

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
研究課題
「高繰り返しコヒーレント軟X線光源の開発と光電子
科学への新しい応用」

研究終了報告書

研究期間 平成20年10月～平成26年3月

研究代表者：辛 埴
(東京大学・物性研究所・教授)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

近年、レーザー技術の進歩は著しい。特に、Yb ファイバーレーザーの出現や高調波技術の進歩に伴い、従来のレーザーではほとんど不可能であった軟X線領域での物性研究が可能になりつつある。

本 CREST の小林グループでは、まず、MHz 以上の高繰り返しを可能にする Yb ファイバーレーザーの特性を最大限に生かし、物性研究に適したピコ秒からフェムト秒までの軟X線コヒーレント光源を開発した。KBBF 非線形結晶を用いて準 CW、ピコ秒の 8eV 光(波長 154nm)を発生させることができた。サブマイクロ W の出力を実現し、下記の光電子分光に使用することで十分実用化できる強度であることを示した。8eV 光は、KBBF 単結晶の吸収端ぎりぎりであるため、本研究においては、KBBF デバイスの開発がキーテクノロジーであることが判明した。そこで、8eV 発生用の KBBF 単結晶およびプリズムデバイスの開発を行う渡部グループを平成 24 年度に新たに増設した。非線形結晶およびレーザー技術の成熟とともに、当初発生した 8eV のパワーは現在までにおよそ2桁の増強を達成している。

また、フェムト秒 VUV 光源として、高繰り返し高次高調波光源の開発を行った。通常 kHz 繰り返しで行われる高調波発生を 80MHz で実現するためには超高平均出力レーザーシステムが必要となる。Yb ファイバーレーザーを外部共振器中で数 kW にまで増強することによりこれを実現した。波長にすると 60nm 程度まで発生している。高繰り返しのコヒーレント VUV 発生ではスペクトル構造が光周波数コムとなっているためコムの1本のみを使った分光は、VUV 領域の狭線幅連続レーザーをつかった分光と等価であり、この領域での超精密分光を可能とする。これを用いて Xe 原子の基底状態から第一励起状態への遷移周波数をこれまでよりも数 10 倍の精度で決定することができた。

一方、辛グループでは、光電子分光が真空紫外線線以上の高エネルギー光にのみ可能な物性実験であることに着目し、レーザーと光電子科学の両者を結びつけた新しい光科学を目指した。本研究では究極のエネルギー分解、時間分解を追求し、世界最高の性能とそれを用いた新しい物性研究の開発を行った。具体的には、①7eV の準 CW レーザーを用いて、超高分解能光電子分光を開発し、固体中準粒子のエネルギーと運動量を明らかにし、物性研究に貢献をする。特に、低温のシールドを完璧にすることによって極低温化を進め、1.0K の極低温で、実験が可能になった。また、繰り返し数を最初の 80MHz から 1GHz の高繰り返しにすることによってスペースチャージ効果を抑え、70 μ eV の世界最高の超高分解能を達成することが出来た。極限レーザーを用いた超高分解能光電子分光システムを用いて、有機材料、スピントロニクス材料や超伝導体材料などの多彩な物質研究に、展開している。特に、最近日本で発見された有望な超伝導材料である鉄ニクタイト超伝導体について、最適ドーブの場合はこれまで言われていた常識とは異なり、超伝導ギャップサイズが3つのフェルミ面でほとんど同じになった。このため転移温度を上げるメカニズムは軌道揺らぎであることを明らかにした。一方、正孔を最大限にドーブした KFe₂As₂においては、鉄系超伝導体で初めてノードを発見することができた。その結果超伝導の起源がスピン揺らぎであることを明らかにした。つまり、鉄系超伝導体では、スピンの揺らぎと軌道揺らぎの2種類が競合しているという特徴的な超伝導の起源を明らかにした。また、これまで不可能とされていた有機物の光電子分光実験をレーザーを用いることによって初めて可能とした。また、スピントロニクス材料の研究におけるスピン偏極による分裂の世界初の観測成功など、基礎から応用まで重要な研究成果を明らかにした。②一方、時間分解光電子分光においても大きな成果を上げた。まず、結晶を用いた 6eV の精密時間分解光電子分光と希ガスをを用いた 60eV の高エネルギーの時間分解光電子分光を開発した。2つの時間分解光電子分光を組み合わせることにより、高エネルギー分解能と高時間分解を両立し、CDW 物質、超伝導物質、トポロジカル絶縁体やグラファイトの研究を行った。

本 CREST では、レーザー光源グループと光電子グループは積極的に共同研究を行い、新しい研究領域を切り開くことを行った。その例として、小林グループで開発された準

CW8eV レーザーを用いることによって、鉄系超伝導体において、ブリルアンゾーンの端にある電子面の超伝導ギャップを測定することが可能になった。また、小林研で開発された超高繰り返し 6eV 高調波レーザーにより、超精密フェムト秒時間分解光電子分光を開発し、トポロジカル絶縁体などの研究を行う事が可能になった。当初の研究目的を十分達成することが出来た物と考えている。

一方、得られた研究内容を国民に発信することも重要であると考えており、積極的に記者発表を行った。Nature 系や Science 等に掲載された4つの論文に関して記者発表を行い、新聞に記載されることができた。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 超高分解能レーザー光電子分光による鉄系超伝導体の研究

概要: 超軟 X 線レーザーを光源とした光電子分光の分解能が超高分解能になり、極低温を達成したために、これまでできなかった低温超伝導体の超伝導ギャップの観測が可能になった。鉄系超伝導体において超伝導ギャップサイズが、フェルミ面に寄らないことを明らかにした。その結果、電子対が結合しているエネルギーの強さを調べ、軌道の揺らぎが超伝導の原因であることを明らかにした。この結果から、BCS理論と異なり、電子軌道に由来する、新しいメカニズムによって超伝導が引き起こされている可能性が示された。この成果を基に記者会見を行った。

被引用件数: 42件

Science **332**(2011) 564-567

2. 偏光依存性を利用した超高分解能レーザー光電子分光による鉄系超伝導体の研究

概要: 鉄系超伝導体は銅系超伝導体に比べて、多軌道であることが重要である。鉄系超伝導体の母物質において、角度分解光電子分光を行い、磁気構造相転移に伴い、軌道が整列している事を発見した初めての論文である。また、偏光依存性を利用して、各フェルミ面の軌道対称性を同定することが出来た。その結果、軌道が超伝導の起源にとって重要であることを示唆した。

被引用件数: 71件

Phys.Rev.Lett. **104**(2010) 057002-057006

3. 33MHz 繰り返し準cw 153nm 光源

概要: KBBF 結晶を用いた波長変換はそれまでチタンサファイアレーザーを用いて研究されてきたため、繰り返し周波数は数 kHz であった。光電子分光に有効に用いるためには 1000 倍以上の高繰り返しレーザーが必要である。今回我々は 33MHz 繰り返しの Yb ファイバーレーザーシステムを開発し、4 段の波長変換をすることにより 7 次高調波、波長 153nm の狭線幅光源を得た。非線形化粧品には KBBF を用いている。この波長は非線形結晶による位相整合のとれた波長変換としては最短波長である。

被引用件数: 5 件

Opt. Lett. **36** (2011) 1758-1760

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. レーザー光電子分光の分解能が 70 μ eV に到達した

概要: 光電子分光の分解能を 100 μ eV 程度にすることは当初の数値目標であった。70 μ eV の超高分解能を達成することにより、CREST の公約を達することができた。その結果、最近発見された鉄系超伝導体のメカニズムが明らかにされるなど、様々な物性研究に大きな威力を発揮することが明らかになった。本研究で開発された超高分解能光電子分光は物性研究分野にとって強力なツールであることが証明でき、今後の物質設計に指針を与えることが可能になる。物性研究コミュニティにあたるインパクトは極めて大きい。

2. 時間分解光電子分光

概要: 時間分解光電子分光を可能にした。その結果、光誘起相転移による新しい光誘起相の研究を進めることが出来た。また、例えば、**TaS₂** や **VO₂** の光誘起現象を明らかにした。また、固体中の電子と格子の非平衡状態での詳細な振る舞いを明らかにすることが出来た。このような非平衡状態は、触媒や、化学反応、生体内で重要な役割を果たしており、新しい研究分野に発展することが可能になった。

3. ファイバーレーザーベース VUV 光源

概要: 高エネルギー分解、高時間分解用光源としてそれぞれピコ秒およびフェムト秒 **Yb** ファイバーレーザーシステムを構築し、**KBBF** 非線形結晶およびガスターゲットによる高次高調波で **8eV** のコヒーレント光を発生させた。VUV 領域においては精密分光や時間分解分光など基礎物理の興味だけではなく、加工や光リソグラフィーの光源として非常に重要である。特に非常に線幅の狭い VUV 光源はレーザーでのみ実現可能であるため軌道放射光やランプでは困難な産業応用が可能となる。加えてファイバーレーザーは他の固体レーザーに比べ小型で安定であるため、これも産業応用に適している。

§2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

本研究は、高繰り返しレーザー光源を開発する小林グループと光電子分光を開発する辛グループの共同研究である。小林グループは100MHzのファイバーレーザーによる高調波レーザーの開発を計画し、光電子分光の発展に寄与する。一方、辛グループは光電子分光器の世界最高分解能の高分解能化と最低温度を目指した極低温化を進めた。また、フェムト秒時間分解光電子分光も目指した。レーザーと光電子科学の両者を結びつけた新しい光科学を目指すことによって、本研究では究極のエネルギー分解、時間分解を追求し、世界最高の性能とそれを用いた新しい物性研究の開発を行い、超伝導体や有機物質、スピントロニクス物質などの物質開発に貢献する。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

① 中間評価で受けた指摘や助言、それを踏まえて対応した結果について

中間評価では、「光電子分光は物性研究にとっては基本的かつ重要なツールであり、そのエネルギー分解能、空間分解能、時間分解能の3方向に向けて、先端的なレーザーを開発する研究者と、高分解能光電子分光計測を得意とする研究者が連携して、世界的にもその性能を誇ることができる光電子分光計測システムを構築したことは高く評価できる。また、レーザー光電子分光の弱点であった励起エネルギーの高エネルギー化においても世界に先駆けて成功しており、これを用いた応用研究も目覚ましいものがある。インパクトの高いジャーナルへの論文発表等も高く評価できる。今後、この計測システムを用いた物性研究の展開が大いに期待される。測定システムの実用化に向けた展開も期待できるので、知財の取得なども研究活動の一環として位置づけることを期待する。」と言う総合評価をいただいている。その後のサイトビジットなどを通じて、光源開発の小林グループと光電子測定グループの辛グループの共同研究を強化することのご助言をいただいた。ご指摘を踏まえて、2つのことを対応した。

(1) 渡部グループを新たに追加し、**KBBF** 結晶の高品質化をはかり、**8eV** の高調波レーザーを更に高出力化し、光電子分光に実際に応用出来るようにすること

(2) 100MHzのフェムト秒ファイバーレーザーを実現し、時間分解光電子分光に応用すること

(1)、(2)ともに、実用化され、新しい実験結果が生まれつつある。

② 中間報告書§2(7 の間違いでしょうか?辛). 当初の研究計画に対する進捗状況「(3) 今後の進め方、および研究成果の見通し」の記載事項に関し、研究を進めた結果について

(1) 光電子分光の開発について

A) 高分解能光電子分光

目標は 1.5K だったが、シールドの改善を更に図り、標準試料(金)以外の実際の試料の物性実験に際しても 1.0K の極低温と、70 μ eV の分解能と、目標以上を達成することが出来た。

B) 時間分解光電子分光

小林グループが新たに開発したファイバーレーザーにより、パワーアップを行い、繰り返し数をあげることにより、S/Nを向上させ、ポンプ光とプローブ光の出力を安定化させることができた。

C) 顕微光電子分光

レーザーを高出力化することによって、3 ナノメートルの高分解能を達成した。また、試料を低温化するために、ヘリウムクライオスタットを製作した。

また、いずれの装置も、装置が巨大化し、使い方が難しくなっている。それに伴い、使いやすく、故障率を下げるようにインフラ整備を積極的に行った。

(2) 高分解能光電子分光用ピコ秒レーザーの開発について

8eV の高強度化については渡部グループから供給された新結晶に置き換えることによりサブマイクロワットまで達成した。レーザーシステムを移設し、超高分解分光器に連結した。8eV光の引き回しに大変苦労し、ビームライン技術の確立に役立てることが出来た。金のサンプルについて 8eV 光源を用いて光電子分光ができることを実証した。

(3) 時間分解光電子分光用フェムト秒レーザーの開発について

フェムト秒レーザーシステムについて、80MHzの高次高調波のうち、7次高調波に着目した。波長は 147nm であるが、これは Xe の基底状態と第一励起状態との電子遷移に共鳴する。7次高調波のスペクトルはその中に 80MHz 間隔で線幅の狭い縦モードが多数並んでいる。このうちの1本のみを用いた吸収分光を行った。ドップラーフリー分光を行うためビーム状の Xe 原子と7次高調波は直角に進む。縦モード光周波数を変化させながら原子が光子を吸収したのちに自然放射光を測定することにより電子遷移周波数を同定した。この波長領域にはcwレーザーが存在しないため、これまでは絶対周波数がわからなかった領域である。

(4) 物性研究への応用について

超伝導、重い電子系、スピントロニクス、光誘起相転移など様々な物性研究に応用することができた。多くの学術誌を出版することが出来た。

③ 上記①②以外で生まれた新たな展開について

計画されていたわけではないが、時間分解光電子分光もこれまで 100kHz のチタンサファイアレーザーで行われていたところを 100MHz の Yb ファイバーレーザーの5倍高調波に置き換える試みを行った。光子エネルギーは同じ 6eV である。3 桁繰り返し周波数が上がったことによりスペースチャージが劇的に低減することがわかった。ポンププローブ実験に使えるかの実証実験を行ったところ、実験精度が飛躍的に向上した。

§3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「辛」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
辛 埴	東京大学物性研究所	教授	H20.10～
石坂香子	東京大学工学部物理工学科	准教授	H20.10～
木須 孝幸	大阪大学基礎工学科	准教授	H20.10～
谷内 敏之	東京大学物性研究所	特任研究員	H20.10～ H25.9
石田 行章	東京大学物性研究所	助教	H21.4～
下志万 貴博	東京大学工学部物理工学科	助教	H21.4～
岡崎浩三	東京大学理学系研究科	助教	H22.1～
MALAEB, Walid	東京大学物性研究所	特任研究員	H24.1～H25.9
小谷 佳範	東京大学物性研究所	特任研究員	H20.10～ H24.3
大川 万里生	東京大学物性研究所	D3	H21.1～H24.3
小泉 健二	東京大学物性研究所	特任研究員	H21.4～H25.9
齋藤 朋也	東京大学物性研究所	M2	H21.4～H22.3
高田 恭孝	理化学研究所	専任研究員	H22.6～H24.3
Chainani Ashish	理化学研究所	専任研究員	H22.6～
大槻 匠	理化学研究所	研究員	H22.6～H25.3
宮脇 淳	東京大学物性研究所	助教	H22.6～
堀川 祐加	理化学研究所	研究員	H22.6～
新井 秀実	東京大学新領域	D1	H22.6～H24.3
小島 太郎	東京大学新領域	D1	H22.6～H24.3
大貫 惇睦	琉球大学	教授	H25.4～

研究項目

- 究極のエネルギー分解能を持つ光電子分光によるフェルミ面付近の電子状態の研究
- 究極の精度を持つ時間分解光電子による緩和現象、化学反応の研究
- レーザー光電子顕微分光によるナノ構造の研究

② 「小林」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小林洋平	東京大学物性研究所	准教授	H20.10～
小澤陽	東京大学物性研究所	助教	H22.2～
久世直也	東京大学物性研究所	D2	H22.10～H24.3
中村卓磨	東京大学物性研究所	M2	H23.4～H25.3
野村雄高	自然科学研究機構 分子科学研究所	助教	H22.12～H24.3
伊藤功	東京大学物性研究所	技術職員	H23.4～
遠藤護	東京大学物性研究所	D1	H23.4～
乙津聡夫	東京大学物性研究所	M2	H24.4～H26.3

大久保弘樹	東京大学物性研究所	M1	H25.4～H26.3
-------	-----------	----	-------------

研究項目

- 高エネルギー分解光電子分光用レーザーの開発
- 高時間分解光電子分光用レーザーの開発

③ 「渡部」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
渡部 俊太郎	東京理科大学総合研究機構	教授	H24.4～
周 春	東京理科大学総合研究機構	ポスドクトラル研究員	H24.4～

研究項目

- 高性能KBBF非線型デバイスの研究開発とVUV光源への応用

§4 研究実施内容及び成果

4. 1. サブテーマ1； 究極のエネルギー分解能を持つ光電子分光によるフェルミ面付近の電子状態の研究（東京大学 辛グループ）

- ① 超高分解能光電子分光システムを製作した。これまで、光電子分光のエネルギー分解能は 1meV が限度と言われていた。光電子分光を行うためには、仕事関数以上のエネルギーを持つ光（＝真空紫外線、軟 X 線）が必要であるが、これまで良い光源がなく、光源のエネルギー巾が 1meV 近くあるためである。例えば、ヘリウム放電管を用いてもドップラー巾が 1.2meV ある。また、シンクロトロン放射光を用いた場合、高分解能にすると、強度が極端に減少する。従って、光源として単色性の良いピコ秒レーザーを光源にすることによって、これまでより遙かに高分解能で、大強度の光電子分光装置を作成し、物性研究に貢献する。一方、それだけの高分解能に対応すべき周辺技術の開発も必要となってくる。例えば、超高分解能仕様の新型の光電子分光器や、温度によるブロードニングを防ぐための新型の極低温クライオスタット、熱シールドの開発も必要である。極低温になると、水素も固化するために超高真空技術ももちろん必要である。ヘリウム4クライオスタットを用いて真空中における試料冷却技術を開発し、最低温度を達成する。具体的には、冷凍能力を最大限に上げることと、熱輻射を徹底的に取ることである。試料を臨む光電子分光器の電子レンズ部分を液体窒素冷却すると共に、試料を取り囲む部分を徹底的に熱シールドするという地道な作業を行った。光電子分光器においてはスウェーデンのシエンタ社と共同で高分解能光電子分光器の開発を行い、 μeV の安定した電源の作成と、仕事関数のムラがない徹底的に平坦な光電子分光器内部表面とスリットを作成することにより、高分解能を達成した。（図1）

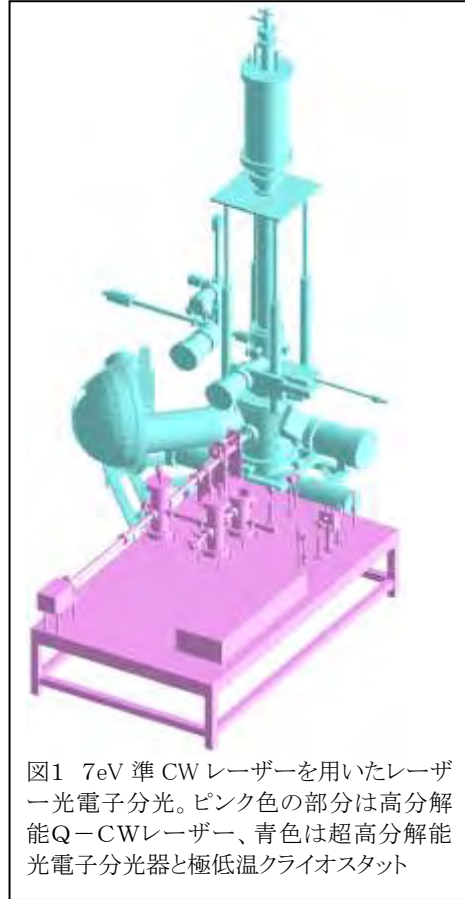


図1 7eV 準 CW レーザーを用いたレーザー光電子分光。ピンク色の部分は高分解能 Q-CW レーザー、青色は超高分解能光電子分光器と極低温クライオスタット

- ② 分解能は、 $100\mu\text{eV}$ の超高分解能を目指したが、予定以上の高分解能を達成することができた。特に、分解能を上げるために最も問題になっていた光電子分光器スリットの改造を

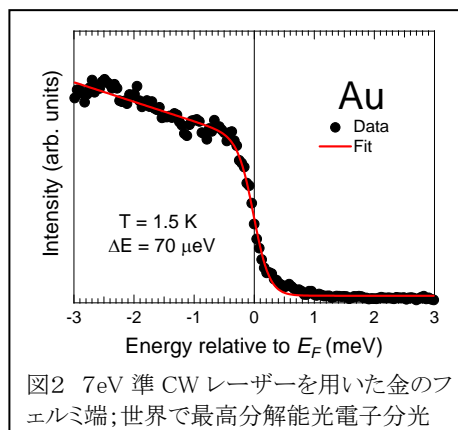


図2 7eV 準 CW レーザーを用いた金のフェルミ端；世界で最高分解能光電子分光

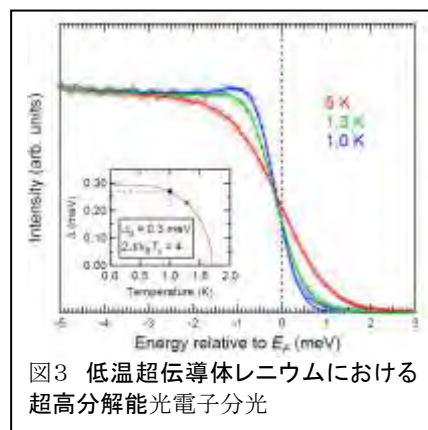


図3 低温超伝導体レニウムにおける超高分解能光電子分光

を行い、 $70\mu\text{eV}$ を達成することができた。金のフェルミ端を測定し（図2）、実際に、所定の極低温と高分解能が得られていることが明らかになった。これにより、本 CREST で当初目標としていた以上の性能を達成することができた。

③ ヘリウム4クライオスタットを用いて真空中における試料冷却技術を更に開発し、最低温度 1.0K を達成した。Te が 1.7K の超伝導体であるレニウムの超伝導ギャップを観測し(図 3)、実際に、所定の極低温と高分解能が得られていることが明らかにした。これにより、本 CREST で、当初目標としていた以上の性能を達成することができたことを実証した。

④ 同装置を用いて、鉄系の新規超伝導体の超伝導ギャップを明瞭に観測し、そのメカニズムを解明する研究を行った。図 4 は高温超伝導体 $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ のフェルミ面と高分解能光電子分光スペクトルである。3枚のフェルミ面について偏光依存性を用いて軌道の同定を行う事が出来た。また、3枚のフェルミ面について超伝導ギャップを観測したが、これまでの常識と異なり、超伝導ギャップの大きさがほぼ同一であることを明らかにした。その結果、超伝導のメカニズムについて既存の理論によるスピンの揺らぎではなく、軌道の揺らぎが重要であることを明らかにした(Science(2011))。BCS 理論によるフォノン、銅酸化物におけるスピンだけでなく、超伝導体における第 3 の起源があることを発見した。この結果を基に、記者会見を行った。

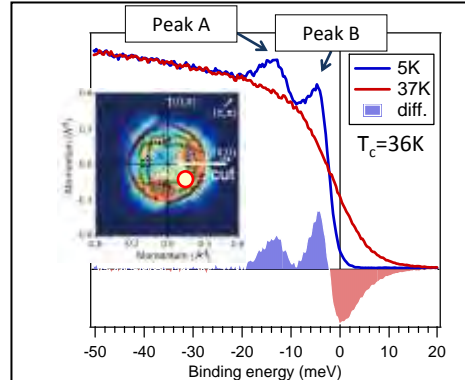


図4 超伝導体 $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ の超伝導ギャップ(Science(2011))

⑤ 鉄ニクトゲン化合物の超伝導においては、ホール電子フェルミ面間のバンド間相互作用が重要な役割を果たしている信じられている。しかしながら、 KFe_2As_2 はブリルアン・ゾーン中心に 3 枚のホールフェルミ面を持つが電子フェルミ面を持たないにもかかわらず、以前超伝導を発現させる。我々の極高分解能レーザー角度分解光電子分光は KFe_2As_2

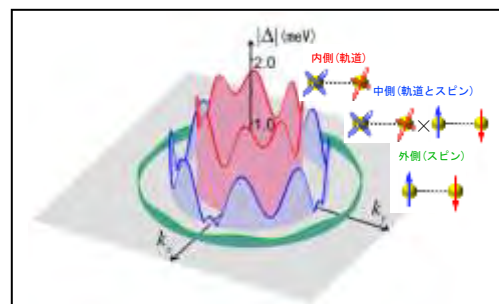


図5 鉄系超伝導体 KFe_2As_2 における超高分解能光電子分光(Science(2012))

は「内側フェルミ面におけるノードの無いギャップ、中側フェルミ面における”8本のラインノード”を持つ非従来のギャップ、外側フェルミ面におけるほぼゼロギャップ」という極めて特異なフェルミ面選択的マルチギャップ構造を持つノーダル s 波であることを明らかにした(図 5)。このギャップ構造は 8 回の符号反転を引き起こすホールフェルミ面における競合する対形成相互作用のフラストレーションに由来する

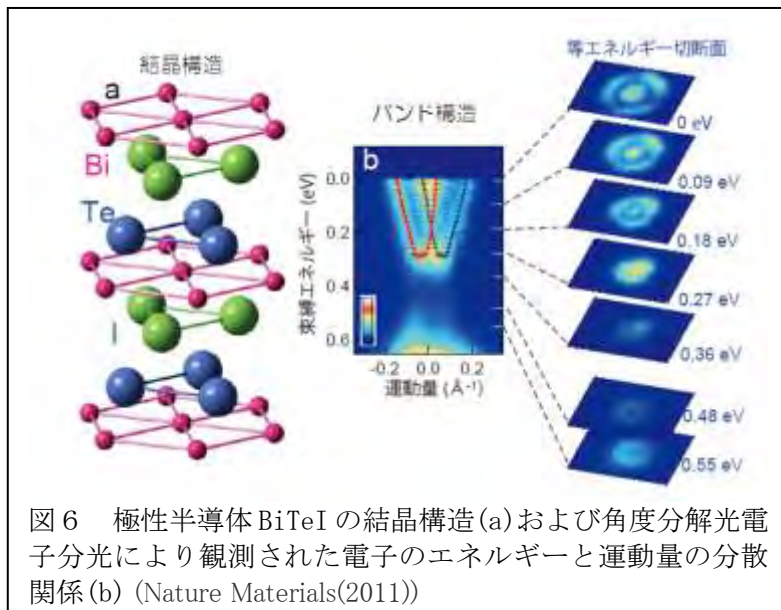


図6 極性半導体 BiTeI の結晶構造(a)および角度分解光電子分光により観測された電子のエネルギーと運動量の分散関係(b) (Nature Materials(2011))

のかもしれない。我々の結果は、鉄ニクタイト化合物において多彩なギャップ構造が存在するにもかかわらず A_{1g} 超伝導対称性普遍的であることを示唆している。3.5K の低温の T_c を持つ KFe_2As_2 において、大きな超伝導ギャップ異方性とノードを初めて発見し、超伝導対称性が s_{\pm}

であることを明らかにした (Science(2012))。この結果を基に記者会見を行った。

- ⑥ スピントロニクスデバイス開発分野では電気によって伝導電子のスピンの向き(偏極)を制御することは重要な開発課題である。これまでも伝導電子のスピンの向きを制御するための素子や材料が盛んに開発されてきたが、主として結晶表面や界面構造の非対称性を利用したものである。今回、結晶構造に極性を持つ半導体 BiTeI の電子構造と磁気構造をスピン・角度分解光電子分光により直接観測することにより、バルクの伝導電子が、その運動量に依存した大きなスピン偏極を有することを明らかにした。このような性質は電流や電場によってスピンと磁性を制御する機能を生み出すために大変重要であり、新しいスピントロニクス材料としての応用が期待される。図 6(b)のように分裂したバンドを観測し、バルクのバンドがスピン偏極していることを明らかにした。このバンドはスピン偏極光電子分光を行い実際にスピンの向きが異なることが分かった (Nature Materials(2011))。この結果を基に、記者発表を行った
- ⑦ 今回の研究で対象とした $(\text{BEDT-TTF})_3\text{Br}(p\text{BIB})$ は理化学研究所の山本浩史専任研究員、加藤礼三主任研究員によって 2001 年に発見・合成された新しい有機結晶である。この有機結晶は層状の 2 次元構造を持ち、有機物の中でも極めて高い伝導性を示す。特に物質中を電子が移動するスピードは銅やアルミニウムと同等であり、現在各所で実用化に向けて精力的に研究が進められている単電子デバイスなどにおいては銅に代わる配線材料として期待される。しかし、この物質がなぜこのように高い伝導度を持つのかについての理解はまだまだ十分ではなかった。研究グループは有機導体の光電子分光を行う上で障害となっていた問題(光を照射すると壊れる、清浄表面を得るのが難しい、冷却中に構造が壊れる等)を解決し、有機導体 $(\text{BEDT-TTF})_3\text{Br}(p\text{BIB})$ において光電子分光により伝導にかかわる電子の直接観測に世界で初めて成功した。 $(\text{BEDT-TTF})_3\text{Br}(p\text{BIB})$ は有機結晶の中で極めて伝導性の良い物質であり、伝導を担う電子がこの物質の中でどのように運動しているのかを知ることは極めて重要である。光電子分光実験と合わせて物質・材料研究機構の宮崎剛主幹研究員による電子状態計算も併せて行い、これらの比較を行った。その結果は大まかには電子状態計算と矛盾しないものの、

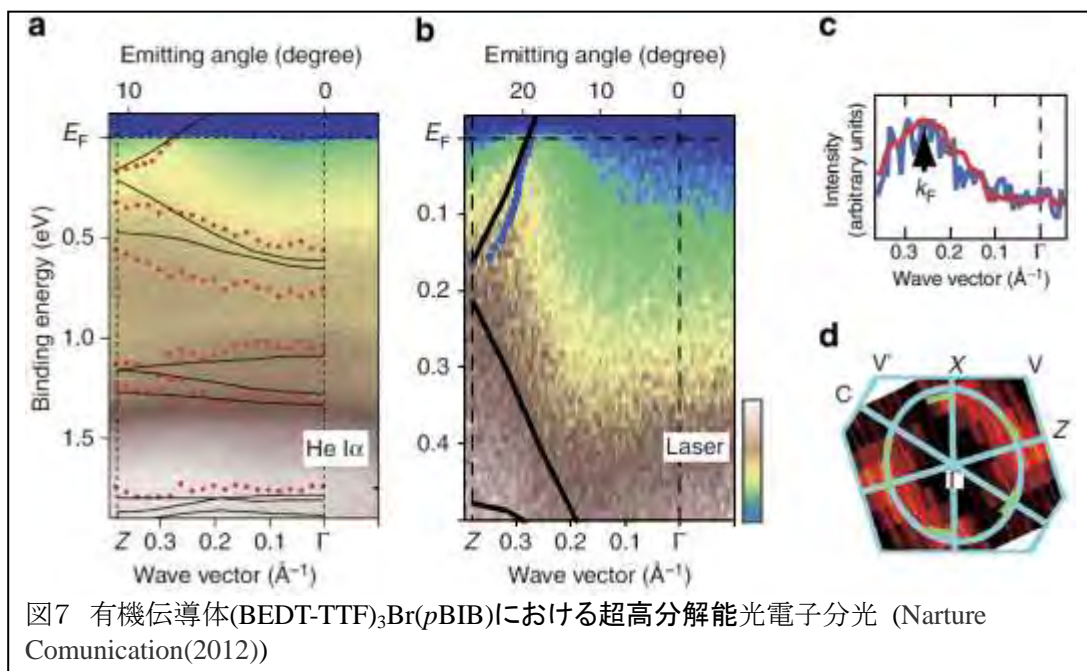


図7 有機伝導体 $(\text{BEDT-TTF})_3\text{Br}(p\text{BIB})$ における超高分解能光電子分光 (Nature Communication(2012))

フェルミ面の形が従来経験的に用いられてきた計算では楕円筒であったのに対して実験ではほぼ円筒であるという違いがみられた。そこで、この電子のエネルギーと運動量について詳細に調べたところ、計算では反映されない分子内部の振動と強く結合した電子がフェルミ面形状を円筒とするような影響を与え、アルミニウムや銅のような理想的な自由電子がこの物質においても実現していることを発見した。このことが $(\text{BEDT-TTF})_3\text{Br}(p\text{BIB})$ が有機結晶の中でも際立って高い電気伝導性を示す理由である。この実験結果は、分子の自由な組み合わせによって

電子構造を設計し、望む物性を持つ有機結晶を新たに創出するにあたって、計算では反映できない分子内振動が電子構造に大きな影響を与えてしまうことを示しており、分子内振動などを考慮しておくことでより正確な物質設計ができることを示唆している。このことは、様々な機能を持つ有機デバイスの開発に必要な電子構造設計に 1 次的な情報を与えるものであり、本研究のような物理と化学の融合による成果が両分野に大きな進展をもたらすと期待される。(Nature Communication(2012))に発表し、新聞発表を行った。

4. 2. サブテーマ 2; 究極の精度を持つ時間分解光電子による緩和現象、化学反応の研究 (東京大学 辛グループ)

① これまで、時間分解分光による光誘起相転移などの研究は、光反射や吸収実験によって行われることが多かったが、反射・吸収実験では、始状態と終状態が込みになった結合状態の時間変化しか分からなかった。

それに対して光電子分光では、始状態のみが分かるので得られる情報が明快である。例えば、反射・吸収実験で光誘起の金属絶縁体相転移を議論するのは極低エネルギー領域のドローデを精密に求めなくてはならないために極めて大変であるが、光電子分光においては、その物質が金属か絶縁体かを議論するのはフェルミエッジの有無を議論するだけでよい。しかし、超高真空が必要で、装置が大がかりになる時間分解光電子分光は、これまでほとんど行われてこなかった。そこで、高精度で、しかもある程度の高分解能も達成するフェムト秒の時間分解能を持つ光電子分光装置を軟 X 線レーザーを光源として作成し、物性研究に貢献する

② チタンサファイアレーザーを光源とし、BBO結晶を用いて6eVのプロープ光を発生させるポンププローブ分光を行う。フェムト秒の時間分解

と10meVの高エネルギー分解能を両立させ、フェルミエッジ付近の超精密物性実験を行う(図8)。一方、6eVではブリリアンゾーン全体をカバーすることができないために、より高エネルギー高調波を用いた時間分解光電子分光装置も必要となる。これは、価電子帯全体だけでなく、内殻の時間分解測定も重要であるためである。そこで、ガスセルを用いて、よりエネルギーの高い高調波プロープ光を発生させ、ポンププローブ分光を行う(図9)。この場

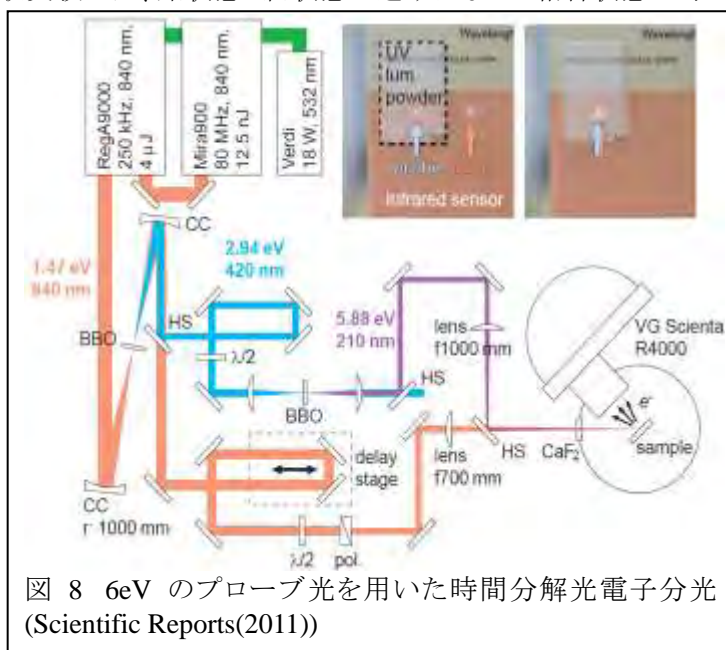


図 8 6eV のプロープ光を用いた時間分解光電子分光 (Scientific Reports(2011))

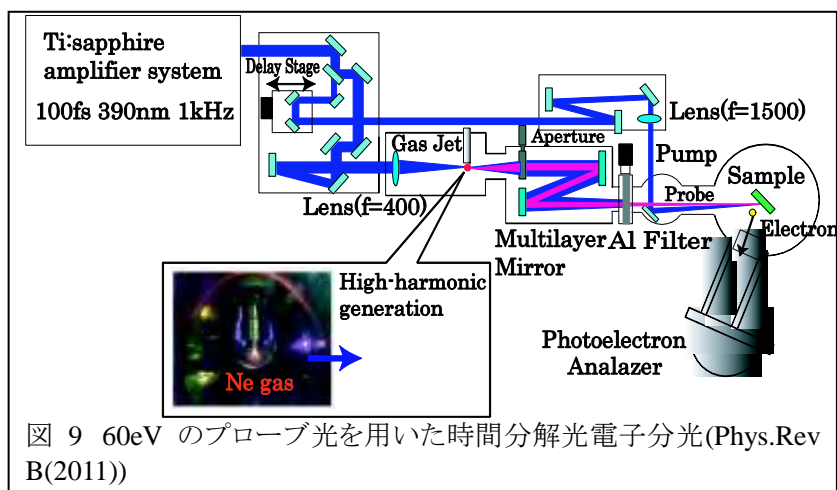


図 9 60eV のプロープ光を用いた時間分解光電子分光 (Phys.Rev B(2011))

合は多少分解能が悪くなるのはやむを得ないがよりエネルギーの高い軟X線が発生することになる。2つの時間分解光電子分光装置を組み合わせることにより、総合的な議論を行う。

- ③ BBO結晶を用いた 6eVプローブ光を用いて、高精度、高分解能の時間分解光電子分光を行うために装置の作成を行った。本装置を用い、高温で金属、低温で半導体となる近藤半導体 YbB_{12} の光誘起現象を観測することに成功した。その結果、低温になり、バンドギャップが成長するにつれ、緩和時間が著しく延びていくことが判明した。これは、通常言われているような擬ギャップではなく、真性のバンドギャップであることが判明した。また、グラファイトやグラフェンの時間分解光電子分光を行い、励起電子の緩和過程を観測し、光学フォノンが緩和過程に重要な役割を果たしていることを明らかにした(Scientific Reports(2011))。また、ガスセルを用いた 20,40,60eV のプローブ光を発生させ、時間分解光電子分光を行った。60eV のプロ

ローブ光を発生させ、物性研究に応用させたのは本研究が初めてである。一方、60eV の時間分解光電子分光装置を開発し、電荷移動物質 TaS_2 の光誘起現象を観測した。その結果、図10のように、内殻4fレベルのシフトの振動が観測され、アンプリチュードの振動が励起されていることが判明した(Phys.Rev B(2011))。

- ④ VO_2 の光誘起相転移を行い、電子電子相関と、電子格子相互作用の競合により、光誘起金属絶縁体相転移を起こしていることを明らかにした。一方、トポロジカルインスレーターの Bi_2Se_3 について光誘起現象を観測した。その結果、グラファイトと同じように長い緩和時間を持ちバンド全体が変化していることが判明した。

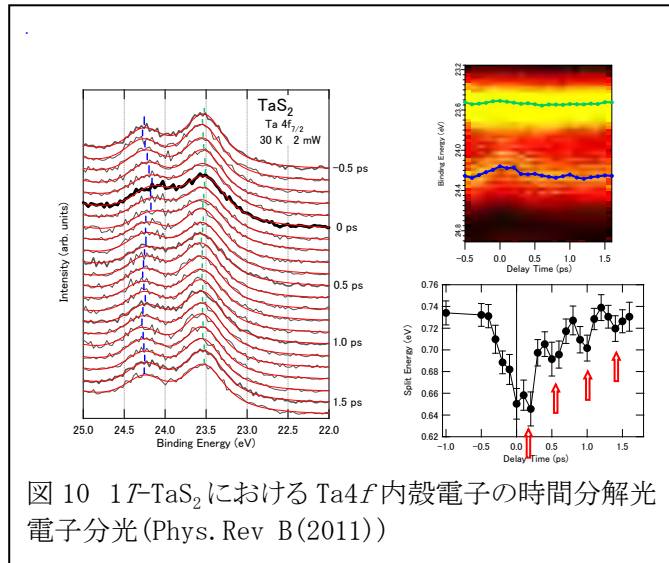


図 10 1T-TaS₂ における Ta4f 内殻電子の時間分解光電子分光 (Phys. Rev B(2011))

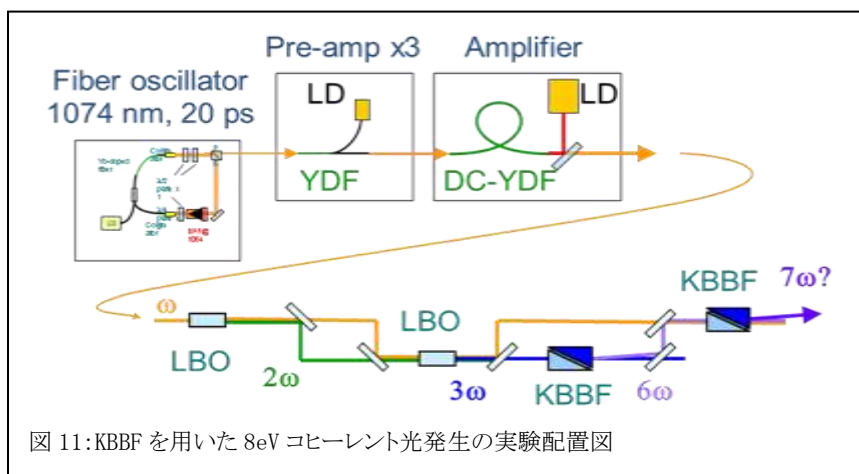
- ⑤ 世界で初めて、内殻の時間分解光電子分光を成功させた。

4. 3. サブテーマ 3; レーザー光電子顕微分光によるナノ構造の研究 (東京大学 辛グループ)

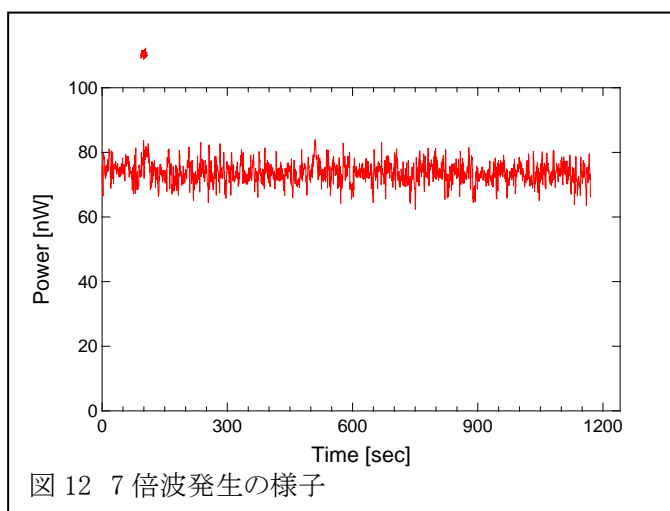
- ① これまで、光電子顕微鏡は、水銀灯かシンクロトロン放射光を用いて行われてきた、しかし、分解能がせいぜい 50 ナノメートル位しかなかった。これは、光源の強度が不足しているのと、光電子顕微鏡の収差が大きいためである。そこで、真空紫外レーザーを用いることによって、これまでより遙かに高空間分解能の顕微光電子分光装置を作成し、物性研究に貢献する
- ② 大強度の CW レーザーを光源として用いるとともに励起エネルギーを仕事関数ぎりぎりにより、スペースチャージやレンズ収差を極限に小さくし、高位置分解能を目指す。
- ③ 新規 CW レーザーを用いて、予備実験を行っている。現在の所、位置分解能が 7 ナノメートルの性能を達成された。世界最高クラスの分解能である。しかし、光電子顕微鏡側の調整が進めば、更に、到達目標の 3 ナノメートルに達することができた

4. 4. サブテーマ4; 高エネルギー分解能光電子分光用コヒーレント真空紫外光源 (東京大学小林グループ)

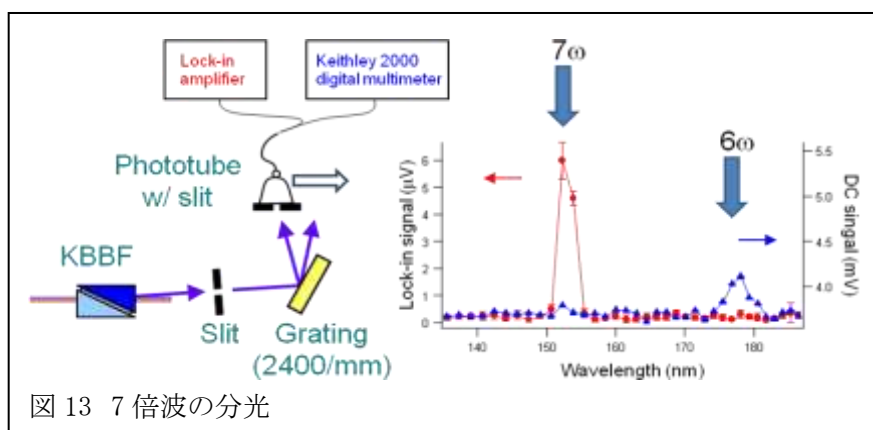
- ① 現在の高分解能レーザー光電子は 7eV の光子エネルギーで行われている。これを 8eV にまで拡張することによりブリルアンゾーン全ての分光を行える光源を開発する。現状の 7eV のレーザー



は市販の 3.5eV の第二高調波を取るだけで済むため、KBBF の結晶さえあれば比較的簡単に実現する。これを 8eV に拡張しようとするすると数々の困難がある。まず、市販レーザーをもとにシステムができない。なぜならば 8eV を得るためには 7eV と 1eV との和周波を取る必要があるが、市販レーザーでこの 2 色が出るものがないからである。また、KBBF の吸収端がどこにあるか不明なため、レーザーの基本波の波長を自由に調整できる必要



がある。これは一般的な Nd ドープレーザーは使えないことを意味する。したがって本研究では Yb ドープのレーザーを出発点として波長可変でなおかつ線幅の細い高繰り返しレーザー



システムを構築し、この高調波を多段で発生させる必要がある。

- ② 以上の要請よりレーザーを全て初めから手作りすることにより Yb ファイバーレーザーの 7 倍波を発生させて 8eV を実現する。ファイバーレーザーに限らず線幅の狭いモード同期レーザーの実現は必ずしも容易ではない。本研究ではファイバーレーザーで波長可変かつ線幅が 0.1nm の高繰り返し光源を実現する。さらにこれを多段で増幅し、波長変換を行う。

- ③ 当初は 100W クラスのレーザーを作り、希ガスに集光することにより 7 倍波を発生させることを考えていたが、設計段階から困難を極めた。スペクトルを狭くすることが光電子の実験から要請されるが、これはパルス幅が長いことを意味し、波長変換が困難になるからである。本研究をスタートした後に 7 倍波を取れる可能性がある KBBF 結晶が手に入ることとなった。そこで方針を変更し KBBF 結晶により 6 倍波と基本波の和周波光をとる方法にした(図11参照)。KBBF 結晶の吸収端近傍であるため発生するかどうかは不明であったが、様々な工夫により 7 倍波 (8eV) の発生に成功した。当初得られたパワーは 1nW と非常に弱いものであったが、1-2年の開発を経て 80nW の出力を得るに到った。また、安定度も5%程度に収まっていることが分かる(図 12 参照)。日常的にさらなるハイパワー化や高安定化を目指しており、現在も開発継続中である。発生した 7 次高調波は簡易型分光器を試作して分光を行った。結果を図 13 に示す。153nm に 7 倍波のピークが見て取れる。また、ハイパワー化した結果 7 倍波は図 14 に示すように見える光となり、アライメントが可能となったため光電子分光装置へ導くことができるようになった。しかしながらこの波長領域の光を数 m アライメントすることは容易ではなく、さまざまな工夫に時間を要することとなった。
- ④ 当初計画では希ガスや金属気体による波長変換を想定して、その発生機構を新たに開拓することが想定されていた。しかしながら設計値で外部共振器を使っても一桁程度集光強度が足りず、難航していた。そこに真空紫外まで位相整合が取れる KBBF という非線形光学結晶を借りる話が持ち上がり、中国のチェン先生、理科大の渡部先生との協力のもと 8eV を KBBF で発生させる実験がスタートした。当初は Nd:YVO₄(波長 1064nm)を発振器としてレーザーシステムを組み上げ、152nm を KBBF にて発生させる試みを行ったが VUV は観測できなかった。これは KBBF の吸収端のせいであろうと推測し、発振器を Yb ファイバーレーザーに置き換えることにより 1074nm とすることにより、最終的に 153.4nm の VUV 光の発生に成功した。わずか 1nm の差で発生したわけである。このようにレーザー開発と非線形結晶開発とが有機的に融合しなした光源開発となった。

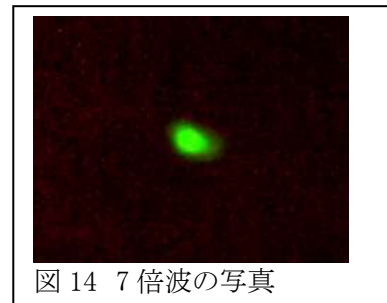


図 14 7 倍波の写真

4. 5. サブテーマ5; 高時間分解光電子分光用コヒーレント真空紫外光源 (東京大学 小林グループ)

①時間分解光電子分光用光源として高繰り返しフェムト秒真空紫外レーザーを開発する。フェムト秒 VUV 光源は高い光子エネルギーを持ちさらに高い時間分解能を得られるため、時間分解光電子分光の光源候補として有力である。スペースチャージの効果を抑えて高いエネルギー分解能の光電子分光を行うために、そのようなフェムト秒 VUV 光源は高繰り返ししてあること

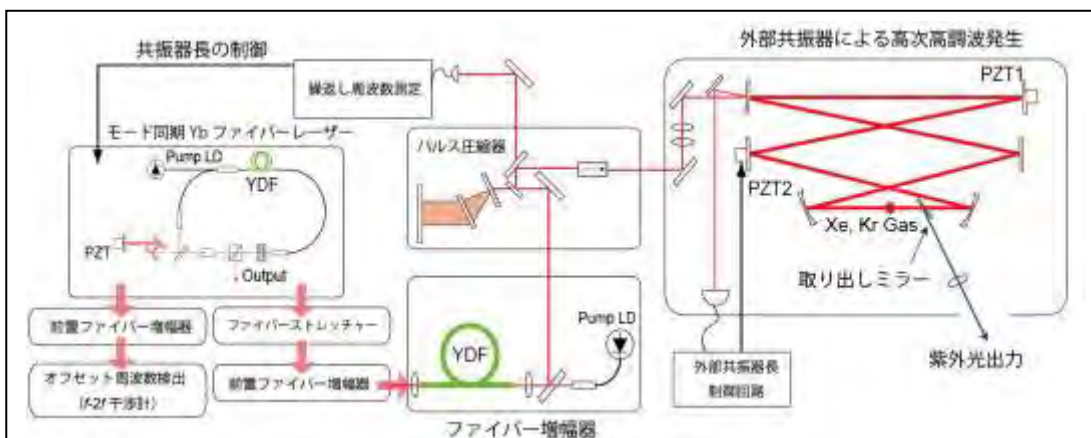


図15 共振器内高次高調波発生による高繰り返し紫外光の発生装置

が必要である。真空紫外域から軟X線に至るようなコヒーレント VUV、XUV 光を発生するためには現状では高次高調波発生過程を用いるのが最も有効であると考えられる。これを仮に市販のレーザーをもとに開発したとすると kHz 程度の繰り返しに限定されてしまう。このため MHz 程度以上の高繰り返しで時間分解光電子分光を行うための VUV 光源の開発が望まれていた。

赤外領域の基本波を用いて、光電子分光に応用可能な VUV 光を発生させるためには 7 次以上の高次高調波を発生させる必要がある。このためには $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上という非常に高いピーク電場強度を達成させる必要がある。これを MHz 以上の高い繰り返しで実現するためには kW 以上の高い平均出力が必須である。ここが本研究開発の最も困難な点となる。高繰り返しで高平均出力を得るには Yb ファイバーレーザーシステムが有力な候補の一つである。それでもファイバーレーザーで到達可能な平均パワーは 100W 程度であり、高次高調波発生を行うには 2桁近く不足している。これを解決するため本研究ではフェムト秒パルス列をエンハンスメント共振器と呼ばれる外部共振器に閉じ込め、パルス共振器中でコヒーレントに合成することにより 100 倍程度増強する。共振器中に集光点を設けておくと、 $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の高い集光強度をシードレーザーと同じ高繰り返し周波数で得ることが可能となる。集光点に Xe などの希ガスを噴射すると高強度のレーザーと原子との相互作用により高次高調波が発生する。発生した VUV 光は大気により吸収されてしまうため、外部共振器は真空槽に配置する必要がある。この共振器内高次高調波発生の手法を用いることで数十 MHz という非常に高い繰り返し周波数で高次高調波を発生することが可能となる。

本研究では外部共振器を駆動するシードレーザーとして高出力 Yb ファイバーレーザーを開発した。Yb ファイバーレーザーおよび、ファイバー増幅器の系は、100~200fs という外部共振器を駆動しやすいパルス幅を得つつ、極めて高い平均パワー、パルス強度を達成できることから、高次高調波発生のための外部共振器を駆動するには適した光源と言える。図 15 に今回開発した Yb ドープファイバーレーザーおよび外部共振器内高次高調波発生システムを示す。Yb ファイバーモード同期レーザーの出力は 10mW 程度で比較的弱いいため、そのままでは外部共振器の駆動用レーザーとして用いることはできない。したがってモード同期レーザーの出力を Yb ファイバー増幅器を用いて増幅する必要がある。このとき増幅ファイバー中での非線形効果及びダメージを防ぐため CPA(Chirped Pulse Amplification)の手法を用いた。モード同期レーザーの出力は特殊ファイバを用いて、数 ps のパルス幅にまでストレッチする。増幅においては ASE (Amplified Spontaneous Emission) を抑えつつ大出力を得る必要がある。さまざまな増幅器の構成を実験的に試した結果、プリアンプ及びパワーアンプの 2段構成とした。パワーアンプにより増幅されたパルス列は、透過型グレーティングを用いた圧縮器により分散補償され sub-200fs のパルス時間幅を得た。パルス幅の評価には FROG 法を用いた。圧縮後の平均出力は 45W である。以上の結果、開発したフェムト秒レーザーシステムは繰り返し周波数 80MHz、パルス時間幅 200fs、平均出力 45W を達成し完成となった。開発したレーザーシステムは日々の調整がほぼ必要無く、高い長期安定性及び信頼性を持つ。turn-key で動作する高平均出力高繰り返しパルス光源として、本研究の VUV 光発生以外にもさまざまな応用に用いることができると考えられる。

開発したレーザーシステムをシード光として外部共振器を駆動した。外部共振器は 5 枚の高反射ミラーと 0.4% の透過率を持つ入射ミラーからなる。15W を外部共振器に入射したとき、共振器内部パワーは 3kW に達し、共振器内部の集光点において $2 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ を超えるピーク電場強度を定常的に得ることに成功した。発生した紫外光は応用のためには共振器の外に取り出すことが必要となる。発生した高調波をどのように共振器の外に取り出すか



図 16 取り出しミラーに生じるダメージ。

が重要な課題であった。本研究では薄い取り出しミラーを基本波に対してブリュースター角になるように挿入し、VUV 光の表面反射を出力として取り出す手法を用いた。取り出しミラーは基本波に対して透明かつブリュースター角で配置されているため共振器に与えるロスは極めて小さい。共振器内部の集光点にXe ガスを入れ、取り出しミラーを配置することにより高次高調波の発生および取り出しを行った。その結果、7 次高調波(8.4eV)にてサブマイクロ W のパワーを発生させることに成功した(応用物理学会招待講演)。

しかしながら安定に長時間高調波を発生させる試みは難航した。これは高次高調波を共振器から取り出すためのミラーに

ダメージが入る問題による。取り出しミラーは平均パワー kW 以上のフェムト秒パルスによる高温と高いピーク強度にさらされ、ダメージを受けやすい環境下にある。薄い Quartz 板を取り出しミラーとして持ちた際のダメージの例を図 16 に示す。いままでになかった超高強度レーザーであるため、どのような材質がこの用途に耐えるかの知見は世の中になかった。したがって様々な材料・形状などをためしうまく VUV 光を共振器

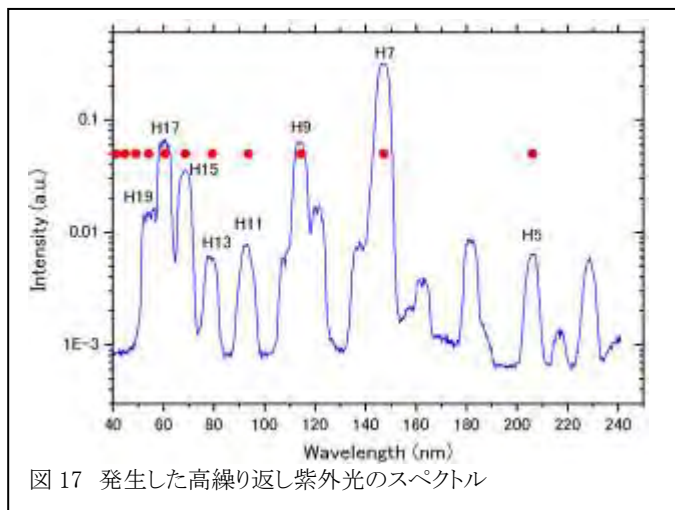


図 17 発生した高繰り返し紫外光のスペクトル

外に取り出す工夫を見出す必要があった。我々は 1 年かけ多様な薄い光学研磨材料を入手してどれがこの用途に適するか調べた。調べた材質は MgO、ダイヤモンド、サファイヤ、SiO₂、SiC、SrTiO₃ などである。この結果、熱伝導率、透明度、さらに表面の清浄度が重要な要因となることが分かってきた。最終的には厚さ 250 μm 程度の単結晶 MgO 板が最もよい特性を示すことを発見した。これにより安定な共振器の長期間運転(1 時間以上)が可能となった。この安定度は知りうる限り世界でも最高クラスである。また高調波も 15 分程度は安定して出力できるようになった。

発生した高次高調波のスペクトルを真空紫外グレーティング型分光器により測定した。図 17 に得られた高次高調波のスペクトルを示す。最大次数 19 次までの高調波が観測されており、54nm までの紫外光が発生していることが確認できる。光子エネルギーにして約 23eV である。短波長側のスペクトルは現在、分光器への入射ミラーとして使用しているアルミミラーの反射率により制限され、外部共振器自体からはより高次の高調波が発生しているものと期待される。共振器外部に取りだされた 7 次高調波の平均パワーはおよそ 1 μW である。今後はさらなる短波長化やこれを用いた光電子分光実証実験に進む予定である。

発生した紫外光は短パルス紫外光源として光電子分光や時間分解分光に応用することが期待される。高次高調波は空間コヒーレンス及びパルス内の時間コヒーレンスをよく保つことが知られているため、今回の光源はコヒーレント紫外パルスレーザーとしての応用も可能になると考えられる。例えば、コヒーレントな紫外パルスを用いて光電子分光を行うことで光電子発生過程がどの程度励起光のパルス位相に依存するかを調べるといったコヒーレント光電子分光に向けた研究も検討中である。さらに今回の外部共振器内高次高調波発生による紫外光はパルス内のみならず多数のパルス間の位相コヒーレンスを保っているという重要な特長がある。これはすなわち発生した紫外光は光周波数コム(Comb)のスペクトル構造を持ちうるということである。光周波数コムは精密分光の分野において必須の技術であるが、光周波数コムを発生するためにはモード同期レーザーを用いる方法が一般的であり、光周波数コムを使用できる波長範囲は従来、安定なモード同期レーザーの発振できる波長、すなわち可視から近赤外の領域に限られてきた。外部共振器内高次高調波発生過程を用いて周波数コムを発生することで、従

来不可能であった真空紫外の領域で精密分光が可能になると期待されている。このような応用に向けて、分光応用可能な高精度紫外周波数コムを発生する研究を行った。

②紫外周波数コム発生のためには、まず基本波となるモード同期レーザーを赤外波長領域の周波数コムとして制御する必要がある。ところが仮に高精度な赤外周波数コムを実現しても、Ybファイバー増幅器の出力には増幅器からの様々な種類のノイズが付与されている可能性を検討する必要がある。例えば、増幅器の励起光強度が時間的に揺らぐことにより出力光に強度ノイズが付与される可能性がある。また励起光強度の揺らぎによるゲイン媒質の反転分布密度変化は媒質の屈折率変化を通じて出力光の位相ノイズへ変換されると考えられる。このような理由により、シード光をコムとして高精度に安定化したとしても、

ファイバー増幅器の出力光はコムの構造を持っているかは自明ではない。高ゲインファイバー増幅器の出力光が分光応用に際して実用的な精度を持つ周波数コムになっているかを検証するため、ファイバー増幅器の出力を実際にコム分解精密分光測定に用いる検証実験を行った。

分光対象としては Rb 原子の ($5S_{1/2} - 4D_{3/2}$, $5S_{1/2} - 4D_{5/2}$)準位間の二光子吸収遷移を用いた。コムを用いて精密分光を行う際は何らかの方法によりドップラー広がりを抑える必要がある。二光子吸収の場合は、ターゲットの両側から励起光を照射し、左右の励起光それぞれから1個ずつ光子を吸収する過程を用いることでドップラー広がりを抑えることができる。またコムを用いて二光子吸収を励起する際はコムが等間隔であるため、光周波数の和が遷移周波数に一致するような多数のコムモードペアが存在し効率よく対象を励起する

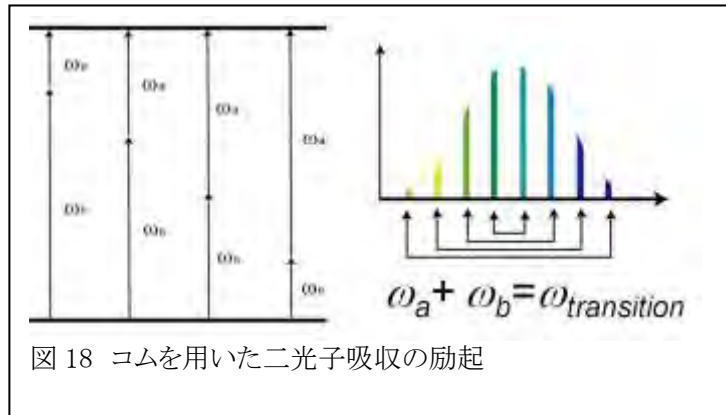


図 18 コムを用いた二光子吸収の励起

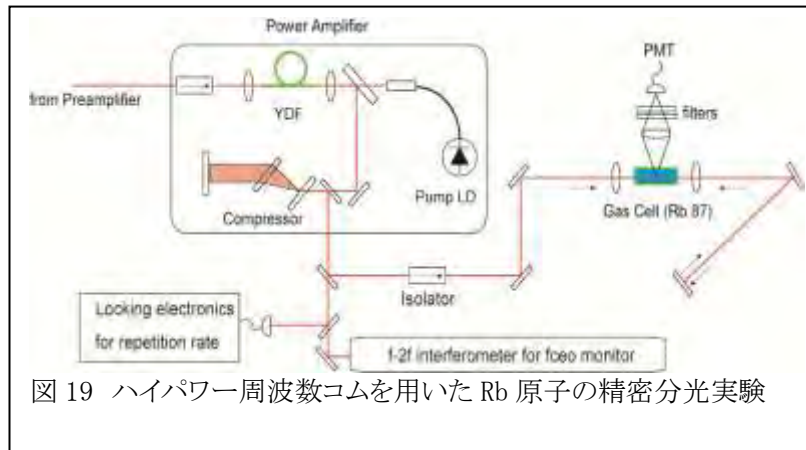


図 19 ハイパワー周波数コムを用いた Rb 原子の精密分光実験

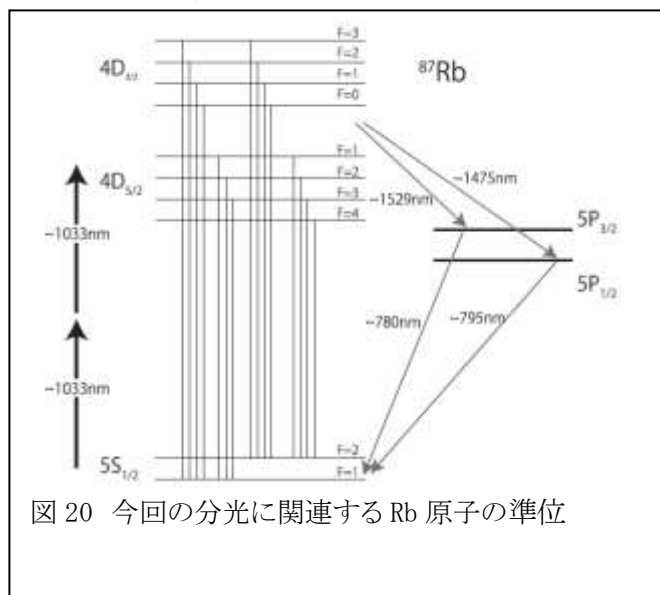


図 20 今回の分光に関連する Rb 原子の準位

ことができる(図 18 参照)。図 19 に Rb 原子のコム分光のセットアップを示す。ファイバー増幅器の出力をグレーティングを用いたパルス圧縮器で分散補償し ^{87}Rb が充填されたガスセルに

照射した。透過した励起光は折り返しミラーにより折り返され再び反対方向よりガスセルに集光される。このとき折り返しミラーの位置を調整し、右へ進行するパルスと左へ進行するパルスがちょうどガスセル内で重なり両側から Rb 原子を励起することができるようにした。またファイバー増幅器の出力の一部を $f2f$ 干渉計に入射し、増幅後のコムオフセット周波数をモニターした。さらに増幅後の繰返し周波数を測定し、モード同期レーザーにフィードバックを行う

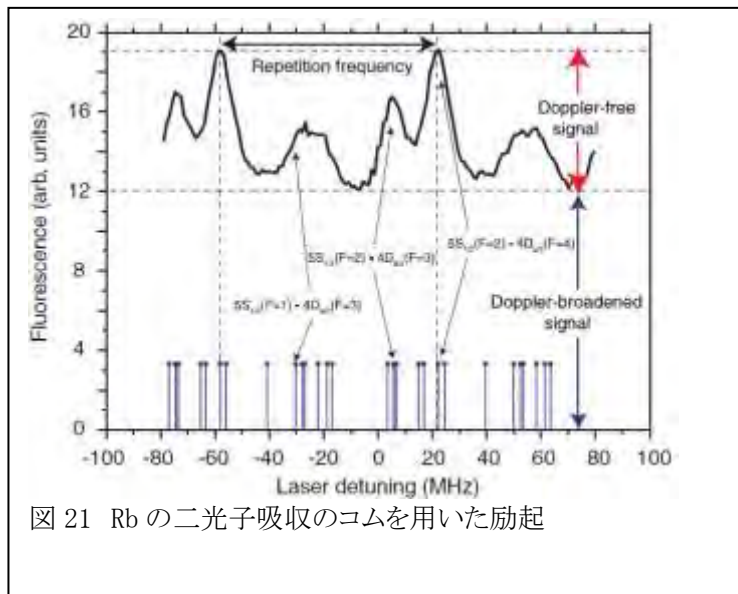


図 21 Rb の二光子吸収のコムを用いた励起

ことでコム繰返し周波数を安定化した。今回の遷移に関連する Rb 原子の準位を図 20 に示す。高感度光電子増倍管を用いてガスセルからの蛍光を観測した。コムによる励起が効率よく行われた場合は励起状態からの蛍光強度が増加する。コム繰返し周波数をスキャンしながら蛍光強度を観測した結果を図 21 に示す。図下部の青色の線は関連する遷移の光周波数である。これらに対応する形で蛍光強度が変化していることが分かる。さらにこの蛍光強度は繰返し周波数の間隔で周期的な構造を持っていることが分かる。これはすなわちコムペアが二光子吸収を励起していることの証拠である。これらの測定結果よりファイバー高出力増幅器の出力はコム構造を持っており、またここに示したようなコム分光に応用可能な高精度なコムとなっていることが実験的に検証できたといえる。本研究は Yb ファイバー増幅器をもちいて非常に高い平均出力を持つ周波数コムを実現しさらに精密分光用途に応用した数少ない例である。

この実験を行うにあたり先述したように増幅器の出力をグレーティング型パルス圧縮器で分散補償している。この際、興味深い現象が観測された。グレーティング型パルス圧縮器のグレーティング間隔をさまざまに設定し Rb のコム分光を行った結果を図 21 に示す。図 22 は図 21 に相当する Rb のコム分光の結果を、パルスに付与された群遅延分散 (Group Delay Dispersion) の関数として描いたものである。パルスに強いチャープを与えてもコムによる信号の変調成分の振幅はほとんど変化していないことが見てとれる。

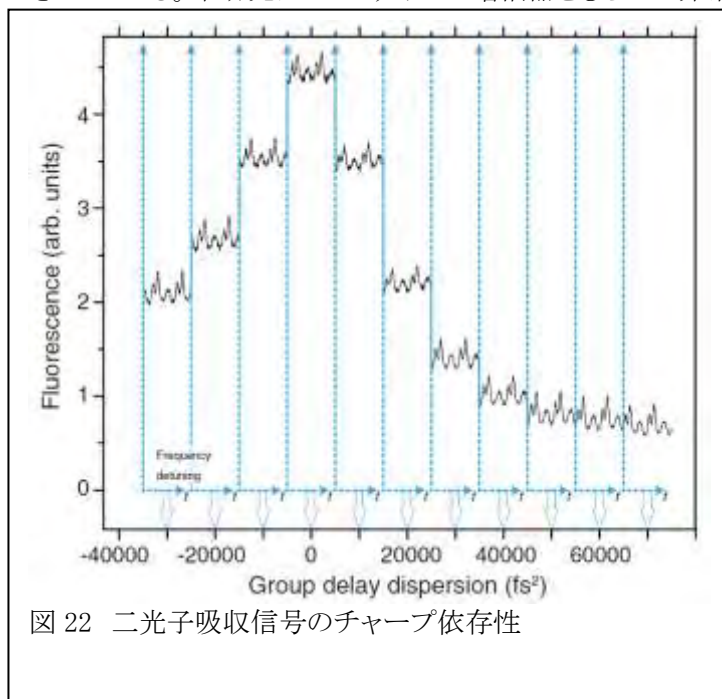


図 22 二光子吸収信号のチャープ依存性

一方で変調成分のオフセット量、すなわちバックグラウンド信号に相当するものはチャープ量が 0 の時に最も強い信号強度をえた。解析の結果、コムによる変調成分の信号は、左右の励起光から一つずつ光子を吸収する過程であるのに対して、バックグラウンドに相当する信号は、左、もしくは右に進行する励起光から2つの光子を吸収する過程に対応することが分かった。左右の励起光から1つずつ光子を吸収する過程がパルスのチャープ量によらない、すなわちパルスのピーク強度によらない点が非直感的で面白い現象である。これを理解するため、二光子吸収をチャープのついた左右に進行するパルス電場で励起するモデルを構築し、シミュレーションを行った。この結果、本現象を定量的に説明することに成功した。直観的な理解としては以下のとおりである：パルスにチャープを与えるとピーク強度が減少して二光子吸収の効率が下がる。一方でパルスがチャープにより時間的に伸長することで対象原子と相互作用する体積が増加する。これらの二つの効果はちょうど相互にキャンセルし励起効率がチャープに依存しなくなることが分かった。一方で、左もしくは右に進行する励起光から2つの光子を吸収する過程においてはこの効果はキャンセルしない。このためバックグラウンドに相当する信号強度はパルスのチャープに対して強く依存する。以上のふるまいは先述した二光子吸収モデルにより定量的に理解された。この現象はコヒーレントなパルス対を用いた二光子吸収の基本的なプロセスを理解するという点で面白いばかりでなく精密分光にむけた実用的な効果もある：コムを用いた二光子吸収精密分光においてはコムによる変調成分のSN比を高くとることが重要となる。この際、パルスにチャープを付与するとコムによる変調成分の振幅を保ったままそのバックグラウンドの信号成分を強く減少させることができ、高いSN比で分光を行うことが可能となる。今回の研究では、コムを用いた二光子吸収精密分光の手法においてあえて強くチャープしたパルスを用いることが高精度測定に有効であることを実験的、理論的に初めて示すことができた。

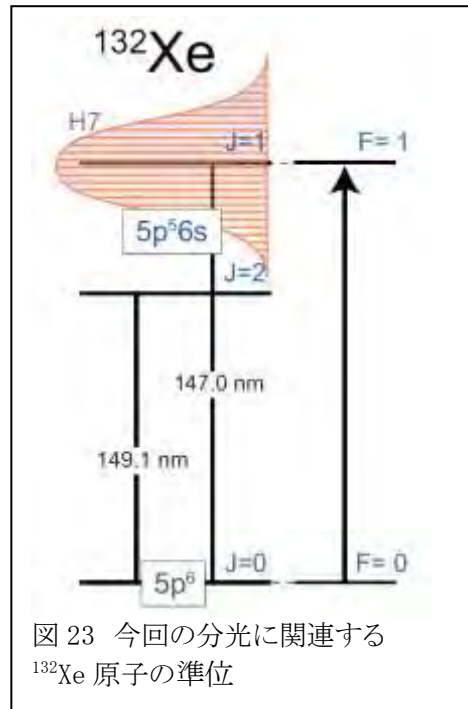


図 23 今回の分光に関連する ^{132}Xe 原子の準位

③上記の研究によりYbファイバー増幅器からの出力光が高精度なコム構造を持つことが実験的に確認できたので、実際にこの赤外周波数コムを外部共振器に入射して真空紫外光への波長変換を行った。得られたスペクトルは図23に示した通りである。各次数の高調波は単一ピーク的なスペクトル形状をしているが、これは使用した分光器の分解能によるもので、このスペクトル内部に繰り返し周波数(80MHz)の間隔で安定なコム構造があるはずである。このような外部共振器を用いて紫外周波数コムを発生する実験は2005年前後より行われてきたが、発生した紫外周波数コムの長期安定性、操作性、パワーなどの問題から実際に真空紫外コムを分光応用に使った例は世界でも一例のみであった。今回我々は、7次の高調波による147nm近辺の紫外周波数コムを用いて真空紫外域の周波数コム精密分光を行った。ターゲットとした遷移はキセノン原子の基底状態から(双極子遷移可能な)第一励起状態への励起である。分光対象としたキセノンのエネルギー準位図を図23に示す。7次高調波のスペクトル範囲内には双極子遷移可能な遷移が1つしかなく、紫外周波数コムを用いた分光実験の対象としては理想的である。また、キセノン原子の同位体シフトや超微細構造の測定は、重い原子における原子核-電子相互作用を調べることにつながり、Hartree-Fock法をもちいた電子波動関数の近似計算の実験的検証となることが期待される。分光の手法としては直接コム分光と呼ばれる方法を用いた。光周波数コムの一本一本は絶対周波数が校正されたあたかもCWレーザーとして分光に用いることができる。直接コム分光の手法では、サンプルに周波数コムを照射しコム的一本を用いて対象となる遷移周波数近傍を掃引する。

キセノン原子は室温で2.7GHz程度のドップラー広がりを持つ。これを抑えるため、図24に示すように3つの領域からなる分光用高真空チャンバーを作成し、分子スキマーを用いて細くコリメートされたキセノン原子ビームを生成した。分光用チャンバーの設計にあたってはモンテカルロ粒子法を用いたガスのダイナミクスに関するシミュレーションを実施し、高密度原子ビームを生成するのに適した分子スキマーの配置を検討した。原子ビームと直交するように励起光(紫外周波数コム)を照射することで、実効的なドップラー広がりを抑え、ほぼ自然幅(45MHz)の分解能を得ることができる。分光

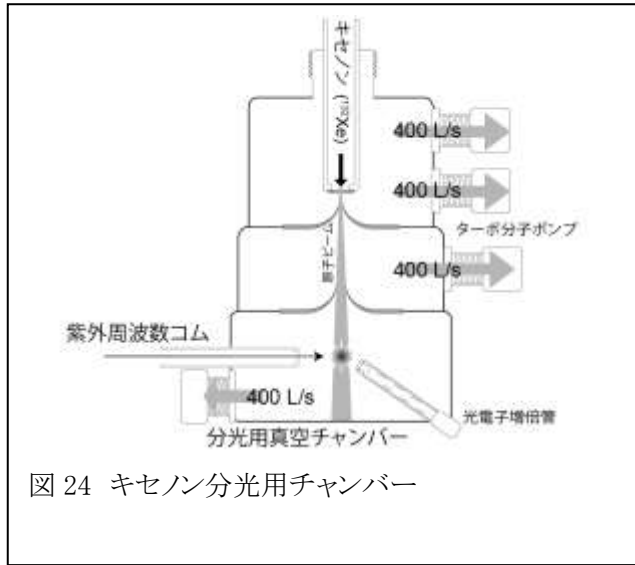


図 24 キセノン分光用チャンバー

用チャンバーの相互作用領域には真空紫外域に高い感度を持つ光電子増倍管を設置し励起に伴って発生する蛍光を光子数計測した。蛍光は励起確率に比例するため紫外周波数コムをスキャンしながら蛍光強度を測定することで直接コム分光を行うことが可能となる。この際、発生する蛍光は励起光と同じ波長をもつため、励起光のチャンバー内の散乱光が蛍光測定の大きなバックグラウンド信号となることが分かった。チャンバー内の散乱光をできるだけ抑えるために、光電子増倍管の位置を調整するなどさまざまな工夫を行ったが散乱光を大きく減少させることは困難であった。この問題を解決するため光電子増倍管の信号を時間分解して測定することを試みた。散乱光は励起パルスとほぼ同時刻に発生すると考えられるが、ターゲット原子からの蛍光は励起パルス到着後、上準位寿命程度の時間で割合ゆっくりと減少していく。このため光電子増倍管からの信号を時間分解し、励起パルスが到着してから比較的後の信号のみをカウントした。この結果バックグラウンドの散乱光の寄与を劇的に現象させることに成功した。十分に自然幅が小さい遷移をコム一本を用いて励起する際は、期待される蛍光強度は時間の関数としてほぼ一定の連続的になる。このため今回我々が開発した、時間分解測定により蛍光と散乱光を分離する手法は、紫外波長領域にとどまらず、一般的に直接コム分光のSN比を本質的に改善できる非常に有力な方法であると考えられる。紫外周波数コムを光周波数領域でシフトさせるにはそのモード間隔である繰返し周波数をわずかに変化させればよい。繰返し周波数を変化させつつ相互作用領域で発生するキセノン原子からの蛍光を光電子増倍管で光子数検出した(図25)。

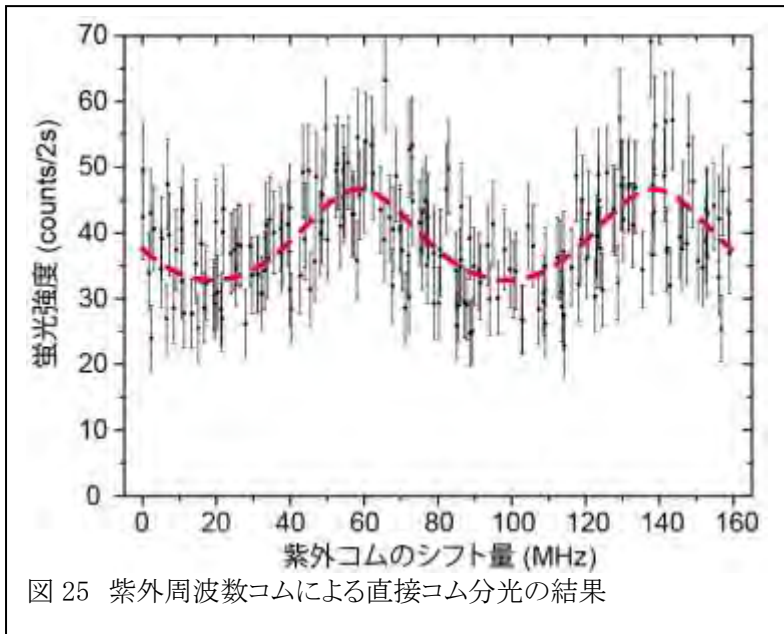


図 25 紫外周波数コムによる直接コム分光の結果

蛍光強度はコムのシフト量に対して強い変調を受けていることが分かる。これはコム一本が対象の遷移にちょうど同調した際に、対象を効率よく励起しているためである。また蛍光強度は単一

のピークを持つわけではなく紫外コムの一連の周波数の周期で周期的な構造を持つことが観測できた。これは紫外周波数コムが繰り返し間隔で周期的な構造をしており、繰り返し周波数分コムをシフトした際に隣のモードによる励起が生じるためである。また、コムが共鳴していない場合でも蛍光強度は0まで落ちていないことが分かる、これは対象とした遷移の自然幅が繰り返し周波数に比べて充分小さくないため若干隣のモードによる励起が避けられない効果による。以上のような効果を含め、期待される信号の形状を計算したものを図25の鎖線で示す。この観測結果から外部共振器内高次高調波発生により発生した紫外光が周波数コムを構成していることが検証できたとと言える。高次高調波発生は非常に強い非線形過程であることから、高次高調波発生プロセスで発生した紫外光がコムを構成することは全く自明なことではなかった。例えばもともと赤外の周波数コムに含まれていた位相ノイズや振幅ノイズが高調波発生過程で増幅されコムに悪影響を与えるような可能性が想定されていた。今回用いた赤外周波数コムは特にその安定化の精度を追求したものではない。それでも、今回の検証実験では少なくとも7次までの高調波がコムになっていることが実験的に証明でき、将来のより高エネルギー領域の真空紫外コム発生及び精密分光に向けた大きな進展といえる。図25に示した一回の測定ではコムの中の一本を用いて励起を行っているかが不明であるため、遷移の絶対周波数を求めることはできない。これを解決するため、繰り返し周波数を大きく変化させた計8回の測定を行ってコムの中のモード番号の推定を行った。この結果、 $^{132}\text{Xe}(5p^6 \cdot 5p^56s)$ の遷移周波数を2039942.91(14) GHzと決定することができた。対象とした遷移は半世紀前に高分解能真空紫外グレーティング分光器により測定されているが、今回紫外周波数コムを導入することでこの遷移に関して従来の測定精度を数十倍改善することができた。これは真空紫外領域においてコムを用いた精密分光を行った数少ない実験例である。今回の測定における最大の誤差は、どのコムを用いて励起を行ったかというモード番号決定の不確定さに起因している。これはすなわち、どの程度大きく繰り返し周波数を変化させても装置を安定に稼働できるかという技術的な問題であり、これが解決すれば最終的にはコムの一連の線幅で制限される超高分解能精密分光が真空紫外域で可能になると思われる。

4. 6. サブテーマ6； 8eVレーザーを用いた光電子分光（東京大学 辛グループ）

- ① 実際に 8eV コヒーレント光源を用いて光電子分光を行う。8eV レーザーは波長が 150nm であるため、空気中を透過しない。また微弱であるため検出も非常に難しい。強大な IR の背景に 9桁弱い 8eV の光を見つけなくてはならないのである。新しい光源はその開発だけでなく、取り扱い方自体も研究対象となってしまう。ここでは Au をターゲットとし、まずは 8eV の新光源で光電子分光を行う。
- ② KBBF 結晶を用いた 8eV レーザーを辛研究室に移設し、超高分解光電子分光器に接続する。まずは分解能は低い取り回しの可能な光電子分光器をレーザー側に配置し、光電子分光か可能かどうかの知見を得る。その後超高分解分光装置に接続し本格研究をスタートする。
- ③ 開発中の小林グループのレーザー(研究項目4)は、辛研の学生と小林研との共同研究として進めており、予想以上の成果を上げることができた。このレーザーは高分解能用準 CW レーザーとしては世界最高(最短波長)の 8.0eV のエネルギーを持っている。今年度後半から、本新型レーザーを辛グループ(1)で建設した超高分解能光電子分光器(研究項目 1)に設置することによって、ブリリアンゾーン全体の光電子分光が測定できるようになる予定である。一方、小林グループ(研究項目2)のレーザーは予定通り、8.4eV の出力を得ることができるようになったが、極めて難しい技術を要し、光電子分光に使用するためには、まだ、時間がかかりそうである。まずは光源グループで光電子分光のセットアップを組んで予備実験を試みる。
- ④ 前述通り、KBBF 方式への路線変更で目処が立ったのは幸運である。また、8eV 時間分解も何ができるかを含めてこれから検討する予定である。

4. 7. サブテーマ7; 高性能KBBFデバイスの研究開発(東京理科大学 渡部グループ)

高性能KBBFデバイスの研究開発を行い、VUV光源の高出力化を計った。現在進行中のプロジェクトでは準 CW ファイバーレーザーを用いた 8 eV 光源の開発が行われているが、この領域では KBBF そのものの吸収のみならず、KBBF と CaF_2 プリズムの界面の接着性や CaF_2 自体の品質も重要である。KBBF に関しては、中国科学院の Chen 教授と10年以上共同研究を行っており、最高品質の KBBF の提供を受けた。また CaF_2 結晶は深紫外リソグラフィーに使われる最高品質のものを用いた。一番重要な KBBF の研磨と CaF_2 プリズムの接合は、日本企業と中国科学院の両方で試作を行った。図26にプリズムカップルKBBF素子(PCD)を示す。

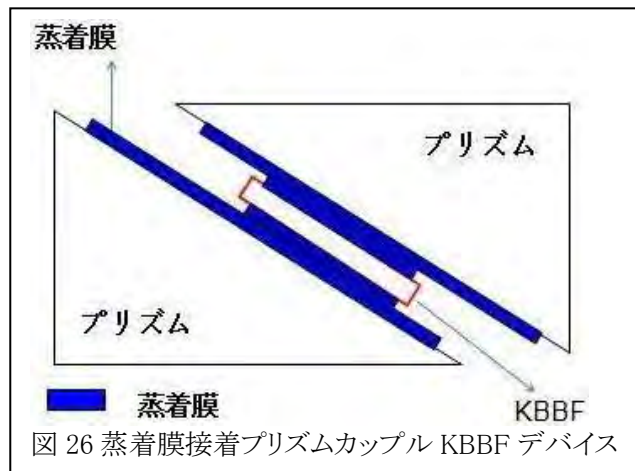


図 26 蒸着膜接着プリズムカップル KBBF デバイス

プリズムとKBBFの界面の接着は光学接着のみならず、蒸着膜を介した新しい接合法を試した。まず光学接着ではKBBF研磨面の面精度と面粗さを改善した。面精度は $0.3\lambda(\lambda=633\text{nm})$, 面粗さは 2nm RMS に改善され、高出力化に大きく貢献した。またプリズム材料が合成石英の場合は SiO_2 蒸着膜を介し加熱することにより界面の高耐力を達成した。 CaF_2 の場合はフッ化物の蒸着膜を介した接着法に成功し、この変換効率と耐力試験を行っている。これら試作された素子は小林研で開発された 8eV 光源の高出力化($1\mu\text{W}$)に使われた。また 8eV 光源の更なる高出力化のために、7eV 光源の高出力化が必要であり、このプロジェクトで開発した最高のデバイスを提供した。現在高出力化の実験を行っている。

§5 成果発表等

(1)原著論文発表(国内(和文)誌 9 件、国際(欧文)誌 46 件)

1. Y.Ishida, T.Shimajima, K.Ishizaka, T.Kiss, M.Okawa, T.Togashi, S.Watanabe, X.Y.Wang, C.T.Chen, Y.Kamihara, M.Hirano, H.Hosono, S.Shin, Temperature-dependent pseudogap in the oxypnictides $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ and $\text{LaFePO}_{1-x}\text{F}_x$ seen via angle-integrated photoemission, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 060503-060506. (DOI:10.1103/PhysRevB.79.060503)
2. M.Okawa, K.Ishizaka, H.Uchiyama, H.Tadatomo, T.Masui, S.Tajima, X.Y.Wang, C.T.Chen, S.Watanabe, A.Chainani, T.Saitoh, S.Shin, Superconducting electronic state in optimally doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ observed with laser-excited angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys Rev. B.*, **79**, (2009) 144528(1-9). (DOI: 10.1103/PhysRevB.79.144528)
3. M.Matsunami, R.Eguchi, T.Kiss, K.Horiba, A.Chainani, M.Taguchi, K.Yamamoto, T.Togashi, S.Watanabe, X.Y.Wang, C.T.Chen, Y.Senba, H.Ohashi, H.Sugawara, H.Sato, H.Harima, S.Shin, Anomalous duality of $4f$ electrons in filled skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Os}_{12}$, *Phys.Rev.Lett.*, **102** (2009) 036403(1-4). (DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.036403)
4. T. Shimajima, K. Ishizaka, Y. Ishida, N. Katayama, K. Ohgushi, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, X. -Y. Wang, C. -T. Chen, S. Watanabe, R. Kadota, T. Oguchi, A. Chainani, S. Shin, "Orbital-dependent modifications of electronic structure across magneto-structural transition in BaFe_2As_2 ", *Phys.Rev.Lett.*, **104**, (2010) 057002 (1-4).(DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.057002)
5. K.Ishizaka, R.Eguchi, S.Tsuda, A.Chainani, T.Yokoya, T.Kiss, T.Shimajima, T.Togashi, S.Watanabe, C.T.Chen, Y.Takano, M.Nagao, I.Sakaguchi, T.Takenouchi, H.Kawarada, S.Shin, Reply to: PRL 100, 166402 (2008), *Phys Rev. Lett.*, **102**, (2009) 199702. (DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.199702)
6. R.Yoshida, T.Wakita, H.Okazaki, Y.Mizuguchi, S.Tsuda, Y.Takano, H.Takeya, K.Hirata, T.Muro, M.Okawa, K.Ishizaka, S.Shin, H.Harima, M.Hirai, Y.Muraoka, T.Yokoya, Electronic structure of superconducting FeSe studied by high-resolution photoemission spectroscopy, *Journal of the Physical society of Japan.*, **78**, No.3, (2009) 034708(1-4). (DOI: 10.1143/JPSJ.78.034708)
7. Y.Okada, T.Takeuchi, M.Ohkawa, A.Shimoyamada, K.Ishizaka, T.Kiss, S.Shin, H.Ikuta, Momentum dependence of the energy gap in the superconducting state of optimally doped $\text{Bi}_2(\text{Sr}, R)_2\text{CuO}_y$ ($R=\text{La}$ and Eu), *Journal of Phys: Conference Series*, **150** (2009) 052197. (DOI:10.1088/1742-6596/150/5/052197)
8. Birgitta Bernhardt, Akira Ozawa, Patrick Jacquet, Marion Jacquy, Yohei Kobayashi, Thomas Udem, Ronald Holzwarth, Guy Guelachvili, Theodor W. Hansch and Nathalie Picque, "Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy," *Nature Photon.* **4**, 55-57 (2010). (DOI: 10.1038/NPHOTON.2009.217)
9. M.Taguchi, A.Chainani, M.Matsunami, R.Eguchi, Y.Takata, M.Yabashi, K.Tamasaku, Y. Nishino, T.Ishikawa, S.Tsuda, S.Watanabe, C.T.Chen, Y.Senba, H.Ohashi, K.Fujiwara, Y.Nakamura, H.Takagi, S.Shin, "Anomalous state sandwiched between fermi liquid and charge ordered mott-insulating phases of Ti_4O_7 ", *Phys Rev. Lett.*, **104**, 106401-106404 (2010). (DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.106401)
10. P.A.Bhobe, A.Chainani, M.Taguchi, T.Takeuchi, R.Eguchi, M.Matsunami, K.Ishizaka, Y.Takata, M.Oura, Y.Senba, H.Ohashi, Y.Nishino, M.Yabashi, K.Tamasaku, T.Ishikawa, K.Takenaka, H.Takagi, S.Shin, "Evidence for a correlated

- insulator to antiferromagnetic metal transition in CrN", *Phys Rev. Lett.*, **104**, 236404-236407 (2010). (DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.236404)
11. Naoya Kuse, Nomura Yutaka, Akira Ozawa, Makoto Kuwata-Gonokami, Shuntaro Watanabe, and Yohei Kobayashi, "Self-compensation of third-order dispersion for ultrashort pulse generation demonstrated in an Yb fiber oscillator", *Opt. Lett.* **35**, 3868-3870 (2010). (DOI: 10.1364/OL.35.003868)
 12. Dai Yoshitomi, Xiangyu Zhou, Yohei Kobayashi, Hideyuki Takada, and Kenji Torizuka, "Long-term stable passive synchronization of 50 μ J femtosecond Yb-doped fiber chirped-pulse amplifier with a mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Express*, **18**, 26027-26036 (2010). (DOI:10.1364/OE.18.026027)
 13. Xiangyu Zhou, Dai Yoshitomi, Yohei Kobayashi, and Kenji Torizuka, "1 W average-power 100 MHz repetition-rate 259 nm femtosecond deep ultraviolet pulse generation from ytterbium fiber amplifier", *Opt. Lett.* **35**, 1713-1715 (2010). (DOI: 10.1364/OL.35.001713)
 14. S. Adachi, N. Ishii, Y. Kobayashi, Y. Nomura, J. Itatani, T. Kanai, and S. Watanabe, "Carrier-envelope phase control of few-cycle parametric chirped-pulse amplifier", *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 032703 (2010). (DOI: 10.1143/JJAP.49.032703)
 15. S. Adachi, N. Ishii, Y. Nomura, Y. Kobayashi, J. Itatani, T. Kanai, and S. Watanabe "1.2-mJ, sub-4-fs source at 1 kHz from an ionizing gas", *Opt. Lett.* **35**, 980-982 (2010). (DOI: 10.1364/OL.35.000980)
 16. K. Ishizaka, T. Kiss, T. Yamamoto, Y. Ishida, T. Saitoh, M. Matsunami, R. Eguchi, T. Ohtsuki, A. Kosuge, T. Kanai, M. Nohara, H. Takagi, S. Watanabe, and S. Shin, "Femtosecond core-level photoemission spectroscopy on 1T-TaS₂ using a 60 eV laser source", *Phy. Rev. B* **83**, (2011)081104-081107. (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.081104).
 17. T. Shimojima, F. Sakaguchi, K. Ishizaka, Y. Ishida, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, C.-T. Chen, S. Watanabe, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Chainani, S. Shin "Orbital-Independent Superconducting Gaps in Iron-Pnictides", *Science* **332**, (2011)564. (DOI: 10.1126/science.1202150)
 18. Y. Ishida, H. Kanto, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Ito, Y. Ota, K. Okazaki, W. Malaeb, M. Mulazzi, M. Okawa, S. Watanabe, C.-T. Chen, M. Kim, C. Bell, Y. Kozuka, H.Y. Hwang, Y. Tokura, and S. Shin Common Origin of the Circular-Dichroism Pattern in Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of SrTiO₃ and Cu_xBi₂Se₃, *Phys.Rev.Lett.* **107**(2011).77601. (DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.077601)
 19. K. Ishizaka, M. S. Bahramy, H. Murakawa, M. Sakano, T. Shimojima, T. Sonobe, K. Koizumi, S. Shin, H. Miyahara, A. Kimura, K. Miyamoto, T. Okuda, H. Namatame, M. Taniguchi, R. Arita, N. Nagaosa, K. Kobayashi, Y. Murakami, R. Kumai, Y. Kaneko, Y. Onose and Y. Tokura, Giant Rashba-type spin splitting in bulk BiTeI, *Nature materials* **19**(2011).521. (DOI: 10.1038/NMAT3051)
 20. Y. Nomura, Y. Ito, A. Ozawa, X.-Y. Wang, C.-T. Chen, S. Shin, S. Watanabe, and Y. Kobayashi, "Coherent quasi-cw 153 nm light source at 33 MHz repetition rate," *Opt. Lett.* **36**, pp1758-1760 (2011). (DOI: :10.1364/OL.36.001758)
 21. Lora Nugent-Glandorf, Todd A. Johnson, Yohei Kobayashi, Scott A. Diddams, "The Impact of Dispersion on Amplitude and Frequency Noise in a Yb-fiber Laser Comb," *Opt. Lett.* **36**, pp1578-1580 (2011). (DOI:10.1364/OL.36.001578)
 22. Y.Ishida, T.Togashi, K.Yamamoto, M.Tanaka, T.Taniuchi, T.Kiss, M.Nakajima, T.Suemoto, S.Shin, "Non-thermal hot electrons ultrafastly generating hot optical phonons in graphite", *Scientific Reports*, **1**, (2011) 1-5. (DOI: 10.1038/srep00064)

23. T.Tokushima, Y.Horikawa, H.Arai, Y.Harada, O.Takahashi, L.G.M.Pettersson, A.Nilsson, S.Shin "Polarization dependent resonant x-ray emission spectroscopy of D2O and H2O water: Assignment of the local molecular orbital symmetry" *The Journal of Chemical Physics.*, 136, (2012) 044517 (1-7) .(DOI:10.1063/1.3678443)
24. Y.Harada, M.Kobayashi, H.Niwa, Y.Senba, H.Ohashi, T.Tokushima, Y.Horikawa, S.Shin," Ultrahigh resolution soft x-ray emission spectrometer at BL07LSU in SPring-8", *Review of Scientific instruments.*, 83, (2012) .013116 (1-6), (DOI:10.1063/1.3680559)
25. H.Arai, Y.Horikawa, K.Sadakane, T.Tokushima, Y.Harada, Y.Senba, H.Ohashi, Y.Takata, S.Shin," Hydrogen bonding of water in 3-methylpyridine studied by O 1s x-ray emission and on absorptions.spectroscopy",*Phys.Chem.Chem.Phys.*,14(2012).1576-1580,(DOI:10.1039/c2cp23276f)
26. M.Matsunami,A.Chainani,M.Taguchi,R.Eguchi,Y.Takata,M.Oura,M.Yabashi,K.Tamasaku,Y.Nishino,T.Ishikawa,M.Kosaka and S.Shin," Photoemission Evidence for Valence Fluctuations and Kondo Resonance in YbAl2", *The Physical Society of Japan* 81,(2012) 073702,(DOI:10.1143/JPSJ.81.073702)
27. T. Kiss, A. Chainani, H. M. Yamamoto, T. Miyazaki, T. Akimoto, T. Shimojima, K. Ishizaka, S. Watanabe, C.-T. Chen, A. Fukaya, R. Kato and S. Shin," Quasiparticles and Fermi liquid behavior in an organic metal", *Nature Communications* **3** (2012).1089,(DOI:10.1038/ncomms2079)
28. K.Okazaki,Y.Ota,Y.Kotani,W.Malaeb, Y. Ishida,T.Shimojima, T. Kiss, S.Watanabe, C.-T.Chen, K.Kihou,C.H.Lee, A.Iyo, H.Eisaki, T.Saito, H.Fukazawa,Y.Kohori,K. Hashimoto,T.Shibauchi,Y.Matsuda,H.Ikeda,H.Miyahara,R.Arita,A.Chainani, S.Shin "Octet-line node structure of superconducting order parameter in KFe2As2", *Science* **337**,(2012). 1314 ,(DOI:10.1126/science.1222793)
29. W. Malaeb, T. Shimojima, Y. Ishida, K. Okazaki, Y. Ota, K. Ohgushi, K. Kihou, T. Saito, C. H. Lee,S. Ishida, M. Nakajima, S. Uchida, H. Fukazawa, Y. Kohori, A. Iyo, H.Eisaki, C.-T. Chen,S. Watanabe,H. Ikeda, S. Shin," Abrupt change in the energy gap of superconducting Ba1-x Kx Fe2As2 single crystals with hole doping", *Phys Rev. B* **86**,(2012).165117,(DOI:10.1103/PhysRevB.86.165117)
30. Birgitta Bernhardt, Akira Ozawa, Andreas Vernaleken, Ioachim Pupeza, Jan Kaster, Yohei Kobayashi, Ronald Holzwarth, Ernst Fill, Ferenc Krausz, Theodor W. Hansch, and Thomas Udem , "Vacuum ultraviolet frequency combs generated by a femtosecond enhancement cavity in the visible," *Opt. Lett.* **37**, pp503-505 (2012).(DOI: 10.1364/OL.37.000503)
31. Akira Ozawa and Yohei Kobayashi, "Chirped-pulse direct frequency-comb spectroscopy of two-photon transitions," *Phys. Rev. A* **86**, 022514 (2012) .(10.1103/PhysRevA.86.022514)
32. Kuse, Naoya; Ozawa, Akira, Nomura, Yutaka, Ito, Isao, Kobayashi, Yohei , "Injection locking of Yb-fiber based optical frequency comb," *Opt. Exp.* **20**, pp10509-10518 (2012). (10.1364/OE.20.010509)
33. N.Ishii, S.Adachi, Y.Nomura, A.Kosuge, Y.Kobayashi, T.kanai, J.Itatani and S.Watanabe, "Generation of soft x-ray and water window harmonics using a few-cycle, phase-locked, optical parametric chirped-pulse amplifier", *OPTICS LETTERS*, vol. 37, No. 1, pp.97-99,(2012) (DOI:10.1364/OL.37.000097)
34. N.Ishii, K.kaneshima, K.Kitano, T.Kanai, S.Watanabe and J.Itatani, "Sub-two-cycle, carrier-envelopephase-stable, intense optical pulses at 1.6μm from a BiB3O6optical parametric chirped-pulseamplifier", *OPTICS LETTERS*, vol. 37, No. 20, pp.4182-4184,(2012). (DOI:10.1364/OL.37.004182)
35. C. Zhou, T. Kanai, X. Wang, Y. Zhu, C. Chen and S. Watanabe, " Generation of ultrashort 25-μJ pulses at 200 nm by dual broadband frequency doubling with a

- thin $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ crystal”, OPTICS EXPRESS, vol. 20, No. 13, pp.13684-13684, (2012). (DOI:10.1364/OE.20.013684)
36. Y. Zhang, R.Hoshi, D.Yamaguchi, Y.Okada-Shudo, M.Watanabe, M.Hyodo, Y.Zhu, X.Wang, G.Wang, C.Chen, T.Kanai and S.Watanabe, “Generation of quasi-cw deep ultraviolet light below 200 nm by an external cavity with a Brewster-input KBBF prism coupling device”, Opt. Communi., vol.295, pp.176-179, (2013) .(DOI:10.1016/j.optcom.2012.12.056)
 37. M. Sakano, M. S. Bahramy, A. Katayama, T.Shimajima, H. Murakawa, Y. Kaneko, W. Malaeb, S. Shin, K. Ono, H. Kumigashira, R. Arita, N.Nagaosa, H.Y. Hwang, Y. Tokura, K. Ishizaka, ” Strongly Spin-Orbit Coupled Two-Dimensional Electron Gas Emerging near the Surface of Polar Semiconductors”, PRL 110, 107204. (2013) , (DOI:10.1103/PhysRevLett.110.107204)
 38. T. Kondo, Y. Nakashima, W. Malaeb, Y. Ishida, Y. Hamaya, Tsunehiro Takeuchi, S. Shin, ” Anomalous Doping Variation of the Nodal Low-Energy Feature of Superconducting $(\text{Bi, Pb})_2(\text{Sr, La})_2\text{CuO}_{6+\delta}$ Crystals Revealed by Laser-Based Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”, /PhysRevLett 110,217006(2013).(DOI:10.1103/PhysRevLett.110.217006)
 39. Akira Ozawa and Yohei Kobayashi, "vuv frequency-comb spectroscopy of atomic xenon," Phys. Rev. A **87**, 022507 (2013).(10.1103/PhysRevA.87.022507)
 40. Yohei Kobayashi, Nozomi Hirayama, Akira Ozawa, Takashi Sukegawa, Takashi Seki, Yoshiyuki Kuramoto, and Shuntaro Watanabe, "10-MHz, Yb-fiber chirped-pulse amplifier system with large-scale transmission gratings," Optics Express Vol. 21, Iss. 10, pp. 12865–12873 (2013). (10.1364/OE.21.012865)
 41. Kuse, Naoya; Ozawa, Akira; Kobayashi, Yohei, "Static FBG strain sensor with high resolution and large dynamic range by dual-comb spectroscopy," Optics Express, Vol. 21 Issue 9, pp.11141-11149 (2013).
 42. Nobuhisa Ishii, eisuke Kaneshima, Kenta Kitano, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe and Jiro Itatani, "Carrier-envelope phase-dependent high harmonic generation in the water window using few-cycle infrared pulses" , Nature Communications, 5, (2014).3331, (10.1038/ncomms4331)
 43. Chun Zhou, Takashi Seki, Tsuyoshi Kitamura, Yoshiyuki Kuramoto, Takashi Sukegawa, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Yohei Kobayashi, and Shuntaro Watanabe, " Wavefront analysis of high-efficiency, large-scale, thin transmission gratings", Optics Express Vol. 22, Iss. 5, pp. 5995–6008 (2014). (10.1364/OE.22.005995)
 44. T. Shimajima, T. Sonobe, W. Malaeb, K. Shinada, A. Chainani, S. Shin, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, H. Kumigashira, K. Ono, Y. Nakashima, H. Anzai, M. Arita, A. Ino, H.Namatame, M. Taniguchi, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda, K. Ishizaka, “Pseudogap formation above the superconducting dome in iron pnictides” Phys Rev. B.89,045101(2014).(DOI:10.1103/PhysRevB.89.045101)
 45. Y. Ota, K. Okazaki, Y. Kotani, T. Shimajima, W. Malaeb, S. Watanabe, C.-T. Chen, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Saito, H. Fukazawa, Y. Kohori, S. Shin, ” Evidence for excluding the possibility of d-wave superconducting-gap symmetry in Ba-doped KFe_2As_2 ” Phys Rev. B.89,081103(2014).(DOI:10.1103/PhysRevB.89.081103)
 46. K. Okazaki¹, Y. Ito, Y. Ota, Y. Kotani, T. Shimajima, T. Kiss, S. Watanabe, C.-T. Chen, S. Niitaka, T. Hanaguri, H. Takagi, A. Chainani, S. Shin, ” Superconductivity in an electron band just above the Fermi level: possible route to BCS-BEC superconductivity” Scientific Reports.,4:4109(2014).1-6(DOI: 10.1038/srep04109)

(2)その他の著作物(原著論文以外の総説、解説、単行本など書籍)

- (ア) 辛 埴・木須孝幸・石坂香子・下志万貴博・渡部俊太郎“真空紫外・軟Xレーザーを用いた超高分解能光電子分光”、固体物理 特集号 Vol.44、161-170 アグネ出版社、2009年
- (イ) 辛 埴、“レーザー光電子分光を用いた物性研究光科学研究の最前線2” 株式会社国際文献印刷社、2009年
- (ウ) 田中良和・A.Chainani・辛埴、“共鳴 X 線回折を用いたキラリティー解析”放射光 Vol.22 No.5 241-248 2009年
- (エ) 田中良和、A.Chainani、辛埴、“円偏光 X 線回折でみる結晶カイラリティ”日本物理学会誌 65 巻 1 号 29-34 2010年
- (オ) 下志万貴博・辛 埴、“第三の超伝導メカニズムの可能性”化学 Vol.66 66 2011年
- (カ) 小林洋平、“Yb 系モード同期レーザーによる高繰り返し光周波数コム,”レーザー研究 39 巻 P831 (2011)
- (キ) 野村雄高, Chuangtian Chen, 渡部俊太郎, 小林洋平, "コヒーレントな狭帯域準連続真空紫外光源の開発," 化学工業 **63**, pp612-617 (2012)
- (ク) 横谷尚睦、辛埴、“重い電子の直接観測”、固体物理 Vol.47 No.11 29-37 2012年
- (ケ) 小澤陽、小林洋平“紫外光周波数コム発生と精密分光への応用”OplusE 2013年 10月号

(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 3 件、国際会議 29 件)

1. S.Shin (Invited Talk) “Laser-ARPES on $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”, ICC-IMR workshop "Physics on Transition Metal Based Superconductors", Tohoku Univ., Sendai, Japan, 24-26 June 2009,
2. S.Shin (Invited Talk) “Laser photoemission experiments on various superconductors including iron pnictides”New Developments in Theory of Superconductivity, ISSP, Univ. Tokyo, Japan, 8-10 July 2009,
3. S.Shin (Invited Talk) “Laser-ARPES study on $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²X-IX), Keio Plaza Hotel Tokyo, Tokyo, Japan, 7-12 September 2009,
4. S.Shin (Invited Talk) “Hard x-ray photoelectron spectroscopy”The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI), Melbourne convention and exhibition centre, Melbourne, Australia, 27 September-2 October 2009,
5. S.Shin (Invited Talk) “Laser-ARPES study on Fe Superconductors”, 10th Japan-Korea-Taiwan Symposium on strongly Correlated Electron Systems, Jibasan Building, Himeji, Japan, 11-13 March 2010,
6. S.Shin. “Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors”, 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), Epocal Tsukuba, Japan, 01-03 November 2010,
7. S.Shin “Photoemission spectroscopy of heavy electron systems: Recent results and Frontiers”, International Conference on Heavy Electrons 2010 (ICHE2010), Tokyo Metropolitan Univ. Tokyo, Japan, 17-20 September 2010,
8. S.Shin. “Laser-ARPES study on Fe-pnictides superconductors”, Workshop on Principles and Design of Strongly Correlated Electronic Systems, Trieste, Italy, 2-13 August 2010,
9. S.Shin “Laser-ARPES on Fe superconductors”, International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials, Osaka University, Convention Center, Osaka, Japan, 30 May - 4 June 2010,
10. Yohei Kobayashi. “High rep rate, high-power Yb:KYW and Yb-fiber laser system,”

- Ringberg meeting of Haensch lab, MPQ, Ringberg Sep. 2010, .
11. B. Bernhardt¹, A. Ozawa, A. Vernaleken, I. Pupeza, Y. Kobayashi, W. Schneider, R. Holzwarth¹, J. Rauschenberger, E. Fill, A. Apolonskiy, F. Krausz, T.W. Hänsch and Th. Udem. "Frequency combs in the XUV", Frontiers of nonlinear physics, Nizhny Novgorod, Russia, July 2010,
 12. Ronald Holzwarth, Birgitta Bernhardt, Akira Ozawa, Thomas Udem, Theodor W. Hänsch, Patrick Jacquet, Marion Jacquy, Guy Guelachvili, Yohei Kobayashi, and Nathalie Picque "Broadband Spectroscopy with Dual Combs and Cavity Enhancement", RD1, the 65th International Symposium on Molecular Spectroscopy, Ohio State University, USA, June 24, 2010,
 13. S.Shin (Invited Talk) "Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors", International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Berkeley, California, July 18 - 22, 2011,
 14. S.Shin (Invited Talk) "Present status of Soft X-ray RIXS in SPring-8: electronic structure of liquids and protein" Workshop on Resonant Inelastic and Elastic X-Ray Scattering, SLS, PSI, Switzerland, 16-17 September 2011
 15. Akira Ozawa, Nozomi Hirayama, and Yohei Kobayashi, "Yb fiber-laser system for XUV frequency comb generation," Ringberg meeting of Haensch lab, MPQ, Ringberg Sep. 2011
 16. Yutaka Nomura, Yoshiaki Ito, Akira Ozawa, Xiaoyang Wang, Chuangtian Chen³, Shik Shin, Shuntaro Watanabe, and Yohei Kobayashi, "Coherent Quasi-cw 153 nm Light Source at High Repetition Rate" SPIE Photonics West 2012 paper 8240-16, San Francisco, USA Jan. 2012
 17. Yohei Kobayashi, Nozomi Hirayama, and Akira Ozawa, "Advanced mode-locked fiber lasers," DYCE-Asia workshop, Hongo(2012.4)
 18. S.Shin(Invited Talk) "Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors" 2012Itinerant Spin-Orbital Systems International Workshop, Dresden, Germany,21-25 May 2012
 19. S.Shin(Invited Talk) "Ultrahigh-resolution and Time-resolved Laser" the 19th International Conference on Magnetism,Busan,Korea,8-13 July 2012
 20. S.Shin (Invited Talk) "Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors" ICAM-12CAM Innovations in Strongly Correlated Electronic Systems, Trieste ,Italy,6-17 August 2012
 21. 幸埴 (Invited Talk) "時間分解レーザー光電子分光による非平衡状態の電子構造", 2012年秋季大会、横浜国大・日本、2012年9月18-21日
 22. K.Okazaki (Invited Talk) 、"DIRECT OBSERVATION OF SUPERCONDUCTING GAPS IN IRON-BASED SUPERCONDUCTORS BY LASER ARPES"、第25回国際超電導シンポジウム(ISS2012)、タワーホール船堀、東京日本、2012年12月3-5日
 23. S.Shin(Invited Talk)"最近の軟 X 線分光の進歩と課題"、第26回放射光学学会、名古屋大学・日本、2013年1月12-14日
 24. S.Shin(Invited Talk) "Study of iron-based superconductors by the development of ultra-high resolution laser-photoemission spectroscopy" The 13th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems ,Osaka,Japan,15-17 January2013
 25. S.Shin(Invited Talk) "Superconducting energy gap and nodes in the doped BaFe₂As₂ system" APS March Meeting 2013, Baltimore, Maryland,USA,18-22 March 2013
 26. Akira Ozawa and Yohei Kobayashi "VUV frequency comb generation based on Yb-doped fiber lasers and its application for comb spectroscopy" Ultrafast Optics 2013, Davos, Switzerland Mar. 2013
 27. S.Shin(Invited Talk) "Superconducting gap and nodes in the doped BaFe₂As₂ system by laser photoemission", SNS2013,Berkelay,California,USA,24-28,June2013

28. S.Shin(Plenary Talk) “Study of materials science by the laser-photoemission spectroscopy”,
VUNX2013, Hefei, Anhui , China, 12-19 July 2013
29. Yukiaki ISHIDA (Invited speaker) “Time-resolved ARPES of graphite using femtosecond pulsed light in the deep-to-extreme UV region”, "IMS Work shop on Advanced Spectroscopy of Correlated Materials (ASCM 13)", UVSOR,Okazaki.Japan, 2-4, August 2013
30. Walid Malaeb(Invited speaker) “Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors” International workshop on Recent developments in Fe-based high-temperature superconductors, Riverhead,New York,USA, 3-6, September2013
31. S.Shin(Invited Talk) “Ultra-high resolution laser-ARPES Study on high Tc-Superconductors”
2014 Quantum Materials Symposium in conjunction with 14th Korea-Japan-Taiwan Workshop on SCES, Muju Deogyusan Resort, Korea, 22-26 February 2014
32. S.Shin(Invited Talk) “Study of materials science by the laser-photoemission spectroscopy”
The 18th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Hiroshima University Faculty Club,Japan, 6-7 March, 2014

② 口頭発表 (国内会議 102 件国際会議 35 件)

1. S. Adachi, N. Ishii, Y. Nomura, Y. Kobayashi, A. Kosuge, J. Itatani, T. Kanai, S. Watanabe, D. Yoshitomi, and K. Torizuka, "CEP Control of Few-Cycle Multi-mJ OPCPA System for Attosecond Harmonics Generation," in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper CFN2.
2. D. Yoshitomi, T. Kawasaki, T. Aoki, Y. Kobayashi, N. Nakamura, T. Homma, H. Kawata, and K. Torizuka, "Normal-Dispersion Passively Mode-Locked Ytterbium-Doped Fiber Laser with a Fundamental Repetition Rate Higher than 400 MHz," in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper CMA2.
3. B. Bernhardt, A. Ozawa, R. Holzwarth, T. Udem, I. Pupez, J. Rauschenberger, F. Krausz, T. Haensch, Y. Kobayashi, and D. Hofling, "Frequency Comb Generation in the XUV Regime Using a Yb-Fiber Laser and Amplifier System," in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper CMN3.
4. N. Ishii, S. Adachi, Y. Nomura, A. Kosuge, J. Itatani, Y. Kobayashi, T. Kanai, and S. Watanabe, "High-Harmonic Generation in the Water Window Using a CEP-Locked Few-Cycle OPCPA System," in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper JThG4.
5. 3~4.5um TUNABLE FREQUENCY COMB BASED ON Yb FIBER LASER FOR MID-INFRARED SPECTROSCOPY,T. A. JOHNSON[□] and S. A. DIDDAMS, and Y. KOBAYASHI, ICOLS09
6. 石田行章, 田中正志, 齋藤朋也, 富樫格, 谷内敏之, 木須孝幸, 下山田篤史, 石坂香子, 中嶋誠, 末元徹, 茂筑高士, 中根茂行, 平田和人, 幸埴, Bi2212 の時間分解光電子分光～準粒子分散と超伝導ギャップの超高速応答, 日本物理学会、2009年3月27日～30日
7. 齋藤朋也, 石田行章, 田中正志, 富樫格, 谷内敏之, 木須孝幸, 下山田篤史, 石坂香子, 中嶋誠, 末元徹, 茂筑高士, 中根茂行, 平田和人, 幸埴, Bi2212 の時間分解角度分解光電子分光, 日本物理学会、2009年3月27日～30日

8. 坂口文規, 下志万貴博, 石田行章, 大川万里生, 石坂香子, 木須孝幸, 渡辺俊太郎, X.Y.Wang, C.T.Chen, 片山尚幸, 大串研也, 辛埴, レーザー角度分解光電子分光による鉄系超伝導体(Ba_{0.6}K_{0.4})Fe₂As₂の電子状態の直接観測, 日本物理学会、2009年3月27日～30日
9. 下志万貴博, 石田行章, 石坂香子, 片山尚幸, 大串研也, 木須孝幸, 大川万里生, 富樫格, X.-Y. Wang, C.-T. Chen, 渡部俊太郎, 小口多美夫, 辛埴, レーザー角度分解光電子分光によるBaFe₂As₂のフェルミ面観測, 日本物理学会、2009年3月27日～30日
10. 下志万貴博, 坂口文規, 石坂香子, 石田行章, 大川万里生, 木須孝幸, 渡部俊太郎, X.-Y.Wang, C.T.Chen, 片山尚幸, 大串研也, 辛埴, (BaK)Fe₂As₂のレーザー角度分解光電子分光II:超伝導ギャップ対称性と擬ピークの起源, 日本物理学会、2009年9月25日～28日
11. 齋藤朋也, 石田行章, 富樫格, 田中正志, 木須孝幸, 石坂香子, 茂筑高士, 中根茂行, 平田和人, 辛埴, 時間分解ARPESによるBi2212の研究, 日本物理学会、2009年9月25日～28日
12. 石田行章, 齋藤朋也, 富樫格, 田中正志, 木須孝幸, 石坂香子, 茂筑高士, 中根茂行, 平田和人, 辛埴, ノード領域から擬ギャップ領域にわたるBi2212の時間分解ARPES, 日本物理学会、2009年9月25日～28日
13. 山本貴士, 石坂香子, 木須孝幸, 小菅淳, 金井輝人, 渡部俊太郎, 菊月達也, M. Lippmaa, 高木英典, 野原実, 齋藤智彦, 辛埴, レーザー高次高調波(60eV)を光源とした時間分解光電子分光装置の開発, 日本物理学会、2009年9月25日～28日
14. 岡崎浩三, 大川万里生, 目崎雄二, 北川健太郎, 松林和幸, 瀧川仁, 上床美也, 渡部俊太郎, C.T.Chen, 辛埴, NaFeAsのレーザー角度分解光電子分光、物理学会、大阪府立大学、2010年9月23日
15. 小泉健二, 石坂香子, 木須孝幸, 加藤礼三, 辛埴、レーザー光電子分光法を用いた低次元有機導体の研究、物理学会、大阪府立大学、2010年9月24日
16. 中村祥明, 岡崎宏之, 吉田力矢, 脇田高德, 平井正明, 村岡祐治, 竹屋浩幸, 平田和人, 大川万里生, 辛埴, 渡部俊太郎, C.-T.Chen, 組頭広志, 尾嶋正治, 横谷尚睦、充填スクテラライト超伝導体RPt₄Ge₁₂(R=La,Pr)の電子状態、物理学会、大阪府立大学、2010年9月25日
17. 吉田力矢, 中村祥明, 福井仁紀, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦, 大川万里生, 辛埴, 平井正明, 村岡祐治, 横谷尚睦、URu₂Si₂のレーザー角度分解光電子分光II、物理学会、大阪府立大学、2010年9月26日
18. 江口律子, 赤池幸紀, 加地由美子, 石田行章, 小泉健二, 辛埴, 金井要, 藤原明比古, 神戸高志, 久保園芳博、新規有機物質の正・逆光電子分光による電子状態の観測、物理学会、大阪府立大学、2010年9月26日
19. 菅藤裕昭, 石田行章, 岡崎浩三, Walid Malaeb, 小谷佳範, 大田由一, 吉川明子, 田口康二郎, 十倉好紀, 辛埴、Cu_xBi₂Se₃の時間分解光電子分光、物理学会、新潟大学、2011年3月26日(中止)
20. 園部竜也, 下志万貴博, 坂野昌人, 大川万里生, フリッドマラエブ, 富樫格, 渡部俊太郎, 辛埴, 中島正道, 石田茂之, 内田慎一, 富岡泰秀, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 伊藤利充, 石坂香子、レーザー光電子分光によるデソインされたBaFe₂As₂の電子状態の研究、物理学会、新潟大学、2011年3月25日(中止)
21. 山本貴士, 石田行章, 金井輝人, 島田智子, 齋藤智彦, 渡部俊太郎, 辛埴、極紫外レーザー光電子の超高速加速と時間分解ARPES、物理学会、新潟大学、3月26日(中止)
22. 大川万里生, 石田行章, 島田智子, 伊賀文俊, 高島敏郎, Chuang-Tian Chen, 渡部俊太郎, 辛埴、時間分解光電子分光から見た近藤半導体YbB₁₂の混成ギャップ形成、物理学会、新潟大学、2011年3月26日(中止)
23. 小泉健二, 石坂香子, 木須孝幸, 加藤礼三, 辛埴、レーザー光電子分光を用いた低次元有機導体の研究:TTF·TCNQ,TSF·TCNQ、物理学会、新潟大学、2011年3月26日(中止)

24. 伊藤孔明, 大田由一, 岡崎浩三, 小谷佳範, 下志万貴博, 木須孝幸, 渡部俊太郎, C.T.Chen, 新高誠司, 花栗哲郎, 高木英典, 辛埴、レーザー角度分解光電子分光による $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ の超伝導電子状態の観測、物理学会、新潟大学、2011年3月27日(中止)
25. 吉田力矢, 福井仁紀, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦, 大川万里生, Walid Malaeb, 辛埴, 平井正明, 村岡祐治, 横谷尚睦、 URu_2Si_2 の超高分解能 ARPES: 光電子スペクトルに見られる微細構造、物理学会、新潟大学、2011年3月28日(中止)
26. 大田由一, 岡崎浩三, 小谷佳範, 下志万貴博, 木須孝幸, C.-T.Chen, 渡部俊太郎, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 辛埴、鉄系超伝導体 KFe_2As_2 の超伝導ギャップとその異方性、物理学会、新潟大学、2011年3月28日(中止)
27. 野村雄高、伊藤孔明、小澤陽、Wang Xiaoyan、Chen Chuantian、辛埴、小林洋平、渡部俊太郎、“KBBF 結晶を用いた高繰り返し真空紫外光源の開発” 第71回応用物理学会学術講演会 長崎大学 2010年9月
28. 伊藤孔明、野村雄高、辛埴、渡部俊太郎、小林洋平 “波長可変狭線幅モード同期 Yb ファイバーレーザーの開発” 第71回応用物理学会学術講演会 長崎大学 2010年9月
29. 久世直也、野村雄高、小澤陽、五神真、小林洋平 “Yb ファイバーレーザーによる光周波数コムの開発” 第71回応用物理学会学術講演会 長崎大学 2010年9月
30. 平山望、小澤陽、小林洋平 “ビスマス系 EDF を用いた広帯域モード同期レーザーの開発”、第71回応用物理学会学術講演会 長崎大学 2010年9月
31. 伊藤 功, 山本遇哲, 小澤 陽, 小林洋平, 辛 埴 1,2, Xiaoyan Wang, Chuangtian Chen, 渡部俊太郎"KBBF 結晶を用いた高繰り返しコヒーレント 8eV 光源の開発" 第72回応用物理学会学術講演会 2011年8月 山形大学
32. 平山 望, 小澤 陽, 小林洋平 "10MHz 繰り返し高出力超短パルスファイバーレーザー" 第72回応用物理学会学術講演会 2011年8月 山形大学
33. 久世直也, 小澤 陽, 伊藤 功, 小林洋平"注入同期を利用したオフセット周波数安定性の転送 第72回応用物理学会学術講演会 2011年8月 山形大学"
34. 松田太一、和達大樹、小島太郎、高田恭孝、大浦正樹、仙波泰徳、大橋治彦、辛埴、石渡晋太郎、金子良夫、田口康二郎、十倉好紀、“共鳴軟 X 線で見た SrFeO_3 の磁気構造” 日本物理学会 2011年秋季大会、富山、2011年9月21-24日
35. 石坂香子、Bahramy M、村川寛、坂野昌人、下志万貴博、園部竜也、小泉健二、辛埴、宮原寛和、木村昭夫、宮本幸治、奥田太一、生天目博文、谷口雅樹、有田亮太郎、永長直人、金子良夫、小野瀬佳文、十倉好紀、“極性半導体 BiTeI におけるラッシュバ型スピン分裂の観測” 日本物理学会 2011年秋季大会、富山、2011年9月21-24日
36. 小泉健二、石坂香子、木須孝幸、加藤礼三、辛埴、“レーザー光電子分光法を用いた低次元有機導体の研究:TTF-TCNQ,TSF-TCNQ その2” 日本物理学会 2011年秋季大会、富山、2011年9月21-24日
37. 松田太一、和達大樹、田中良和、小島太郎、高田恭孝、大浦正樹、仙波泰徳、大橋治彦、“共鳴軟 X 線回折で見た SrFeO_3 の磁気構造”、第25回日本放射光学会年会、鳥栖市民文化会館・中央公民館、2012年1月6-9日
38. 宮脇淳、Ashish Chainani、高田恭孝、大浦正樹、仙波泰徳、大橋治彦、辛埴、Guang-Yu、Guo、前川禎通、永長直人、“Pt(111)の軟 X 線角度分解光電子分光におけるスピン軌道二色性”、第25回日本放射光学会年会、鳥栖市民文化会館・中央公民館、2012年1月6-9日
39. 小川古都、坂本英城、Walid Malaeb、近藤猛、辛埴、生田博志、竹内恒博、“ $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{CuO}_{6+\delta}$ の超伝導ギャップのキャリア濃度依存性”、第25回日本放射光学会年会、鳥栖市民文化会館・中央公民館、2012年1月6-9日
40. 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎, 鈴木博人, 藤森淳, 下志万貴博, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽祐, 安斎太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 小野寛太 組頭広志, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, “ $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$ の超伝導ギャップの異方性”、第25回日本放射光学会年会、鳥栖市民

- 文化会館・中央公民館、2012年1月6-9日
41. 大槻匠、A.Chainani、大浦正樹、仙波泰徳、大橋治彦、辛埴、“無限層構造銅酸化物薄膜の電子状態”、第25回日本放射光学会年会、鳥栖市民文化会館・中央公民館、2012年1月6-9日
 42. 堀川裕加、新井秀実、徳島高、辛埴、“有機溶媒中の酢酸分子の軟X線吸収測定 – Saturation effect 補正 –”、第25回日本放射光学会年会、鳥栖市民文化会館・中央公民館、2012年1月6-9日
 43. 山本遇哲、伊藤功、小澤陽、小林洋平、辛埴、Xiaoyan Wang, Chuangtian Chen, 渡部俊太郎, "KBBF結晶を用いた狭線幅コヒーレント8 eV光源の高出力化" 第59回応用物理学関係連合講演会 早稲田大学(2012.3)
 44. 久世直也、小澤陽、小林洋平 "フリーランニングCWレーザーにより相対的に安定化したコヒーレントデュアルコム分光システム" 第59回 応用物理学関係連合講演会 早稲田大学(2012.3)
 45. Yuka Horikawa, Hidemi Arai, Takashi Tokushima, Shik Shin, "Spectral fingerprint in X-ray absorption for hydrogen-bonded dimer formation of acetic acids in solution 第28回化学反応討論会、九州大学 筑紫、2012年6月6-8日
 46. TOKUSHIMA, Takashi; HORIKAWA, Yuka; ARAI, Hidem; HARADA, Yoshihisa; TAKAHASHI, Osamu; SHIN, Shik, "High resolution X-ray emission studies on hydrogen bonded water molecules in liquids and solutions", 第28回化学反応討論会、九州大学 筑紫、2012年6月6-8日
 47. 岡崎浩三、“レーザーARPESによる鉄系超伝導体の超伝導ギャップの直接観測” 基研研究会「鉄系高温超伝導の物理 ～スピン・軌道・格子～」、京都大学、2012年6月21-22日
 48. 久世直也、小澤陽、小林洋平 "高分解能デュアルコム分光システムのFBG歪センサーへの応用" 第73回応用物理学会学術講演会、愛媛・松山大学 (2012.9)
 49. 周春、金井輝人、王暁洋、Yong Zhu、陳創天、渡部俊太郎、“多波長サブTW光源(II)深紫外光源”、2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学・松山大学、2012/9/13
 50. 周春、関敬司、北村強、助川隆、石井順久、金井輝人、板谷治郎、小林洋平、渡部俊太郎、“1kHz テラワット級チタンサファイアレーザー用大型高効率透過型グレーティング(II) – 1740本/mm”、2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学・松山大学、2012/9/13
 51. 金井輝人、金島圭祐、石井順久、松本由幸、北野健太、渡部俊太郎、板谷治郎、“高強度 sub-10-fs 赤外 OPCPA 励起用チタンサファイア増幅システム”、2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学・松山大学、2012/9/13
 52. 石田行章、菅藤裕昭, Walid Malaeb, 渡部俊太郎, Chuangtian Chen, 吉川明子, 田口康二郎, 十倉好紀, 辛埴, “ドーブした Bi₂Se₃ の表面分極を介した超高速非線形光電子放出” 日本物理学会 2012年秋季大会、横浜国大、2012年9月18-21日
 53. 谷内敏之、阿部真之介、小谷佳範、関剛斎、小嗣真人、高梨弘毅、辛埴、“レーザー光電子顕微鏡によるナノスケール磁区観察”、日本物理学会2012年秋季大会、横浜国大、2012年9月18-21日
 54. 中島祐貴、近藤猛、石田行章, Walid Malaeb, 渡部俊太郎, Cuangtian Chen, Markus Kriener, 佐々木聡, 瀬川耕司, 安藤陽一, 辛埴, “偏光を用いたレーザー励起型角度分解光電子分光によるトポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ の研究”、日本物理学会 2012年秋季大会、横浜国大、2012年9月18-21日
 55. 岡崎浩三、大田由一、小谷佳範、下志万貴博、木須孝幸、渡部俊太郎 C.-T. ChenE, 辛埴, “低温超高分解能レーザー光電子分光による超伝導ギャップの直接観測”、2012年秋季大会、横浜国大、2012年9月18-21日
 56. 下志万貴博, W. Malaeb, 園部竜也, 石田行章, 木須孝幸, C.T.Chen, 渡部俊太郎, 辛埴, 大串研也, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 石田茂之, 島正道, 内田慎一, 石坂香子, “広い温度領域における Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ の電子状態観測”、2012年秋季大会、横浜国大、2012年9月18-21日

57. 大田由一, 岡崎浩三, W.Malaeb, 小谷佳範, 下志万貴博, 木須孝幸, C.-T.Chen, 渡部俊太郎, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 辛埴, “鉄系超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ オーバードープ領域の超伝導ギャップとその異方性 2”, 2012 年秋季大会、横浜国大、2012 年 9 月 18-21 日
58. 出田真一郎, 吉田鉄平, 鈴木博人, 藤森淳, 下志万貴博, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽祐 D, 安斎太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 組頭広志, 小野寛太, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, “ $BaFe_2(As_{1-x}Px)_2$ ($x = 0.38$) の超伝導ギャップの異方性”, 2012 年秋季大会、横浜国大、2012 年 9 月 18-21 日
59. 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎, 鈴木博人, 藤森淳, 下志万貴博, 品田慶, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽祐, 安斎太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 組頭広志, 小野寛太, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, S. K. Mo, X. Shen, Hussain, “ $BaFe_2(As_{1-x}Px)_2$ のバンド軌道対称性”, 2012 年秋季大会、横浜国大、2012 年 9 月 18-21 日
60. 園部竜也, 下志万貴博, 品田慶, 出田真一郎, Walid Malaeb, 石田行章, 辛埴, 中島正道, 富岡泰秀, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 伊藤利充, 内田慎一, 吉田鉄平, 藤森淳, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 石坂香子, “ $BaFe_2(As,P)_2$ における擬ギャップ”, 2012 年秋季大会、横浜国大、2012 年 9 月 18-21 日
61. Rikiya Yoshida, “超高分解能 ARPES でみた URu₂Si₂ の電子状態”, 新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ、沖縄県琉球大学、2012 年 11 月 23-24 日
62. 大田由一, 岡崎浩三, W.Malaeb, 小谷佳範, 渡部俊太郎, T. Chen, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 辛埴, “Ba ドープ KFe_2As_2 における超伝導ギャップ異方性のドーピング依存性”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
63. 山本遇哲, 岡崎浩三, 大田由, 小谷佳範, 下志万貴博, 木須孝幸, 北川健太郎, 松林和幸, 上床美也, 瀧川仁, G. Chuangtian Chen, 渡部俊太郎, 辛埴, “超高分解レーザー光電子分光による $LiFeAs$ の超伝導ギャップの異方性”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
64. 山本貴士, 石田行章, 吉川明子, 田口康二郎, 金井輝人, 板谷治郎, 木須孝幸, 石坂香子, 齋藤智彦, 渡部俊太郎, 十倉好紀, 辛埴, “ $Cu_{0.17}Bi_2Se_3$ における時間分解 ARPES の極紫外光エネルギー依存性”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
65. 山本真吾, 藤澤正美, 保原麗, 山本達, 中村哲也, 藤川和志, 湯川龍, 田口宗孝, 大浦正樹, 富樫格, 角田匡清, 辛埴, 松田巖, “SASE 型自由電子レーザーを用いた磁気光学効果測定システムの開発”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
66. 松波雅治. Chainani, 田口宗孝, 江口律子, 大浦正樹, 辛埴, 木村真一, 加藤健一, 玉作賢治, 香村芳樹, 伊藤基巳紀, 田中義人, 石川哲也, “硬 X 線光電子分光による $YbTGe$ ($T=Cu, Ag, Ir, Pt$) の電子状態研究”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
67. 坂本英城, 竹内恒博, 近藤猛, 辛埴, “ $Bi_2(Sr,R)_2CuO_{6+\delta}$ ($R=La, Sm, Eu$) における面外乱れが超伝導ギャップに及ぼす影響”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
68. 小泉健二, 石坂香子, 木須孝幸, 加藤礼三, 辛埴, “光電子分光法による擬 1 次元有機導体 $(TMTSF)_2PF_6$ の電子状態とその温度依存性の観測”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日
69. 吉田力矢, 山本貴士, 石田行章, 長尾浩樹, 大塚翼, 村岡祐治, 金井輝人, 板谷治郎, 辛埴, “極紫外レーザー時間分解光電子分光で見た VO_2 の光誘起相転移”, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26-29 日

70. 中島祐貴, 近藤猛, 石田行章, Walid Malaeb, 渡部俊太郎, Cuangtian Chen, Markus Kriener, 佐々木聡, 瀬川耕司, 安藤陽一, 辛埴, “レーザー励起型角度分解光電子分光で観察したカリウム蒸着により変化するトポロジカル絶縁体の表面電子状態”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26-29 日
71. 近藤猛, 中島祐貴, 金井洋貴, 谷口晴香, Walid Malaeb, 石田行章, Chuangtian Chen, 渡部俊太郎, 前野悦輝, 辛埴, “レーザー励起型角度分解光電子分光を用いて研究したルテニウム酸化物の表面電子状態”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26-29 日
72. 金井洋貴, 石田行章, 近藤猛, 野原実, 高木英典, 辛埴, “時間分解光電子分光を用いた 2H-NbSe₂ の緩和過程の研究”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26-29 日
73. 阿部真之介, 谷内敏之, 小谷佳範, 蜂谷智央, 大塚照久, 島久, 秋永広幸, 辛埴, “レーザー励起光電子顕微鏡による垂直磁化薄膜の高分解能磁気イメージング”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013.3.27-30
74. 小澤 陽, 小林洋平, “真空紫外周波数コムによる精密分光実験”第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学(2013.3)
75. 石井順久, 金島圭佑, 北野健太, 松本由幸, 金井輝人, 渡部俊太郎, 板谷治郎, “赤外パルスを用いた水の窓コンティニューム発生と背圧依存性”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013/3/27
76. 山口大智, 金井輝人, 兵頭政春, Xiaoyang Wang, Yong Zhu, Chuangtian Chen, 渡部俊太郎, 張贇, 岡田佳子, 渡辺昌良, 星遼太, “KBBF-PCD を用いた外部共振器型 SHG による準連続 VUV 光発生システムの出力安定性”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013/3/30
77. Yukiaki ISHIDA, “Time-resolved ARPES of graphite using femtosecond pulsed light in the deep-to-extreme UV region“, IMS Work shop on Advanced Spectroscopy of Correlated Materials (ASCM 13), UVSOR, 2013.8.2-4
78. Takeshi Kondo, “Two energy scales in the copper oxide high temperature superconductor” 基礎物理学研究所セミナー, 2013.9.13
79. 乙津聡夫, 小澤陽, 石田行章, 辛埴, 小林洋平, “Yb-ファイバーレーザーを用いた時間分解光電子分光用深紫外パルスレーザーの開発”, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学, 2013.9.16-20
80. 金聖憲, 吉澤俊介, 山本貴士, 石田行章, 宮町俊生, 江藤数馬, Zhi Ren, 瀬川耕司, 安藤陽一, 辛埴, 小森文夫, “STM および時間分解光電子分光による Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3} の電子状態研究”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
81. 園部竜也, 下志万貴博, 出田真一郎, Walid Malaeb, 辛埴, 中島正道, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 石坂香子, “Ba(Fe,Co)2As2 における擬ギャップ”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
82. 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎 C. C. Ambolode, 鈴木博人, 藤森淳, 下志万貴博, 品田慶, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽佑, 安斎太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 組頭広志, 小野寛太, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, S. K. MoK, Z.X. ShenK, Z, HussainK, “BaFe₂(As_{1-x}Px)₂ のバンド分散, フェルミ面の組成依存性”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
83. 大川万里生, 笠原聡, 田路智也, 山村周玄, 和達大樹, 吉田鉄平, 杉山武晴, 池永英司, 田口宗孝, 辛埴, 久我健太郎, 中辻知, 齋藤智彦, “価数揺動系 α-Yb(Al,Fe)B₄ における Yb 価数の Fe ドープ・温度依存性”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
84. 坂本英城, 竹内恒博, 近藤猛, 辛埴, “レーザー ARPES による Bi₂(Sr,R)2CuO_{6+d} における超伝導ギャップの系統的評価”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
85. 大田由一, 岡崎浩三, 藤森伸一, 芳賀芳範, 大貫惇睦, 渡部俊太郎, C.-T.Chen, 辛埴, “レ

- レーザー角度分解光電子分光によるウラン化合物超伝導体 U_6Fe と UPd_2Al_3 の超伝導ギャップ測定”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
86. 中村飛鳥, 下志万貴博, 園部竜也, 出田真一郎, Walid Malaeb, 辛埴, 飯村壮史, 松石聡, 細野秀雄, 石坂香子, ”光電子分光による $LaFeAsO_{1-x}H_x$ の電子状態の研究 II”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
 87. 小嗣真人, 大槻匠, 大河内拓雄, 小嶋隆幸, 荻原美沙子, 田代敬之, 水口将輝, 谷内敏之, 辛埴, 高梨弘毅, ”レアメタルフリー $L_{10}-FeNi$ の初期成長と垂直磁化”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
 88. 近藤猛, Walid Malaeb, 石田行章, 谷口晴香, 前野悦輝, 中辻知, 辛埴, ”レーザー励起型角度分解光電子分光で研究したルテニウム酸化物 $Ca_{2-x}Sr_xRuO_4$ の表面電子状態”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013.9.25-28
 89. 乙津 聡夫, 小澤 陽, 石田 行章, 辛 埴, 小林 洋平, ”Yb-ファイバーレーザーを用いた時間分解光電子分光用新紫外パルスレーザーの開発”, 第 74 応用物理学会学術講演会 京都・同志社大学(2013.9)
 90. 辛埴, ”超高分解能光電子分光による超伝導体の研究”, 名古屋大学物性談話会, 名古屋大学, 2014.1.8
 91. 山口大智, 金井輝人, 兵頭政春, X.Y.Wang, Y.Zhu, C.T.Chen, 渡部俊太郎, 張 贇, 渡辺昌良, ”準連続 160nm 光発生システム”, レーザー学会創立 40 周年記念学術講演会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場, 2014.1.20-22
 92. 石井順久, 金島圭佑, 北野健太, 松本由幸, 金井輝人, 渡部俊太郎, 板谷次郎, ”高強度 2 サイクル赤外ドライバによる電場波形依存水の窓高次高調波発生”, レーザー学会創立 40 周年記念学術講演会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場, 2014.1.20-22
 93. 金島圭佑, 石井順久, 金井輝人, 渡部俊太郎, 板谷治郎, ”軟 X 線高調波発生における高強度赤外光の電場波形とガス圧依存性”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2014.3.17-20
 94. 大槻太毅, N. L. Saini, 溝川貴司, 大田由一, 辛埴, 岡崎浩三, 藤森淳, 鳥山達也, 小西健久, 太田幸則, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実 “ $Ir_{1-x}Pt_xTe_2$ の角度分解光電子分光 II”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
 95. 山本真吾, 染谷隆史, 板谷治郎, 保原麗, 藤澤正美, 吉田力矢, 山本貴士, 中村哲也, 角田匡清, 山本達, 辛埴, 松田巖, ”高次高調波を用いた内殻共鳴磁気光学測定装置開発と時間分解への展望”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
 96. 山本遇哲, 石田行章, 大田由一, 岡崎浩三, 伊藤功, 野村雄高, 小澤陽, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 深澤英人, 小堀洋, Xiaoyan Wang, Chuangtian Chen, 渡部俊太郎, 小林洋平, 辛埴, ”狭線幅 8 eV ファイバーレーザーによる第 1 ブリルアンゾーン全域での高分解能 ARPES” 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
 97. 山本貴士, 石田行章, 吉田力矢, 吉川明子, 田口康二郎, 金井輝人, 板谷治郎, 木須孝幸, 石坂香子, 齋藤智彦, 渡部俊太郎, 十倉好紀, 辛埴, ”ドーブしたトポロジカル絶縁体 $Cu_{0.17}Bi_2Se_3$ の価電子帯及び $Bi\ 5d_{5/2}$ 内殻準位の時間分解光電子分光”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
 98. 松波雅治, A. Chainani, 大浦正樹, 辛埴, 羽尻哲也, 松川周矢, 中山美佳, 齋藤真衣, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭, 田中幸範, 山本真, 石政勉, 海老原孝雄, 木村真一”u-Al-Yb 系準結晶の光電子分光と光学伝導度”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
 99. 大田由一, 岡崎浩三, 山本遇哲, 石田行章, W.Malaeb, 渡部俊太郎, C.-T.Chen, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 齋藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 小林洋平, 辛埴, ”7eV 及び 8eV レーザー角度分解光電子分光を用いた Ba ドープ KFe_2As_2 における超伝導ギャップ異方性観測”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
 100. 岡崎浩三, 堀尾眞史, 藤森淳, 大田由一, 山本遇哲, 辛埴, 渡部俊太郎, C.-T.Chen, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, A. Bohmer, T. Wolf, P. Adelman, C. Meingast,

H. v. Loehneysen ,” FeSe のレーザー角度分解光電子分光”, 日本物理学会第 69 回年次大会,東海大学,2014.3.27-30

101. 中村飛鳥, 下志万貴博, 園部竜也, 出田真一郎, Walid Malaeb, 辛埴, 堀場弘司, 豊田智史, 組頭広志, 小野寛太, 飯村壮史, 松石聡, 細野秀雄, 石坂香子,”光電子分光による LaFeAsO_{1-x}H_x の電子状態の研究 III”, 日本物理学会第 69 回年次大会,東海大学,2014.3.27-30
102. S.Shin,”Study of materials science by the laser-photomission spectroscopy”, ISSP-OIST Symposium,OIST 沖縄,2014.3.10-11

〈国際〉

1. Naoya Kuse, Makoto Kuwata-Gonokami, Yutaka Nomura, Shuntaro Watanabe, and Yohei Kobayashi, "Experimental Study of Pulse Evolution in a 30-fs Mode-Locked Yb-Fiber Oscillator" CLEO/QELS, San Jose, CA, 2010
2. Yohei Kobayashi, Yutaka Nomura, and Shuntaro Watanabe, "1.3-GHz, 20-W, Femtosecond Chirped-pulse Amplifier System," CLEO/QELS, San Jose, CA, 2010
3. Xiangyu Zhou, Dai Yoshitomi, Yohei Kobayashi, and Kenji Torizuka, "1-Watt Average-Power 100-MHz Repetition-Rate 258-nm Ultraviolet Pulse Generation from a Femtosecond Ytterbium Fiber Amplifier," CLEO/QELS, San Jose, CA, 2010
4. Birgitta Bernhardt, Akira Ozawa, Patrick Jacquet, Marion Jacquy, Yohei Kobayashi, Thomas Udem, Ronald Holzwarth, Guy Guelachvili, Theodor W. Hansch, and Nathalie Picque, "Trace Gas Detection with Frequency Comb Fourier Transform Spectroscopy," CLEO/QELS, San Jose, CA, 2010
5. Akira Ozawa, Yohei Kobayashi,” Intracavity high harmonic generation driven by Yb-fiber based MOPA system at 80MHz repetition rate”, CLEO2011 CThB4 Baltimore, USA 2011 年 5 月
6. Dai Yoshitomi, Xiangyu Zhou, Yohei Kobayashi,Hideyuki Takada, Kenji Torizuka, “Long-Term Stable Passive Synchronization of 50- μ J, 690-fs, 0.4-MHz Yb-Doped Fiber Amplifier with a Mode-Locked Ti:Sapphire Laser”, CLEO2011 CFE6 Baltimore, USA , 2011 年 5 月
7. Lora Nugent-Glandorf, Todd Johnson, Yohei Kobayashi, Scott Diddams, “The Influence of Cavity Dispersion on Amplitude and Frequency Noise in a Yb-fiber Laser Comb”, CLEO2011 CTuA3 Baltimore, USA, 2011 年 5 月
8. Yutaka Nomura, Yoshiaki Ito, Akira Ozawa, Xiaoyang Wang, Changtian Chen, Shik Shin, Shuntaro Watanabe, Yohei Kobayashi, Coherent Quasi-cw 153 nm Light Generated at 33 MHz Repetition Rate, CLEO2011 CMJ4 Baltimore, USA, 2011 年 5 月
9. Birgitta Bernhardt, Akira Ozawa, Ioachim Pupeza, Andreas Vernaleken, Yohei Kobayashi, Ronald Holzwarth, Ernst Fill, Ferenc Krausz, Theodor W. Hänsch, Thomas Udem, “Green Enhancement Cavity for Frequency Comb Generation in the Extreme Ultraviolet”, CLEO2011 QTuF3 Baltimore, USA , 2011 年 5 月
10. Naoya Kuse, Yutaka Nomura, Akira Ozawa, Makoto Kuwata-Gonokami, and Yohei Kobayashi, “Passive synchronization of repetition and offset frequency between two mode-locked Yb-doped fiber lasers”, CLEO2011 JThB121 Baltimore, USA, 2011 年 5 月
11. T.Tokushima, H.Arai, Y.Horikawa, S.Shin,” Hard x-ray resonant inelastic x-ray scattering at stanford synchrotron radiation lightsource”, International workshops on photoionization and resonant inelastic x-ray scattering (IWP2011 RIXS), Las Vegas, USA, 2011.05.22-27
12. Y.Horikawa, H.Arai, T.Tokushima, S.Shin,” Polarization anisotropy in resonant x-ray emission from acetic acid molecules in various solutions”, International workshops on photoionization and resonant inelastic x-ray scattering (IWP2011

- RIXS), Las Vegas, USA, 2011.05.22-27
13. Takahiro Shimojima," Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors",
2012Energy
Materials and Nanotechnology, Orlando ,USA, 2012/4/16-20
 14. Nozomi Hirayama; Akira Ozawa; Takashi Sukegawa; Takashi Seki; Yoshiyuki
Kuramoto; Shuntaro Watanabe; Yohei Kobayashi "High-power Yb-fiber laser
system for high-field physics at 10-MHz repetition rate" JTh4I.6 CLEO 2012, San
Jose, USA (2012.5)
 15. Akira Ozawa; Yohei Kobayashi "Single comb mode excitation of ground state xenon
in VUV" Postdeadline Session II CTh5D.9 CLEO 2012, San Jose, USA (2012.5)
 16. N. Ishii, K. Kitano, K. Kaneshima, T. Kanai, S. Watanabe and J.Itatani,
"Nearly-octave,
sub-two-cycle, CEP-locked,intense IR pulses from BIBO OPCPA using810-nm pump
pulses",
Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, USA, 2012/5/6-11
 17. Kozo Okazaki," Photoemission study on Kondo materials",M2S 2012-Materials &
Mechanisms of Superconductivity Conference , Washington,D.C USA ,
2012/7/29-8/3
 18. Yuka Horikawa," "Electronic state of liquid molecules observed by soft X-ray
emission Spectroscopy", EMLG/JMLG Annual Meeting 2012, Eger, Hungary,
2012/9/5-9
 19. Rikiya Yoshida," Ultrahigh-resolution three-dimensional ARPES study on the
Hidden-order
transition in URu₂Si₂", ICESS-12,Electron Spectroscopy and Structure:,
Saint-Malo France, 2012/9/16-21
 20. Walid Malaeb," High-Tc superconductivity: from basic research to useful
applications"Arab Expatriate Scientists Network 2012, Qatar, 2012/10/21-23
 21. Shik Shin," Study of materials science by the development of ultra-high resolution
laser-photoemission spectroscopy", 復旦大学セミナー, 上海/中国, 2012/12/3-5
 22. Shik Shin," Study of materials science by the development of ultra-high resolution
laser-photoemission spectroscopy", ソウル大学セミナー, ソウル/韓国, 2012/12/6-9
 23. N.Ishii, K.Kaneshima, K.Kitano, T.Kanai, S.Watanabe and J.Itatani,
"Carrier-envelope phase-dependent high harmonic generation in the water window
by use of waveform-controlled
infrared pulses", Ultrafast Optics 2013, Davos Congress Centre, Davos,
Switzerland, 2013/3/4-8
 24. N.Ishii, K.Kaneshima, K.Kitano, T.Kanai, S.Watanabe and J.Itatani,
"Sub-two-cycle, CEP-stabilized, millijoule-class IR optical pulses from a
BiB₃O₆-based OPCPA using
Ti:sapphire lasers", Ultrafast Optics 2013, Davos Congress Centre, Davos,
Switzerland,2013/3/4-8
 25. K.Oazaki, Y. Ito, Y.Ota, Y. Kotani, T. Shimojima,T.Kiss,S. Watanabe,C.Chen, S.
Niitaka, T.Hanaguri, H.Takagi,A.Chainani, S.Shin," Laser ARPES study of
optimally doped FeTe_{0.6}Se_{0.4}", APS March Meeting 2013, Baltimore,
Maryland,USA. 2013/3/18-22
 26. Y.Ishida,H.Kanto,W.Malaeb,S.Watanabe,C.Chen,A.Kikkawa,Y.Taguchi,Y.Tokura,S.
Shin, "Transient Surface Photoemission Involving Nonlinear Surface Sheet
Polarization Developed on the Doped Bi₂Se₃ Topological Insulator¹",APS March
Meeting 2013, Baltimore, Maryland,USA. 2013/3/18-22
 27. Akira Ozawa, Makoto Kuwata-Gonokami and Yohei Kobayashi, "*Cavity-enhanced
high harmonic generation with high power Yb-fiber laser at 10MHz repetition
rate*"CLEO 2013, CM3N2, San Jose, USA May. 2013

28. Akira Ozawa, Makoto Kuwata-Gonokami and Yohei Kobayashi, "Intracavity High Harmonic Generation At 80 and 10 MHz Repetition Rates," CLEO PR 2013, TuF1-5, Kyoto, Japan July. 2013
29. N. Ishii, K. Kaneshima, K. Kitano, T. Kanai, S. Watanabe, and J. Itatani, "Carrier-Envelope Phase-Dependent High-Harmonic Generation in the Water Window Using a Few-Cycle Infrared Light Source", Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, Munich, Germany, 2013/5/12-16
30. Nobuhisa Ishii, Keisuke Kaneshima, Kenta Kitano, Teruto Kanai, Shuntaro Watanabe, Jiro Itatani, "Carrier-Envelope Phase-Dependent High Harmonic Generation in the Water Window by Few-Cycle IR Pulses", Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, USA, 2013/6/9-11
31. N. Ishii, K. Kaneshima, K. Kitano, T. Kanai, S. Watanabe, and J. Itatani, "Generation of isolated attosecond continua in the water window using a CEP-locked, few-cycle IR pulses from a BiB3O6 OPCPA system", 4th International Conference on Attosecond Physics, Paris, France, 2013/7/8-12
32. Yohei Kobayashi, Makoto Kuwata-Gonokami and Akira Ozawa, "10-MHz, high-power high-harmonic generation by a 30-m enhancement cavity" 4th International Conference on Attosecond Physics, Paris, France, 2013/7/8-12
33. T. Kondo, "Two energy scales in the copper oxide high temperature superconductor revealed by e-resolved angle-resolved photoemission spectroscopy", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013) Tokyo, Japan, 2013.8.5-9
34. R. Yoshida, "Photoinduced Insulator-Metal Transition in VO₂ Studied by Time-Resolved Photoemission Spectroscopy" International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013) Tokyo, Japan, 2013/8/5-9
35. T. Kondo, "Two energy scales in the copper oxide high temperature superconductor revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy", The 2nd International Workshop on Convergence in Condensed Matter and Nano Physics Sungkyunkwan University, Korea, 2013.10.6-9

③ ポスター発表 (国内会議 12 件国際会議 3 件)

〈国内〉

1. 鈴木裕也, 下志万貴博, 園部竜也, 中村飛鳥, 坂野昌人, 大浦正樹, 仙波泰徳, 大橋治彦, A. Chainani, 辛埴, 中野晃佑, 野崎保将, 矢島健, 陰山洋, 石坂香子, "超伝導体 BaTi₂Pn₂O (Pn=As, Sb, Bi) の光電子分光", 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
2. 吉田力矢, 山本貴士, 石田行章, 大塚翼, 橘高朋子, 村岡祐治, 金井輝人, 板谷治郎, 辛埴, "時間分解光電子分光で見た VO₂/TiO₂ ヘテロ接合における光キャリア注入" 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
3. 乙津聡夫, 小澤陽, 石田行章, 矢治光一郎, 辛埴, 小林洋平, "ファイバーレーザーを用いたビスマスの弱励起時間分解光電子分光", 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
4. 近藤猛, Walid Malaeb, 石田行章, 笹川崇男, 遠山貴己, 辛埴, "銅酸化物高温超伝導体 Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d} のノード近傍で解く電子対ギャップの成り立ち: レーザー励起型角度分解光電子分光" 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
5. 染谷隆史, 吹留博一, 石田行章, 吉田力矢, 飯盛拓嗣, 山本貴士, 湯川龍, 山本真吾, 山本達, 金井輝人, 板谷治郎, 小森文夫, 辛埴, 松田巖, "時間分解光電子分光法による n 型グラフェンのキャリアダイナミクスの観測", 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30

6. 谷内敏之, 小谷佳範, 小嗣真人, 辛埴,” レーザー励起光電子顕微鏡による表面構造の局所解析”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
7. W. Malaeb, T. Shimojima, Y. Ishida, T. Kondo, K. Okazaki, Y. Ota, K. Ohgushi, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Ishida, M. Nakajima, S. Uchida, H. Fukazawa, T. Saito, Y. Kohori, H. Kumigashira, K. Ono, S. Shin,” Energy scales in $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ revealed by Laser ARPES”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
8. 小林正和, 谷内敏之, 井土宏, Alain Marty, 大谷義近, 辛埴,” 強磁性-反強磁性転移を有する FeRh 薄膜の磁気異方性”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
9. 中山充大, 近藤猛, 石川洵, Ru Chen, 山本遇哲, 山本貴士, Walid Malaeb, 吉田力矢, 松波雅治, 石田行章, Leon Balents, 木村真一, 中辻知, 辛埴,” 角度分解光電子分光で観測したパイロクロア型イリジウム酸化物 $Pr_2Ir_2O_7$ のフェルミノード状態” 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
10. 金聖憲, 石田行章, 近藤猛, 江藤数馬, 瀬川耕司, 安藤陽一, 辛埴, 小森文夫,” トポロジカル絶縁体 $Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3}$ の非占有電子ダイナミクス”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30
11. M. Nakayama, “Observation of a quadratic Fermi node in pyrochlore iridate $Pr_2Ir_2O_7$ ”, ISSP-OIST Symposium, OIST 沖縄, 2014.3.10-11
12. M. Kobayashi, “Antiferromagnetic-to-ferromagnetic phase transitions and Magnetic anisotropy of FeRh thin films”, ISSP-OIST Symposium, OIST 沖縄, 2014.3.10-11

〈国際〉

1. Y. Ota, “Doping dependence of superconducting-gap anisotropy of Ba-doped KFe_2As_2 ”, NSN2013, Berkeley, California, USA, 2013/6/24-28
2. H. Yamamoto, NSN2013, Berkeley, California, USA, 2013/6/24-28
3. Y. Ota, “Superconducting-gap measurements of uranium superconductors U_6Fe and UPd_2Al_3 by laser photoemission spectroscopy” International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), Tokyo, Japan, 2013/8/5-9

(4) 知財出願

- ① 国内出願 (0件)
- ② 海外出願 (0件)

(5)受賞・報道等

① 受賞

1) 「超短パルス高強度レーザーとコヒーレント短波長光発生に関する先駆的研究」で泰山賞(レーザー進歩賞)、((財)レーザー技術総合研究所)、渡部 俊太郎、2012年7月18日

2) 第33回(2012年秋季)応用物理学会講演奨励賞 小澤陽 2013年3月

3) "Cavity-enhanced high harmonic generation with high power Yb-fiber laser at 10MHz repetition rate" Best paper award of CLEO Pacific Rim 2013, 2013年7月

② マスコミ(新聞・TV等)報道

(A)プレス発表; 鉄系超伝導体における新しい高温超伝導メカニズムの発見—格子振動、スピ
ンに続く第三の起源—

東京大学 大学院工学系研究科の下志万貴博特任助教と東京大学物性研究所の辛埴教授は、鉄系超伝導体において、これまで知られている超伝導体とは異なる新しい超伝導メカニズムを発見しました。

超伝導とは、金属などをある温度(超伝導転移温度)以下に冷却すると、電気抵抗がゼロになる現象です。通常ばらばらに運動している電子は、超伝導状態では2つずつ対になって運動します。この超伝導電子対を結び付ける働きをする「のり」の種類を特定することは、超伝導メカニズムを知る上で最も重要なことです。しかし、これまでに見つかっていた「のり」の種類は、結晶格子の振動や電子スピン(磁性の源)に限られていました。近年発見された鉄系超伝導体は、高い温度で超伝導を示す物質として基礎科学そして応用面からも非常に注目されているものの、この物質の「のり」の種類についてははっきり分かっていませんでした。

本研究グループは、世界最高レベルの超高分解能レーザー光電子分光装置を開発し、これを用いて、鉄系超伝導体において電子対が結合しているエネルギーの強さを調べ、新たな「のり」の種類を決定することに成功しました。この結果から、電子軌道という性質に由来する、第三の新しいメカニズムによって超伝導が引き起こされている可能性が示されました。今後、電子軌道に着目することにより、さらに高い温度で超伝導を示す物質の開発につながるものと期待されます。

本研究成果は2011年4月7日(米国東部時間)に米国科学誌「Science」のオンライン速報版で、編者が特に推薦する「Science express」として公開されます。

- 読売新聞 2011年4月8日 鉄系超伝導の仕組みを解明
- 日刊工業新聞 2011年4月8日 電子対結合の仕組み

(B)プレス発表; 大きなスピン偏極をもった電子材料を開発(新しいスピントロニクス材料開発に
大きな前進)

東京大学大学院工学系研究科の十倉好紀教授と石坂香子准教授らの研究グループは、大きなスピン偏極を有する電子材料を開発し、スピントロニクス材料開発に向けて大きく前進しました。

スピントロニクスデバイス開発分野では電気によって伝導電子のスピン(偏極)を制御することは重要な開発課題の一つです。これまでも伝導電子のスピン(偏極)を制御するための素子や材料が盛んに開発されてきましたが、主として結晶表面や界面構造の非対称性を利用したものでした。この為、少ない表面/界面の電子を結晶中の多数の電子と区別して制御する必要があり、応用するうえで技術的にも困難を予感させるものでありました。

今回、結晶構造に極性を持つ半導体 BiTeI (Bi:ビスマス、Te:テルル、I:ヨウ素)の電子構造と磁気構造をスピン・角度分解光電子分光により直接観測することにより、結晶表面の伝導

電子に限定されることなく、物質中における多数の伝導電子が、その運動量に依存した大きなスピン偏極を有することを明らかにしました。このような性質は電流や電場によってスピンと磁性を制御する機能を生み出すために大変重要であり、新しいスピントロニクス材料としての応用が期待されます。本研究成果は、英国科学雑誌「Nature Materials」のオンライン速報版で公開されております。

- 日本経済新聞 2011年6月20日 半導体省エネへ新技術

(C) プレス発表； 鉄系超伝導体において転移温度を抑制している原因を発見：

邪魔しあう2種類の超伝導の“のり”の存在

電子が電子対をつくってエネルギー損失ゼロとなる超伝導体は、未来の材料として大いに注目を集めている。しかし、超伝導現象は極低温でしか実現しないことが多い。切望される室温での超伝導実現には、高温超伝導体の電子対形成の機構を解明することが不可欠である。

東京大学物性研究所の岡崎浩三(おかざきこうぞう)特任研究員と辛埴(しんしぎ)教授は、電気伝導を担う電子を高精細に観測し、電子を結びつけて対にする“のり”について新発見をした。研究グループは、エネルギー分解能70マイクロ電子ボルト、最低温度1.5Kという世界一の性能を持つレーザー光電子分光装置を新たに開発し、鉄系超伝導体における超伝導ギャップ(=超伝導電子対の結合の強さ)を観測した。その結果、電子対を作らない運動量(超伝導ギャップのノード=節)が存在する電子など、様々な電子対形成をする電子の存在を観測することに成功した。本成果により、鉄系超伝導体において2種類の“のり”が互いに邪魔しあうことで、電子対を作れない電子が存在することが明らかになった。今回発見した“のり”の性質の理解は、高温超伝導発現機構の全容解明に繋がる。

本研究成果は2012年9月13日(米国東部時間)発行予定の米国科学誌「サイエンス」オンライン版で公開される。

- 化学工業日報、競合する2種類の「のり」 東大、1化合物で存在確認、2012年10月19日
- 電気新聞、室温超伝導へ一歩 東大物性研が成功、鉄系電子を直接観測、2012年10月19日

(D) プレス発表； 銅に迫る高い伝導性を示す有機導体の謎の解明

有機結晶(分子性結晶)は既存のデバイスに置き換わる新しいデバイスとして大きな注目を集めている。有機結晶の特徴は、分子を元素と置き換えて物質を設計することであり、現在デバイスとして用いられている化合物を構成する元素数よりはるかに多様な分子の組み合わせによって、様々な機能性物質が新しく創出されることが期待されている。例えば、希土類等を用いる物質の代替としても期待されている。その実現のためには、要求する機能を念頭に置いてそれを実現する電子構造を再現できるように分子の組み合わせを行うが、従来は経験的手法によって行われていた。

東京大学物性研究所の木須孝幸(きす たかゆき)特任研究員(現大阪大学大学院基礎工学研究科准教授)と辛埴(しんしぎ)教授らは、理化学研究所の山本浩史(やまもとひろし)専任研究員(現分子科学研究所 教授)、加藤礼三(かとう れいぞう)主任研究員、物質・材料研究機構の宮崎剛(みやざき つよし)主幹研究員らと共同で、有機導体(BEDT-TTF)₃Br(pBIB)において物質の性質を決める電子を光電子分光法を用いて直接観測し、アルミニウムや銅などにおける電子のように運動する電子を有機物において初めて発見し、この物質が非常に高い金属性を持つ原因を突き止めた。

研究グループは、不可能と思われていた通常の金属のような自由電子を持つ有機導体の光電子分光を初めて成功させ、これによって、ある決まった方向にしか動けないと思われていた電子があらゆる方向に運動することを発見、この物質が高い伝導性を持つ理由を明ら

かにした。今回発見した電子の振る舞いは新しい有機デバイスを創成するうえで物質設計の指針となる。
 本研究成果は 2012 年 9 月 25 日 (世界標準時) 発行の「ネイチャー コミュニケーションズ」で公開された。

- 科学新聞、有機導体の高い金属性 東大・理研・物材機構など共同 その原因を突き止める

(6) 成果展開事例

① 実用化に向けての展開

- 本研究で得られた技術を元に開発された光電子分光器、R8000 が、シエンタ社(スウェーデン)から販売されている。世界中の超高分解能光電子を目指す研究室やシンクロトン放射光施設で、使用され始めている。

§6 研究期間中の活動

6.1 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
平成 26 年 3 月 10-11 日	OIST-ISSP シンポジウム	OIST (沖縄)	40 人	Joint ISSP-OIST Symposium: "Lighting Up New Frontiers - From Tokyo to Okinawa, From Materials to Neurons"
平成 25 年 12 月 16 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70 人	誘導ラマン分光顕微鏡による無染色生体組織イメージング, 小関泰之氏 東京大学
平成 25 年 11 月 20 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第 1 会議室	50 人	Applications of Ultrafast & Nonlinear Spectroscopy: From 2D materials to mimicking neuro-functioning (Dr. Dani Keshav, 沖縄科学技術大学院大学)
平成 25 年 11 月 4 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研セミナー室	30 人	フェムト秒域高次高調波を用いた時間分解角度分解光電子分光 (Prof. Martin Aeschlimann University of Kaiserslautern)
平成 25 年 10 月 28 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第 2 会議室	45 人	Ultrafast Quantum Processing in the Vibronic States of Molecules and Solids, Dr. Benjamin J Sussman (National Research Council Canada, 100 Sussex Drive, Ottawa, Ontario, K1A 0R6, Canada)
平成 25 年 10 月 10 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研会議室	40 人	isentangling the Effects of Strain and Charge on the Raman Lines of Epitaxial Graphene, Prof. Martin Hundhausen (Technische Physik University Erlangen-Nurnberg, Germany)

平成 25 年 9 月 9 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	人	テラヘルツパルスを用いた BCS 状態のヒッグスモードの観測と光制御、松永 隆佑 (東京大学・理学系)
平成 25 年 6 月 3 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	X 線・中性子線・電子線を用いる原子分解能ホログラフィ、林好一(東北大学・金属材料研究所)
平成 25 年 5 月 28~29 日	物性研短期研究会	物性研大講義室	150人	真空紫外・軟 X 線放射光物性研究の将来 主な講演者 雨宮健太 (PF)、奥田太一(広島大)、大河内拓雄 (SPring-8)、高橋和敏(佐賀大)、早稲田嘉夫(東北大多元研)、河田 洋 (KEK)、村上洋一(KEK)、和達大樹(東大工)、石井賢司(原子力機構・SPring-8)、田中新(広島大)、遠山貴己(京大基礎研)、腰原伸也(東工大)、小笠原寛人(SLAC)、長坂将成(分子研)、吹留博一(東北大)、島田賢也(広島大)、橋本 信(スタンフォード大)、伊藤孝寛(あいちシンクロtron光センター)、組頭広志 (PF)、木村真一(分子研)
平成 25 年 5 月 13 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第1会議室	40人	高分解能コヒーレント X 線回析イメージングの現状と展望、高橋幸生(大阪大学工学研究科精密科学)
平成 25 年 3 月 4 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	共鳴軟 X 線散乱で見た遷移金属酸化物の磁気構造、和達大樹(東大・量子相エレクトロニクス研究センター)
平成 25 年 2 月 18 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	産総研におけるイッテルビウム光格子時計の開発、安田正美(産総研・波長標準研究室)
平成 25 年 1 月 15~17 日	13th Japan-Korea-Taiwan Symposium on strongly Correlated Electron Systems	大阪	100人	主な講演者 K. Char (Seoul National University, Korea), Ying-HaoChu(NationalChiaoTungUniversity, Taiwan),Tien-MingChuang(Academia Sinica, Taiwan) ,Chao-HungDu(Tamkang University, Taiwan),H. Eisaki (AIST, Tsukuba, Japan) Di-Jing Huang (NSRRC, Taiwan) T. Katsufuji (Waseda University, Japan) Changyoung Kim (Yonsei University, Korea) Kee Hoon Kim (Seoul National University, Korea) ,Y. Kitaoka (Osaka University, Japan) Chih-WeiLuo(NationalChiaoTung niversity, Taiwan) ,Tae Won Noh (Seoul National

				University,Korea) ,JaeHoonPark (POSTECH, Korea),Je-GeunPark(SeoulNational University,Korea),Way-FaungPong(Ta mkang University,Taiwan),S.Suga(Osaka University, Japan) ,Hao Tjeng (MPI, Dresden, Germany) T.Tohyama (Kyoto University, Japan) S. Uchida (University of Tokyo, Japan) Jaejun Yu (Seoul National University, Korea
平成 24 年 12 月 17 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	ベイズ推論と物性科学、岡田真人(東大・新領域)
平成 24 年 11 月 29~30 日	LASOR 発足記念 ISSP-Workshop	物性研大講義室	160人	レーザー・放射光融合研究領域の開拓 主な講演者 野澤俊介(KEK), 米田仁紀(電気通信大学レーザー新世代研究センター)、岩崎純史(東京大学理学系研究科)、近藤寛(慶應義塾大学)、松本吉泰(京都大学)、相馬清吾(東北大学原子分子材料科学高等研究機構)、木村真一(分子科学研究所 UVSOR)、石坂香子(東京大学工学系研究科)、奥田太一(広島大学放射光科学研究センター)藤森淳(東京大学理学系研究科)、鎌田雅夫(佐賀大学)谷村克己(大阪大学産業科学研究所)、五神真(東京大学理学系研究科)
平成 24 年 9 月 5 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	パルス X 線を用いた物質構造ダイナミクスの可視化、足立伸一(KEK・物質構造科学研究所)
平成 24 年 6 月 27-29 日	ISSP 国際ワークショップ「コヒーレント軟 X 線科学」(5th AWCXR)	柏図書館メディアホール	150人	主な講演者 M. Yabashi(RIKEN SPring-8 Center, Japan) K. Ueda(Tohoku University, Japan), T.Togashi (JASRI, Japan), A. Hishikawa(Nagoya University, Japan), K. Yamauchi(Osaka University, Japan), Do Young Noh(GIST, Korea), M.Newton,Y.Nishino,(Hokkaido University, Japan), N. Sarukura(Inst. Laser Eng., Osaka Univ., Japan),
平成 24 年 7 月 23 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	生細胞を染めずに見る～コヒーレント・ラマン分光によるマルチカラー・イメージング～、加納英明(筑波大)
平成 24 年 6 月 18 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	軟 X 線発光分光:超高分解能化とオペランド分光への展開、原田慈久(物性研准教授)

平成 24 年 5 月 28 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	レーザーと放射光を組み合わせた時間分解分光実験:半導体中のキャリア追跡、松田巖(物性研准教授)
平成 23 年 12 月 19 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	フェムト秒時間分解電子回析法による超高速固体構造動力学、谷村克己(大阪大学産業科学研究所)
平成 23 年 11 月 7 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	強相関係における非平衡物理、岡隆史(東大物理)
平成 23 年 9 月 12 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第1会議室	30人	多層膜光学素子の現状と将来、竹中久貴(NTTアドバンステクノロジー(株))
平成 23 年 7 月 15 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	極限機能半導体レーザー、横山弘之(東北大教授)
平成 23 年 6 月 10 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	高強度テラヘルツ光発生とテラヘルツ非線形分光の新展開、田中耕一郎(京大教授)
平成 23 年 5 月 23 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	極限光技術で拓く新しい天文学、三尾典克(東大工教授)
平成 23 年 4 月 4 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第1会議室	30人	超短パルスレーザー開発並びに 光物性、高強度物理への応用、石井 順久(物性研助教)
平成 22 年 3 月 11 - 13 日	10 th Japan-Korea-Taiwan Symposium on strongly Correlated Electron Systems	姫路	100人	主な講演者 H.J. Choi (Yonsei University, Korea) Y.H.Chu(National Chiao-Tung University, Taiwan) A. Fujimori (University of Tokyo, Japan) D.J.Huang(NSRRC, Taiwan) H.-T. Jeng (Academia Sinica, Taiwan) Y.-J. Kao (National Taiwan University, Taiwan) F. C. Chou (National Taiwan University, Taiwan),R. Kato (RIKEN, Japan) B. J. Kim (University of Michigan, USA) C. Kim (Yonsei University, Korea) T.Kimura (Osaka University, Japan) Y.Matsuda (Kyoto University, Japan) D. D. Sarma (Indian Institute of Science, India) J.Yu(Seoul National University, Korea)
平成 22 年 12 月 2 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	コヒーレントX線が拓く構造可視化の手法、西野 吉則(北大教授)
平成 22 年 11 月 5 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第1会議室	70人	高機能テラヘルツ電磁波計測の開拓とメゾ・ナノ系量子伝導研究への応用、河野行雄(理研)
平成 22 年 9 月 7 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	30人	時間分解光電子顕微鏡による高速磁気応答現象の観測、木下 豊彦(SPring-8)
平成 22 年 7 月 5 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	30人	紫外光周波数コム、小澤陽(物性研助教)
平成 22 年 6 月 7 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70人	1 分子内運動計測から見えた動的分子間相互作用、佐々木 祐次(東大新領域教)

				授)
平成 22 年 5 月 10 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研第 1 会議室	30 人	小林研究室の現状と将来、小林洋平(物性研准教授)
平成 22 年 1 月 26 日	コヒーレント光科学セミナー	物性研大講義室	70 人	ヘテロダイン検出和周波発生振動分光による表面吸着種の振動ダイナミクス、渡邊一也(京大)

§7 最後に

(1) 光科学の中で本CRESTの位置づけ

本 CREST は、当初設定した数値目標は、ほとんど達成しつつある。本研究により、真空紫外光や軟 X 線領域の高調波レーザーを用いた物性研究の将来が見えてきたと思っている。低エネルギー領域では、レーザー光は放射光でできなかったような新しい世界を築きつつある。5-10年後くらいの将来には、高調波レーザーと放射光科学の両者の光科学は、統合することを確信するようになった。その結果、本 CREST がきっかけになり、東京大学物性研究所内の光科学関係の組織改革になった。放射光を研究する軌道放射光物性研究施設とレーザー科学を推進する先端分光研究部門が統合し、「極限コヒーレント光科学研究センター(LASOR)」に再編となった。物性研究において、光科学のビジョンを示したとすることで、本 CREST は大きな役割を示したと思っている。

(2) TV の撮影とそれを利用した市民向け解説記事について

本研究で作成した実験装置を基に、テレビ「ガリレオ」の撮影が行われた。直接ではなかったが、一般市民の光科学への興味を持ってもらったと思っている。物性研究所のホームページにガリレオの撮影に用いた実験装置を市民向けにわかりやすく説明を行った (http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/n1004_detail.cgi?c=information_table::326)。



図27 TV の背景は 60eV レーザーと時間分解光電子分光装置