

Prof. dr hab. Tomasz Story
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Joanny Wincukiewicz
pt. „Magnesy topologiczne oparte na związku Bi_2Te_3 domieszkowanym Mn”**

Rozprawa doktorska mgr Joanny Wincukiewicz poświęcona jest doświadczalnemu badaniom magnetycznych izolatorów topologicznych na bazie masywnych kryształów Bi_2Te_3 domieszkowanych Mn, w których spontanicznie formują się heterostruktury warstwowe typu $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ z ferromagnetyczną warstwą septetową MnBi_2Te_4 i (nominalnie) niemagnetyczną warstwą kwintetową Bi_2Te_3 powtórzoną n razy.

Są to materiały półprzewodnikowe należące do nowej klasy materiałów kwantowych - izolatorów topologicznych, wykazujących unikatowe właściwości elektronowe związane z topologicznie chronionymi stanami elektronowymi na powierzchni kryształów. Układy te posiadają topologicznie nietrywialny odwrócony (inwersyjny) układ pasm elektronowych i szereg unikatowych właściwości: liniową relację dyspersji energii elektronów (analogia do bezmasowych fermionów Diraca), helikalność (silne sprzężenie ruchu orbitalnego elektronów z ich spinem) oraz zakaz rozpraszania topologicznych nośników ładunku do tyłu. Bardzo ważną konsekwencją tych właściwości jest skwantowanie niektórych wielkości fizycznych, takich jak przewodnictwo elektryczne w zerowym polu magnetycznym: podłużne (izolator topologiczny 2D - kwantowy spinowy efekt Halla - QSHE) czy poprzeczne (kwantowy anomalny efekt Halla – QAHE).

Jest to aktualnie jedno z najaktywniej badanych na całym świecie zagadnień nowoczesnej fizyki materii skondensowanej, z licznymi powiązaniem do innych działów fizyki i nadziejami aplikacyjnymi związanymi z nową fizyczną realizacją (prawie) bezdysypatywnego reżimu transportu ładunku w układach niskowymiarowych, czy nowym kwantowym standardem oporu elektrycznego, nie wymagającym przykładania silnych pól magnetycznych. W tej dziedzinie badań jednym z kluczowych zagadnień jest kwantowy anomalny efekt Halla obserwowany w ferromagnetycznych izolatorach topologicznych. Podstawowe pytania dotyczą zarówno dyskutowanych obecnie różnych modeli fizycznych tego efektu, jak i materiałów, w których jest oczekiwany.

Kluczem do pełnego zbadania właściwości fizycznych magnetycznych izolatorów topologicznych, a także uzyskanie reżimu fizycznego dla demonstracji kwantowania przewodnictwa w QAHE jest kontrola położenia poziomu Fermiego w obszarze energii w przerwie energetycznej, tak aby transport elektronowy zdominowany był przez topologiczne stany krawędziowe, a przerwa energetyczna w widmie stanów topologicznych była wygenerowana namagnesowaniem warstw w kierunku prostopadłym do ich powierzchni.

W swojej pracy doktorskiej Joanna Wincukiewicz podjęła bardzo ambitny projekt badawczy, w którym stosując różnorodne metody doświadczalne i aktywnie współpracując z technologami i teoretykami, zbadała wpływ na kluczowe właściwości magnetyczne izolatorów topologicznych na bazie Bi_2Te_3 z Mn takich ważnych czynników jak: (i) realna struktura krystaliczna materiałów (samoistne powstawanie struktur warstwowych $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, elektrycznie aktywne defekty rodzime, nieporządek elektronowy związany z niejednorodnym rozkładem magnetycznych jonów Mn), a także (ii) sterowanie

położeniem poziomu Fermiego w obszarze przerwy energetycznej poprzez naświetlanie kryształów Bi_2Te_3 z Mn strumieniem elektronów w celu kontroli ich właściwości magnetycznych i magnetotransportowych.

Kluczowe dla recenzowanej rozprawy doświadczalne badania właściwości magnetycznych metodą rezonansu ferromagnetycznego (FMR) i pomiary struktury elektronowej powierzchni kryształów $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ metodą kątowno-rozdzielonej spektroskopii fotoemisyjnej (ARPES) doktorantka wykonała pod kierownictwem promotorki dr hab. Agnieszki Wołoś, prof. UW, na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego Solaris w Krakowie. Aktywnie uczestniczyła także w interpretacji wyników dodatkowych badań wykonanych przez jej współpracowników w innych ośrodkach, w zakresie obliczeń struktury elektronowej, pomiarów magnetotransportowych i magnetycznych, nanocharakteryzacji strukturalnej, a także prac technologicznych.

Praca doktorska zaczyna się od przedstawienia motywacji doktorantki do podjęcia tej tematyki badawczej. Rozprawa składa się z 8 rozdziałów, z których rozdziały 1-3 stanowią wstęp do tematyki izolatorów topologicznych, magnetycznych izolatorów topologicznych na bazie Bi_2Te_3 z Mn oraz stosowanych metod doświadczalnych i technologicznych. W rozdziale 4 przedstawione są wybrane do szczegółowych badań kryształy Bi_2Te_3 z Mn i kryształy BiSbTe_3 z Mn wraz z ich charakterystyką strukturalną, chemiczną i magnetyczną. Oryginalne wyniki badawcze doktorantki, dotyczące charakteryzacji magnetycznej metodą rezonansu ferromagnetycznego, badań struktury elektronowej metodą ARPES oraz pomiarów magnetotransportu elektronowego, przedstawione są w rozdziałach 5-7. Rozdział 8 zawiera wnioski końcowe podsumowujące rozprawę. Rozprawa zawiera także bibliografię (201 pozycji), spis 38 rysunków i dwóch tabel oraz listę publikacji doktorantki.

W rozdziale 1 autorka przedstawia problematykę topologicznej klasyfikacji materiałów z odpowiednim rysem historycznym, powiązaniem topologii w przestrzeni rzeczywistej i w przestrzeni odwrotnej (wektorów falowych) z podkreśleniem ważnej roli topologicznej interpretacji pierwszego układu topologicznego - całkowitego kwantowego efektu Halla (IQHE). Omówione są izolatory topologiczne 2D (studnie kwantowe HgTe) i 3D (Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3) oraz układy kwantowego anomального efektu Halla (QAHE) z kwantowaniem przewodnictwa elektrycznego przez stany krawędziowe (bez przykładania pola magnetycznego). Wprowadzone są takie podstawowe pojęcia jak krzywizna Berry'ego, liczba Cherna, niezmiennik topologiczny Z_2 czy mechanizmy ochrony topologicznej. To dosyć szczegółowa i dobrze przemyślana prezentacja tej dziedziny badań (w części dotyczącej izolatorów topologicznych) udanie dokonana przez doktorantkę.

Na str. 29, omawiając mechanizm inwersji pasm elektronowych doktorantka słusznie podkreśla kluczową rolę oddziaływań spinowo – orbitalnych. Jednak w wielu materiałach topologicznych równie ważnym dla przesunięć pasm typu-s jest inny wkład do energii elektronów, posiadający także relatywistyczną naturę, a związany z zależnością masy od prędkości.

Na str. 34 jest omyłka edytorska: izolator topologiczny Bi_2Sb_3 nie istnieje, chodzi o selenek bizmutu Bi_2Se_3 .

Rozdział 2 zawiera krótkie, ale użyteczne, omówienie struktury krystalicznej, struktury elektronowej i magnetycznej podstawowych magnetycznych izolatorów topologicznych na bazie kryształów $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ z Cr lub V, dla których dokonano pierwszych obserwacji efektu QAHE, a także układu na bazie Bi_2Te_3 z Mn, w którym występuje zjawisko formowania się ferromagnetycznych heterostruktur warstwowych typu $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$.

Przedstawiony aktualny stan badań tych materiałów pozwala na zidentyfikowanie nowych ważnych obszarów badawczych podjętych w rozprawie doktorskiej Joanny Wincukiewicz.

W rozdziale 3 przedstawione są układy i techniki pomiarowe wykorzystywane przez doktorantkę w czasie wykonywania swojej pracy doktorskiej. Szczegółowo omówiony jest układ do badań metodą rezonansu ferromagnetycznego i metodyka pomiarów fotoemisyjnych ARPES na synchrotronie Solaris - podstawowe narzędzia doświadczalne doktorantki. Podane są także informacje o pomiarach, w interpretacji których doktorantka uczestniczyła (magnetotransport, charakteryzacja strukturalna metodami mikroskopii elektronowej) a wykonywanych w innych laboratoriach. Opis ten uzupełnia krótka informacja o wariantach metody Bridgmana zastosowanych do wytwarzania badanych kryształów MnBi_2Te_4 (w IF PAN (P. Skupiński i K. Grasa) oraz Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry (I. Fedorchenko)). Dużo uwagi poświęcono wykorzystaniu metody naświetlania kryształów wysokoenergetyczną wiązką elektronów (Ecole Polytechnique – M. Kończykowski) w celu kontroli przewodnictwa elektrycznego i położenia poziomu Fermiego.

Są to użyteczne informacje przedstawione w syntetyczny sposób (tabela 1), pozwalający na ustalenie wkładu doktorantki w poszczególne etapy dużego projektu badawczego, który przedstawia w rozprawie doktorskiej.

Czy zastosowanie reżimu naświetleń strumieniem elektronów wpływającego na zdefektowanie w podsieci Bi nie wpływa jednocześnie na zdefektowanie podsieci jonów Mn (które mają niższy próg generacji defektów Frenkla), a w szczególności na przesunięcie jonów Mn do pozycji międzywęzłowej?

Na str. 58 w stwierdzeniu „...możliwe są dwa sposoby zmiany częstości rezonansowej” lepiej mówić o zmianie warunku rezonansu ponieważ częstość rezonansową określa tylko g-czynnik i (efektywne) pole magnetyczne.

Na str. 58 autorka stwierdza (nieprecyzyjnie) „...częstość mikrofalowa, która indukuje precesję namagnesowania ...”. Promieniowanie mikrofalowe jest oczywiście kluczowe w detekcji precesji namagnesowania ale nie jest niezbędne do jej indukowania.

W rozdziale 4 przedstawione są wyniki charakteryzacji realnej struktury krystalicznej i chemicznej badanych kryształów Bi_2Te_3 z Mn metodami mikroskopii elektronowej TEM, spektroskopii fluoroscencyjnej SEM-EDX oraz spektroskopii mas jonów wtórnych SIMS. Analizując wysokiej jakości zdjęcia TEM, mapy SEM-EDX i profile SIMS wykonane w ramach realizacji tego projektu przez współpracowników doktorantki z IF PAN (A. Reszka, R. Jakiela) i Centrum Nauk Biologiczno-Chemicznych UW (J. Borysiuk, K. Sobczak) doktorantka identyfikuje najważniejsze defekty strukturalne, w tym heterostruktury z septetowymi warstwami MnBi_2Te_4 , prowadzące do zmian we własnościach magnetycznych materiałów. Wyznaczenie koncentracji i rozkładu jonów Mn w warstwach septetowych i kwintetowych. Te ważne informacje wykorzystywane są przez autorkę do interpretacji wyników badań struktury elektronowej oraz właściwości magnetotransportowych, magnetycznych i elektronowych prezentowanych w dalszych rozdziałach dysertacji.

Rozdział 5 poświęcony jest najwszechstronniejszej części aktywności badawczej doktorantki związanej z badaniami właściwości magnetycznych kryształów Bi_2Te_3 z Mn metodą rezonansu ferromagnetycznego (FMR). To niewątpliwie oryginalny wkład doktorantki do międzynarodowych badań magnetyzmu tych izolatorów topologicznych. Choć jakość widm FMR nie zawsze pozwala na ich pełną interpretację, doktorantka z sukcesem podjęła takie ważne zagadnienia jak: (i) interpretacja widm z uwzględnieniem sprzężonych wymiennie modów akustycznych i optycznych w dwuwarstwach, (2) wyznaczenie temperaturowej zależności pola prostopadłej anizotropii magnetycznej z analizy zależności

kątowej pola rezonansu FMR, (3) określenie wpływu położenia poziomu Fermiego na magnetyzm izolatorów topologicznych z samoorganizującymi się warstwami MnBi_2Te_4 .

Jest to część rozprawy bardzo nasycona danymi doświadczalnymi, propozycjami interpretacji i wynikami analizy ilościowej. Pośród wielu ciekawych zagadnień warto bliżej wyjaśnić poniższe.

Analizując kątową zależność pola rezonansowego FMR autorka korzysta z dobrze znanych równań Smitha-Beljersa, które pozwalają na ustalenie równowagowego położenia wektora namagnesowania dla danego położenia wektora zewnętrznego pola magnetycznego. W układach magnetycznych z anizotropią zwykle oba te wektory nie są kolinearne. Doktorantka wskazuje na dwa przypadki kolinearności tych wektorów uzyskane podczas analizy danych: pierwszy trywialny, gdy pole zewnętrzne i pole anizotropii prostopadłe są skierowane w tym samym kierunku (prostopadle do warstwy) i drugi (zaskakujący), gdy pole zewnętrzne skierowane jest w płaszczyźnie warstwy (a więc prostopadle do łatwej osi magnesowania). Jak należy to rozumieć? Czym jest dodatkowy mod rezonansowy FMR oznaczony na rys. 5.2 (*)?

W dyskusji wyników badań magnetycznych kluczową rolę odgrywają jony Mn w (nominalnie niemagnetycznej) warstwie kwintetowej Bi_2Te_3 . Są one odpowiedzialne za postulowany ferromagnetyzm tej warstwy. Czy w widmach rezonansu paramagnetycznego można zaobserwować pojedyncze jony magnetyczne Mn^{2+} ?

Skąd wiadomo, że sprzężony układ ferromagnetyczny to dwuwarstwa $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3:\text{Mn}$, a nie trójwarstwa $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n/\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ sprzężona przez niemagnetyczną, bardzo cienką warstwę Bi_2Te_3 ?

W rozdziale 6 autorka przedstawia wyniki badań struktury elektronowej powierzchni heterowarstw $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ metodą kątowo-rozdzielonej spektroskopii fotoelektronowej (ARPES) wykonane na synchrotronie Solaris w Krakowie. W interpretacji widm ARPES kryształów Bi_2Te_3 z Mn bardzo ważną rolę odgrywają dedykowane obliczenia struktury elektronowej powierzchni wykonane metodą teorii funkcjonału gęstości (DFT) przez współpracownika doktorantki Kyungwha Parka z Virginia Tech (USA). Uwzględniono szereg układów wielowarstw typu kwintet-septet-kwintet-septet. W analizie wyników brane są pod uwagę stany powierzchniowe i objętościowe, zarówno topologiczne jak i topologicznie trywialne. Przedstawione widma ARPES, zwykle dobrej jakości, uzyskano dla różnych energii promieniowania synchrotronowego, w funkcji temperatury (powyżej i poniżej T_c) dla wszystkich, poza jedną, warstw badanych wcześniej przez doktorantkę innymi metodami.

Ten bardzo wartościowy, i zapewne trudny do uzyskania, materiał doświadczalny jest analizowany w korelacji z obliczeniami DFT. Autorka podkreśla, że dla obserwacji przerw o naturze magnetycznej w widmie topologicznych stanów powierzchniowych, ferromagnetyczna warstwa septetowa MnBi_2Te_4 powinna być warstwą wierzchnią. Pokazuje także silny wpływ na widmo ARPES zdefektowania warstw (deficyt Mn w warstwach septetowych do nawet 50% podstawień Mn przez Bi).

Co wiadomo o realnej topografii powierzchni w skali atomowej próbek eksfoliowanych w warunkach bliskich tym stosowanym w eksperymencie synchrotronowym (dane STM, AFM, XPS)? W szczególności, czy w skali obszaru próbkowanego promieniowaniem UV w eksperymencie ARPES (typowo ~ 100 mikronów?) można, pomimo nieuchronnej obecności takich defektów jak np. stopnie atomowe, skazać dominującą powierzchnię eksponowaną w procesie eksfoliacji warstw $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$?

Czy podejmowano próby pomiarów metodą ARPES z rozdzielczością spinową, powyżej i poniżej temperatury Curie?

Rozdział 7 poświęcony jest przedstawieniu wyników pomiarów magnetotransportowych i dokonanej przez doktorantkę mikroskopowej interpretacji obserwacji doświadczalnych anomalnego efektu Halla. Pomiary elektryczne wykonał w Ecole Polytechnique współpracownik doktorantki Marcin Kończykowski na układzie pozwalającym na sprawny pomiar próbek poddanych naświetlaniu strumieniem elektronów o energii 2,5 MeV i cyklowi dalszych wygrzewań (w celu zmiany koncentracji nośników ładunku i typu przewodnictwa). Metoda ta okazała się bardzo skuteczna dla kryształów Bi_2Te_3 z Mn, gdzie uzyskano zmianę koncentracji od 10^{20} cm^{-3} typu p to 10^{16} cm^{-3} typu n , z osiągnięciem tzw. punktu neutralności elektrycznej. Natomiast dla kryształów BiSbTe_3 z Mn naświetlanie okazało się mniej skuteczne i umożliwiło jedynie zmianę koncentracji nośników typu p o czynnik 3 na poziomie 10^{20} cm^{-3} .

W niektórych próbkach zaobserwowano anomalny efekt Halla i doktorantka podjęła ważną próbę skorelowania tego efektu z koncentracją nośników ładunku i położeniem poziomu Fermiego, a także z przewodnictwem elektrycznym kryształów. Na podstawie analizy temperaturowej zależności tego efektu wyznaczono temperaturę Curie warstw i porównano dane magnetotransportowe z pomiarami namagnesowania powierzchniowego wykonanymi z wykorzystaniem zewnętrznej sondy i magnetometrii Halla.

Jaka jest dokładność wyznaczenia ruchliwości nośników ładunku przedstawionej na rys. 7.5, w szczególności dla próbek typu p ?

Analizując dane doświadczalne autorka omawia różne mechanizmy odpowiedzialne za anomalny efekt Halla i ich zależność od oporności elektrycznej kryształów. Dokonana analiza wskazuje na dominującą rolę tzw. wewnętrznego mechanizmu związanego z topologiczną strukturą elektronową materiałów i fazą Berry'ego (skalowanie z kwadratem oporności elektrycznej).

Na końcu rozdziału autorka przedstawia także ciekawą analizę rachunkową wskazującą na silny wkład do anomalnego efektu Halla w obszarze energii specjalnych punktów (anty-przecięć pasmowych) w strukturze elektronowej izolatorów topologicznych Bi_2Te_3 z Mn. Omówione są również konsekwencje tych obserwacji dla osiągnięcia w krystalicznych heterowarstwach $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ reżimu kwantowego anomalnego efektu Halla.

Rozdział 8 stanowi trzypięciowe podsumowanie rozprawy w odniesieniu do każdego z rozdziałów 4-7 z wnioskami końcowymi.

Rozprawę czyta się bardzo dobrze ponieważ ma ona czytelny i logiczny układ i przemyślane rysunki. Zauważyłem zaledwie kilka drobnych potknięć redakcyjnych.

Należy jednoznacznie stwierdzić, że mgr Joanna Wincukiewicz zrealizowała projekt badawczy stanowiący oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego wykorzystania masywnych kryształów Bi_2Te_3 domieszkowanych Mn, z samoistnie formującymi się heterostrukturami warstwowymi $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, jako magnetycznych izolatorów topologicznych o kontrolowanych parametrach fizycznych (położenie poziomu Fermiego, anizotropia magnetyczna, przewodnictwo elektryczne) kluczowych dla uzyskania reżimu kwantowego anomalnego efektu Halla.

Doktorantka wykazała się także wymaganą wiedzą ogólną z fizyki oraz dużą samodzielnością w prowadzeniu prac doświadczalnych, analizie i publikacji wyników badawczych z różnych dziedzin fizyki i technologii ciała stałego, także w bezpośredniej współpracy z teoretykami i technologiami.

Osiągnięcia badawcze przedstawione w rozprawie doktorskiej mgr Joanny Wincukiewicz obejmują:

- Wykonanie wszechstronnych pomiarów właściwości strukturalnych, elektronowych i elektrycznych kryształów Bi_2Te_3 oraz BiSbTe_3 z Mn, w których samoistnie formują się ferromagnetyczne heterostrukтуры $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ i zbadanie powierzchniowych stanów topologicznych.
- Doświadczalne pokazanie, że w kryształach Bi_2Te_3 z Mn naświetlanych strumieniem elektronów można kontrolować położenie poziomu Fermiego w obszarze pasma walencyjnego lub pasma przewodnictwa albo przerwy energetycznej. Zweryfikowanie (negatywne) wpływu nośników ładunku na formowanie się stanu ferromagnetycznego i wkład anomalnego efektu Halla w heterowarstwach $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$.
- Wszechstronne wykorzystanie metody rezonansu ferromagnetycznego do zbadania właściwości ferromagnetycznych heterostruktur $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, a w szczególności temperaturowej zależności namagnesowania i pola (prostopadłej) anizotropii magnetycznej, a także doświadczalne zbadanie efektu sprzężenia wymiennego w dwuwarstwie $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3:\text{Mn}$, w funkcji temperatury i położenia poziomu Fermiego.
- Zrealizowanie dużego programu badań doświadczalnych wpływu naświetlania elektronami na transport elektronowy na powierzchni izolatorów topologicznych Bi_2Te_3 z Mn i BiSbTe_3 z Mn oraz zweryfikowanie roli nieporządku elektronowego.

Mgr Joanna Wincukiewicz (z domu Sitnicka) ma już w swoim dorobku publikacyjnym cztery prace bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej i opublikowane w bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych (Phys. Rev. B (2023), 2D Materials (2022) i Nature Physics (2021)) a także w publikacji konferencyjnej w wydawnictwie Metamaterials XIV (2023). Doktorantka jest pierwszą autorką trzech z tych publikacji.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Joanny Wincukiewicz pt. „Magnesy topologiczne oparte na związku Bi_2Te_3 domieszkowanym Mn” spełnia odnośne wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r. stawiane pracom doktorskim z fizyki i wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Uważam także rozprawę doktorską Joanny Wincukiewicz za wyróżniającą ze względu na jej poniższe cechy:

(1) skuteczne zrealizowanie, w ścisłej współpracy z technologami i teoretykami, bardzo aktualnego, ambitnego i wszechstronnego projektu badawczego dotyczącego nowej klasy materiałów kwantowych - magnetycznych izolatorów topologicznych;

(2) poczynienie ważnych wniosków co do wpływu defektów strukturalnych, a także kontrolowanego położenia poziomu Fermiego, na właściwości magnetyczne i magnetotransportowe kryształów Bi_2Te_3 z Mn, a w szczególności unikatowych samoorganizujących się heterostruktur warstwowych $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$;

(3) zweryfikowanie możliwości uzyskania w tych materiałach reżimu fizycznego niezbędnego do obserwacji kwantowego anomalnego efektu Halla (położenie poziomu Fermiego w przerwie energetycznej, prostopadła anizotropia magnetyczna, brak równoległych, topologicznie trywialnych kanałów przewodzenia);

(4) opublikowanie wyników badań w bardzo dobrych czasopismach (Physical Review B i 2D Materials – 1-sza autorka oraz Nature Physics - współautorka).

Tomasz Stroh