

Topologia pokazanych na rysunku 1 powierzchni: sfery i obwarzanka jest różna, ponieważ nie jest możliwe ciągłe przekształcenie sfery, które, bez jej rozerwania, prowadzi do obwarzanka. Można jednak tak przekształcić sferę, bez jej rozrywania, że przejdzie ona w spodek, a obwarzanek powstanie z niego kubek z uszkiem: te powierzchnie, sfera i spodek z jednej strony i obwarzanek i kubek z drugiej, są topologicznie identyczne. Hipotetyczny mieszkaniec takiej powierzchni nie widzi nic dziwnego podróżując po nich, ale może wyznaczyć pewien parametr, genus, który jest różny dla różnych topologii i taki sam w ramach tej samej.



Rys. 1 a): Powierzchnie z $g=0$, których nie można w sposób ciągły przekształcić w powierzchnie z $g=1$ (b)

Przestrze stanów elektronowych też może mieć różną topologię. I podobnie jak w przypadku powierzchni w zwykłej przestrzeni nie czujemy nic dziwnego „przechodząc” na nich, tak i w przypadku stanów elektronowych nie da się w nich własnymi oczami zobaczyć czegoś nadzwyczajnego. Dopiero zmiana topologii, rozrywanie sfery w zwykłej przestrzeni, lub granica obszarów o dwóch różnych topologiach stanów elektronowych prowadzi do dziwnych zjawisk. I tak jeżeli topologia pewnego izolatora jest „nietrywialna” – jej liczba Cherna („odpowiednik” genusu dla zwykłej przestrzeni) nie jest równa zero – to powierzchnia takiego izolatora jest miejscem, gdzie stykają się stany elektronowe o dwóch różnych topologiach, bowiem topologia próżni jest trywialna – liczba Cherna równa zero.

To musi prowadzić do dziwnych zachowań elektronów na powierzchni. W istocie stany powierzchniowe stają się w takich izolatorach metaliczne, a relacja dyspersji tych metalicznych elektronów jest liniowa, jak elektronów relatywistycznych. Oznacza to, że w 2-wymiarowej przestrzeni stanów powierzchniowych relacja dyspersji $E(k)$ jest powierzchniowa – tzw. stożek Diraca (Rys. 2a). Co więcej, metaliczność powierzchni jest „chroniona” różną topologią przestrzeni, które rozgraniczają: adne działania, poza zniszczeniem pewnych symetrii materiału (np. symetrii odwrócenia w czasie) nie jest w stanie zniszczyć tych właściwości.

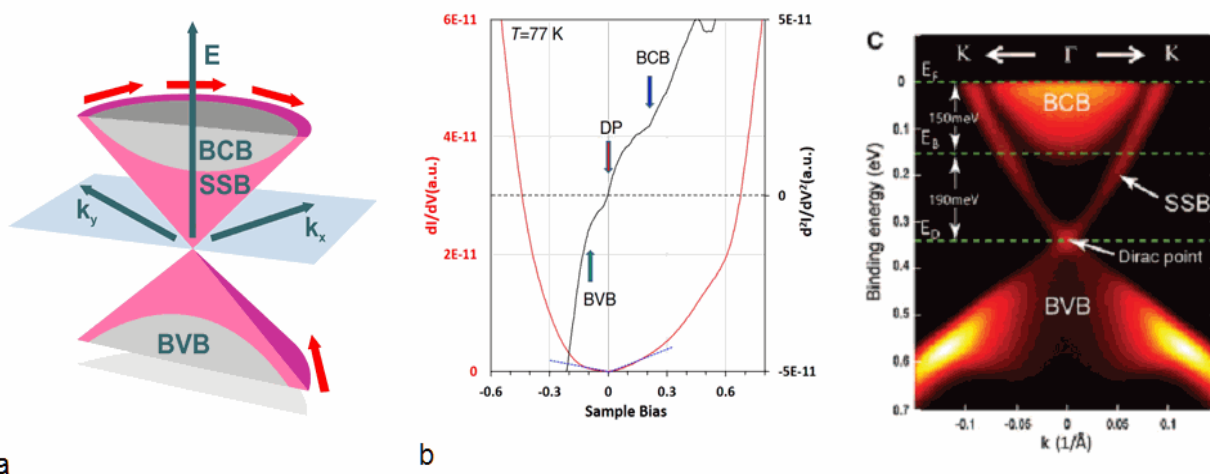


Fig. 2 a): Stożek Diraca w stanach powierzchniowych (SSB) na tle pasma walencyjnego (BVB) i przewodnictwa (BCB) w trzecim wymiarze, wraz z zaznaczonym związaniem spinu z wektorem falowym (czerwone strzałki) w porównaniu z rzeczywistą strukturą elektronową uzyskaną z pomiarów STS (b; Xu et al., Nature Physics, 10, (2014) 956) i ARPES (c; Y. L. Chen et al., SCIENCE 329 (2010) 659).

Materiały o tych właściwościach, izolatory topologiczne, TI, odkryto pod koniec pierwszej dekady XXI wieku. Do trójwymiarowych topologicznych izolatorów należą np. materiały z rodziny tetradymitów, takich jak $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 i Sb_2Te_3 , które tworzą rodzinę kanonicznych izolatorów topologicznych. Poza metalicznymi stanami powierzchniowymi bezsprzecznie najbardziej fascynującym cechem tych materiałów jest właśnie naturalna ochrona elektronów przy powierzchniach przed rozpraszaniem (na niemagnetycznych domieszkach) – zjawisko, które może mieć niebagatelne znaczenie w konstrukcji układów spintronicznych lub komputerów kwantowych. Narzuca się naturalne pytanie, do jakiego stopnia materiał taki można zmieniać – np. przez wprowadzanie do niego elektrod, zmian rozmiaru w celu wykonania mikroelektronicznych elementów

elektronicznych, czy te zmiany kształtu, te w zakresie odległości w skali mikro lub nanometrycznej – bez ingerencji w jego unikalne właściwości. Odpowiedzi na to pytanie po wicony jest nasz projekt.

Naszym celem jest wytworzenie nanostruktur, dla których materiałem bazowym będą monokryształy kanonicznych izolatorów topologicznych, a następnie eksperymentalne zbadanie stabilności topologii stanów elektronowych tych struktur pod wpływem zmiany ich rozmiarów i geometrii. Uważamy, że taka kolejność działań: wytworzenie wysokiej jakości monokryształu (o czystości 99,99999%; nasze monokryształy uważamy jako jedne z najlepszych w świecie), a następnie jego nanoformowanie wiązką elektronów lub jonów, FEB/FIB, (czyli formowanie materiałów metodą „top-down” w odróżnieniu od zwykle stosowanej metody odwrotnej: wzrostu cienkich warstw aż do pożądanego dla elektroniki rozmiaru, czyli metody „bottom-up”) pozwoli na lepszą obserwację warunków, w których właściwości TI znikają.

Właściwości elektronowe nanostruktur TI będziemy na bieżąco kontrolować przez obserwację ich przewodnictwa elektrycznego, również w funkcji pola magnetycznego, stałego i impulsowego do 60T, prowadzoną w szerokim zakresie temperatur do ok. 50mK. Właściwości elektronowe powierzchni będziemy kontrolowali technikami sprawdzonymi na tych materiałach: kątowo-rozdzielczą fotoemisją ARPES (rys. 2c), spektroskopią tunelową STS (Rys. 2b), oraz efektem Halla. Uważamy, że dzięki takiej analizie porównawczej możemy będzie wskazanie tych zjawisk mających wpływ na właściwości magnetotransportowe wytworzonych przez nas nanostruktur, które są rezultatem nietrywialnej topologii struktury elektronowej TI, ale także efektów rozmiarowych i koncentracji defektów pochodzących z procesów nanofabrykacji. Tym samym możemy będzie rozwiązanie zasadniczych problemów, które w przyszłości pojawią się, gdy topologiczne izolatory będą wykorzystywane w nanoelektronice i elektronice spinowej.