



# **Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk**

Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań

tel. 61 8695 100, 234, faks 61 8684 524

[www.ifmpan.poznan.pl](http://www.ifmpan.poznan.pl)

Poznań, 28 kwietnia 2025 r.

prof. dr hab. Tomasz Toliński

Instytut Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu

## **Recenzja pracy doktorskiej wykonanej przez mgr Katerynę Boboshko Tytuł rozprawy: „Nieliniowe Efekty Magnetotransportowe w Izolatorach Topologicznych”**

Mgr Kateryna Boboshko swoją pracę doktorską wykonała w Zakładzie Fizyki Mezoskopowej Instytutu Spintroniki i Informacji Kwantowej Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Promotorką rozprawy jest prof. UAM dr hab. Anna Dyrdał.

Dysertacja została przygotowana w tradycyjnej formie i liczy 114 stron z uwzględnieniem bibliografii, oświadczeń i listy skrótów, a językiem rozprawy jest język angielski, zgodnie jednak z formalnymi wymogami przedstawiono również streszczenie w języku polskim. Styl rozprawy jest na dobrym poziomie, nieliczne usterki gramatyczne lub edycyjne nie wymagają bliższego omówienia. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorantka miała okazję współpracować w gronie wybitnych specjalistów w tematyce jej rozprawy.

Zagadnienia, którymi zajmowała się Doktorantka dotyczą własności transportowych w niezwykle ciekawych i intensywnie badanych materiałach, jakimi są izolatory topologiczne. Ich niezwykłość wynika z obecności przewodzących stanów powierzchniowych, mimo że objętościowo materiał jest izolatorem. Co więcej te stany powierzchniowe są topologicznie chronione odpowiednią symetrią. Implikuje to odporność na zaburzenia, co może istotnie wpłynąć na rozwój nowoczesnej elektroniki, spintroniki, a w zasadzie dziedziny określanej już mianem topotroniki. Badania realizowane przez mgr Katerynę Boboshko mają charakter ściśle teoretyczny i koncentrują się na dwóch konkretnych efektach magnetotransportowych, a mianowicie biliniowym magnetooporze (BMR – bilinear magnetoresistance) oraz nieliniowym planarnym efekcie Halla (PHE – planar Hall effect). Uzyskane wyniki zostały przedstawione w dwóch publikacjach, jednej w Journal of Magnetism and Magnetic Materials w roku 2022 oraz jednej w Physical Review B w 2024 roku. W obu pracach Doktorantka jest pierwszym autorem, a ze złożonych oświadczeń wynika jej wiodąca rola. Mgr Kateryna



Boboshko jest również współautorką dwóch innych, wcześniejszych prac, niezwiązanych z tematyką doktoratu.

Struktura dysertacji jest typowa, tzn. pierwsze 5 rozdziałów (46 stron) stanowi wprowadzenie w najważniejsze zagadnienia dotyczące tematyki rozprawy, w szczególności Doktorantka opisuje narzędzia matematyczne i modele, którymi posługiwała się w swoich badaniach. **Rozdział 6** (24 strony) prezentuje wyniki własne, zawarte również we wspomnianych dwóch publikacjach. Pokróćce odniosę się do poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

We wstępie (**Rozdział 1**) autorka podkreśla, że zarówno biliniowy magnetoopór jak i planarny efekt Halla, które badała i których mechanizmy starała się wyjaśnić dotyczą układów z silnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym. Swoje badania ograniczyła również do przypadku izotropowych przekrojów powierzchni Fermiego. W rozdziale tym sformułowała swój główny cel badań, którym było określenie źródła i mechanizmów mikroskopowych BMR i PHE w izolatorach topologicznych.

W **Rozdziale 2** Doktorantka krótko definiuje takie zagadnienia i zjawiska jak izolatory topologiczne, sprzężenie spinowo-orbitalne, polaryzacja spinowa indukowana prądem oraz efekty Halla wynikające z obecności sprzężenia spinowo-orbitalnego. Opisy przedstawione przez Doktorantkę są poprawne, aczkolwiek mają nieco encyklopedyczny charakter, nie pokusiła się o bardziej intuicyjne wprowadzenie omawianych zjawisk, np. efektów Halla. Ułatwieniem również nie są małe rysunki, w szczególności drobna czcionka opisów na rysunkach. Jednakże, odniesienie do dobrze dobranych pozycji literaturowych pozwala czytelnikowi na poszerzenie informacji o omawianych zagadnieniach.

Mam kilka pytań i uwag technicznych do tej części rozprawy. W opisie do Rys. 2.1(c) mowa jest o silnym izolatorze topologicznym. Jakie kryterium decyduje o tej sile? Jaka jest degeneracja czterech charakterystycznych punktów wskazanych na tym rysunku? W równaniu 2.3 definiującym efekt Dresselhausa prawdopodobnie nawiasy są nieprawidłowo postawione.

Dobrze oceniam **Rozdział 3** opisujący różne mechanizmy prowadzące do magnetooporu, widać, że w tym obszarze zagadnień Doktorantka czuje się pewnie, choć czytelność i pogładowość wybranych z literatury rysunków nadal moim zdaniem nie jest optymalna. Lakoniczne opisy niektórych rysunków wymagałyby poszerzenia, np. opis Rys.3.1(c) nie wyjaśnia wystarczająco roli poszczególnych elektrod i zasady działania przedstawionego elementu magnetooporowego. Więcej uwagi Doktorantka poświęciła biliniowemu magnetooporowi (pkt 3.3), ponieważ jest to jeden z głównych tematów jej rozprawy. Opisała dwa główne mechanizmy BMR, pierwszy związany z heksagonalną deformacją topologicznych stanów powierzchniowych oraz drugi, którym zajmowała się w swoich badaniach, związany z defektami strukturalnymi z istotnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym. Punkt 3.3 został dobrze przygotowany, drobna uwaga dotyczy błędnego odwołania do Rys. 3.8 na stronie 41, zamiast 3.8(f) powinno być 3.8(e) i odwrotnie.

**Rozdział 4** to wprowadzenie do planarnego efektu Halla, drugiego z zagadnień, którymi mgr Kateryna Boboshko zajmowała się w ramach pracy doktorskiej. W sposób przejrzysty przedstawiła zjawisko PHE, podała przykłady eksperymentalne oraz wyjaśniła podstawowe mechanizmy. Z punktu widzenia eksperymentatora ciekawym aspektem jest użyteczność drugiej harmonicznej rezystancji w identyfikacji nieliniowych efektów i bliższe wyjaśnienie roli drugiej harmonicznej w tym rozdziale byłoby pomocne, w szczególności biorąc pod uwagę,



że w zasadzie Doktorantka nie pokazuje bezpośrednio nieliniowego PHE w formie napięcia Halla. Może to prowadzić do nieporozumień, zwłaszcza dla czytelnika, który nie jest specjalistą w tej dziedzinie. Przykładowo na stronie 47 pojawia się stwierdzenie, że: „ $R_{yx}^{2\omega} \approx \mathbf{E} \cdot \mathbf{H}$ , indicating the nonlinear nature of  $R_{yx}^{2\omega} \dots$ ”. Czy nie chodziło tutaj raczej o nieliniową naturę PHE?

Niewątpliwie kluczowe znaczenie dla rozprawy ma **Rozdział 5**, ponieważ dostarcza on szczegółowego przeglądu narzędzi matematycznych stosowanych przez Doktorantkę. Omówiona została metoda funkcji Greena oraz technika diagramów Feynmana, czyli diagramowy rachunek zaburzeń. Jako nieteoretyk oceniam ten rozdział jako użyteczne wprowadzenie w te zaawansowane techniki obliczeniowe.

Zastosowanie tych metod we własnych obliczeniach analitycznych i numerycznych mgr Kateryna Boboshko zaprezentowała w **Rozdziale 6**. Przedstawiła w nim konkretne rezultaty dla biliniowego magnetooporu i nieliniowego planarnego efektu Halla w trójwymiarowych izolatorach topologicznych. W kolejnych podpunktach Doktorantka omówiła przyjęte założenia, przybliżenia i człony uwzględnione w hamiltonianie, a więc rozpraszanie na domieszkach, polaryzację spinową indukowaną prądem, a jednym z kluczowych założeń wydaje się być izotropowy kształt przekrojów powierzchni Fermiego. Oczywiście istotnym elementem proponowanego modelu jest sprzężenie spinowo-orbitalne, które w pewnym sensie pojawia się w dwóch kontekstach, z jednej strony w związku z domieszkami, a z drugiej strony jako efektywne pole związane ze sprzężeniem elektronów powierzchniowych z nierównowagową polaryzacją spinową.

Z uznaniem stwierdzam, że Doktorantka sprawnie i skutecznie posłużyła się metodą diagramów Feynmana w celu wyznaczenia tensora przewodnictwa. Rozważyła dwa przybliżenia, w angielskim oryginale nazwane „Bare Bubble” oraz „Ladder approximation”. W drugim przypadku zostaje uwzględniona większa liczba wyrazów w rozwinięciu funkcji Greena, oznacza to między innymi uwzględnienie procesów rozpraszania typu „side jump”, których wkład okazuje się jednak pomijalny. Ostatecznie Doktorantka otrzymała analityczne wzory na przewodnictwo elektryczne podłużne oraz poprzeczne. W przypadku składowej poprzecznej otrzymano ogólną formułę na planarne przewodnictwo Halla. Część symetryczna tej formuły jest proporcjonalna do kwadratu pola magnetycznego  $B^2$ , a część antysymetryczna jest proporcjonalna do  $B$ .

Bardzo zwartym i przydatnym w interpretacji eksperymentów zapisem analitycznych formuł uzyskanych przez Doktorantkę są stosunki amplitud zależnych od kąta zjawisk transportowych. W jednym przypadku jest to stosunek amplitud biliniowego i kwadratowego magnetooporu (wzór (6.109)), a w drugim stosunek amplitud symetrycznego i antysymetrycznego wkładu do tzw. kąta Halla, w tym przypadku planarnego efektu Halla (wzór (6.112)). Relacje te pozwalają wyznaczyć takie wielkości jak wektor falowy Fermiego, czy stała sprzężenia spinowo-orbitalnego. Praca przedstawiająca te wyniki teoretyczne została opublikowana niedawno, w roku 2024, niemniej być może znane są Doktorantce prace eksperymentalne, które wyznaczyły te parametry w oparciu o formuły (6.109) i (6.112) lub może pokusiła się o przetestowanie ich w oparciu o już istniejące w literaturze wyniki badań eksperymentalnych?

Proszę również Doktorantkę o wyjaśnienie wzoru opisującego amplitudę kwadratowego magnetooporu, wzór (6.107) w rozprawie doktorskiej, występujący również jako wzór (36)



w pracy opublikowanej w Physical Review B. Pojawia się w nim współczynnik liczbowy 28, nie jest dla mnie jasne w jaki sposób wynika on z równania (6.105) w rozprawie.

Podsumowując swoją recenzję stwierdzam, że mgr Kateryna Boboshko podjęła w ramach pracy doktorskiej bardzo ciekawy, aktualny i ambitny temat, który z jednej strony dotyczy wyjątkowej grupy materiałów jakimi są izolatory topologiczne, a z drugiej strony wymaga zaawansowanego aparatu matematycznego, który bardzo dobrze opanowała. Z jej oraz współautorów oświadczeń wynika, że wykazała się w tym zakresie dużą samodzielnością.

Uzyskane przez Doktorantkę wyniki są w moim przekonaniu bardzo wartościowe i jeśli jeszcze to nie nastąpiło, to w krótkim okresie wyprowadzone przez nią relacje znajdą odzwierciedlenie w badaniach eksperymentalnych. Jej praca dobrze wpisuje się w główny nurt badań nad możliwościami kontrolowania prądów spinowych w kontekście rozwoju spintroniki, zwłaszcza własności nieliniowych w transporcie.

Za najważniejsze osiągnięcia przedstawione w rozprawie doktorskiej uważam między innymi:

- Wskazanie formuł określających zależność energii własnej badanego modelowego układu od kierunku prądu ładunkowego, zewnętrznego pola magnetycznego i polaryzacji spinowej.
- Poszerzenie wiedzy o mechanizmach odpowiedzialnych za występowanie biliniowego magnetooporu i nieliniowego planarnego efektu Halla. Kluczową okazała się rola efektywnego pola spinowo-orbitalnego generowanego przez indukowaną prądem polaryzację spinową i rola rozpraszania na domieszkach wnoszących do układu silne sprzężenie spinowo-orbitalne.
- Pokazanie relacji między amplitudami różnych zjawisk transportowych w formie, która pozwala ilościowo wyznaczyć stałą sprzężenia spinowo-orbitalnego oraz wektor falowy Fermiego.

Wskazane w recenzji drobne usterki nie wpływają na moją bardzo pozytywną ocenę osiągnięć mgr Kateryny Boboshko i uznania dla stopnia w jakim opanowała odpowiedni formalizm i narzędzia matematyczne. Jest ona niewątpliwie dobrze ukształtowanym i w dużej mierze już samodzielnym fizykiem-teoretykiem, zasługującym na stopień doktora nauk fizycznych.

Stwierdzam, że w swojej rozprawie doktorskiej Pani mgr Kateryna Boboshko prezentuje dobrze ugruntowaną wiedzę w dyscyplinie nauki fizyczne oraz przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w formie zaproponowanego modelu teoretycznego, w związku z tym z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr Kateryny Boboshko spełnia wszelkie wymagania artykułu 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr Kateryny Boboshko do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

T. Tok/JR