sato, Y. Sekiba, K. Terashima, P. Richard, T. Takahashi, K. Kudo, N. Okumura, T. Sasaki, and N. Kobayashi
Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 227006-1-4.
- 47 “Fermi surface nesting induced strong pairing in iron-based superconductors”
 K. Terashima, Y. Sekiba, J. H. Bowen, K. Nakayama, T. Kawahara, T. Sato, P. Richard, Y.-M. Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, H. Ding, and T. Takahashi
Proc. Natl. Acad. Sci. **106** (2009) 7330-7334.
- 48 “Band structure and Fermi surface of an extremely overdoped iron-based superconductor KFe_2As_2 ”
 T. Sato, K. Nakayama, Y. Sekiba, P. Richard, Y.-M. Xu, S. Souma, T. Takahashi, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, and H. Ding
Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 047002-1-4.

- 49 “Magnetic Phase Transition of CeSb Studied by Low-Energy Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”
A. Takayama, S. Souma, T. Sato, T. Arakane, and T. Takahashi
J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 073702-1-4.
- 50 “Doping dependence of superconducting-gap anisotropy in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ”
K. Nakayama, T. Sato, K. Terashima, T. Arakane, T. Takahashi, M. Kubota, K. Ono, T. Nishizaki, Y. Takahashi, and N. Kobayashi
Phys. Rev. B **79** (2009) 140503-1-5.
- 51 “Peculiar Rashba Splitting Originating from the Two-Dimensional Symmetry of the Surface”
K. Sakamoto, H. Kakuta, K. Sugawara, K. Miyamoto, A. Kimura, T. Kuzumaki, N. Ueno, E. Annese, J. Fujii, A. Kodama, T. Shishidou, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Sato, T. Takahashi, and T. Oguchi
Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 156801-1-4.
- 52 “Metal-insulator transition of Na_xWO_3 studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
S. Raj, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, D. D. Sarma, and P. Mahadevan
Mod. Phys. Lett. B **23** (2009) 2819-2814.
- 53 “Reconstruction of Fermi surface and anisotropic excitation gap of $\text{Na}_{0.5}\text{CoO}_2$ ”
T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, T. Fujii, and A. Asamitsu
Phys. Rev. B **80** (2009) 081101R-1-4.
- 54 “Observation of Dirac Cone Electronic Dispersion in BaFe_2As_2 ”
P. Richard, K. Nakayama, T. Sato, M. Neupane, Y.-M. Xu, J. H. Bowen, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, X. Dai, Z. Fang, H. Ding, and T. Takahashi
Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 137001-1-4.
- 55 “Direct evidence for the Dirac-cone topological surface states in the ternary chalcogenide TlBiSe_2 ”
T. Sato, K. Segawa, H. Guo, K. Sugawara, S. Souma, T. Takahashi, and Y. Ando,
Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 136802-1-4.
- 56 “Direct evidence for cage conduction band in superconducting cement $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ by low-energy high-resolution photoemission spectroscopy”
S. Souma, T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, S. W. Kim, S. Matsuishi, and H. Hosono
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 103704-1-4.
- 57 “Ultrahigh-resolution spin-resolved photoemission spectrometer with a mini Mott detector”
S. Souma, A. Takayama, K. Sugawara, T. Sato, T. Takahashi
Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 095101-1-4
- 58 “Pseudogap of charge-density-wave compound SmNiC_2 studied by high-resolution photoemission spectroscopy”
T. Sato, S. Souma, K. Nakayama, T. Takahashi, S. Shimomura, and H. Onodera
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 044707-1-4.

- 59 “Evidence for the transition of Fermi surface topology in highly-doped Na_xCoO_2 ”
T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, T. Fujii, and A. Asamitsu
Phys. Rev. B **81** (2010) 115132-1-4.
- 60 “Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of the Iron-Chalcogenide Superconductor”
 $\text{Fe}_{1.03}\text{Te}_{0.7}\text{Se}_{0.3}$: Strong Coupling Behavior and the Universality of Interband Scattering”
K. Nakayama, T. Sato, P. Richard, T. Kawahara, Y. Sekiba, T. Qian, G. F. Chen, J. L. Luo,
N. L. Wang, H. Ding, and T. Takahashi
Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 197001-1-4.
- 61 “Angle-resolved photoemission study of heavily electron-doped $\text{BaFe}_{2-x}\text{Co}_x\text{As}_2$ ”
Y. Sekiba, T. Sato, K. Nakayama, K. Terashima, P. Richard, J. H. Bowen, H. Ding, Y.-M.
Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, and T. Takahashi
Physica C, *in press*.
- 62 “High-resolution ARPES study of electron-doped Fe-based superconductor
 $\text{BaFe}_{1.85}\text{Co}_{0.15}\text{As}_2$ ”
T. Kawahara, K. Terashima, Y. Sekiba, J. H. Bowen, K. Nakayama, T. Sato, P. Richard,
Y.-M. Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, H. Ding, and T. Takahashi
Physica C, *in press*.
- 63 “Xenon-plasma-light ultrahigh-resolution ARPES study of low-energy single particle
excitation gap in $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ ”
K. Nakayama, T. Sato, Y. Sekiba, K. Terashima, P. Richard, K. Kudo, N. Okumura, T.
Sasaki, N. Kobayashi, and T. Takahashi
Physica C, *in press*.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1 「グラファイトにおける準粒子とエッジ局在状態」
菅原克明、佐藤宇史、高橋 隆
固体物理、Vol.42 (2007) 903-910.
- 2 「キセノンプラズマ発光によるバルク敏感高分解能光電子分光」
相馬清吾、佐藤宇史、高橋 隆
応用物理学会薄膜・表面物理分科会ニューズレター Vol.132 (2007) 27-33.
- 3 「角度分解光電子分光で見た高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ のバルク・表面電子状態」
中山耕輔、佐藤宇史、高橋 隆
PF News、Vol. 26 (2008) 22-25.
- 4 「角度分解光電子分光による鉄系超伝導体 $(\text{Ba},\text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ の多重超伝導ギャップ」
佐藤宇史、H. Ding、相馬清吾、高橋 隆
固体物理、Vol. 43, No. 8 (2008) 499-506.
- 5 「黒鉛超伝導体のメカニズムを解明」
佐藤宇史、菅原克明、高橋 隆
技術総合誌 OHM、Vol. 96, No. 4 (2009) 8-9.
- 6 高橋 隆
「グラファイトで超伝導の起こるメカニズム」
パリテイ、Vol. 24, No. 9 (2009) 42-47.
- 7 「グラフェンの光電子分光」
菅原克明、佐藤宇史、高橋 隆
グラフェンの機能と応用展望 シーエムシー出版 (2009) 102-110.
- 8 「 C_6Ca の層間電子超伝導」
菅原克明、佐藤宇史、高橋 隆
日本物理学会誌、Vol. 65 (2010) 256-259.
- 9 「鉄系超伝導のクーパー対の対称性」
佐藤宇史
パリテイ、Vol. 25, No. 1 (2010) 16-18.
- 10 T. Sato and T. Takahashi
"Angle-resolved photoemission spectroscopy of graphene, graphite, and related compounds"
Comprehensive Semiconductor Science & Technology, *in press*.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 15 件、国際会議 17 件)

- 1 “Extremely low energy photoemission by a laboratory source”
Takashi Takahashi (Tohoku Univ.)
日本物理学会 (62 回年次大会)、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日
- 2 “High-resolution ARPES study of many-body interactions in high- T_c cuprate superconductors”
Takashi Takahashi (Tohoku Univ.)
8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors, Dresden, Germany, July 9-14, 2006
- 3 “Novel electronic states of metal surfaces studied by ultrahigh-resolution photoemission”
Takafumi Sato (Tohoku Univ.)
5th COE International Symposium, Sendai, February 14-16, 2007
- 4 “Many-body interactions in hole-doped high- T_c cuprates studied by high-resolution ARPES”
Takafumi Sato (Tohoku Univ.)
8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Sendai, Japan, August 20-24, 2007
- 5 “Normal and superconducting state gap in electron-doped cuprates studied by high-resolution ARPES”
Hiroaki Matsui (Tohoku Univ.)
8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Sendai, Japan, August 20-24, 2007
- 6 “Anomalous electronic states of graphite and related materials”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES07), Dresden, Germany, April 23-27, 2007
- 7 “Autocorrelation analyses of photoemission data and FT-STs experiments”
Kensei Terashima (Tohoku Univ.)
日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 8 “Superconducting gap and pseudogap of $\text{La}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{FeAs}$ studied by high-resolution photoemission spectroscopy”
Takafumi Sato (Tohoku Univ.)
International Symposium on Fe-Oxipnictide Superconductors, Tokyo, June 28-29, 2008
- 9 “Electronic structure of $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ studied by high-resolution ARPES”
Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)
Beijing International Workshop on Iron (Nickel)-Based Superconductors, Beijing, China, October 17-19, 2008
- 10 “High-resolution ARPES of novel superconductors”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
Tohoku-Fudan Joint Workshop, Shanghai, China, November 13-14, 2008.
- 11 “Pairing symmetry of electron- and hole-doped iron-based superconductors studied by high-resolution ARPES”
Takafumi Sato (Tohoku Univ.)

International Workshop on the Search for New Superconductors – Frontier and Future –,
Shonan, Japan, May 12-16, 2009

- 12 “Superconducting gap symmetry of iron-based superconductors studied by ARPES”
Takafumi Sato (Tohoku Univ.)
8th Asia-Pacific Workshop on Novel Quantum Materials / 2nd Workshop for A3 Foresight
Program, Seoul, Korea, July 5-7, 2009
- 13 “ARPES of CaC₆”
Takahashi Takashi (Tohoku Univ.)
9th international conference on Materials and mechanisms of superconductivity and high
temperature superconductor, Tokyo, September 7-12, 2009
- 14 “Development of bulk-sensitive spin-resolved ultrahigh-resolution photoemission
spectrometer”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
2nd UVSOR Workshop on Low-Energy Photoemission of Solids using Synchrotron
Radiation, Okazaki, October 3-4, 2009
- 15 “Spin-resolved ultrahigh-resolution ARPES study of Rashba effect on semi-metal
surface”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
The 1st GCOE international Symposium, Sendai, February 18-19, 2009
- 16 “Spin-resolved ultrahigh-resolution ARPES study of Rashba effect on semi-metal
surface”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
The 14th Hiroshima international Symposium on Synchrotron Radiation, Hiroshima Univ.,
March 4-5, 2010
- 17 “High-Resolution Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Novel Functional
Materials” (plenary)
Takahashi Takashi (Tohoku Univ.)
The 2010 WPI Advanced Institute for Material Research (WPI-AIMR) Annual Workshop,
Sendai, March 25-27, 2010.
- 18 “Ultrahigh-resolution spin-resolved ARPES of novel low-dimensional systems”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
Electronic, transport, and optical properties of low-dimensional systems (WS10-ETOLDS),
Valencia, Spain, May 31-June 4, 2010.
- 19 "Low-energy excitations of electron- and hole-doped iron-based superconductors studied
by high-resolution ARPES"
Takafumi Sato (Tohoku Univ.)
International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)
Shanghai, China, May 24-28, 2010.
- 20 “高温超伝導体の光電子分光”
高橋 隆 (東北大学)
日本物理学会(2006年秋季大会)、千葉大学、2006年9月23-26日
- 21 “超高分解能光電子分光 -フェルミ面微細電子構造と準粒子-”
佐藤宇史 (東北大学)
第67回応用物理学会学術講演会、立命館大学、2006年8月29日-9月1日

- 22 “V 族半金属表面の超高分解能角度分解光電子分光”
佐藤宇史 (東北大学)
日本物理学会 (第 63 回年次大会)、近畿大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 23 “光電子分光によるグラフェンおよび関連物質の電子構造の解明”
菅原克明 (東北大学)
日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 24 “鉄ニクタイト超伝導体の高分解能角度分解光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)
PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」、高エネルギー加速器
研究機構、2008 年 12 月 17-18 日
- 25 “銅酸化物高温超伝導体の高分解能角度分解光電子分光”
中山耕輔 (東北大学)
PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」、高エネルギー加速器
研究機構、2008 年 12 月 17-18 日
- 26 “一次元 In 鎖の金属絶縁体転移の起源:角度分解光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)
第一回界面科学研究会 -表面・界面制御による新物質相の探索-、岡山大学、2008
年 12 月 19-20 日
- 27 “新型鉄系高温超伝導体における微細電子構造と超伝導機構”
佐藤宇史 (東北大学)
第22回日本放射光学会年会、東京大学、2009年1月10-12日
- 28 “高温超伝導体と高分解能光電子分光の進歩”
高橋隆 (東北大学)
第25回PFシンポジウム、つくば市、2009年3月24-25日
- 29 “高分解能 ARPES で見た鉄系高温超伝導体の電子構造”
佐藤宇史 (東北大学)
日本物理学会 (2009 年秋季大会)、熊本大学、2009 年 9 月 25-28 日
- 30 “SiC 表面に作成したグラフェンの高分解能 ARPES”
菅原克明 (東北大学)
東京大学物性研究所短期研究会「ディラック電子系の物性—グラフェンおよび
関連物質の最近の研究」、東京大学物性研究所、2009 年 10 月 12-24 日
- 31 “高分解能光電子分光でみる強相関微細電子構造”
相馬清吾 (東北大学)
日本物理学会(第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 32 “SiC 上グラフェンの光電子分光”
菅原克明 (東北大学)
日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日

② 口頭発表 (国内会議 56 件、国際会議 5 件)

- 1 “Impurity-effect on the electronic structure in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
Kensei Terashima (Tohoku Univ.)
American Physical Society, March Meeting, Baltimore, USA, March 13-17, 2006
- 2 “Origin of shadow band in high- T_c cuprate superconductors studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)
19th International Symposium on Superconductivity, Nagoya, October 30-November 1, 2006
- 3 “Single-particle excitation gap in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ studied by high-resolution angle-resolved photoemission”
Y. X. Xiao (Tohoku Univ.)
19th International Symposium on Superconductivity, Nagoya, October 30-November 1, 2006
- 4 “Quasiparticle lifetime and edge localized states of graphite studied by high-resolution ARPES”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
American Physical Society, March meeting, New Orleans, USA, March 10-14, 2008
- 5 “Electronic structure of graphene/SiC(0001) studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.), Graphene Tokyo 2009, Tokyo, July, 2009
- 6 “Transition of Fermi surface topology in highly-doped Na_xCoO_2 studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”,
Toshiyuki Arakane (Tohoku Univ.)
APS March meeting 2010, Portland, USA, March 15-19, 2010
- 7 “Fermi surface and superconducting gap of $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ superconductor studied by high-resolution ARPES”,
Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)
APS March meeting 2010, Portland, USA, March 15-19, 2010
- 8 “Electronic structure of single- and multi-layer graphene on SiC(0001) studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
K. Kanetani (Tohoku Univ.)
Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, August 3, 2010
- 9 “Electronic structure of Li-doped graphene on SiC(0001) studied by high-resolution ARPES”
K. Sugawara (Tohoku Univ.)
Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, August 3, 2010
- 10 “As(111)の高分解能 ARPES”
菅原克明 (東北大学)、日本物理学会(2006 年秋季大会)、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日
- 11 “ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ におけるフェルミ面微細電子構造”
中山耕輔 (東北大学)、日本物理学会(2006 年秋季大会)、千葉大学、2006 年 9 月

23-26 日

- 12 “ La_2C_3 の超伝導ギャップ：超高分解能光電子分光”
菅原克明 (東北大学)、日本物理学会(2007 年春季大会)、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日
- 13 “ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ における電子状態のドーピング依存性：高分解能 ARPES”
中山耕輔 (東北大学)、日本物理学会(2007 年春季大会)、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日
- 14 “キセノンプラズマ発光による低温超伝導体のバルク敏感超高分解能光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (62 回年次大会)、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日
- 15 “キセノンプラズマ発光による Bi 系高温超伝導体のバルク敏感超高分解能光電子分光”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (62 回年次大会)、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日
- 16 “キセノンプラズマ発光による $\text{Co}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ のバルク敏感超高分解能光電子分光”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (62 回年次大会)、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日
- 17 “キセノンプラズマ発光による不純物置換 Bi_{2212} のバルク敏感超高分解能光電子分光”
寺嶋健成 (東北大学)、日本物理学会 (62 回年次大会)、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日
- 18 “キセノンプラズマ発光による SmNiC_2 の高分解能光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (63 回年次大会)、近畿大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 19 “キセノンプラズマ発光 ARPES による不純物置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の超伝導ギャップ”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (63 回年次大会)、近畿大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 20 “キセノンプラズマ発光によるセメント超伝導体 $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(4e^-)$ の高分解能光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (63 回年次大会)、近畿大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 21 “キセノンプラズマ発光 ARPES による Bi_{2201} の超伝導ギャップと擬ギャップ”
中山耕輔 (東北大学)、日本物理学会 (63 回年次大会)、近畿大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 22 “キセノンプラズマ発光による Yb_4As_3 の高分解能光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 3 月 23-26 日

- 23 “キセノンプラズマ発光による CeSb の高分解能 ARPES”
高山あかり (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 24 “キセノンプラズマ発光 ARPES による Pb 置換 Bi2201 の擬ギャップ”
中山耕輔 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 25 “La(O_{1-x}F_x)FeAs の高分解能光電子分光”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 26 “擬一次元ハーフメタル NaV₂O₄ の高分解能光電子分光”
Tian Qian (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 3 月 23-26 日
- 27 “キセノンプラズマ発光 ARPES による Bi2201 の超伝導ギャップと擬ギャップ”
中山耕輔 (東北大学)、日本物理学会 (63 回年次大会)、近畿大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 28 “キセノンプラズマ発光による Yb₄As₃ の高分解能光電子分光”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 29 “キセノンプラズマ発光による CeSb の高分解能 ARPES”
高山あかり (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 30 “キセノンプラズマ発光 ARPES による Pb 置換 Bi2201 の擬ギャップ”
中山耕輔 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 31 “La(O_{1-x}F_x)FeAs の高分解能光電子分光”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 32 “擬一次元ハーフメタル NaV₂O₄ の高分解能光電子分光”
Qian Tian (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 33 “高分解能 ARPES による Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂(T_c=37 K)における超伝導ギャップの直接観測”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 34 “(Ba,K)Fe₂As₂ における多体相互作用の起源:角度分解光電子分光”
Pierre Richard (東北大学)、日本物理学会 (2008 年秋季大会)、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日
- 35 “ミニモット検出器を用いたスピン分解光電子分光装置の開発”

- 相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (第 64 回年次大会)、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日
- 36 “キセノンプラズマ発光 ARPES による CeSb のバンド構造の温度変化”
高山あかり (東北大学)、日本物理学会 (第 64 回年次大会)、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日
- 37 “鉄系高温超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ の超伝導ギャップの直接観測 : 高分解能 ARPES”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (第 64 回年次大会)、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日
- 38 “単層および多層グラフェンの作成と高分解能 ARPES”
伊勢一樹 (東北大学)、日本物理学会 (第 64 回年次大会)、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日
- 39 “ CaC_6 の超伝導ギャップと電子-格子相互作用 : 高分解能 ARPES”
菅原克明 (東北大学)、日本物理学会 (第 64 回年次大会)、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日
- 40 “ミニモット検出器を用いたスピン分解光電子分光装置の開発 : II”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (2009 年秋季大会)、熊本大学、2009 年 9 月 25-28 日
- 41 “ミニモットスピン検出器の開発と V 族半金属表面の Rashba 効果の観測”
高山あかり (東北大学)、日本物理学会 (2009 年秋季大会)、熊本大学、2009 年 9 月 25-28 日
- 42 “グラフェンの高品質化と高分解能 ARPES”
菅原克明 (東北大学)、日本物理学会 (2009 年秋季大会)、熊本大学、2009 年 9 月 25-28 日
- 43 “ミニモット検出器を用いたスピン分解光電子分光装置の開発 : III”
相馬清吾 (東北大学)、日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 44 “Bi2201 におけるバルクの擬ギャップ : 高分解能 ARPES”
佐藤宇史 (東北大学)、日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 45 “LaFeAsO のキセノンプラズマ励起 ARPES”
川原卓磨 (東北大学)、日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 46 “Bi 薄膜の超高分解能スピン分解 ARPES”
高山あかり (東北大学)、日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 47 “Li ドープグラフェン / SiC の高分解能 ARPES”
菅原克明 (東北大学)、日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日

- 48 “CeRu₂Al₁₀のキセノンプラズマ励起光電子分光”
相馬清吾 (東北大学), 日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 49 “単層及び多層グラフェンの高分解能 ARPES”
金谷康平 (東北大学), 日本物理学会 (第 65 回年次大会)、岡山大学、2010 年 3 月 20-24 日
- 50 “CeRu₂Al₁₀の高分解能光電子分光”
相馬清吾 (東北大学), 新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ、高知大学、2010 年 8 月 1-2 日
- 51 “Ba122 系における電子-ホール非対称性：光電子分光”
佐藤宇史 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 52 “CaFe₂P₂の高分解能 ARPES”
川原卓磨 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 53 “オーバードープ Ba_{0.3}K_{0.7}Fe₂As₂の高分解能 ARPES”
中山耕輔 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 54 “111 系鉄ニクタイト超伝導体 NaFeAs の高分解能 ARPES”
梅澤浩太郎 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 55 “Li ドープした二層グラフェンの高分解能 ARPES”
金谷康平 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 56 “水素終端した SiC 上の 2 層グラフェンの高分解能 ARPES”
菅原克明 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 57 “ミニモット検出器を用いたスピン分解光電子分光装置の開発：IV”
相馬清吾 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 58 “高分解能 ARPES による Na_xCoO₂ の 3 次元電子構造のドーピング量依存性”
荒金俊行 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 59 “High-resolution ARPES study on Bi_{1-x}Sb_x (x = 0.023)”
Hua Guo (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日
- 60 “Bi(111)表面のスピン分解微細電子構造”

高山あかり (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日

- 61 “CeSb の微細電子構造 : キセノンプラズマ発光 ARPES”
高坂研一郎 (東北大学), 日本物理学会 (2010 秋季大会)、大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日

③ ポスター発表 (国内会議 3 件、国際会議 21 件)

- 1 “Electronic structure of LaAgSb₂ and CeAgSb₂ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Toshiyuki Arakane (Tohoku Univ.)
17th International Conference on Magnetism, Kyoto, August 20-25, 2006
- 2 “Impurity effect on electronic structure of La_{1.85}Sr_{0.15}CuO₄ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Kensei Terashima (Tohoku Univ.)
17th International Conference on Magnetism, Kyoto, August 20-25, 2006
- 3 “Anisotropic spin-orbit interaction in Sb(111) surface studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
17th International Conference on Magnetism, Kyoto, August 20-25, 2006
- 4 “Metal-insulator transition in sodium tungsten bronzes, Na_xWO₃, studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
Satyabrata Raj (Tohoku Univ.)
17th International Conference on Magnetism, Kyoto, August 20-25, 2006
- 5 “Electronic structure of M_xCoO₂(M: Na, K, Rb) studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Toshiyuki Arakane (Tohoku Univ.)
19th International Symposium on Superconductivity, Nagoya, October 30-November 1, 2006
- 6 “Ultrahigh-resolution angle-resolved photoemission study of group-V semimetal surfaces”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
5th COE International Symposium, Sendai, February 14-16, 2007
- 7 “Effect of Zn impurities on the electronic structure of La_{1.85}Sr_{0.15}CuO₄ studied by high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Kensei Terashima (Tohoku Univ.)
8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Sendai, August 20-24, 2007
- 8 “High-resolution angle-resolved photoemission study of bulk electronic states in YBa₂Cu₃O_{7-δ}”
Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)
8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Sendai, August 20-24, 2007
- 9 “Quasiparticle lifetime in graphite studied by ultrahigh-resolution ARPES”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Sendai,

August 20-24, 2007

- 10 “Band structure and Fermi surface of heavy Fermion compounds Ce_2TIn_8 (T=Co, Rh, In) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”
Seigo Souma (Tohoku Univ.)
2007 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Houston, USA, May 13-18, 2007
- 11 “Universal character of CoO_2 plane studied by high-resolution angle-resolved photoemission”
Toshiyuki Arakane (Tohoku Univ.)
2007 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Houston, USA, May 13-18, 2007
- 12 “Low-energy excitations in graphite studied by ultrahigh-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
2007 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Houston, USA, May 13-18, 2007
- 13 “Ultrahigh-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy of Bi(111)”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
15th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics, Berlin, Germany, July 19-August 3, 2007
- 14 “Electronic structure of C_6Ca studied by ultrahigh-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy”
Katsuaki Sugawara (Tohoku Univ.)
9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, Tokyo, September, 2009
- 15 “Pairing Origin of a Small Pseudogap in $Bi_2Sr_2CuO_6$ Studied by Ultrahigh-Resolution Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”
Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)
9th international conference on Materials and mechanisms of superconductivity and high temperature superconductor, Tokyo, September 7-12, 2009
- 16 “Angle-Resolved Photoemission Study of Heavily Electron-Doped $BaFe_{2-x}Co_xAs_2$ ”
Yoichi Sekiba (Tohoku Univ.)
9th international conference on Materials and mechanisms of superconductivity and high temperature superconductor, Tokyo, September 7-12, 2009
- 17 “High-resolution ARPES study of electron-doped Fe-based superconductor $BaFe_{1.85}Co_{0.15}As_2$ ”
Takuma Kawahara (Tohoku Univ.)
9th international conference on Materials and mechanisms of superconductivity and high temperature superconductor, Tokyo, September 7-12, 2009
- 18 “Low-energy angle-resolved photoemission spectroscopy of Fe-based high- T_c superconductor $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ ”
Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)
2nd UVSOR Workshop on Low-Energy Photoemission of Solids using Synchrotron Radiation, Okazaki, October 3-4, 2009
- 19 “Three-dimensional electronic structure in highly-doped $NaxCoO_2$ studied by

angle-resolved photoemission spectroscopy”

Toshiyuki Arakane (Tohoku Univ.)

International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)
Shanghai, China, May 24-28, 2010.

- 20 “Evidence for the precursor pairing above T_c in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ revealed by ultrahigh-resolution ARPES”

Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)

International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)
Shanghai, China, May 24-28, 2010.

- 21 “Low-energy electronic structure of $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ and $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ superconductors studied by high-resolution ARPES”

Kosuke Nakayama (Tohoku Univ.)

International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)
Shanghai, China, May 24-28, 2010.

- 22 “鉄系高温超伝導体 $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ の超高分解能 ARPES”

関場陽一 (東北大学)

PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」、高エネルギー加速器研究機構、2008年12月17-18日

- 23 “層状コバルト酸化物 $\text{Na}_{0.5}\text{CoO}_2$ の高分解能角度分解光電子分光”

荒金俊行 (東北大学)

PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」、高エネルギー加速器研究機構、2008年12月17-18日

- 24 “High-resolution photoemission study of quasi one-dimensional half-metal NaV_2O_4 ”

Tian Qian (東北大学)

PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」、高エネルギー加速器研究機構、2008年12月17-18日

(4)受賞・報道等

①受賞

- 1 第47回原田研究奨励賞 2007年5月11日

相馬清吾 (東北大学)

“高分解能光電子分光による金属二ホウ化物および六ホウ化物の電子構造の研究”

- 2 山下太郎学術研究奨励賞 2007年6月8日

佐藤宇史 (東北大学)

“超高分解能光電子分光装置の開発と高温超伝導機構の研究”

- 3 第2回日本物理学会若手奨励賞 2008年3月26日

佐藤宇史 (東北大学)

“高分解能光電子分光装置の開発と銅酸化物高温超伝導体の電子構造の研究”

- 4 平成21年度科学技術分野の文部科学大臣表彰：若手科学者賞 2009年4月17日

佐藤宇史 (東北大学)

“銅酸化物及び鉄系高温超伝導体の電子構造の研究”

②マスコミ(新聞・TV等)報道

- 1 “キセノンプラズマ放電管の開発”
日経産業新聞 (2007年12月27日)
日刊工業新聞 (2007年12月27日)
電波新聞 (2008年1月7日)
- 2 “鉄系オキシニクタイト高温超伝導体の超伝導電子の直接観測”
日刊工業新聞 (2008年6月10日)
河北新報 (2008年6月10日)
科学新聞 (2008年6月27日)
- 3 “鉄系高温超伝導体の超伝導電子対の対称性”
科学新聞 (2008年8月1日)
- 4 “黒鉛超伝導体のメカニズム解明に成功”
河北新報 (2008年11月10日)
読売新聞 (2008年11月10日)
日刊工業新聞 (2008年11月13日)
日経産業新聞 (2008年11月13日)
産経新聞 (2008年11月14日)
科学新聞 (2008年11月14日)
- 5 “電子系鉄系超伝導体の超伝導電子対の対称性の直接決定に成功”
日刊産業新聞 (2009年4月7日)
化学工業日報 (2009年4月8日)
日経産業新聞 (2009年4月17日)
科学新聞 (2009年4月24日)
河北新報 (2009年5月3日)
- 6 “時間反転対称性を必要としない Rashba 効果を発見”
中国新聞 (2009年10月6日)
- 7 “鉄系超伝導母物質におけるディラック電子の発見”
日経産業新聞 (2010年3月29日)
- 8 “新型の超高分解能スピン分解光電子分光装置を開発”
日経産業新聞 (2010年9月6日)
日刊工業新聞 (2010年9月6日)
- 9 “セメント超伝導体の電気伝導メカニズムを解明”
日経産業新聞 (2010年9月28日)
朝日小学生新聞 (2010年10月29日)
河北新報 (2010年9月29日)
- 10 “新型トポロジカル絶縁体を発見”
科学新聞 (2010年10月1日)

科学新聞 (2010年10月8日)
河北新報 (2010年10月11日)

- 11 “鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se})$ の超伝導対称性を直接決定”
日経産業新聞 (2010年11月2日)
科学新聞 (2010年11月5日)

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

| 年月日 | 名称 | 場所 | 参加人数 | 概要 |
|-------------------|---|------------|------|--|
| 2007年8月 19-24日 | 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors | 仙台 | 250名 | 先端的分光技術を用いた高温超伝導体研究についての国際会議を主催した。 |
| 2007年9月5日 | 大学模擬講義 | 秋田県立横手高等学校 | 20名 | 高校2年生を対象に電子と超伝導についての大学模擬講義を行った。 |
| 2009年9月2日 | 大学模擬講義 | 秋田県立横手高等学校 | 20名 | 高校2年生を対象に電子と超伝導についての大学模擬講義を行った。 |
| 2009年12月5日 | 土曜ゼミナール講師 | 宮城県宮城野高校 | 35名 | 高校1,2年生を対象に電子と超伝導についての出前授業を行った。 |
| 2010年7月 27,28日 | 東北大学理学部オープンキャンパス 体験授業 | 東北大学 | 200名 | 東北大学理学部オープンキャンパスにおいて、主に高校生を対象に電子と超伝導などについての講義を行った。 |
| 2010年9月1日 | 大学模擬講義 | 秋田県立横手高等学校 | 20名 | 高校2年生を対象に電子と超伝導についての大学模擬講義を行った。 |
| 2010年10月 26日 | 大学セミナー | 宮城県仙台二華高校 | 40名 | 高校2,3年生を対象に電子と超伝導についての出前授業を行った。 |
| 2010年11月 19日 | サイエンスパートナーシッププロジェクト | 神奈川県藤沢清流高校 | 35名 | 高校3年生を対象に電子と超伝導についての講義を行った。 |

§ 7 結び

最初に、本研究に対する JST-CTREST の援助に心から感謝致します。

本研究は、光電子分光法を、その弱点と言われてきた「表面敏感性」と「スピン分解の困難」を克服して、物性・材料科学研究における基盤的実験法の一つとして確立することを目指して開始したものです。キセノンプラズマ放電管はその中核を成す装置であり、その開発の成否が本研究の最初の挑戦と言えます。「キセノンプラズマからの発光を利用すれば、バルク敏感の超高分解能測定が可能となる」との着想を持ち、本開発研究に着手しました。しかし、「重希ガスであるキセノンのプラズマを発生させることは、キセノンイオンによる管壁のスパッターを誘起させることで、放電管を破壊することになる」との当初の危惧どおり、試作1号機の発光寿命は、せいぜい数分から数十分でした。装置を分解してキャピラリー内部を見ると、金属が内壁にべったりと付着しており、確かにスパッターが起きていることを確信せざるを得ない状況でした。このスパッターを押さえ込み、長時間の安定発光を得るにはどうしたら良いかと、研究チーム内で議論して知恵を絞り合い、装置を作っては壊して、試作2号機、3号機と、考えられる限りのアイデアを試して改良を重ね、4号機にしてようやく、実用に耐えられる 1,000 時間以上の安定的発光を達成することに成功しました。開発したキセノンプラズマ放電管については、装置開発の国際的専門誌である Review of Scientific Instruments に発表しました。また、スピン分解を行う小型モット検出器についても、開発当時は、高電圧印加時における放電ノイズや効率不足等の多くの問題がありましたが、要素技術における問題をひとつひとつクリアする事によって、スピン分解光電子分光装置として世界最高のエネルギー分解能 8meV を達成する事に成功し、Review of Scientific Instruments に論文を発表することができました。また、本装置を活用した光電子分光実験も着々と進んでおり、鉄系超伝導体、グラフェン、トポロジカル絶縁体などのスピントロニクス関連物質で重要な成果が出ております。開発した装置とそれを用いた光電子分光実験の成果について、いくつかの国内国際会議で招待講演も含めて講演を行いました。国内外からの装置の見学や技術的問い合わせも多く受けており、学会や研究者さらに産業界に大きなインパクトを与えたものと自負しております。

今後は、開発した装置を利用した光電子分光研究をより大きく展開し、スピントロニクス関連新機能物質や超伝導物質に代表される新機能性材料における電子状態の基盤解析を中心に据えた研究を行っていきたいと考えております。

最後になりますが、本研究を遂行するに当たり、研究統括・領域アドバイザーの先生方から多くの有益なご助言を頂いておりますことに感謝いたします。