

Louisville, 6 lutego, 2024 r.

Dr. Jacek B. Jasinski
Conn Center for Renewable Energy Research
University of Louisville
Louisville, KY 40292, USA
Tel: +1-502.852.6338 | E-mail: jacek.jasinski@louisville.edu

**Recenzja pracy doktorskiej Pani mgr Joanny Wincukiewicz, zatytułowanej
„Magnesy topologiczne oparte na związku Bi_2Te_3 domieszkowanym Mn”**

Wstęp

Praca doktorska Pani mgr Joanny Wincukiewicz, zatytułowana „Magnesy topologiczne oparte na związku Bi_2Te_3 domieszkowanym Mn”, wykonana została w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem Pani profesor UW, dr hab. Agnieszki Wołoś. Praca ta poświęcona jest badaniom magnetycznych izolatorów topologicznych (MIT), opartych na związku Bi_2Te_3 domieszkowanym Mn, ze szczególnym uwzględnieniem układów ferromagnetycznych (FM), w których domieszki manganu samoistnie organizują się tworząc warstwy septetowe MnBi_2Te_4 . Badania obejmują wpływ rozmieszczenia Mn, nieporządku strukturalnego oraz położenia poziomu Fermiego na magnetyzm, powierzchniową strukturę pasmową oraz magnetotransport.

MIT stanowią fascynującą klasę materiałów kwantowych, w których silne oddziaływanie spin-orbitalne (SO) prowadzi do powstania specyficznych struktur energetycznych, nietrywialnych topologii struktury pasmowej i kwantowego transportu spinu. Co czyni te materiały wyjątkowo atrakcyjnymi, zarówno z perspektywy fascynujących zjawisk kwantowych, jak i ich potencjalnych zastosowań w elektronice i spintronice, to występowanie w nich wysoce odpornych na zakłócenia i rozpraszanie kanałów przewodnictwa bezdysypacyjnego opartego na topologicznie chronionych stanach elektronowych. Dodatkowo, w przeciwieństwie do niemagnetycznych izolatorów topologicznych (IT), wprowadzenie magnetyzmu w takich układach pozwala na wytworzenie unikalnych kwantowych faz topologicznych, w szczególności kwantowego anomального efektu Halla (QAHE). Dlatego też prace nad MIT otwierają nowe perspektywy w dziedzinie spintroniki, pamięci magnetycznych, kwantowych komputerów oraz innych innowacyjnych technologii związanych z przechowywaniem i przetwarzaniem informacji. Niemniej jednak, praktyczne zastosowanie tych materiałów w tego typu urządzeniach wymaga kontrolowanego dostępu do stanów topologicznie chronionych. Ponadto, z praktycznego punktu widzenia, istotne jest także, aby topologiczne zjawiska kwantowe zachodziły w stosunkowo wysokich temperaturach. Osiągnięcie tych celów wymaga dogłębnego zrozumienia magnetyzmu w tych układach i w tym kierunku prowadzone są obecne badania w tej dziedzinie. **Omawiana rozprawa doktorska doskonale wpisuje się w ten nurt badawczy, a jej wyniki przybliżają nas do lepszego zrozumienia i kontroli topologicznych zjawisk kwantowych w jednym z najbardziej obiecujących MIT, a mianowicie w telurku bizmutu (Bi_2Te_3) domieszkowanym manganem.**

Niedomieszkowany Bi_2Te_3 stanowi silny IT o stosunkowo szerokiej przerwie energetycznej w objętości (~ 0.2 eV) i bezprzerwowych stanach powierzchniowych. Wprowadzenie do niego jonów magnetycznych, takich jak Mn, może prowadzić do wystąpienia efektów magnetotopologicznych, zwłaszcza QAHE. Koncentracja i rozmieszczenie jonów mają istotny wpływ na właściwości elektroniczne i magnetyczne, a pośrednio także na topologiczne stany powierzchniowe. W swoich badaniach autorka skoncentrowała się na tzw. samoistnych MIT, przybierających postać heterostruktur $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, gdzie $n = 1, 2, 3$, itd., powstających w odpowiednich warunkach wzrostu i przy stosunkowo wysokim poziomie domieszkowania (powyżej ok. 2% at.), kiedy to jony Mn mogą samoistnie organizować się w warstwy septytowe MnBi_2Te_4 oddzielone warstwami kwintetowymi niemagnetycznego Bi_2Te_3 . Ze względu na dobre dopasowanie zarówno strukturalne, jak i chemiczne, w strukturach tych znacznie łatwiej niż w materiałach, gdzie jony Mn rozmieszczone są losowo, uzyskać wysoką jednorodność oddziaływań wymiennych. Umożliwia to lepszą kontrolę fazy topologicznej i jej istnienie w wyższych temperaturach. W związku z tym, samoistne MIT są obiecującymi układami z punktu widzenia potencjalnych zastosowań. **W swoich badaniach autorka skupiła się na dwóch istotnych czynnikach - nieporządku magnetycznym i koncentracji swobodnych nośników - oraz ich wpływie na magnetyzm i właściwości topologiczne. Kierunek ten motywowany był brakiem wcześniejszych systematycznych studiów wyjaśniających rolę tych czynników. Jednocześnie jest to kierunek istotny, ponieważ zrozumienie wpływu tych czynników na powierzchniową strukturę pasmową, a także właściwości magnetyczne i magnetotransportowe, jest kluczowe dla zrozumienia i kontroli efektów magnetotopologicznych, zwłaszcza QAHE, w tych materiałach.**

Omówienie pracy

Odnosnie struktury i treści omawianej rozprawy, to napisana jest ona w języku polskim i składa się kolejno ze strony tytułowej, streszczenia (w języku polskim, jak i angielskim), podziękowań, spisu treści i wykazu używanych akronimów. Dalej, w części pt. „Motywacja” autorka szczegółowo uzasadnia wybór tematu rozprawy i wyjaśnia jego istotne znaczenie. Następująca po tym główna część rozprawy, omówiona szerzej w następnych paragrafach składa się z wprowadzenia, omawiającego najważniejsze zagadnienia rozważanej dziedziny badań (Rozdziały 1-2), prezentacji i dyskusji uzyskanych wyników (Rozdziały 3-7) oraz podsumowania (Rozdział 8). Ostatnia część, to spis publikacji autorki bezpośrednio związanych z tematem rozprawy, wykaz rysunków i tabel pojawiających się w pracy, a na końcu - bibliografia, zawierająca 201 odnośników literaturowych.

Główną część rozprawy otwiera Rozdział 1, stanowiący świetne wprowadzenie do efektów topologicznych w fizyce materii skondensowanej. W bardzo przystępny i doskonale przemyślany sposób, autorka przybliży czytelnikowi podstawową wiedzę z zakresu tej fascynującej, ale jednocześnie wysoce abstrakcyjnej dziedziny. W dużym stopniu jest to też zasługą przejrzystego wprowadzenia elementów formalizmu teoretycznego, umożliwiającego czytelnikowi nie tylko zrozumienie podstawowych pojęć związanych z efektami topologicznymi, ale także stanowiącego solidną podstawę do dalszego zgłębiania tematu. W rozdziale tym omawiany jest po pierwsze związek symetrii i topologii, w szczególności

fakt, że symetria odgrywa kluczową rolę w kontekście definiowania faz topologicznych i że łamanie dodatkowej symetrii w istniejącej fazie topologicznej może prowadzić do nowej fazy topologicznej. Jako ważny przykład omówione jest łamanie symetrii względem odwrócenia czasu (TR) w trójwymiarowym (3D) IT poprzez wprowadzenie uporządkowania FM, co może prowadzić do QAHE. W rozdziale tym omawiane są również symetrie przestrzenne, takie jak symetria odbicia i symetria obrotowa, które wpływają na topologiczne właściwości struktury pasmowej. Wprowadzone i przedyskutowane są również pojęcia fazy Berry'ego i krzywizny Berry'ego, a także ich bezpośredni związek z niezmiennikami topologicznymi, jak również ich kluczowa rola w klasyfikacji faz topologicznych i istotne znaczenie dla dynamiki elektronów w kryształach. Rozdział ten omawia również niezmienniki topologiczne, takie jak liczba Cherna dla kwantowego efektu Halla (QHE) czy niezmienniki Z_2 oraz v_0, v_1, v_2, v_3 dla układów dwu- i trójwymiarowych izolatorów topologicznych. W Rozdziale 1 omówiona jest także koncepcja stanów topologicznie chronionych, takich jak pary Kramersa, powstających w IT dzięki unikalnej strukturze pasma elektronowego i symetrii TR, która chroni je przed rozpraszaniem wstecznym, dzięki czemu zachowują swoje unikalne właściwości nawet w obecności defektów czy zanieczyszczeń.

Rozdział 2 pełni również rolę wprowadzenia, gdyż podsumowuje bieżącą wiedzę na temat badanej klasy materiałów, czyli MIT opartych na Bi_2Te_3 domieszkowanym Mn. Rozdział ten rozpoczyna się od omówienia MIT i ich właściwości, a następnie prezentuje dotychczasowy stan wiedzy - teoretycznej i doświadczalnej - dla tych układów. Przedstawione są także stosowane metody syntezy tych materiałów oraz ich charakterystyka strukturalna i elektroniczna. Ponadto, omówione są również wyniki badań właściwości magnetycznych, obejmujące magnetyczną strukturę MnBi_2Te_4 oraz wpływ temperatury.

Rozdział 3 koncentruje się na syntezie próbek wybranych do badań w doktoracie oraz zastosowanych technikach pomiarowych tych materiałów. W szczególności omówiona jest metoda Bridgmana, za pomocą której otrzymano badane materiały. Omówione są także techniki mikroskopii elektronowej zastosowane do badań strukturalnych i określenia składu chemicznego, w tym dystrybucji Mn w próbkach. Opisana jest również metoda kątowno-rozdzielczej spektroskopii fotoemisyjnej (ARPES), która stosowana była do pomiarów ich struktury pasmowej. Ponadto, autorka opisała również technikę naświetlania za pomocą wysokoenergetycznej wiązki elektronów, stosowaną w doktoracie do modyfikacji położenia poziomu Fermiego i koncentracji swobodnych nośników w celu badania wpływu tych czynników na magnetyzm i własności magnetotransportowe.

Rozdział 4 poświęcony jest identyfikacji różnych form nieporządku, w szczególności w odniesieniu do rozmieszczenia jonów Mn. Pomiary EDX, wykonane w skali submikronowej przy użyciu SEM wykazały niemal jednorodne rozmieszczenie pierwiastków i dostarczyły informacji na temat średniej zawartości Mn w próbkach. Jednakże podobne pomiary w skali nano- i subnanometrowej, wykonane przy użyciu TEM ujawniły obecność samozorganizowanych warstw septetowych MnBi_2Te_4 rozmieszczonych pomiędzy warstwami Bi_2Te_3 . Zidentyfikowane zostały dwa rodzaje nieporządku - pierwszy związany z rozkładem warstw septetowych i kwintetowych - drugi z dystrybucją manganu pomiędzy tymi dwoma typami warstw. Pomiary te wykazały, że badana klasa MIT jest wysoce podatna na zaburzenia, co objawia się statystycznym rozrzutem

odległości między warstwami septetowymi oraz migracją Mn pomiędzy warstwami septetowymi i kwintetowymi.

Rozdział 5 przedstawia wyniki pomiarów spektroskopii rezonansu magnetycznego (FMR) oraz ich fenomenologiczną analizę. Badane są czynniki kształtujące ferromagnetyzm w próbkach $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, takie jak odległości między warstwami septetowymi i wpływ nieporządku magnetycznego na pole anizotropii i temperaturę przejścia fazowego. Wyniki FMR skorelowane z badaniami miroskopowymi pokazały, że deficyt Mn w warstwach septetowych prowadzi do osłabienia oddziaływania FM wewnątrz warstw i obniżenia temperatury Curie. Z drugiej strony, występowanie Mn w warstwach kwintetowych umożliwia lepsze sprzęganie między warstwami septetowymi i prowadzi do trójwymiarowej stabilizacji fazy FM całego układu, nawet w próbkach o dużym n ($n > 4$). **Dotychczas taki mechanizm nie był rozważany, także badania autorki rzucają nowe światło na dodatkowe aspekty kształtujące ferromagnetyzm w tego typu układach.**

Oprócz analizy wpływu Mn badany był również wpływ swobodnych nośników. Badania te wyraźnie wskazują, że położenie poziomu Fermiego nie wpływa na właściwości magnetyczne próbek $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ czyli samoistnych MTI, co jest wyraźnie różne od zachowania w rozcieńczonych MTI. Jeszcze jednym ważnym wnioskiem z badań FMR jest to, że technika naświetlania wiązką elektronową może być skutecznie wykorzystywana do zmiany koncentracji swobodnych nośników bez znaczącego zaburzenia właściwości magnetycznych w tych układach.

Rozdział 6 przedstawia badania powierzchniowej struktury pasmowej układów $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ przy użyciu techniki ARPES oraz obliczeń metodą DFT. Analizowany jest wpływ magnetycznej warstwy septetowej i różnych konfiguracji warstw na strukturę pasmową powierzchni oraz złożona struktura pasmowa w okolicach stożka Diraca. Badania wykazały, że warunkiem koniecznym pojawienia się przerwy magnetycznej na topologicznej powierzchni niezaburzonego układu $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ jest zakończenie jego powierzchni warstwą septetową, a kluczową rolę w kształtowaniu struktury pasmowej ogdrywa uporządkowanie magnetyczne w obrębie jednej warstwy septetowej. Ponadto, analiza zaburzeń rozkładu Mn w warstwie septetowej pozwoliła uchwycić najbardziej charakterystyczne aspekty widm ARPES. Dodatkowo badania ujawniły złożony charakter orbitalny powierzchniowych struktur pasmowych oraz możliwą hybrydyzację pomiędzy stanami z sąsiadujących warstw.

Rozdział 7 skupia się na badaniach wpływu poziomu Fermiego na właściwości magnetotransportowe MIT zawierających warstwy septetowe MnBi_2Te_4 . Autorka przeprowadziła pomiary magnetotransportowe na dwóch próbkach - S5 (Bi_2Te_3 domieszkowany Mn) i S6 (BiSbTe_3 domieszkowany Mn) - przed i po naświetleniu różnymi dawkami elektronów. Dzięki temu możliwe było badanie właściwości magnetycznych oraz magnetotransportowych tych samych próbek dla różnego położenia poziomu Fermiego i różnej liczby niemagnetycznych defektów powstałych wskutek naświetlania, przy jednoczesnym zachowaniu rozmieszczenia domieszek Mn. Najciekawsze wyniki uzyskano dla próbki Bi_2Te_3 domieszkowanej Mn, tzn. próbki S5, gdzie udało się zmienić typ przewodnictwa z p na n. Pomiary magnetotransportowe próbek o różnym położeniu poziomu Fermiego w połączeniu z obliczeniami teoretycznymi pozwoliły na analizę wkładów do AHE od mechanizmów zewnętrznych, zależnych od nieporządku i rozpraszania magnetycznego i od mechanizmu wewnętrznego, wynikającego z krzywizny Berry'ego i topologii

struktury elektronowej. Jak wynika z przedstawionych obliczeń, objętościowy wkład do AHE od krzywizny Berry'ego jest rezonansowo wzmacniany w pobliżu punktów krytycznych energetycznej struktury pasmowej powstałych w wyniku inwersji pasm na skutek oddziaływania SO. W próbce nienaświetlonej, AHE był zdominowany przez wkład pochodzący z objętości struktury pasmowej. Dostrojenie poziomu Fermiego pozwoliło na całkowite wyeliminowanie udziału objętościowego AHE, co w próbce o przewodnictwie typu n umożliwiło obserwację QAHE, co szczegółowo opisane zostało w prestiżowej pracy opublikowanej w *Nature Physics* (Deng i in., *Nature Physics*, 17, 36-42, 2021). Wyniki tych badań stanowią solidną podstawę do dalszego badania wpływu poziomu Fermiego na właściwości magnetotransportowe MIT zawierających warstwy septetowe MnBi_2Te_4 . Ponadto, przedstawione w Rozdziale 7 badania magnetotransportowe, podobnie jak opisane wcześniej w Rozdziale 5 pomiary FMR, wskazują, że proces naświetlania nie wpływa znacząco na właściwości magnetyczne, a w szczególności na temperaturę Curie czy wielkość i charakter zależności temperaturowych pola anizotropii magnetycznej.

W **Rozdziale 8** przedstawione są wnioski końcowe oparte na zebranych danych i przeprowadzonych analizach. Doktorantka podsumowuje główne wyniki swoich badań, wymieniając najważniejsze uzyskane w pracy wyniki i najważniejsze wnioski płynące z tych badań.

Najważniejsze osiągnięcia pracy

W moim przekonaniu, wśród kluczowych osiągnięć przedstawionych w rozprawie, należy wymienić następujące wyniki:

- Po pierwsze przy użyciu FMR udało się określić, że próbki Bi_2Te_3 domieszkowane Mn są ferromagnetyczne. Jest to o tyle ważne osiągnięcie, że wcześniejsze próby domieszkowania w innych układach, np. Cr do Bi_2Te_3 , Mn do Bi_2Se_3 , V do Bi_2Se_3 nie dały materiału ferromagnetycznego.
- Przeprowadzona analiza wyników TEM pokazała, że Mn samorganizuje się planarnie w tych materiałach, co stnowiło podstawę zrozumienia wyników transportu elektrycznego.
- Udało się zaobserwować QAHE na próbkach $\text{Bi}_2\text{MnTe}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ i to niewątpliwie bardzo istotne osiągnięcie, opisane w pracy Deng i in., *Nature Physics*, 17, 36-42, 2021, możliwe było w dużym stopniu dzięki szczegółowym badaniom autorki i wyslekcjonowaniu bardzo dobrych próbek do pomiarów.
- Kompleksowe zbadanie cech nieporządku w materiałach $\text{Bi}_2\text{MnTe}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ i jego wpływ na właściwości magnetyczne materiału i obserwację. Dzięki analizie danych TEM i EDX udało się zaobserwować deficyt Mn w warstwach septetowych (Bi_2MnTe_4), który bezpośrednio wpływa na zaburzenia struktury pasmowej i jest głównym powodem braku występowania QAHE. Badania te pokazały jak ważne jest określenie dystrybucji jonów magnetycznych z punktu widzenia uzyskania i optymalizacji materiału do QAHE.

- Dzięki korelacji badań strukturalnych i magnetycznych udało się pokazać również, że obecność Mn w warstwach kwintetowych (Bi_2Te_3) wzmacnia sprzężenie warstw septetowych nawet znacznie odległych od siebie, stabilizując w ten sposób porządek ferromagnetyczny w trzech wymiarach.
- Udało się także pokazać że dominujący wpływ na objętościowy AHE w tych układach ma wewnętrzny mechanizm, wynikający z krzywizny Berry'ego i topologii struktury elektronowej. Wykorzystując niemonotoniczną zależność tego mechanizmu od położenia poziomu Fermiego, pokazano m.in., że dla pewnych położań poziomu Fermiego objętościowy AHE może być całkowicie wyzerowany umożliwiając obserwację QAHE.

Podsumowanie i wnioski końcowe

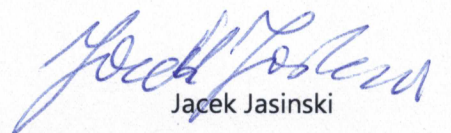
W mojej ocenie rozprawa doktorska Pani mgr Joanny Wincukiewicz, wykonana pod pod kierunkiem Pani profesor UW, dr hab. Agnieszki Wołoś spełnia warunki wymagane w § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu z dnia 29 czerwca 2022 r. dotyczące określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim.

Po pierwsze rozprawa bezprzecznie prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Pani Joanny w dziedzinie fizyki ciała stałego. W rozprawie Pani Joanna wykazała się bardzo wnikliwym zrozumieniem fundamentalnych zagadnień związanych z kwantowymi układami topologicznymi, takich jak związek pomiędzy symetrią a fazami topologicznymi, pomiędzy krzywizną Berry'ego i nietrywialną topologią struktury pasmowej, magnetotransportem kwantowym i topologiczne chronionymi stanami kwantowymi, itd.. Ponadto, przeprowadzone przez nią badania oraz ich szczegółowa dyskusja i opis świadczą także jednoznacznie o wysokiej dojrzałości naukowo-badawczej i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W szczególności, rozprawa potwierdza doskonałe umiejętności dotyczące projektowania badań, przeprowadzania pomiarów i obliczeń, jak również wnikliwej analizy danych i interpretacji wyników.

Po drugie zgodnie z wymaganymi kryteriami, przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego - w tym przypadku kompleksowe zbadanie i zrozumienie wpływu nieporządku magnetycznego i swobodnych nośników na strukturę pasmową, fazy magnetotopologiczne i właściwości magnetotransportowe w ważnej klasie materiałów topologicznych $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, cieszącej się obecnie dużym zainteresowaniem środowiska naukowego, ze względu na możliwość uzyskania w nich fazy QAHE w wyższych temperaturach. Wyniki badań przedstawione w rozprawie znacząco przyczyniają się do dalszego rozwoju tych układów, a także całej dziedziny magnetycznych izolatorów topologicznych, gdyż pokazują jak ważny jest wpływ rozmieszczenia jonów magnetycznych na tworzenie się i właściwości fazy QAHE. O znaczeniu pracy badawczej Pani Joanny świadczy chociażby fak, że część wyniki opisane w rozprawie zostały opublikowane w renomowanych czasopismach takich *Nature Physics*, *Physical Review B* i *2D Materials*. W szczególności dzięki badaniom Pani Joanny udało się wyslekcjonować wysokiej jakości próbki $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, dla których następnie udało się zaobserwować QAHE,

co jest niewątpliwie sporym osiągnięciem i zostało opublikowano w pracy Deng i in., *Nature Physics*, 17, 36-42, 2021, która nieco ponad dwa lata od publikacji, ma już ponad 100 cytowań.

Podsumowując, bardzo pozytywnie oceniam rozprawę doktorską Pani mgr Joanny Wincukiewicz i jednocześnie wnioskuję o jej wyróżnienie. W uzasadnieniu chciałbym podkreślić kompleksowe zbadanie i zrozumienie wpływu nieporządku magnetycznego na własności magnetytopologiczne w układach $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$, co w szczególności doprowadziło do rozszerzenia obserwacji, odkrytego stosunkowo niedawno QAEH (Chang, i in., *Science*, 340,167-170, 2013) na tę ważną klasę materiałów topologicznych, których zaletą jest m.in. możliwość uzyskania szerszej przerwy energetycznej w punkcie Diraca i obserwacji QAHE w wyższych temperaturach.



Jacek Jasinski

Dodatkowe komentarze, pytania i uwagi redakcyjne:

- Strona 31, linia 18: Zamiast „...do twierdzeniem Kramersa...” powinno być „...do twierdzenia Kramersa...”
- Strona 32, linia 17: Zamiast „...po połowie strefie Brillouina...” powinno być „...po połowie strefy Brillouina...”
- Strona 50, Tabela 1: W kolumnie 3 podana jest procentowa zawartość Mn. Dobrze byłoby podać błąd wyznaczenia tych wartości.
- Strona 50, Tabela 1: Czy wielkości podane w kolumnach 3, 4 i 5 wyznaczone były niezależnie, a jeśli tak, to na ile dane te są ze sobą spójne?
- Strona 55, linie 2-4 od dołu: Przy zdaniu „...Należy zaznaczyć, że naświetlanie elektronami nie niszczy struktury sieci krystalicznej, a topologiczne stany powierzchniowe Diraca są zachowane...” Być może warto byłby jednak dodać, że w ogólności jeśli nie są zachowane odpowiednie warunki naświetlania (np. odpowiednio niska temperatura i odpowiednio niska energia elektronów), to naświetlanie wprowadza zależne od dawki zniszczenie radiacyjne, a dla dużych dawek nawet amorfizację materiału jak np. w tych pracach:
 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095671519090085U>
 - <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.54.3800>
 - <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.68.144102>
- Strona 70, linia 6: Zamiast „...sprzęgają z Mn uporządkowanymi...” powinno być chyba raczej „...sprzęgają się z jonami Mn uporządkowanymi...”
- Strona 76, Rysunek 5.5: Ciekawe jest widoczne zupełnie inne zachowanie dla próbki S2 niż dla pozostałych próbek. Czy ta różnica i pojawienie się drugiego modu wynika z dobrze uporządkowanej struktury magnetycznej w tej próbce i z silnej anizotropii?

- Strona 78, Rysunek 5.6: Jak określono temperatury przejść fazowych zaznaczonych na tym rysunku?
- Strona 80, linie 4-6: Odnośnie stwierdzenia „...proces wygrzewania po naświetlaniu odwraca ten efekt, przesuwając poziom Fermiego z powrotem do jego pierwotnej pozycji sprzed naświetlenia, a więc w głąb pasma walencyjnego...” czy wiadomo jaki jest mikroskopowy mechanizm tego procesu?
- Strona 80, linie 6-10: Odnośnie stwierdzenia „...W świetle wcześniejszych badań, wygrzewanie naświetlonych próbek Bi_2Te_3 przez 30 min. w temperaturze powyżej 75 °C, prowadzi do redukcji defektów indukowanych naświetlaniem. 170 Natomiast procesy wygrzewania realizowane powyżej 150 °C skutkują przesunięciem poziomu Fermiego do pierwotnej pozycji sprzed naświetlenia...” czy w związku z tym są dwa rodzaje defektów - jedne które ulegają usunięciu powyżej 75 °C, a drugie powyżej 150 °C? Czy coś wiadomo co to za defekty?
- Strona 80, linie 4-6: Odnośnie stwierdzenia „...proces wygrzewania po naświetlaniu odwraca ten efekt, przesuwając poziom Fermiego z powrotem do jego pierwotnej pozycji sprzed naświetlenia, a więc w głąb pasma walencyjnego...” czy wiadomo jaki jest mikroskopowy mechanizm tego procesu?
- Strona 80, linie 14-16: Odnośnie stwierdzenia „...Dla próbki S5 naświetlonej dawką 2.16 C/cm², procesy wygrzewania przeprowadzono w temperaturach 100 °C i 200 °C, natomiast dla próbki S6 naświetlonej dawką 3.26 C/cm² – w temperaturach 150 °C i 200 °C...” czemu dla próbek S5 i S6 wybrano inne dawki naświetlania i inne temperatury i czy nie miało to wpływu na interpretację wyników i porównanie efektów dla tych dwóch próbek?
- Strona 81, Rysunek 5.7: Wydaje się, że dla próbki S5 anizotropia wzrasta nieznacznie po wygrzewaniu, zwłaszcza w temperaturze 10-15 K podczas, gdy dla próbki S6 wygrzewanie prowadzi do wyraźnej redukcji anizotropii, zwłaszcza w temperaturach poniżej 15K. Czy wiadomo skąd ta różnica w zachowaniu?
- Strona 96, linie 2-4 od dołu: Odnośnie stwierdzenia: „...Dominującymi defektami, które pozostają, są luki. W przypadku badanych kryształów, poddanych naświetlaniu, luki Bi o charakterze donorowym odgrywają decydującą rolę w kształtowaniu bilansu ładunku w ich objętości...” czy badane były koncentracje luk i jakie techniki pomiarowe były brane pod uwagę?
- Strona 98, Tabela 2, próbka S5: Interesujące, że dla nastąpiła bardzo duża zmiana między dawką 1.36 C/cm² a 1.56 C/cm², a potem już niewielka między dawką 1.56 C/cm² a 3.26 C/cm²? Co może być tego przyczyną?
- Strona 98, Tabela 2, próbka S6: Interesujące, że naświetlanie dawkami powyżej 2 C/cm² ma już bardzo niewielki wpływ na koncentrację nośników? Czy wiadomo czemu tak się dzieje? Czy może to np. oznaczać, że jest „pinning” poziomu Fermiego na jakimś głębokim stanie w objętości lub na powierzchni?
- Strona 106, Rysunek 7.5: O ile ruchliwość w próbce S6 spada bardzo nieznacznie (3-4%), to ruchliwość w próbce S5 spada o ponad 50%? Jak ewentualnie można to zrozumieć?