

Prof. dr hab. inż. Vitalii Dugaev
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Politechniki Rzeszowskiej
Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 28 marca 2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Kateryny Boboshko
pt. "Nieliniowe efekty magnetotransportowe w izolatorach topologicznych"**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr Kateryny Boboshko jest opracowanie teorii nieliniowego magnetotransportu oraz planarnego zjawiska Halla w izolatorach topologicznych. Tematyka ta jest obecnie niezwykle aktualna, gdyż w ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania mechanizmami prowadzącymi do nietypowych zależności magnetooporu i planarnego zjawiska Halla od pola magnetycznego w układach dwuwymiarowych. Kluczową rolę w fizyce tych zjawisk odgrywa oddziaływanie spin-orbita. Izolatory topologiczne są szczególnie interesującymi układami, w których gaz elektronowy na powierzchni materiału jest dwuwymiarowy, a oddziaływanie spin-orbita może być znaczące.

Rozprawa ma charakter teoretyczny i składa się z siedmiu głównych rozdziałów. Pierwszy z nich to wstęp, natomiast rozdziały od drugiego do piątego opisują fizykę izolatorów topologicznych, oddziaływania spin-orbita, zjawiska Halla, magnetooporu oraz planarnego zjawiska Halla. Przedstawione są również podstawy teoretyczne, w tym funkcje Greena i diagramy Feynmana, które doktorantka wykorzystała w obliczeniach składowych tensora przewodnictwa. Rozdziały te opierają się na danych literaturowych. Z kolei w rozdziale szóstym zaprezentowano wszystkie przeprowadzone obliczenia teoretyczne oraz ich wyniki, w tym również wyniki obliczeń numerycznych. Rozdział siódmy zawiera wnioski. Praca obejmuje także listę oznaczeń, wykaz publikacji autorki (dwa artykuły dotyczące pracy doktorskiej opublikowane w renomowanych czasopismach) oraz bogatą bibliografię, liczącą 249 cytowań. Dorobek naukowy uznaję za wystarczający dla pracy doktorskiej. Całość rozprawy liczy 114 stron i zawiera 27 rysunków.

Rozprawa doktorska została wykonana w Instytucie Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierownictwem prof. UAM dr hab. Anny Dyrdał. Praca została napisana w sposób klarowny i przystępny, a jej lektura wzbudza stałe zainteresowanie. Autorka wykazuje bardzo dobrą znajomość literatury dotyczącej

izolatorów topologicznych oraz zjawisk transportowych w półprzewodnikach, a także doskonale opanowanie metod kwantowej teorii pola w fizyce ciała stałego.

We wstępie (rozdział 1) sformułowano główny cel rozprawy, którym jest teoretyczne wyjaśnienie mechanizmów nieliniowego magnetooporu oraz planarnego zjawiska Halla w trójwymiarowych izolatorach topologicznych.

Rozdział 2 stanowi wprowadzenie do tematyki pracy. Opisano w nim izolatory topologiczne, przedstawiono ich historię oraz wyjaśniono głęboki związek między symetrią a topologią. Następnie omówiono oddziaływanie spin-orbita w nierelatywistycznej mechanice kwantowej, w tym oddziaływania Rashby i Dresselhausa, istotne w spintronice układów dwuwymiarowych. W tym rozdziale znalazł się również opis efektu Edelsteina w dwuwymiarowych półprzewodnikach ze spin-orbitą Rashby oraz przegląd podstawowych zjawisk Halla (klasycznego, anomального, spinowego i kwantowego). Informacje w tym rozdziale stanowią przegląd najważniejszej literatury związanej z tematem pracy. Jest on dobrze napisany, choć oczywiście nie wyczerpuje wszystkich aspektów zagadnienia.

W rozdziale 3 szczegółowo omówiono zjawisko magnetooporu oraz jego najważniejsze mechanizmy, w tym klasyczny magnetoopór w półprzewodnikach trójwymiarowych, anizotropowy magnetoopór w materiałach magnetycznych, gigantyczny efekt magnetooporowy (GMR) oraz tunelowy magnetoopór (TMR) w warstwach magnetycznych. Po lekturze tego rozdziału można stwierdzić, że doktorantka dobrze rozumie fundamentalne mechanizmy magnetooporu w półprzewodnikach i układach magnetycznych.

Rozdział 4 zawiera syntetyczne omówienie planarnego efektu Halla, wyników eksperymentów w izolatorach topologicznych oraz mechanizmów mikroskopowych tego zjawiska. Choć rozdział jest krótki (zawiera jedynie 6 stron), to rzetelnie przedstawia istniejące teorie i mechanizmy.

W rozdziale 5 zwięźle przedstawiono podstawy kwantowej teorii wielu ciał, funkcje Greena, techniki diagramów Feynmana oraz teorię odpowiedzi liniowej na zaburzenia pola. Niektóre kwestie omówiono zbyt skrótowo, co utrudnia pełne ich zrozumienie. Przykładowo, funkcja Greena (5.6)-(5.8) w przypadku magnetycznym i w polu spin-orbitalnym powinna być macierzą, jednak w rozdziale 5.2 tego nie widać. Ponadto, wzory (5.16) i (5.17) zostały opisane jako „wzór Kubo”, choć rzeczywisty wzór Kubo nie został tam podany.

Rozdział 6 jest kluczowy, gdyż zawiera wyniki obliczeń teoretycznych przeprowadzonych przez doktorantkę. Pani Boboshko opracowała teorię magnetooporu i planarnego zjawiska Halla w izolatorach topologicznych, opartą na modelu

dwuwymiarowego gazu elektronowego, opisywanego hamiltonianem Rashby i poddanym działaniu pola magnetycznego, wpływającego na spin elektronu, oraz oddziaływaniom z domieszkami, które obejmują zarówno potencjalny człon, jak i oddziaływanie spin-orbita na domieszce. W tym ujęciu pole magnetyczne można traktować jako pole cechowania w hamiltonianie elektronów swobodnych. Należy jednak zauważyć, że transformacja cechowania, o której pisze Pani Boboshko, nie eliminuje pola magnetycznego, jak ma to miejsce w standardowym cechowaniu, ponieważ po jej przeprowadzeniu pojawiło się pole magnetyczne w oddziaływaniu spin-orbita na domieszce.

W zerowym polu magnetycznym obliczono indukowane prądem namagnesowanie, analogiczne do efektu Edelsteina, lecz nie porównano uzyskanych wyników z odpowiednimi rezultatami dla dwuwymiarowego półprzewodnika z oddziaływaniem Rashby.

Następnie Pani Boboshko znalazła wyrażenie dla energii własnej przy rozpraszaniu elektronu na domieszkach w przybliżeniu Borna. Część urojona energii własnej definiuje czas relaksacji elektronów. Wzór dla czasu relaksacji jako funkcję pola został przedstawiony w rozdziale 6.1.4, jednak nie został on dokładnie przeanalizowany.

Kolejnym etapem było obliczenie składowych tensora przewodnictwa – zarówno bez uwzględnienia, jak i z uwzględnieniem funkcji wierzchołkowej w przybliżeniu drabinkowym (ladder approximation). Na podstawie przewodnictwa obliczonego bez funkcji wierzchołkowej wyznaczono symetryczną (QMR) i antysymetryczną (BMR – bilinear MR) części magnetooporu. Po uwzględnieniu funkcji wierzchołkowej Pani Boboshko zrobiła wniosek, że «the behavior of the resistivity in our system in the different approximations is preserved». Dla mnie jednak nie jest do końca jasne – czy oznacza to, że transportowy czas relaksacji pozostaje taki sam jak ten obliczony w rozdziale 6.1.4 ?

W rozdziale 6.3.3 przedstawiono również wyniki obliczeń planarnego efektu Halla – symetryczna i antysymetryczna względem zmiany kierunku prądu składowa kąta Halla, który jest zdefiniowany przez przewodnictwo σ_{PH} . Niestety, nie podano wyrażenia wykorzystanego dla obliczenia σ_{PH} .

W podsumowaniu pracy (rozdział 7) zawarto syntetyczny opis wyników wszystkich przeprowadzonych obliczeń dotyczących nieliniowego magnetooporu i planarnego efektu Halla.

Mogę stwierdzić, że praca doktorska Pani Kateryny Boboshko wywarła na mnie bardzo dobre wrażenie. Obliczenia zostały wykonane na wysokim poziomie z wykorzystaniem zaawansowanych metod kwantowej teorii pola, funkcji Greena i diagramów Feynmana.

Udało się rozwiązać skomplikowane zagadnienia teoretyczne. Praca jest dobrze napisana, a uzyskane wyniki są jasno i szczegółowo opisane, co pozwala mi bez żadnych wątpliwości uznać je za wiarygodne.

Uwagi krytyczne:

- (1) W niektórych miejscach brakuje szczegółowych wyjaśnień przeprowadzonych obliczeń. Przykładowo, wzór (6.3) na str. 60 odnosi się do oddziaływania elektronów z polem domieszki, lecz nie jest jasne, czy $V_{kk'}$ jest elementem macierzowym potencjału pojedynczej domieszki, czy układu wielu domieszek. Jeżeli tylko pojedynczej domieszki to skąd powstało wyrażenie dla średniej wartości $\langle |V_{kk'}|^2 \rangle = n_i V_0^2$. Jeszcze jeden przykład: w rozdziale 6.1.2 zostały obliczone x i y składowe namagnesowania. Czy to znaczy, że z -składowa jest równa zero? Czy to było sprawdzone?
- (2) Wszystkie obliczenia wykonano dla temperatury $T=0$. Ponieważ wyniki teorii mogą być wykorzystane dla porównania z eksperymentem, byłoby dobrze przedyskutować, jaki wpływ może mieć niezerowa temperatura?

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy Pani mgr Kateryny Boboshko nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale.

Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy Pani Boboshko utwierdziły mnie w przekonaniu o jej wysokich kwalifikacjach. Praca doktorska Pani mgr Kateryny Boboshko, wykonana pod opieką naukową kierownika – Profesora UAM dr hab. Anny Dyrdał jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących **istotny wkład** do obszaru wiedzy, który można określić jako **opracowanie teorii nieliniowego magnetooporu i planarnego efektu Halla w izolatorach topologicznych**.

Pokazuje ona także jej ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki ciała stałego i fizyki spinowo-zależnych zjawisk transportowych. Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autorki do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem pod kątem merytorycznym i metodologicznym spełnia wszystkie wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20.07.2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z póź. zm.). Niniejszym wnoszę o dopuszczenie Pani **mgr Kateryny Boboshko do dalszych kroków przewodu doktorskiego**.

