ISSP ワークショップ「トポロジカル絶縁体の表面電子状態」

物性研究所　本館６階第５輪講室（A615）

プログラム

2 月 23 日(木)

12:55　開会

<u>セッション１</u>（座長：加藤 岳生）

13:00　野村健太郎（東北大金研）
　　トポロジカル絶縁体表面に現れるディラック電子の物性

13:40　佐藤宇史（東北大理）
　　高分解能 ARPES で見たトポロジカル絶縁体におけるディラック電子の質量獲得

14:20　奥田太一（広大放射光セ）
　　高分解能スピン分解光電子分光によるトポロジカル絶縁体の表面スピン電子構造観測

15:00　花栗哲郎（理研）
　　トポロジカル表面状態の磁場中 STM/STS

15:40~16:00　休憩

<u>セッション２</u>（座長：木村昭夫）

16:00　笹川崇男（東工大応セラ研）
　　３次元のトポロジカル絶縁体・ラシュバ物質の開拓

16:40　石坂香子（東大工）
　　極性半導体 BiTeI における巨大なラシュバ型スピン分裂

17:20　幸坂祐生（理研）
　　巨大 Rashba 効果の走査トンネル分光イメージング

2 月 24 日　(金)

<u>セッション 3</u>（座長：小森文夫）

9:30　安藤陽一（阪大産研）
　　トポロジカル絶縁体・超伝導の物質開発と物性解明

10:10　村上修一（東工大理）
　　トポロジカル絶縁体の表面・界面状態と外場応答

10:50　木村昭夫（広大理）
　　トポロジカル絶縁体表面の非磁性・磁性原子吸着効果

11:30　松田　巌（物性研）
　　光電子分光によるトポロジカル転移の研究

12:10~13:10　昼食

<u>セッション 4</u>（座長：松田　巌）

13:10　吉澤俊介（物性研）
　　走査トンネル分光イメージングよるバンド分散測定

13:40　平原　徹（東大理）
　　トポロジカル絶縁体超薄膜の電子構造及び電子輸送

14:20　石田行章（物性研）
　　トポロジカル絶縁体の偏光依存・時間分解レーザーARPES

15:00　閉会

トポロジカル絶縁体表面に現れるディラック電子の物性

野村健太郎　（東北大学・金属材料研究所）

近年注目を集めている、トポロジカル絶縁体[1]と呼ばれる系では、バルクには有限のエネルギーギャップが存在するが試料表面はスピンと運動量の間に相関をもつ、新奇なギャップレス表面状態が実現する。講演ではトポロジカル絶縁体の表面輸送現象における非自明な量子効果を議論する。[2]

これまで知られていたすべての電子系導体では、乱れの強さが増していくと波動関数がアンダーソン局在し、絶縁化することが知られている。ところがトポロジカル絶縁体の場合、バルクのギャップが開いている限り、表面状態はアンダーソン局在することはなく、その伝導性(金属性)は時間反転対称性によってトポロジカルに保護されている[3]。スケーリング理論に基づき表面の伝導率に対する量子補正が$\Delta\sigma_{xx} \propto \log(T_0/T)$のように、低温に向けて対数的に増大することを示す。

一方、磁性不純物をドープした場合、時間反転対称性を破る乱れの効果として、表面状態での波動関数はアンダーソン局在し、対角伝導率σ_{xx}は０になる。しかしホール伝導率σ_{xy}は０にはならず半整数値に量子化される[4,5]。このことはトポロジカル絶縁体における、電場による磁化の誘起、すなわちトポロジカル電気磁気効果[1,5]の実現に有利に働く。 さらに表面量子ホール状態を用いて磁性不純物をドープしたトポロジカル絶縁体の表面における磁気モーメントを、単に電場と磁場だけを用いて制御する機構を提案する[5]。 本講演の内容は越野幹人、笠真生、Christopher Mudury、古崎昭、永長直人の各先生方との共同研究に基づく。

[1] Z. Hasan, C. Kane, Rev. Mod. Phys. 82, 3045 (2010)
[2] 野村健太郎, 固体物理 45, 743 (2010); 講義ノート
http://www-lab.imr.tohoku.ac.jp/~nomura/note_nomura.pdf.
[3] K. Nomura, M. Koshino, S. Ryu,　Phys. Rev. Lett. 99, 146806 (2007).
[4] K. Nomura, S. Ryu, M. Koshino, C. Mudry, A. Furusaki, Phys. Rev. Lett. 100, 246806 (2008).
[5] K. Nomura, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 106, 166802 (2011).

高分解能 ARPES で見たトポロジカル絶縁体におけるディラック電子の質量獲得

東北大学大学院理学研究科　佐藤宇史

近年、トポロジカル絶縁体と呼ばれる従来の物質の状態とは全く異なる新しい状態が発見され、大きな話題になっている。トポロジカル絶縁体は、バルクは絶縁体であるのに対して、そのエッジに特殊な金属状態が現われ、電子は質量ゼロのディラック電子となってディラックコーン状態を形成する。トポロジカル絶縁体

を利用した革新的なデバイスの多くは、ディラック電子に意図的に質量を持たせる事を必要とする。またこれが実現されると、半整数量子ホール効果や磁気単極子等の様々な特異量子現象が実現される可能性も指摘されている。その一方で、ディラック電子に質量を持たせる事は困難で、結晶に磁性不純物を添加したり強磁場を印加したりして、時間反転対称性を破る事が唯一の方法と考えられてきた。

我々は、上記の問題にアプローチするために、トポロジカル絶縁体 $TlBiSe_2$(Z_2=1)と、通常の絶縁体 $TlBiS_2$(Z_2=0)の固溶系である $TlBi(S_{1-x}Se_x)_2$ の高分解能角度分解光電子分光(ARPES)を行った。実験の結果、この系は、x=0.5 においてトポロジカル量子相転移を示す事が明らかになった[1]。また、$TlBiSe_2$(x = 1.0)においてディラックコーン的な X 字型を示す表面バンドが、S 置換によってエネルギーギャップが生じることが明らかになった。このことは、$TlBiSe_2$ の Se を非磁性不純物である S で置換しただけで結晶表面におけるディラック電子が質量を獲得することを意味しており、これまでの常識を覆して時間反転対称性を明示的に破らなくてもディラック電子が質量を持つ事を初めて示したものである。また我々は、トポロジカル絶縁体 $Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$ における ARPES 実験も行い[2]、この物質系は現在知られているトポロジカル絶縁体の中で最もディラックキャリアの制御に適していると結論した。

本研究は、相馬清吾、高坂研一郎、荒金俊行、小松 誠、中山耕輔、高橋 隆 (東北大)、および、江藤数馬、南 達哉、Zhi Ren、瀬川耕司、安藤陽一 (阪大) の各氏との共同研究です。

[1] T. Sato *et al.*, Nat. Phys. **7**, 840 (2011).

[2] T. Arakane *et al.*, Nat. Commun. 3:636 doi:10.1038/ncomms1639 (2012).

高分解能スピン分解光電子分光によるトポロジカル絶縁体の表面スピン電子構造観測

広島大学放射光科学研究センター　奥田太一

スピン分解光電子分光法(SARPES)は、光電子の運動エネルギーと運動量を観測する通常の角度分解光電子分光法(ARPES)にスピン分析能力を付与することにより、スピンを明確に分離して物質のバンド構造を観測する事を可能とした強力な実験手法である。近年理論的に予言され実験的にもその存在が確認されたトポロジカル絶縁体は、バルクは非磁性絶縁体であるにも関わらず、内包する大きなスピン軌道相互作用により表面では金属的でスピン偏極したディラックコーンが形成される。ディラックコーンを形成するスピン偏極電子の向きは、理想的にはその波数ベクトルと垂直で面内に固定されており、後方散乱が禁制となるため散逸の無い高い偏極度(~100%)を持つスピン流の存在が理論的に予想され、そのスピン流を利用したスピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。このトポロジカル絶縁体の物性研究においても、SARPESはキーとなる実験手法であるが、従来SARPESに一般に用いられてきたMott型スピン検出器の効率が低いため精度の高い実験をすることが難しかった。我々はMott型スピン検出器に代わる、高効率の低速電子回折型スピン検出器と最新の光電子アナライザーを組み合わせた高いエネルギーと角度分解能を有したSARPES装置を近年開発し[1]、トポロジカル絶縁体の電子状態の詳細観測を進めている。従来の分解能の低いSARPES装置での観測では、ディラックコーンのスピン偏極の存在は確認できても、観測され

る見かけの偏極度は小さく、またディラック点上下でのスピン偏極の反転が明確に観測できなかった。今回の発表では最近理想的なトポロジカル絶縁体の一つとして注目されるBi_2Te_2Seの測定結果を例として、高分解能測定の実現により高いスピン編極度（>80%）が観測され、ディラック点上下で明確なスピン偏極の反転が観測されることなどを紹介しながら、これまでのトポロジカル絶縁体の定性的なスピン電子状態の理解から、より定量的な理解へ向けて高分解能のSARPES測定が重要であることを示した。

[1] T. Okuda, K. Miyamaoto, H. Miyahara, K. Kuroda, A. Kimura, H. Namatame, and M. Taniguchi, Review of Scientific Instruments **82**, 103302 (2011).

トポロジカル表面状態の磁場中 STM/STS

理化学研究所　花栗哲郎

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 表面における Dirac 電子の磁場中における性質を STM/STS を用いて調べた。実空間における Landau 軌道は、エネルギーに依存してポテンシャルの極大、あるいは極小に局在し、Landau 準位のエネルギーでは非局在状態をとることがわかった。このふるまいは、量子 Hall 状態で観測されるものと同じである。また、STM 像に見られる欠陥と Dirac 点の空間分布の比較から、Se 欠陥がポテンシャル分布を決定していることがわかった。

Bi_2Se_3 は、典型的には 10^{-19} cm^{-3} 程度のバルクキャリヤを含むが、キャリヤに寄与する欠陥を減らすことのできる Bi_2Te_2Se においても磁場中 STM/STS を行った。Bi_2Se_3 同様、Dirac 表面状態の特徴を備えた Landau 準位が観測された。この物質では、バイアス電圧を上げながら測定したトンネルスペクトルと下げながら測定したスペクトルに履歴が観測された。この履歴は、バイアス電圧が ±60 mV を超えると現れ、バイアス電圧の絶対値を 60 mV 以下に保つ限り、直前に印加した最大バイアス電圧で決まる状態が保持される。すなわち、一種のメモリーとして働いていることがわかった。この現象は、欠陥によって形成される様々な準安定表面電荷分布状態間を、バイアス電圧によってスイッチした結果であると考えられる。

３次元のトポロジカル絶縁体・ラシュバ物質の開拓

東京工業大学応用セラミックス研究所　笹川崇男

２次元電子系において発見された量子スピンホール効果やラシュバ効果などの大きな相対論効果（スピン軌道相互作用）に起因して現れるスピン偏極した新奇な固体電子状態について、最近では３次元電子系を対象とした研究も活発に行われるようになってきた。

本講演では、我々の行ってきた研究を中心に、純良単結晶開発・電子構造の直接観察・第一原理電子状態計算の連携という共通した研究手法によって、３次元のトポロジカル絶縁体とラシュバ物質の両者について、効率的な物質や物性の開拓ができることを紹介する。

３次元のトポロジカル絶縁体については、代表的な物質である Bi_2Se_3 を舞台として、単結晶試料の精密組成制御によって、様々な電子状態の実現に成功したことを前半では紹介する。具体的なトピックスは、Se 欠損量や非磁性不純物によるキャリア量（フェルミ準位）のファインチューニング、磁性不純物による強磁性（ディラック点へのギャップ）の導入、Cu インタカレーションによる超伝導の発現などである。後半では、Bi_2Se_3 と同様な Tetradymite 構造をもつ物質を対象として、トポロジカル絶縁体の多様性と特性の向上を狙った研究の進捗状況を報告する。$Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$ で表される化学量論組成（x, y は整数）の物質について、第一原理計算で系統的にトポロジカル普遍量の判定を行った後に、12 組成中の 10 組成を実際に単結晶試料として合成し、物性評価を行った結果を示す。

３次元のラシュバ物質については、BiTeX (X = I, Br, Cl) が有望な候補物質であることを理論計算と実験の双方から示す。前半は、単結晶合成法の選択により、絶縁体から金属まで電子状態の制御に成功したことを紹介する。キャリア量（フェルミ準位）に対応するスピンバンド分裂したバルク電子状態は、内因性スピンホール効果や、シングレットとトリプレットが混成した超伝導状態など、種々の興味深い現象を探索する舞台として魅力的であることについて議論する。後半は、これら物質が格子圧縮によりトポロジカル相転移することについて、弾性定数の見積りにより圧力効果を定量的に検討した結果から議論し、裏と表と側面とで異なる表面電子状態をもつような新しいトポロジカル絶縁体の創製にも有望であることを紹介する。

極性半導体 BiTeI における巨大なラシュバ型スピン分裂

東京大学大学院工学系研究科　石坂香子

固体中のスピン軌道相互作用と空間反転対称性の破れに起因するスピン分裂の研究（ラシュバ効果、ドレッセルハウス効果）は、スピントロニクスの最も基本的な動作原理として応用への期待からも注目されている。ここで報告する BiTeI は三角格子を組んだ Bi, Te, I 層が順に積層した P3m1 結晶構造を有する半導体であり、積層軸方向に極性を持つ。このような空間反転非対称な結晶構造に由来する電子構造やスピン軌道相互作用によるバンドのスピン分裂の様子を調べるため、スピン分解・角度分解光電子分光および第一原理計算を行った[1,2]。

角度分解光電子分光（$h\nu$ = 21.2 eV）により観測された伝導帯は 0.2 eV 程度の明瞭な分裂を示しており、これは金の表面状態などにおいて観測される k-linear なラシュバ型分裂と類似している。実際に、スピン分解角度分解光電子分光の結果からはそれぞれのバンドがラシュバ型のスピン分極（極性電場ベクトルと運動量ベクトルに直交するスピン成分 $S_{\perp}$）を持つことが確かめられた。また、SPring-8 BL17SU での波長依存角度分解光電子分光により、BiTeI の持つ 3 次元的なバンド分散とそのスピン分裂構造が確認された。これらは相対論効果を考慮した第一原理計算とよく一致しており、BiTeI のバルク電子構造がラシュバ型の大きなスピン分裂に支配されることを実証するも

のである。このような特異な結晶構造およびバルク電子構造を反映し、BiTeI は特徴的な光学特性[3]、軌道磁性[4]や圧力依存トポロジカル転移[5]などの興味深い性質を持つことが次第に明らかとなっており、今後の展開が期待される。

[1] K. Ishizaka *et al*., Nature Mater. **10**, 521 (2011).

[2] M. S. Bahramy, *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 041202(R) (2011).

[3] J. S. Lee et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 117401 (2011).

[4] G. A. H. Schober *et al.*, arXiv: 1111.5800v1.

[5] M. S. Bahramy *et al.*, Nature Communications DOI:10.1038/ncomms1679 (2011).

巨大 Rashba 効果の走査トンネル分光イメージング

理化学研究所　幸坂祐生

結晶の空間反転対称性が破れると、固体中の電子のバンド分散はスピン分裂を起こす。このような現象の一つとして Rashba-Bychkov 効果[1]が知られており、重金属表面や半導体量子井戸などで研究が進められてきた。Rashba-Bychkov 効果の特徴の一つは、完全後方散乱(k→-k)がスピンの反転を伴うために抑制されることであり、トポロジカル絶縁体の表面電子状態の特徴と類似している。我々は層状半導体 BiTeI について走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いた分光イメージング測定を行い、不純物による電子散乱を詳細に調べた。

BiTeI は重元素から構成される空間反転対称性のない層状構造を持つ物質である[2]。バルク物質として大きな Rashba 分裂が実験的に観測されているだけでなく[3,4]、圧力下でトポロジカル絶縁体になることが理論的に示唆されている[5]。このため、この物質は強いスピン-軌道相互作用がもたらす物性を研究するための格好の舞台を提供している。

STM による BiTeI の測定結果として、1 つの表面上で n 型金属的及び p 型半導体的な 2 種類のテラスが観測されることを見出した。n 型金属的テラス上では不純物周囲に明瞭な電子定在波が観測された。Fourier 解析により電子定在波の分散は 2 種類あることを確認し、理論予測[6]とは異なる結果を得た。これは Rashba 分裂したバンド間での散乱と、スピンの面直成分が存在することによるバンド内散乱の両方が見えていることに起因する。このことは、スピンの面直成分の存在が（トポロジカル絶縁体の表面状態同様に）電子状態の理解に不可欠であることを示している。

[1] Y. A. Bychkov and E.I. Rashba, JETP Letters 39, 78 (1984).

[2] A. V. Shevelkov et al., J. Solid State Chem. 114, 379 (1995)

[3] K. Ishizaka et al., Nature Mater. 10, 521 (2011)

[4] J. Lee et al., Phys. Rev. Lett. 107, 1 (2011).

[5] M.S. Bahramy, B.-J. Yang, R. Arita, N. Nagaosa, arXiv:1109.5102 (2011).

[6] L. Petersen, P. Hedegard, Surf. Sci. 459, 49 (2000).

トポロジカル絶縁体・超伝導の物質開発と物性解明

大阪大学産業科学研究所　安藤陽一

物性物理学の分野で最近、「トポロジカルな量子状態」に関する研究が急速に進展している。その大きなきっかけとなったのが、普通のバンド絶縁体の中にも Z_2 インデックスという不変量で特徴付けられるトポロジカルな絶縁体があるという発見である（Kane and Mele, 2005 年)。そのような絶縁体は当初、量子スピンホール絶縁体と呼ばれたが、2007 年ごろからトポロジカル絶縁体と呼ばれるようになり、その後に具体的な物質も発見されて、ここ数年その研究が世界的な流行を見せている。

このトポロジカル絶縁体の特徴は、バルクにはエネルギーギャップを持つ絶縁体なのに、その表面にギャップレスの金属状態が生じていることである。その表面状態中の電子は、質量ゼロのディラック方程式で記述されるエネルギー状態を持つため、これを相対論的ディラック粒子とみなすことができる。しかもそのスピンの方向が、面内でかつ運動量ベクトルと垂直な方向に固定されたヘリカルなスピン偏極を持つのが大きな特徴である。このようなヘリカルスピン偏極の存在は無散逸スピン流の存在を意味するので、トポロジカル絶縁体の表面を利用した超省エネルギー型スピントロニクスの応用が期待されている。

また最近、トポロジカル絶縁体の発見に触発されて、「トポロジカル超伝導体」の研究も流行の兆しを見せている。このトポロジカル超伝導体もトポロジカル絶縁体と似た特徴を備えており、バルクの波動関数には超伝導ギャップが開いているのに、表面にギャップレスの状態が現れる。ただしトポロジカル超伝導体のバラエティはトポロジカル絶縁体よりも広く、バルクの持つトポロジカルな性格に応じて、表面状態の性質も様々である。例えば時間反転対称性の破れた 2 次元トポロジカル超伝導体のトポロジーはチャーン数によって決まり、その端には右回りか左回りかどちらか一方の電子の流れ（カイラルエッジ流）が生じる。これに対して、時間反転対称性を保った 3 次元トポロジカル超伝導体のトポロジーはヒルベルト空間の巻き付き数によって決まり、その表面にはヘリカルなスピン偏極を持ったマヨラナ粒子が現れる。

上記のようなトポロジカル絶縁体・超伝導体における新奇なトポロジカル量子状態の学理を確立するためには、物質開発と物性解明を車の両輪としてバランスよく推進することが望ましい。本講演では、我々の研究室で行っているそのような研究の最新の成果を紹介する。

トポロジカル絶縁体の表面･界面状態と外場応答

東京工業大学理工学研究科　村上修一

トポロジカル絶縁体表面ではディラックコーンと呼ばれる線型の分散が実現していて、その傾き（速度）で特徴づけられる。本講演では、トポロジカル絶縁体同士の界面を作ったときに界面に局在する状態について、２つのトポロジカル絶縁体表面の速度が互いに逆符号のときはギャップレスになることを示した。またこうしたトポロジカル絶縁体表面に円偏光を当てると静的な磁化が誘起される逆ファラデー効果について、非平衡グリーン関数法を用いて計算し、低周波数では周波数に比例した磁化が出ることを示した。

トポロジカル絶縁体表面の非磁性･磁性原子吸着効果

広島大学大学院理学研究科　木村昭夫

３次元トポロジカル絶縁体は，理想的にはバンドギャップ中にマスレスなディラックコーンを表面状態（トポロジカル表面状態）として持つ。電子スピン（有効磁場）の方向が波数ベクトルに対して固定されているため波数空間で helical spin texture を構成する。その結果，欠陥や非磁性不純物による表面電子の散乱が大きく抑制され，エネルギー損失の少ない表面スピン流が得られることが期待され，量子電磁気効果，それに関わる磁気単極子の発生，さらにはマヨラナフェルミオンの出現など様々な新奇量子現象が期待される [1,2]。

我々は，三次元トポロジカル絶縁体表面の電子構造を調べるために，真空紫外領域のシンクロトロン放射光で励起する高分解能角度分解光電子分光（HR-ARPES）及び走査型トンネル顕微鏡（STM）を組み合わせて研究を行っている。特に，波数空間においてトポロジカル表面状態がバルク状態に対して孤立しているかどうかを見極める事がこの研究では重要であることから，トポロジカル絶縁体の電子構造研究には広範囲で波長可変なシンクロトロン放射光の利用は必須である。また，STM を用いることにより，結晶終端面の特定が出来るだけでなく，不純物や欠陥等による表面電子の散乱についての知見が得られる。これらの代表的な２つの表面プローブ法を組み合わせることで，表面ディラック電子の理解をより深められる。本研究では，広島大学放射光科学研究センターHiSOR にて HR-ARPES 実験を行った。

典型的な三次元トポロジカル絶縁体として知られる Bi_2Se_3 は Se-Bi-Se-Bi-Se の５原子層で構成されるブロック層が比較的弱い結合で積層している構造をとる。ブロック層間にはゲスト原子が挿入しやすく，例えば Cu が層間にインターカレートされた場合には超伝導が現れる。我々は，超高真空下で Bi_2Se_3 表面に，蒸着法により Ag 原子をインターカレートしたところ，最表面のブロック層がバルクから離れ，トポロジカル表面状態が埋もれた界面に移動したことを STM 及び HR-ARPES により観測した [3]。この結果は，非自明（non-trivial）-自明（trivial）な物質の界面でギャップレ

スなトポロジカル表面状態が生じることから理解でき，基礎的な観点からのみならず応用面においても重要な知見を与える。

一方，トポロジカル絶縁体に磁性原子をドープした系や，表面に磁性原子を吸着させた場合には，トポロジカル表面状態のディラック点においてエネルギーギャップが生じることが報告され注目を浴びている [4,5]。ただし，その表面における磁性について直接的な知見が得られておらず，そのエネルギーギャップと磁性との関係が不明なままである。我々は，Bi_2Se_3 単結晶表面に磁性原子としては典型的な Fe や Co 原子を微量吸着し，STM，HR-ARPES および内殻吸収端における磁気円二色性（XMCD）分光を用いて表面における吸着状態，電子構造，磁性の解明を試みた。その結果，Bi_2Se_3 のトポロジカル表面状態は，Fe 及び Co 原子吸着に対して，電子ドープの効果でフェルミエネルギーの移動は観測されるものの，エネルギーギャップは閉じたままで大きな変化は見られなかった。さらに Fe，Co L_{23} 吸収端における XMCD 分光実験では，±8 テスラの間で外部磁場を挿引して実験を行ったところ，キュリーワイス常磁性の振る舞いが観測された。また Co 原子吸着については，STM を用いて試料バイアス+200mV 以上（非占有状態側）で定在波が観測されたが，基本的には時間反転対称性が破れたためではなく，等エネルギー面のワーピング効果により散乱が生じているものと解釈する事ができる [6]。以上の実験結果から，Fe 及び Co 原子吸着に対してトポロジカル表面状態はロバストであることが結論される。また我々とは独立に行われた別の Fe/Bi_2Se_3 についての ARPES 実験でも同様の結論が得られている [7]。この結果は，先行研究 [5]とは大きく矛盾することを最後に申し添える。

［謝辞］本研究は，叶茂，黒田健太，宮本幸治，奥田太一，有田将司，仲武昌史，島田賢也，生天目博文，谷口雅樹（広島大学），植田義文（呉高専），E.E. Krasovskii，E.V. Chulkov（DIPC），S. Eremeev（Tomsk）との共同研究である（敬称略）。

References

[1] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 3045.

[2] 村上修一他、日本物理学会誌 **65** 巻 (2010) 840.

[3] M. Ye et al., arXiv. 1112.5869 (2011).

[4] Y. L. Chen et al., Science **329**, 659 (2010).

[5] L. A. Wray, Nat. Phys. **7**, 32 (2010).

[6] M. Ye et al., arXiv. 1112.3206 (2011).

[7] M. R. Scholz et al., arXiv. 1108.1037 (2011). [Phys. Rev. Lett., accepted.]

光電子分光によるトポロジカル転移の研究

東京大学物性研究所　松田巌

トポロジカル絶縁体の代表的な物質である $Bi_{1-x}Sb_x$ は Bi に Sb をドープすることで合成される。Z_2 で定義されるトポロジカル量に対して $Bi_{1-x}Sb_x$ は non-trivial であるが、Bi は trivial であるためこの変化は必然的にトポロジカル転移である。理論的には $Bi_{1-x}Sb_x$ はバルクバンドが Sb のドープ量に伴ってまずその L 点でのギャップを閉じ、再度開く際にエッジ状態バンドが non-trivial になる。本研究では物質の電子構造を直接調べることができる光電子分光法で、このトポロジカル転移を追跡した。光源として、バルクバンドと表面バンドを選択的に調べることができる放射光を用いた。

その結果、$Bi_{1-x}Sb_x$ の Sb ドープ量に伴う各バルクバンドのエネルギーシフトを定量的に決定することができ、また L 点でのギャップが再度開く際にエッジ状態が変化することを確認した。エッジ状態はスピン偏極しており、その数は理論予測よりも多かった。これは trivial なエッジ状態と non-trivial なエッジ状態の混成で説明することができる。本講演ではこれらエッジ状態の変遷を表面状態の形成条件と合わせて議論した。

本研究は中村史一、小宇佐友香（慶応大学）、武市泰男、Marie D’angelo（パリ大学）、Alexy A. Taskin（阪大）、中辻寛、小森文夫、柿崎明人、近藤寛（慶応大学）、安藤陽一（阪大）の各氏との共同研究です。

[1]　Topological transition in Bi1-xSbx studied as a function of Sb doping, F. Nakamura, Y. Kousa, A. A. Taskin, Y. Takeichi, A. Nishide, A. Kakizaki, M. D’Angelo, P. Lefevre, F. Bertran, A. Taleb-Ibrahimi, F. Komori, S. Kimura, H. Kondo, Y. Ando, and I. Matsuda, Phys. Rev. B **84** 235308 (2011).

走査トンネル分光イメージングよるバンド分散測定

東京大学物性研究所　吉澤俊介

$Bi_{1-x}Sb_x$ は$x \sim 0.1$でトポロジカル絶縁体となり、バルクのエネルギーギャップの中にスピン偏極した金属的な表面状態をもつことが角度分解光電子分光法（ARPES）により確認されている[1,2]。しかしARPESで得られている分散関係は理論予測とは異なり、その原因を理解するには通常のARPESでは測定できない非占有状態の分散関係を知る必要がある。今回、$Bi_{0:79}Sb_{0:21}$ 単結晶(111) 劈開面において走査トンネル分光（STS）測定を行い、準粒子干渉による局所状態密度（LDOS）の空間変調を観測した。この空間変調に含まれるフーリエ成分は表面状態バンドの等エネルギー線をむすぶ散乱ベクトルと対応付けられ、スピン反平行の状態間の散乱に対応する成分は観測されない

ことが分かっている[3]。この性質をもとに、空間変調のフーリエ変換のエネルギー依存性を詳細に解析することで、Γ点付近の分散関係を占有状態から非占有状態まで明らかにすることができた。つづいて磁性不純物としてCo をわずかに蒸着して同様の測定を行い、清浄表面での結果と比較した。フーリエ変換で得られるピークの種類と波数は清浄表面で得られたものと同じであった。また、Co 原子の近傍にはクローバー形に広がる3 回対称の状態ができ、+100 meV 付近にLDOS のピークを作ることを明らかにした。Co の磁性が消えている可能性と、スピン反転散乱が存在しても対応する定在波が生じていない可能性が考えられる。

[1] A. Nishide *et al*., Phys. Rev. B 81, 041309(R) (2010).

[2] F. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B 84, 234308 (2011).

[3] P. Roushan *et al.*, Nature 460, 1106 (2009).

トポロジカル絶縁体超薄膜の電子構造と電子輸送

東京大学大学院理学系研究科　平原　徹

トポロジカル絶縁体は量子スピンホール相とも呼ばれ、最近“新しい物質状態(a new state of matter)”として量子伝導、場の理論、表面物理などを中心に物性物理の研究分野全体に話題を提供している[1]。この相は２次元及び３次元系で実現されるもので、バルクが非磁性絶縁体であるのに対して、そのエッジ状態（２次元の場合）や表面状態（３次元の場合）はギャップレスである。このエッジ/表面状態はスピン流を運び、しかもこのエッジ/表面状態は非磁性不純物等による散乱からトポロジカルに保護されているなど新奇な物性が理論的に提唱されており、ビスマス系化合物でその実験的観測が報告され、現在までに多くの実験が行われている。

上記のようにトポロジカル絶縁体の興味深い性質は表面状態が担っている。原理的にはバルクのバンド構造はギャップを持つために十分低温でその寄与をなくし、表面状態のみの特性を計測することが可能なはずである。しかし現実的には高純度に作成した結晶であっても種々の欠陥によってドープされ、絶縁体ではなくなっている。

このような状況を踏まえて筆者らはトポロジカル絶縁体を超薄膜として成長させて in situ で電子状態及び電子輸送を研究している。超薄膜を用いることで(i)表面/バルクの比を大幅に向上させ表面敏感な測定ができ、さらに(ii) ３次元から２次元へのクロスオーバーの際のトポロジカルな性質の変化が議論できる。また(iii)基板や蒸着層の寄与によるトポロジカル表面状態やトポロジカル数の変化なども理論的には期待されており、その実験的検証も可能である。一方 in situ で測定を行うため、(iv)大気暴露などによる表面・バルクバンドの変化・汚染なども気にしなくて良いという利点がある。本講演ではその成果の一端を紹介した[3]。

本研究は長谷川修司先生、坂本裕介氏、相谷昌紀氏、山田学氏、福居直哉氏（東京大学大学院理学

系研究科)、Gustav Bihlmayer 博士、Stefan Blügel 博士（ドイツユーリッヒ研)、宮崎秀俊博士、松波雅治博士、木村真一先生（分子科学研究所 UVSOR)、奥田太一先生（広大放射光センター)、武市泰男氏、松田巌先生、柿崎明人先生（東大物性研)、小林功佳先生（お茶大）との共同研究です。

[1] 村上修一、平原徹、松田巌、日本物理学会誌　Vol. **65**, No. **11**, 840 (2010).

[2] A. Taskin *et al.,* Phys. Rev. Lett. **107**, 016801 (2011).

[3] T. Hirahara *et al.,* Phys. Rev. B **81**, 165422 (2010); Phys. Rev. B **82**, 155309 (2010); Phys. Rev. Lett. **107**, 166801 (2011). Y. Sakamoto *et al.,* Phys. Rev. B **81**, 165432 (2010). T. Hirahara *et al.,* submitted (2012).

トポロジカル絶縁体の偏光依存・時間分解 ARPES

東大物性研　石田行章

角度分解光電子分光（ARPES）にレーザーの単色性・偏光制御性・短パルス性などを活かすことで、より分析的に物質の電子状態を調べることができる。本講演では、Cu を添加したトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の時間分解および偏光依存レーザーARPES の結果を紹介した。

まず、$Cu_xBi_2Se_3$ の時間分解 ARPES と偏光依存レーザーARPES に以下の 2 点の異常が認められることを報告した：（１）フェルミ準位近傍の電子分布のダイナミクスのほかに、光電子強度が過渡的に変化する現象が観測された；（２）双極子選択則では説明できない ARPES の直線偏光依存性が観測された。これらが $Cu_xBi_2Se_3$ 表面の特異な分極に由来する表面光電子放出のチャンネルを考慮すると説明できることを示し、$Cu_xBi_2Se_3$ の表面状態や二次元電子ガスの表面局在の度合いや、表面分極とラシュバ分裂との関連を議論した。

次に、$SrTiO_3$:Nb と $Cu_xBi_2Se_3$ の ARPES の円二色性について報告した[Y. Ishida *et al.*, *PRL* **107**, 077601 (2011)]。$SrTiO_3$:Nb 表面の二次元電子ガスの円二色性に、実験系の対称操作だけからでは説明のつかない“水平ノード”が現れることを報告し[図１]、これが（１）入射面に対して垂直に鏡映面が存在し、（２）電子状態が光電子のド・ブロイ波長に比して局在している、という２条件が満たされると現れることが双極子近似の範囲で言えることを示した。これを基に $Cu_xBi_2Se_3$ に現れる ARPES の円二色性を考察し、ディラック点から離れるにつれてトポロジカル表面状態が理想的なヘリカルスピン構造から逸脱する原因などを議論した。

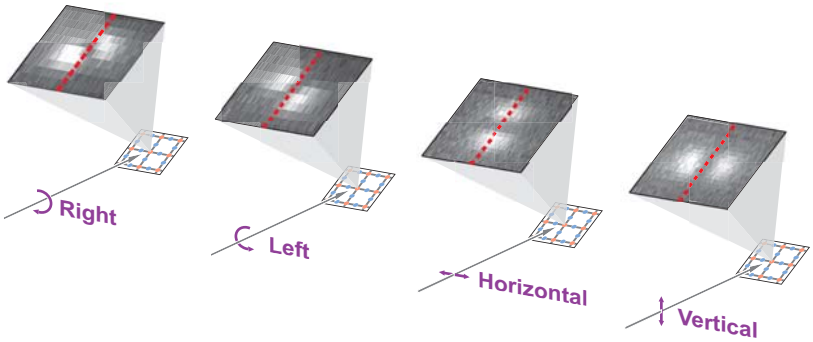

図１:種々の偏光で測定した $SrTiO_3$:Nb の表面状態のフェルミ面マッピング。入射面での鏡映に関して、右円偏光の実験系は左円偏光の系に重なるので、実験結果も点線の折り返しに関して重なる。一方、左右円偏光で得られるマッピングは、水平ラインでの上下の折り返しでも入れ替わるように見え、円二色性はこのラインでも消失する。