

# 科学研究費助成事業(基盤研究(S))公表用資料 [研究進捗評価用]

平成23年度採択分  
平成25年4月8日現在

## 超高分解能3次元スピン分解光電子分光による

### 新機能物質の基盤電子状態解析

Electronic states of novel functional materials studied by ultrahigh-resolution three-dimensional spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy

高橋 隆 (TAKAHASHI TAKASHI)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授



#### 研究の概要

物質内の電子が持つ全物理量「エネルギー」「運動量」「スピン」を完全決定する「超高分解能3次元スピン分解光電子分光装置」を開発する。トポロジカル絶縁体、巨大ラッシュバ効果物質、巨大磁気抵抗物質、ハーフメタル強磁性体などの新機能物質の物性とスピンの依存した電子状態の関わりを明らかにして、スピントロニクスに資する新機能物質の基盤電子状態を確立する。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関係、スピントロニクス、光電子分光、トポロジカル絶縁体、表面

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、トポロジカル絶縁体や巨大磁気抵抗物質などの新機能性物質が次々と発見され、その物性やデバイス応用に向けての研究が加速的に進展している。これらの物性発現機構の完全解明には、スピンの依存した電子状態の決定が不可欠であり、電子スピン検出の困難を克服した実験装置の開発と、これを用いた電子構造研究の遂行が求められている。

#### 2. 研究の目的

本研究は、超高分解能スピン分解光電子分光法を用いて、トポロジカル絶縁体、ラッシュバ金属、巨大磁気抵抗物質、ハーフメタルなどの新機能物質について、そのフェルミ準位近傍の基盤電子構造を解明し、特異物性発現機構との関連を明らかにする事を目的とする。

#### 3. 研究の方法

新機能性物質における微細電子構造を解明するために、世界最高のエネルギー、運動量、およびスピン分解能を持つ「3次元スピン分解超高分解能光電子分光装置」の建設と改良を行う。建設した装置を用いて、スピントロニクス関連新機能性物質、具体的には、トポロジカル絶縁体、ラッシュバ金属、巨大磁気抵抗物質、ハーフメタルなどのスピン分解

ARPESを行い、フェルミ面、バンド分散、スピン偏極率とスピンベクトル、および準粒子のダイナミクスを、バルク・表面・界面に分離して高精度で決定することで、物性の起源となる基盤電子構造を明らかにする。

#### 4. これまでの成果

3次元スピン分析と装置全体の分解能向上を達成するために、電子エネルギー分析器、2台のスピン検出器、電子偏向器、電子ビームスプリッターの適性配置と仕様を決定した。装置の中心部となる二次元電子エネルギー分析器の改造と超高真空ミューメタル測定槽の設計と製作を行い、東北大学においてこれらの組上げ、電子のエネルギー・運動量の各種キャリブレーション、及び性能評価を行った。スピン分解/非分解実験の両立のために二次元電子エネルギー分析器の後段部においてMCP検出器の改造を行ったが、電場調整、漏洩磁場の除去、アライメント調整などの結果、MCP上の光電子シグナルにおいてエネルギー分解能1meV以下、角度分解能0.2°という性能を達成した。

スピン検出器については、散乱電子取り込み機構、ターゲット磁化のための二対コイル、集束レンズ、ターゲットホルダとその交換機構、ミューメタルシールド、などについて、電子軌道シミュレーションから最適形状・寸法を決定し、その設計と製作を行った。電子

偏向器と電子ビームスプリッターについては、2つのスピン検出器へ等価な電子ビームが高スループットで導かれ、ターゲット上で10mmφ以下にビームが収束できるような最適な電極形状・配置・印加電圧を決定し、これらの設計と製作および組立てを行った。さらに、強磁性薄膜ターゲットの作成のために薄膜基板を製作する真空槽を立ち上げ、タングステン基板の清浄化を行った。その清浄度は、LEEDおよび角度分解光電子分光による表面バンドの観測により確認した。さらに薄膜作成のための蒸着源を製作し、鉄薄膜の作成が行えることを確認した。

装置の開発と並行して、スピン非分解ARPES実験により、トポロジカル絶縁体およびその関連物質の電子状態を精密決定した。具体的には、(1) IV-VI族半導体SnTeのARPES実験を行い、そのトポロジカル電子状態が「二重ディラック錐」表面状態で特徴付けられることを明らかにした。このディラック錐構造は、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>などのトポロジカル絶縁体とは大きく異なり、鏡映対称性によって保護されたトポロジカル結晶絶縁体特有の構造であると結論した。(2) トポロジカル絶縁体Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>層の間にPbSe層を挟んだ(PbSe)<sub>5</sub>(Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>3m</sub> ( $m = 1, 2, \infty$ )の電子状態をARPESで決定し、ディラック錐の形状がBi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の層数 $m$ に依存して劇的に変化することを見出した。(3) タリウム系3元カルコゲナイドTlBiX<sub>2</sub>トポロジカル絶縁体について、X=(S,Se)を系統的に変化させて電子構造を詳しく調べた結果、トポロジカル量子相転移によりディラック表面状態にギャップが形成される事を見出した。(4) トポロジカル絶縁体Bi<sub>2-x</sub>Sb<sub>x</sub>Te<sub>3-y</sub>Se<sub>y</sub>について、系統的にx,y組成を変化させた実験を行い、この物質がトポロジカル数を保ちながら高いバルク絶縁性を示し、且つディラック電子状態のエネルギー位置が制御可能な物質である事を見出した。(5) 新型トポロジカル絶縁体Pb(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>を発見した。(6) トポロジカル超伝導体候補物質のCu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>における電子構造のCu濃度依存性を決定し、この物質の超伝導にはキャリア数の増加とは別に重要な発現機構がある可能性を見出した。(7) 典型的なラッシュバ系として知られるビスマス超薄膜のARPESを行い、通常のラッシュバ効果とは異なる面直方向のスピン偏極を観測した。さらにBi薄膜の厚さを系統的に変えた実験から、Bi薄膜とSi基板と界面においても、Bi表面と同様のラッシュバ状態が発現する事を見出した。

## 5. 今後の計画

現在開発中の高効率スピン検出システムをアナライザーに接続して、スピン分解光電子分光装置の本格稼働を目指す。装置全体の調整を行い、スピン分解時において1 meVの超高分解能測定と、シャーマン関数0.3の高効率スピン検出を実現する。建設した装置を用いて、トポロジカル絶縁体およびトポロジカル結晶絶縁体の準粒子ダイナミクス、さらに、これらの物質へのドーピングによる超伝導発現機構の解明、ラッシュバ金属の電子構造と巨大スピン分裂をもつ新奇物質の探索、巨大磁気抵抗物質およびハーフメタルのスピン偏極電子構造の決定などの研究を行い、新機能物質の物性発現の基礎を成す基盤電子状態の確立を目指す。

## 6. これまでの発表論文等

- (1) T. Sato, K. Segawa, K. Kosaka, S. Souma, K. Nakayama, K. Eto, T. Minami, Y. Ando and T. Takahashi, “Unexpected mass acquisition of Dirac fermions at the quantum phase transition of a topological insulator”, Nature Phys., vol. 7, pp. 840-844, (2011).
- (2) T. Arakane, T. Sato, S. Souma, K. Kosaka, K. Nakayama, M. Komatsu, T. Takahashi, Z. Ren, K. Segawa, and Y. Ando, “Tunable Dirac cone in the topological insulator Bi<sub>2-x</sub>Sb<sub>x</sub>Te<sub>3-y</sub>Se<sub>y</sub>”, Nature Commun., vol. 3, pp. 636-1-5, (2012).
- (3) Y. Tanaka, Z. Ren, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, K. Segawa, and Y. Ando, “Experimental realization of a topological crystalline insulator in SnTe”, Nature Phys., vol. 8, pp. 800-803, (2012).
- (4) S. Souma, M. Komatsu, M. Nomura, T. Sato, A. Takayama, T. Takahashi, K. Eto, K. Segawa, and Y. Ando, “Spin Polarization of Gapped Dirac Surface States Near the Topological Phase Transition in TlBi(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>2</sub>”, Phys. Rev. Lett., vol. 109, pp. 186804-1-5, (2012).
- (5) A. Takayama, T. Sato, S. Souma, Tamio Oguchi, and T. Takahashi, “Tunable spin polarization in bismuth ultrathin film on Si(111)”, Nano Lett., vol. 12, pp. 1776-1779, (2012).

他 原著論文9編

ホームページ等

<http://arpes.phys.tohoku.ac.jp/>