

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Kateryny Boboshko
pt. Nieliniowe Efekty Magnetotransportowe w Izolatorach Topologicznych**

Rozprawa doktorska Pani Kateryny Boboshko poświęcona jest teoretycznym badaniom biliniowego magnetooporu oraz nieliniowego planarnego efektu Halla w izolatorach topologicznych. Nowe materiały, izolatory topologiczne, w których jedynie stany powierzchniowe, topologicznie chronione w wyniku symetrii inwersji czasu, uczestniczą w przewodzeniu prądu, są bardzo atrakcyjne do zastosowań w nowoczesnej spintronice. W pobliżu powierzchni Fermiego, elektrony odpowiadające stanom powierzchniowym zachowują się jak cząstki Diraca o liniowym widmie dyspersyjnym, a w wyniku silnego oddziaływania spin-orbitalnego stany te charakteryzują się sprzężeniem kierunku spinu elektronu z jego pędem, tzw efekt przyszpilenia spin-pęd. W obecności zewnętrznego pola elektrycznego indukuje się spinowa polaryzacja w kierunku prostopadłym do ruchu elektronów i pojawia się spinowo spolaryzowany prąd. Ze względu na fakt przyszpilenia spinu elektronu z jego pędem efekt ten jest bardzo wydajny, co jest istotne z aplikacyjnego punktu widzenia.

Wykorzystując zaawansowane techniki rachunkowe, oparte na funkcjach Greena, Autorka przedstawiła analityczny opis nieliniowego transportu elektronowego w izolatorach topologicznych, co pozwoliło na określenie fizycznych mechanizmów badanych efektów, ich głębsze zrozumienie, a ponadto określenie wpływu parametrów materiałowych. Wnioski, które otrzymuje Autorka są ogólne, dotyczą pewnej klasy materiałów, nie odnoszą się wyłącznie do wybranych wartości parametrów. Wyprowadzenie formuł analitycznych, a następnie wykonanie obliczeń numerycznych jest niewątpliwie znacznym osiągnięciem Autorki, tym cenniejszym, iż obecnie większość badań opiera się głównie na obliczeniach numerycznych z wykorzystaniem gotowych pakietów obliczeniowych, często bez głębszego wnikania w naturę fizyczną badanych zjawisk. Analityczne rozwiązanie zagadnienia wymagało, rzecz jasna, wprowadzenia pewnych przybliżeń, jednakże Doktorantka była w stanie opisać nieliniowe efekty transportowe dla stanów powierzchniowych izolatora topologicznego w obecności rozpraszania na domieszkach, stanowiących dodatkowe centra oddziaływania spin-orbitalnego.

Obliczenia wskazują, iż rozpraszanie na domieszkach oraz nierównowagowa, indukowana prądem polaryzacja spinowa, stanowią główny mechanizm badanych efektów transportowych. Ten mechanizm wydaje się szczególnie istotny w układach z izotropową zależnością dyspersyjną.

Rozprawa doktorska została opracowana w tradycyjny sposób. Zawiera siedem rozdziałów, w tym pięć początkowych, poświęcono omówieniu zagadnień dotyczących transportu elektronowego w izolatorach topologicznych, wyłącznie w oparciu o dane literaturowe. Natomiast rozdział szósty zawiera oryginalne obliczenia Autorki. Wyniki tych obliczeń zostały opublikowane w dwóch prestiżowych czasopismach, przy czym najważniejsze z nich w Physical Review B. Pani Boboshko jest pierwszą autorką obu prac, a zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami jej wkład w obu pracach jest zasadniczy. Krótki rozdział siódmy zawiera podsumowanie wyników oraz wnioski. Rozprawa charakteryzuje się pewną asymetrią prezentacji danych literaturowych oraz oryginalnych osiągnięć Doktorantki. Jednakże, w mojej ocenie, nie stanowi to wady, widziałabym raczej

pozytywne aspekty tego podejścia. Autorka prezentuje tematykę trudną, wciąż jeszcze stosunkowo mało znaną w szerszych kręgach, początkowe rozdziały dysertacji stanowią zatem doskonałe wprowadzenie do tej tematyki. Jest to kompendium wiedzy, nieocenione źródło informacji dla młodych fizyków. Ten aspekt rozprawy podkreśla jeszcze bardzo bogata bibliografia, obejmująca prawie 250 pozycji, z których przeważającą większość stanowią najnowsze publikacje dotyczące badanej tematyki. Zarówno opis prezentowany w początkowych rozdziałach, jak i bibliografia, wskazują na niezwykle solidne przygotowanie do podejmowanych badań. Rozprawa ma bardzo duże znaczenie z dydaktycznego punktu widzenia.

Na szczególną uwagę zasługuje rozdział trzeci, zwłaszcza punkt 3.3, poświęcony biliniowej magnetorezystancji w izolatorach topologicznych. Doktorantka cytuje wyniki eksperymentalne otrzymane dla warstw selenku bizmutu (praca [8]). Mechanizm, który tam zaproponowano, do wyjaśnienia mierzonego sygnału, wskazuje, iż efekt jest rezultatem konwersji indukowanego polem elektrycznym prądu spinowego w prąd ładunkowy, w obecności heksagonalnej deformacji topologicznych stanów powierzchniowych, generowanej przez sprzężenie spin-orbita. Z kolei w pracy [7] wykazano, iż rozpraszanie na strukturalnych defektach, wykazujących sprzężenie spin-orbita, prowadzi do niejednorodności przyszpilenia spin-pęd w topologicznych stanach powierzchniowych, a w konsekwencji do biliniowego magnetooporu i dobrze opisuje wyniki eksperymentalne w naprężonych warstwach telurku rtęci (praca [206]).

Opisanie mechanizmów prowadzących do biliniowego magnetooporu w izolatorach topologicznych ma istotne znaczenie poznawcze, a także aplikacyjne. Tematykę tę podejmuje Doktorantka w prezentowanej dysertacji, stawiając sobie za cel wyjaśnienie i zrozumienie fizycznych podstaw nieliniowego magnetooporu w izolatorach topologicznych, charakteryzujących się izotropową relacją dyspersji stanów powierzchniowych, a więc układów, w których nie występuje, dyskutowana wcześniej, heksagonalna deformacja. Rozdział szósty zawiera oryginalne wyniki uzyskane przez Panią Boboshko dla biliniowego magnetooporu oraz nieliniowego planarnego efektu Halla. Obliczenia oparto na stosunkowo prostym hamiltonianie modelowym, opisującym stany powierzchniowe izolatora topologicznego w obecności zewnętrznego pola elektrycznego i magnetycznego. Uwzględniono też człon opisujący rozpraszanie na domieszkach będących dodatkowym źródłem sprzężenia spin-orbita. Pole elektryczne prowadzi do pojawienia się prądu elektrycznego oraz nierównowagowej polaryzacji spinowej, prostopadłej do wektora gęstości prądu. W obecności oddziaływania spin-orbita polaryzacja ta jest sprzężona z elektronami odpowiadającymi stanom powierzchniowym. Rezultatem sprzężenia jest efektywne pole magnetyczne, które prowadzi do przesunięcia energii stanów powierzchniowych, tzn przesunięcia stożka Diraca w strefie Brillouina. Efekt ten uwzględniono w hamiltonianie wyjściowym poprzez transformację cechowania. Jednakże, zastosowanie tej transformacji modyfikuje część hamiltonianu odpowiedzialną za rozpraszanie na domieszkach, a w konsekwencji operator prędkości elektronu, prowadząc do dodatkowego członu, tzw prędkości anomalnej, generowanej przez oddziaływanie spin-orbita.

W celu opisanie transportu elektronowego Autorka stosuje formalizm funkcji Greena i technikę diagramowego rachunku zaburzeń. Rozpraszanie na domieszkach, zależne od sprzężenia spin-orbita i opisane parametrem sprzężenia λ , traktuje się jako zaburzenie. Wyznaczono składowe tensora przewodnictwa, opisującego reakcję układu na zewnętrzne pole elektryczne w obecności zewnętrznego pola magnetycznego i efektywnego pola generowanego przez sprzężenie spin-orbita, a zastosowana metoda diagramów Feynmana pozwoliła na zapisanie przewodnictwa w zwartej formie, zawierającej trzy istotne człony. Pierwszy z nich odpowiada standardowym procesom rozpraszania i renormalizowanej prędkości, a dwa pozostałe człony, złożonym procesom rozpraszania zależnym od sprzężenia spin-orbita i anomalnej prędkości. Szczegółowe obliczenia tensora przewodnictwa przeprowadzono w dwóch przypadkach, w pierwszym (a) nie uwzględniono renormalizacji prędkości, w drugim (b) renormalizacja ta została uwzględniona poprzez proste wielokrotne rozpraszanie na domieszkach, tzw przybliżenie drabinkowe. Należy podkreślić, iż w drugim przypadku Autorka przeprowadziła obliczenia numeryczne podłużnej i poprzecznej składowej przewodnictwa z uwzględnieniem wkładów pochodzących od złożonych procesów

rozpraszania i prędkości anomalnej, pomijanych w przybliżeniu drabinkowym. Wpływ tych członów okazuje się zanedbywalnie mały, co zilustrowano graficznie w zależności od energii Fermiego dla różnych wartości pola magnetycznego i gęstości prądu. Podobnie wykazano, iż wpływ wyrazów trzeciego rzędu rachunku zaburzeń względem sprzężenia spin-orbita może być zanedbany. Zatem, przybliżenie drabinkowe wraz z ograniczeniem do członów drugiego rzędu względem parametru spin-orbita prowadzi do wiarygodnych wyników dla tensora przewodnictwa.

W obu przypadkach, (a i b) Autorka była w stanie wyprowadzić analityczne wyrażenia dla podłużnej i poprzecznej składowej przewodnictwa i zapisać je w przejrzystej, kompaktowej formie, pozwalającej na szczegółową analizę magnetooporu. Wyznaczono biliniowy (antysymetryczny) magnetoopór BMR oraz kwadratowy (symetryczny) QMR, przy czym pierwszy z nich zależy sinusoidalnie od kąta pomiędzy kierunkiem prądu a polem magnetycznym, drugi zaś zmienia się jak funkcja cosinus kwadrat. Wyniki te są zgodne z innymi opisami. Jak wykazuje Autorka, stosunek amplitud obu magnetooporów jest wielkością zależną od stałych fizycznych oraz gęstości prądu ładunkowego i pola magnetycznego, a zatem wielkości, które mogą być łatwo kontrolowane eksperymentalnie. Ponadto mamy zależność od wartości wektora falowego na poziomie Fermiego, a więc parametru charakteryzującego materiał.

Nieliniowy planarny efekt Halla jest stosunkowo nowym zjawiskiem, obserwowanym w izolatorach topologicznych, a teoretyczny opis tego efektu i jego mechanizmów jest jeszcze daleki od pełnego zrozumienia. Wyznaczając symetryczną i antisymetryczną składową poprzecznego przewodnictwa Doktorantka przeanalizowała kątową zależność tych wielkości od kierunków współpłaszczyznowych pól elektrycznego i magnetycznego, otrzymując wyniki zgodne z innymi opisami. Antysymetryczna, dominująca część poprzecznego przewodnictwa, opisana poprzez iloczyn skalarny wektorów gęstości prądu i pola magnetycznego, reprezentuje nieliniową, jednokierunkową reakcję układu na zewnętrzne pole elektryczne, a mianowicie nieliniowy planarny efekt Halla. Ponadto stosunek amplitud obu składowych, antisymetrycznej i symetrycznej, podobnie jak w przypadku podłużnej magnetorezystancji, jest opisany przez gęstość prądu i pole magnetyczne. Biliniowa część magnetorezystancji, jak również biliniowa część planarnej rezystancji Halla zależą także od wektora falowego i parametru sprzężenia spin-orbita. Zatem pomiary nieliniowego transportu w izolatorach topologicznych pozwalają na określenie tych istotnych parametrów materiałowych.

Podsumowując, należy stwierdzić, iż Doktorantka w pełni zrealizowała postawiony cel. Przeprowadzone obliczenia wskazują, iż w izolatorach topologicznych o izotropowej relacji dyspersji można zaobserwować biliniowy magnetoopór oraz nieliniowy planarny efekt Halla, a fizycznym mechanizmem prowadzącym do tych zjawisk, jest rozpraszanie na domieszkach wykazujących sprzężenia spin-orbita, w obecności polaryzacji spinowej indukowanej prądem. Te wyniki mogą być następnie rozszerzone o dodatkowe czony, generowane przez deformację powierzchniowych stanów izolatora.

Tematyka pracy doskonale wpisuje się w nurt współcześnie prowadzonych badań. Nieliniowy transport w izolatorach topologicznych w obecności pola elektrycznego i magnetycznego to zagadnienie trudne, wymagające zaawansowanych technik rachunkowych. Autorka dobrze sobie radzi z tym problemem, wykorzystując metody nierównowagowych funkcji Greena oraz technikę diagramowego rachunku zaburzeń. Metody te są, jak najbardziej adekwatne do opisu transportu elektronowego w badanym układzie. Doktorantka bardzo dobrze opanowała technikę funkcji Greena i potrafi ją dobrze wykorzystać. Co istotne, końcowe wyrażenia dla składowej podłużnej i poprzecznej tensora przewodnictwa zapisała w bardzo prostej i łatwej do interpretacji formie, pozwalającej na eksperymentalne wyznaczenie podstawowych parametrów materiałowych, a mianowicie wartości wektora falowego na poziomie Fermiego i parametru opisującego sprzężenie spin-orbita. W mojej ocenie wartość uzyskanych wyników jest wysoka.

Rozprawa napisana jest jasno i zrozumiale. Struktura pracy jest przejrzysta. Opis zjawisk i metod jest przystępny, a szerokie opracowanie danych literaturowych dowodzi, moim zdaniem, ugruntowanej wiedzy Autorki oraz wskazuje na dobre opanowanie i zrozumienie tematyki. Prezentacja wyników jest przejrzysta.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, iż rozprawa doktorska Pani Kateryny Boboshko spełnia ustawowe wymagania dotyczące prac doktorskich i wnioskuję o dopuszczenie Pani Boboshko do dalszych etapów postępowania mającego na celu nadanie jej stopnia doktora nauk fizycznych.



Prof. dr hab. Renata Swirkowicz