

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800165

研究課題名(和文) 時間分解光電子分光法による光励起非平衡状態の研究

研究課題名(英文) Nonequibrated state of matter investigated via time-resolved photoemission

研究代表者

石田 行章 (Ishida, Yukiaki)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：30442924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：時間分解光電子分光法の高度化と汎用化を進め、新しい切り口からの研究を開拓した。1. 非占有側のバンドを直接観測できるという原理を用いて、種々のトポロジカル物質(トポロジカル絶縁体TIやワイルセミメタル)の分類を進めた。2. 固体表面層数ナノメートルに特異的な光現象を観測できる特徴を生かして、世界に先駆けてTI表面に光起電力が生じることを見出した。この現象を利用した新機能を提案し基礎づけた。3. 銅酸化物高温超伝導体の光応答を精査して、全く新しい超伝導機構を提案した。4. 光学材料として期待されるディラック電子系物質の光励起状態とダイナミクスを系統的に調べ、反転分布の実現やモデルの適用可能性を議論した。

研究成果の概要(英文)：A continuous development was pursued for a variety of pump-probe photoemission spectroscopic method and methodologies: (1) By revealing the band structures in the unoccupied side, a variety of topological states of matter (topological insulators, TIs, and Weyl semimetals) was identified. (2) Owing to the surface sensitivity of the method, we discovered the emergence of surface photovoltage on a series of bulk-insulating TIs, by which optical generation of spin-polarized surface current may become possible. (3) A new mechanism was proposed for the cuprate superconductivity after investigating the ultrafast responses of the electronic structures of Bi2212. 4. Ultrafast carrier dynamics of Dirac electrons were investigated, and the applicability of some models as well as the realization of an inverted population were discussed.

研究分野：超高速ダイナミクス

キーワード：時間分解光電子分光法 トポロジカル絶縁体 光起電力 スピン偏極電流 銅酸化物高温超伝導体 ディラック電子系

## 1. 研究開始当初の背景

レーザーは、輝度、コヒーレンス、単色性、短パルス性、偏光特性、指向性において優れた性質を示す人工の光である。レーザー技術の進歩は著しく、固体表面から光電子を放出させるのに十分な光子エネルギーを持つ深紫外-極紫外域のレーザー高調波が安定して得られるようになってきた。これに伴ってレーザーと角度分解光電子分光法 (ARPES) の技術融合が進み、レーザーの優れた特性利用した新しい切り口からの電子状態研究が可能となった。

フェムト秒域のパルスレーザー光源を用いたポンプ・プローブ法と ARPES を組み合わせたものが、超高速時間分解 ARPES (TARPES) である。TARPES を用いることで、光パルスをトリガーとして生じる動的現象の電子状態を時々刻々観測できる。極端な非平衡状態に現れる新現象の探索 (光誘起相転移、コヒーレント振動、フロック状態、散逸構造)、非平衡状態を利用した研究 (非占有側のバンド分散の直接観測、詳細な温度変化の追跡)、光誘起現象の初期ダイナミクスの解明 (太陽電池、光触媒反応、光化学反応、光起電力) など、基礎から応用に渡る幅広い分野において有用な新しい実験手法として認知されつつある。

## 2. 研究の目的

本研究では、TARPES を用いて可能となる新しい物性研究の新機軸開拓および手法のさらなる高度化・広範化・汎用化を行うことで、TARPES を物性研究のツールとして確固たるものにするを旨とした。具体的には以下の項目を進めた。1. ARPES では不可能である非占有側のバンド分散を直接観測できるという原理を用いて、種々のトポロジカル物質の分類をすすめた。2. 固体表面層数ナノメートル域に特異的なダイナミクスを観測できるという特徴を生かして、トポロジカル絶縁体表面に現れる新しい光現象やそれを利用した機能を追究した。3. ARPES における未解決問題に対して新たな突破口を与えるべく、銅酸化物高温超伝導体の詳細電子構造の光応答を精査した。4. 平衡状態から遠く離れた励起状態やダイナミクスにおけるモデルによる理解や法則の確立を目指して、キャリアダイナミクスの高精度測定をおこなった。5. 低繰返しから高繰返しにわたる周波数での TARPES 測定を可能かつ簡便にするために、新しいフェムト秒パルス光源を用いた TARPES の開発と高度化を行った。

## 3. 研究の方法

東京大学物性研究所において、研究期間中も含めてこれまでに 3 台の TARPES 装置の開

発と高度化を進めてきた[解説記事]。世界最高 95 MHz の繰返し周波数を達成した装置は、微弱な励起による微小な変化を精度よく捉えることに適する。世界最高 10.5 meV のエネルギー分解能を達成した装置は詳細な電子構造の光応答を観測するのに適しており、開発した分周回路を用いることで繰返し周波数を変えることも可能である。最高 60 eV の極紫外プローブを発生可能な装置 (1 kHz) は、極端な光励起状態を観測するのに適する。期間中に前者 2 台の並列化と高度化を進め、それぞれのパフォーマンスを と に発表し、本研究課題を遂行した。

## 4. 研究成果

### (1) 物質のトポロジカルな分類

トポロジーの考え方をを用いて絶縁体を 2 種類に分類できることが 2008 年に実証された。絶縁体のバンド構造に「ひねり具合」が定義できて、ひねりが入っているものがトポロジカル絶縁体 (TI)、そうでないものが普通の絶縁体に分類される。ひねりの影響ないししわ寄せが表面に現れるのが TI の特徴である。即ち、TI 表面にはバルクのバンドギャップを差し渡す形のスピン偏極したディラック型分散が現れる。表面のディラック分散の存在を ARPES で検証することで、TI 可否かを判定する研究が広く行われるようになった。

TI の判定を行うためには、表面ディラック分散を非占有側まできちんと見る必要が生じる場合がある。ここに TARPES を活用した。電子を非占有側に分布させた瞬間をプローブすれば、非占有側のバンド分散まで見ることができる。この原理を用いた研究成果を以下に紹介する。

### 15 族カルコゲンの分類

周期律表 15 族のカルコゲン (P, As, Sb, Bi) は単体で半金属になる。これらのトポロジカルな分類も進み、黒リン (P) は普通の絶縁体、スズ (Sn) とビスマス (Bi) は TI に分類されるようになってきた。ところがヒ素 (As) については、毒性が強いというイメージもあってか、手つかずであった。そこで、ヒ素の分類を試みた[雑誌論文]。

ARPES を用いて As(111)表面のバンド分散を調べたところ、放物バンドのペアが観測された。占有側を見る限り、2 次元自由電子が表面ラシュバ分裂をした典型のように見える構造であった。実際、放物バンドのペアがラシュバ型のスピン分裂を示すこと、またその波動関数が表面に局在することがスピン分解および放射光 ARPES の測定を通して確認された。

ところが驚くことに、ARPES を用いて非占有側を観測したところ、一方の放物バンドはそのまま伝導帯につながるのに対し、もう一方の分散は価電子帯に逆戻りしてることが観測された。これは、スピン偏極した表面状態が価電子帯から始まり伝導帯に差し渡されることを直接示す結果である。このバンド構造は理論計算ともよい一致を示した。以上の結果から、ヒ素を TI に帰属した。

本研究により、15 族元素のリンとヒ素の間に線引きがなされ、ヒ素以下の重元素が単体で TI になることが判った。

### ワイル半金属の同定

1929 年にヘルマン・ワイルは新種の粒子を预言した。2015 年になって、ワイル粒子に相当するものが固体結晶 TaAs の中で発現することが実証された。ワイルフェルミオンを内包したワイル半金属の表面には、弓状の表面状態（フェルミ面が閉じないという特徴をもつ）がその名残として現れる。この特異な表面状態を ARPES で捉えることで、ワイル半金属か否かを判定する研究が爆発的に行われるようになった。

この中で (Mo,W)Te<sub>2</sub> が II 型のワイル半金属になることが理論的に预言された。その帰結として現れる弓状表面状態は殆ど非占有側で分散すると予測されたことから、ARPES を用いてこれの直接観測を試みた [雑誌論文]。その結果、非占有側 50 meV 周辺のバンドに折れ曲がり構造が捉えられた。これが理論計算で予想された弓状の表面状態に同定され、(Mo,W)Te<sub>2</sub> が II 型のワイル半金属になっていることを支持した。このほかに、TaIrTe<sub>4</sub> も II 型になっていることを支持する結果を得た [査読中]。なお II 型のワイル型分散は運動量空間で最早等方的ではないのが特徴である。

### (2) TI 表面の光起電力の発見と新機能

トポロジによる絶縁体の分類が進むのにつれて、絶縁性の高い TI も得られるようになってきた。一群の高絶縁性 TI の表面に光起電力が生じることを世界に先駆けて見出し、この現象を利用した新しい光機能を提案した。この経緯と機能の詳細を解説する。

SmB<sub>6</sub> は古くから近藤半導体として知られる物質である。90 K より低温側で近藤ギャップが発達して絶縁化する。2011 年に SmB<sub>6</sub> は TI にもなっているという理論予想がなされ、新たな注目を集めることとなった。以降、予想を支持する結果が続々と報告され、SmB<sub>6</sub> はトポロジカル近藤絶縁体の最有力候補物質となっている。興味深いことに、SmB<sub>6</sub> はこれまで報告された TI の中で最も高い絶縁性を示

す物質にもなっていた。

SmB<sub>6</sub> の ARPES を測定したところ、90 K より低温側で、ポンプ光を照射するとスペクトルが高結合エネルギー側にシフトする現象を観測した [雑誌論文]。我々はこれを、表面光起電力効果 (SPV) による現象と解釈した。SPV は半導体表面ではよく知られた現象であり、表層域にバンドベンディングが発達するときに生じる。太陽電池において光起電力が発生するのと同様に、光が照ると表層バンドベンディングが緩んで表面に起電力が生じる。なお金属の場合にはバンドはバンドできないので (導体内電場ゼロ) SPV は生じない。

本研究により、TI の絶縁性が上がると SPV が顕著に生じることが明確となった。絶縁性が上がると、いよいよ半導体特有の光現象が TI にも発現するのである。この現象を利用して、光で表面にスピン偏極電流を誘起する新しい機能を提案した。1. 高絶縁性 TI の表面の一部に光を照射する。2. すると、明るい部分と暗い部分の間に電位差が生じる。3. TI の表面は金属なので、電位差が生じればその間に表面電流がながれる。4. そして表面状態はスピン偏極しているの、流れる表面電流はスピン偏極しているはずである。

新しい光機能は提案できたものの、SmB<sub>6</sub> では問題があった。まず、SPV は高々 5 mV と小さい。また SPV が生じるのは 90 K 以下と低温である。これらの問題を踏まえて、絶縁性の高い Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se の ARPES を行ったところ、100 mV にも及ぶ巨大な SPV を観測した [雑誌論文]。さらに正および負の SPV が p 型および n 型の Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> の表面に生じることを観測した [査読中]。両極性の SPV は、表面スピン偏極電流の向きまでコントロールするために必須である。

以上、高絶縁性の SmB<sub>6</sub> において SPV を見出し、これを利用した新機能を基礎づけるための研究を Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se と Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> において展開した。

### (3) ディラック電子系のダイナミクス

ディラック電子系の特異な光学応答が注目されている。バンドギャップがゼロであるため、あらゆる色の光を吸収するポテンシャルがある。さらに照射光の強度を強めてディラックコーンの中で反転分布を実現できれば、あらゆる色を発振するレーザーをつくることできるかもしれない。残念ながら「ディラック型レーザー」はまだ実現していない。その理由の一つに、ディラック電子のダイナミクスをきちんと記述できていないことが挙げられる。理解を困難にしているのは、ディラックコーンが準位ではなくバンド構造を有することにある。既存のレーザー媒質の

反転分布を記述する方法として  $N$  準位モデルがしばしば用いられるが、これを越えたモデルを確立することが本質的に要請される。

バンドの中での光励起ダイナミクスを理解するモデルは、ないわけではない。しばしば 2 温度モデルが適用される。このモデルでは、考える対象を電子系と格子系に分割する（場合によってはさらに細かく）。光パルスは、まず電子系のみを温度を上昇させ、その後、温度差に応じて異なる系の間で熱のやりとりが行われる、という単純なモデルである。

2 温度モデルは、「ボトルネック型遅延」と呼ばれる普遍的な振る舞いを示す。これは、ポンプ光の強度をあげていくと、電子系の初期緩和にかかる時間が伸びるというものである。熱くなるほど冷めるのに時間がかかる、という直観的にも理解しやすい振る舞いである。

驚くことに、ボトルネック型遅延が実際に観測された例はこれまでなかった。観測されてきたのは、むしろ逆の傾向であった。例えばグラファイトや銅酸化物の場合、ポンプ光強度を増大させると電子系の初期緩和率は大きくなる。2 温度モデルがどれだけ信頼に足るモデルであるか、という以前に、そもそもモデルが成立する可能性があるのかどうかさえ明確でない、という状況にあった。

#### 2 温度モデルに従うダイナミクス

本研究では、2 温度モデルの適用可能性の問題を念頭おきつつ、2011 年に層状ディラック電子系として報告された  $\text{SrMnBi}_2$  の超高速キャリアダイナミクスを調べた [雑誌論文]。ダイナミクスのポンプ光強度依存性を調べたところ、ボトルネック型遅延に合致する振る舞いが初めて観測された。これに基づいて 2 温度モデルによるダイナミクスの解析を進めた結果、ディラック電子は一部 ( $1.5/8$ ) の格子振動モードと弱く (結合定数  $0.06$ ) カップルしていることが導き出された。

本研究の第一の意義は、2 温度モデルが実際に適用できる例が初めて見つかったことである。また、モデルの適用可能性を判定する方法が確立された。この判定方法を用いて種々の物質のキャリアダイナミクスを分類することが可能になる。この分類を進めるうちに、どのような原因でモデルの成否が決まるのかの判ってくるのが期待される。

この他に  $100 \text{ ps}$  を越える電子冷却過程を捉えることにも成功した。この冷却が熱伝導では説明のできない異常な幕 ( $T \propto 1/t^{0.2}$ ) を示すことを報告した。

#### 超高速反転分布の発見

$\text{Sb}_2\text{Te}_3$  は典型的な TI であるが、表面ディラック分散が非占有側に現れるため、ARPES による研究は殆ど進んでいなかった。 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の TARPEs を行い非占有側のディラックバンド内の電子分布を観測したところ、持続時間  $3 \text{ ps}$  に渡って反転分布が実現することを示唆するデータを得た [雑誌論文]。非占有側に広がる上部と下部ディラックコーンからの光電子放出強度が、ディラック点を挟んで  $0.4 \text{ eV}$  の範囲で反転した。もしこの示唆のとおりであれば、反転分布が持続するタイミングに合わせて  $0.4 \text{ eV}$  以下の遠赤外-テラヘルツ域のパルスを照射すれば、利得が得られる可能性がある。反転分布が生じる原因として、砂時計と類似のボトルネック型の緩和機構が働くことを提案した。本結果は、ディラック型レーザーを実現する可能性を示すことができた点でよいニュースである。

#### (4) 銅酸化物高温超伝導の新機構

発見から 30 年以上たった現在も、銅酸化物高温超伝導のメカニズムは未解明のままである。ARPES による研究から、 $d$  波超伝導ギャップ、分散に現れる折れ曲がり構造 (キルク) 擬ギャップ、フェルミアークなどの特徴的な電子構造が見出されてきたものの、これらの構造が互いにどう関係するのか、さらには超伝導機構とどう関連するのかについて一致した見解はない。例えば分散に現れるキルクは、一電子励起が何等かのボゾンとカップルしていることを示唆するが、このボゾンの起源 (フォノンか、何等かの電子的なモードか) はおろか、その役割 (クーパ対の糊か、全く別の働きか) も、全く分かっていないのである。

ARPES を用いてとらえられてきた特徴的な電子構造の超高速光応答を調べることで、それぞれの構造どうしの関係、ひいては超伝導機構解明への手がかりが得られるかもしれない。この切り口から  $\text{Bi2212}$  (超伝導転移温度  $T_c \sim 92 \text{ K}$ ) の TARPEs を行った [雑誌論文]。その結果、これまで別個と思われていたキルクとフェルミアークの間に関連があることが示唆された。具体的には、キルクより低エネルギー側でのみスペクトルが光応答 (ブロードニング) を示し、これが  $d$  波ノード近傍のギャップをかき消してフェルミアークを出現させるように観測された。

従来型の超伝導体では、 $T_c$  において超伝導ギャップがゼロになることで超伝導状態が消失する。一方、銅酸化物ではスペクトルのブロードニングが超伝導ギャップをかき消してマクロな超伝導が消失するように見える。さらにこのブロードニングがキルク構造より低いエネルギー側だけで生じることが

ら、以下の新しい超伝導消失機構を提案した。「温度が上昇することで、一電子励起のキックボゾンによる繰り込みが徐々に解かれ、一電子励起スペクトルはブロードになる。 $T_c$ に至り、 $d$ 波超伝導のノード近傍の微小なギャップは多分にかき消されてマクロな超伝導状態は消失する。」この機構においてクーパー対の糊の役割をするボゾンは、キックにかかわるボゾンである必要はない。すなわち、糊の役割をするボゾンと超伝導をかき消すキックのボゾンの2者のボゾンが容認され、それぞれが超伝導機構に本質的な役割を果たす。また、強く糊付けされたクーパー対は揺らぎながらも依然  $T_c$  より高温側で存在することも容認される。

キック構造をもたらすボゾンは、マクロな超伝導をかき消す機構に積極的な役割を担い、これが非従来型の超伝導消失機構をもたらすという考え方は、今後他の手法による検証を待つ必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計13件)

P. Zhang<sup>\*</sup>, J.-Z. Ma<sup>\*</sup>, Y. Ishida<sup>\*</sup>, L.-X. Zhao<sup>\*</sup>, Q.-N. Xu, B.-Q. Lv, K. Yaji, G.-F. Chen, H.-M. Weng, X. Dai, Z. Fang, X.-Q. Chen, L. Fu, T. Qian, H. Ding, S. Shin, Topologically entangled Rashba-split Shockley states on the surface of grey arsenic, *Physical Review Letters*, 査読有, 118 巻, 2017, pp. 046802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.046802

Y. Ishida, T. Otsu, A. Ozawa, K. Yaji, S. Tani, S. Shin, Y. Kobayashi, High repetition pump-and-probe photoemission spectroscopy based on a compact fiber laser system, *Review of Scientific Instruments*, 査読有, 87 巻, 2016, pp. 123902. DOI: 10.1063/1.4969053

I. Belopolski<sup>\*</sup>, D. S. Sanchez<sup>\*</sup>, Y. Ishida<sup>\*</sup>, X. Pan<sup>\*</sup>, P. Yu<sup>\*</sup>, S.-Y. Xu, G. Chang, T.-R. Chang, H. Zheng, N. Alidoust, G. Bian, M. Neupane, S.-M. Huang, C.-C. Lee, Y. Song, H. Bu, G. Wang, S. Li, G. Eda, H.-T. Jeng, T. Kondo, H. Lin, Z. Liu, F. Song, S. Shin, M. Z. Hasan, Discovery of a new type of topological Weyl fermion semimetal state in  $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Te}_2$ , *Nature Communications*, 査読有, 7 巻, 2016, pp. 13643. DOI: 10.1038/ncomms13643

I. Belopolski<sup>\*</sup>, S.-Y. Xu<sup>\*</sup>, Y. Ishida<sup>\*</sup>, X. C. Pan<sup>\*</sup>, P. Yu<sup>\*</sup>, D. S. Sanchez, H. Zheng, M. Neupane, N. Alidoust, G. Q.

Chang, T.-R. Chang, Y. Wu, G. Bian, S.-M. Huang, C.-C. Lee, D. X. Mou, L. Huang, Y. Song, B. Wang, G. H. Wang, Y.-W. Yeh, N. Yao, J. E. Rault, P. Le Fevre, F. Bertran, H.-T. Jeng, T. Kondo, A. Kaminski, H. Lin, Z. Liu, F. Q. Song, S. Shin, M. Z. Hasan, Fermi arc electronic structure and Chern numbers in the type-II Weyl semimetal candidate  $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Te}_2$ , *Physical Review B*, 査読有, 94 巻, 2016, pp. 085107. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.085127

Y. Ishida, H. Masuda, H. Sakai, S. Ishiwata, S. Shin, Revealing the ultrafast light-to-matter energy conversion before heat diffusion in a layered Dirac semimetal, *Physical Review B*, 査読有, 93 巻, 2016, pp. 100302(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.100302

M. Neupane, Y. Ishida, R. Sankar, J.-X. Zhu, D. S. Sanchez, I. Belopolski, S.-Y. Xu, N. Alidoust, M. M. Hosen, S. Shin, F. C. Chou, M. Z. Hasan, T. Durakiewicz, Electronic structure and relaxation dynamics in a superconducting topological material, *Scientific Reports*, 査読有, 6 巻, 2016, pp. 22557. DOI: 10.1038/srep22557

Y. Ishida, T. Saitoh, T. Mochiku, T. Nakane, K. Hirata, S. Shin, Quasi-particles ultrafastly releasing kink bosons to form Fermi arcs in a cuprate superconductor, *Scientific Reports*, 査読有, 6 巻, 2016, pp. 18747. DOI: 10.1038/srep18747

M. Okawa, Y. Ishida, M. Takahashi, T. Shimada, F. Iga, T. Takagatake, T. Saitoh, S. Shin, Hybridization gap formation in the Kondo insulator  $\text{YbB}_{12}$  observed using time-resolved photoemission spectroscopy, *Physical Review B*, 査読有, 92 巻, 2015, pp. 161108(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.161108

M. Neupane<sup>\*</sup>, S.-Y. Xu<sup>\*</sup>, Y. Ishida<sup>\*</sup>, S. Jia, B.M. Fregoso, C. Liu, I. Belopolski, G. Bian, N. Alidoust, T. Durakiewicz, V. Galitski, S. Shin, R.J. Cava, M.Z. Hasan, Gigantic surface lifetime of an intrinsic topological insulator, *Physical Review Letters*, 査読有, 115 巻, 2015, pp. 116801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.116801

石田行章, 超高速時間分解光電子分光, *表面科学*, 査読有, pp. 31-36. DOI: 10.1380/jsssj.37.31

S. Zhu, Y. Ishida, K. Kuroda, K. Sumida,

M. Ye, J. Wang, H. Pan, M. Taniguchi, S. Qiao, S. Shin, A. Kimura, Ultrafast electron dynamics at the Dirac node of the topological insulator  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , Scientific Reports, 査読有, 5 巻, 2015, pp. 13213. DOI: 10.1038/srep13213

Y. Ishida, T. Otsu, T. Shimada, M. Okawa, Y. Kobayashi, F. Iga, T. Takabatake, S. Shin, Emergent photovoltage on  $\text{SmB}_6$  surface upon bulk-gap evolution revealed by pump-and-probe photoemission spectroscopy, Scientific Reports, 査読有, 5 巻, 2015, pp. 8160. DOI: 10.1063/1.4903788

Y. Ishida, T. Togashi, K. Yamamoto, M. Tanaka, T. Kiss, T. Otsu, Y. Kobayashi, S. Shin, Time-resolved photoemission apparatus achieving sub-20-meV energy resolution and high stability, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85 巻, 2014, pp. 123904. DOI: 10.1063/1.4903788

[学会発表](計 10 件)

Y. Ishida, H. Masuda, H. Sakai, S. Ishiwata, S. Shin, Revealing the ultrafast light-to-matter energy conversion before heat diffusion in a layered Dirac semimetal, APS March meeting, 2017 年 3 月 13-17 日、ニューヨーク (米国)

Y. Ishida, Time-resolved photoemission spectroscopy implemented by ultrafast lasers, EMN meeting on Ultrafast, 2016 年 10 月 10-14 日、メルボルン (豪州)

石田行章、Gao Weilu、矢治光一郎、原沢あゆみ、河野淳一郎、辛埴、カーボンナノチューブの時間分解光電子分光、日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 13-16 日、金沢大学 (石川県・金沢市)

Y. Ishida, Time-resolved photoemission spectroscopy implemented by femtosecond laser sources, Interacting quantum systems driven out of equilibrium, 2015 年 5 月 5-6 日、ヒューストン (米国)

石田行章、増田英俊、酒井英明、石渡晋太郎、辛埴、多層ディラック電子系  $\text{SrMnBi}_2$  の時間分解 ARPES、第 71 回日本物理学会年次大会、2016 年 3 月 19-22 日、東北学院大学 (宮城県・仙台市)

Y. Ishida, T. Saitoh, S. Shin, T. Mochiku, T. Nakane, K. Hirata, Quasi-particles ultrafastly releasing kink bosons to form Fermi arcs in a cuprate superconductor, APS March meeting, 2016 年 3 月 14-18 日、

ボルチモア (米国)

石田行章、齋藤朋也、茂筑高士、中根茂行、平田和人、辛埴、銅酸化物高温超伝導体の準粒子分散、超伝導ギャップ、およびフェルミアークの超高速応答、日本物理学会秋季大会、2015 年 9 月 16-19 日、関西大学 (大阪府・吹田市)

石田行章、超高速時間分解光電子分光法、表面科学会・第 1 回関東支部セミナー、2015 年 5 月 22 日、東京大学 (東京都・文京区)

石田行章、乙津聡夫、島田智子、大川万里生、小林洋平、伊賀文俊、高島敏郎、辛埴、 $\text{SmB}_6$  の時間分解光電子分光: バルクギャップ形成とともに表面に現れる光起電力、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21-24 日、早稲田大学 (東京都・新宿区)

Y. Ishida, T. Otsu, T. Shimada, M. Okawa, Y. Kobayashi, F. Iga, T. Takabatake, S. Shin, Emergent photovoltage on  $\text{SmB}_6$  surface upon bulk-gap evolution revealed by pump-and-probe photoemission spectroscopy, APS March meeting, 2015 年 3 月 2-6 日、サンアントニオ (米国)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 行章 (ISHIDA, Yukiaki)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号: 30442924