

Poznań, 11.09.2025 r.

dr hab. inż. Piotr Kuświk prof. IFM PAN
Instytut Fizyki Molekularnej
Polskiej Akademii Nauk

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Krzysztofa Sobuckiego
pt. „Resonance effects in linear and nonlinear spin wave dynamics for control of
propagating spin waves”**

Rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Sobuckiego koncentruje się na analizie liniowych i nieliniowych efektów rezonansowych towarzyszących odbiciu i transmisji fal spinowych w magnonicznych interferometrach. Badania w niej prezentowane zostały wykonane na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Instytucie Spintroniki i Informatyki Kwantowej. Promotorem pracy jest dr hab. Paweł Gruszecki, Prof. UAM. Badania, w których brał udział Doktorant finansowane były przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektów badawczych PRELUDIUM (2022/45/N/ST3/01844) oraz SONATA (2019/35/D/ST3/03729).

Przedstawiona do recenzji rozprawa dotyczy badań nad falami spinowymi, które obecnie są postrzegane jako obiecujący nośnik informacji w przyszłych technologiach przetwarzania danych. Kluczową zaletą wykorzystania fal spinowych jest brak wydzielania ciepła Joule’a, co odróżnia tę technologię od klasycznej elektroniki. W konsekwencji oczekuje się istotnego ograniczenia przegrzewania się urządzeń podczas pracy, co z kolei prowadzi do zmniejszenia strat energii oraz obniżenia jej zapotrzebowania. Urządzenia magnoniczne operują przy znacznie krótszych długościach fal niż te stosowane we współczesnych technologiach wykorzystujących fale elektromagnetyczne. Przewiduje się również, że zastosowanie fal spinowych jako nośnika informacji pozwoli przezwyciężyć ograniczenia związane z dalszą miniaturyzacją układów, wynikające z zasady nieoznaczoności Heisenberga. Pomimo licznych zalet, rozwój magnoniki wymaga rozwiązania wielu problemów. Należą do nich m.in. duża podatność niskoenergetycznych fal spinowych na fluktuacje termiczne w ośrodku magnetycznym, silne tłumienie fal spinowych w większości znanych materiałów magnetycznych, a także ograniczona liczba efektywnych metod wzbudzenia, kontroli i detekcji rozchodzących się w przestrzeni fal spinowych. W związku z tym trwają intensywne poszukiwania ich rozwiązań. W ten nurt wpisują się badania Doktoranta, których celem było opracowanie teoretycznych podstaw nowych sposobów kontroli propagacji fal spinowych z wykorzystaniem interferometrów magnonicznych.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów, w tym tego najważniejszego, czyli zawierającego pięć prac opublikowanych w międzynarodowych czasopismach fizycznych, takich jak Scientific Report (dwie prace), Nano Letters, Physical Review B, IEEE Transactions on Magnetism, które stanowią powiązany tematycznie zbiór artykułów naukowych. Rozprawa zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim, krótki opis dodatkowych dwóch publikacji Doktoranta, podziękowania oraz spis literatury.

W pierwszym rozdziale Autor skupił się na wprowadzeniu do tematyki doktoratu omawiając źródła magnetyzmu, rodzaje oddziaływań oraz uporządkowania magnetyczne. Obszernie zostały opisane zagadnienia związane z propagacją fal spinowych z uwzględnieniem efektów nieliniowych. Rozdział ten napisany jest bardzo klarownie i zawiera wszystkie niezbędne elementy, które

wprowadzają czytelnika w tematykę rozprawy. Wywiązując się z roli recenzenta muszę zwrócić uwagę na drobne niedociągnięcia:

1) „DMI also introduces chirality to the spin ordering (whether spins are aligned counter- or clockwise), what is indicated by the negative sign in Eq. 1.25.”. To sugeruje, że znak “minus” jest związany z chiralnością układu. Chiralność związana z oddziaływaniem DM wynika z minimalizacji energii, która jest osiągana, gdy wektory $\mathbf{S}_1$ i $\mathbf{S}_2$ są ustawione względem siebie prostopadle, a o skrętności decyduje kierunek wektora $\mathbf{D}$.

2) W podpisie pod rysunkiem 1.6 pojawiała się definicja pola koercji, która wskazuje, że jest to pole, w którym zanika uporządkowanie magnetyczne. Jest to nieprecyzyjne określenie, gdyż dla wartości pola magnetycznego równego polu koercji system wykazuje $M=0$, gdyż wypadkowe momenty np. od domen kompensują się, ale układ nie traci uporządkowania magnetycznego.

3) Przy omawianiu procesu tworzenia się domen w materiale ferromagnetycznym Autor jedynie dyskutuje aspekt minimalizacji energii magnetostatycznej. Przy podziale na domeny istotną rolę odgrywa również energia anizotropii i wymiany, które w związku z obecnością ścian domenowych silnie wpływają na proces tworzenia się domen. Warto, aby na obronie Doktorant doprecyzował tę kwestię.

4) W równaniu 1.39 zamiast γ powinno być γ_G , a w równaniu 1.49 powinno być V_g zamiast V_{ph} .

W rozdziale drugim opisane zostały wybrane pojęcia i efekty z dziedziny optyki, gdyż wykazują wiele podobieństw ze zjawiskami magnonicznymi. Opisy te stworzyły dobre podstawy teoretyczne do wyjaśnienia wyników własnych. W szczególności Doktorant omawia w nich zasadę zastosowania konturów stałoczęstotliwościowych oraz działanie interferometrów. Opisane zostały także efekt Goosa-Hänchena oraz anomalia Wooda. Wymienione efekty są znane w optyce, jednak w magnonice wciąż pozostają słabo zbadane. Ich dokładniejsze zrozumienie może znacząco przyczynić się do rozwoju nowych technologii wykorzystujących fale spinowe. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że badania nad anomalią Wooda należą do pierwszych tego typu prac prowadzonych w dziedzinie magnoniki. Rozdział został napisany w sposób klarowny, choć Doktorant nie ustrzegł się drobnych pomyłek. Brakuje spójności pomiędzy treścią a rysunkiem 2.3b, co utrudnia zrozumienie, który kontur odpowiada któremu materiałowi. Nie jest również do końca jasne, dlaczego jeden z materiałów ma kontur w kształcie okręgu, a drugi — w kształcie „fasolki”. Jakie właściwości fizyczne decydują o takim kształcie? Na rysunku 2.6 przy oznaczeniu przesunięcia wiązki padającej i odbitej użyto Δ a powinno być ΔX .

W rozdziale trzecim opisane zostały metody obliczeniowe zastosowane w rozprawie. W pierwszej części doktorant opisał założenia metody elementów skończonych (z ang. Finite Element Method - FEM) koncentrując się na sposobie podziału na elementy badanego materiału. Po tym płynnie wprowadził czytelnika w symulacje realizowane z wykorzystaniem, oprogramowania COMSOL Multiphysics, które bazuje na metodzie FEM. Warto zwrócić uwagę, że Doktorant zaimplementował, w tym oprogramowaniu, równanie Landaua-Lifshitz, które nie było dostępne w standardowym kodzie COMSOL. W tym rozdziale opisana została również metoda różnic skończonych (Finite Difference Method - FDM), która jest zaimplementowana w MuMaX3. W rozprawie podane zostały również skrypty wykorzystywane przez Doktoranta do zastosowania w obliczeniach gradientów tłumienia czy kodu pozwalającego symulować skwantowane mody fal spinowych. Podsumowując, ten rozdział mogę stwierdzić, że Doktorant posiada dużą wiedzę w zakresie metod obliczeniowych stosowanych w magnonice oraz bardzo dobrą znajomość wykorzystywanego oprogramowania.

W czwartym rozdziale przedstawiona została motywacja prowadzonych badań oraz wymienione cele. Główną motywacją jest zastosowanie fal spinowych jako nośnika informacji w systemach magnonicznych. Mimo licznych zalet, o których wspomniałem na początku recenzji, technologia magnoniczna wciąż napotyka na istotne trudności w kontroli propagacji i detekcji fal spinowych. Celem pracy doktorskiej mgra Krzysztofa Sobuckiego jest opracowanie teoretycznych podstaw nowych metod kontroli propagacji fal spinowych z wykorzystaniem interferometrów

magnonicznych. Badania koncentrują się na analizie efektów rezonansowych, zarówno liniowych, jak i nieliniowych, zachodzących podczas odbicia i transmisji fal spinowych w strukturach magnonicznych. Realizacja tego celu stanowi istotny krok w kierunku rozwoju wydajnych i energooszczędnych urządzeń do przyszłych zastosowań w przetwarzaniu informacji. W tym rozdziale zawarto również krótką informację o pięciu publikacjach stanowiących podstawę rozprawy, a także wzmiankę o dwóch dodatkowych pracach, które, w mojej ocenie, trudno zaliczyć do zbioru publikacji składających się na rozprawę, ponieważ nie przedstawiono do nich ani oświadczeń współautorów, ani pełnych tekstów tych publikacji.

Rozdział piąty stanowi zbiór pięciu publikacji, które zostały opatrzone bardzo skromnym komentarzem Autora oraz zawierają informacje dotyczące jego wkładu w powstawanie tych prac. Dołączono również stosowne oświadczenia współautorów. Nie mam wątpliwości, że w czterech spośród wymienionych publikacji Doktorant odegrał wiodącą rolę (2xSci. Rep., Nano Letter, IEEE). W przypadku pracy opublikowanej w Physical Review B, oświadczenie pierwszego autora, dr. Wojciecha Śmigaja, wskazuje, że to on był wiodącym autorem tej publikacji. Niemniej jednak, istotna część tej pracy została wykonana przez Doktoranta, który potwierdził poprawność półanalitycznego modelu opracowanego przez dr. Śmigaja – do czego odniosę się w dalszej części recenzji.

Pierwsza publikacja (Podrozdział 5.2) otwiera cykl badań nad kontrolą propagacji fal spinowych poprzez analizę wpływu interferometru Giresa–Tourniois (GTI) na fale odbite. Praca zawiera zarówno wyniki symulacji numerycznych, jak i półanalityczny model oparty na równaniu Landaua–Lifshitz, który wyjaśnia zmiany parametrów fal spinowych wywołane obecnością interferometru. W ramach badań zaobserwowano silnie nieliniową zależność między zmianą fazy odbitych fal, a szerokością interferometru. Wykazano możliwość wzbudzenia rezonansu Fabry'ego–Perota w strukturze o szerokości mniejszej niż długość padającej fali, co przeczy klasycznej teorii optycznej. Zjawisko to wyjaśniono istnieniem wielu modów własnych o krótszych długościach fal, które mogą zostać wzbudzone przez nadchodzące fale spinowe. Warto podkreślić, że praca została zauważona w środowisku, gdyż ma już 10 cytowań (bez autocytowań).

Kontynuacją tych prac jest druga publikacja (Podrozdział 5.3), która koncentruje się na wpływie różnych geometrii interferometru GTI na zmianę fazy odbitych fal. Analizowano m.in. zmianę grubości warstwy oraz odległości między elementami interferometru. Wykazano, że odpowiednia modyfikacja geometrii pozwala kontrolować nieliniową zależność fazową i dostrajać właściwości interferometru w sposób pożądaný z punktu widzenia zastosowań magnonicznych.

Trzecia publikacja (Podrozdział 5.4) stanowi rozwinięcie pierwszej pracy i zawiera szczegółowy opis półanalitycznego modelu, który umożliwia analizę zarówno odbitych, jak i transmitowanych fal spinowych przy udziale magnonicznego interferometru. W proponowanym podejściu numerycznym struktura dzielona jest na segmenty o stałym przekroju poprzecznym, dla których wyznaczane są normalne mody własne poprzez rozwiązanie zlinearyzowanego równania Landaua–Lifshitz. Na ich podstawie obliczane są współczynniki odbicia i transmisji oraz przesunięcie fazy fali przechodzącej i odbitej. W artykule przedstawiono przykład analizy propagacji fal spinowych przez magnoniczny interferometr działający w geometrii rezonatora Fabry'ego–Perota. Wyniki uzyskane przy pomocy tego modelu zostały porównane z rezultatami symulacji mikromagnetycznych. Tutaj pojawia się kluczowa kwestia wkładu Doktoranta w powstanie tego artykułu. Korzystając ze środowiska MuMax3, Doktorant przeprowadził symulacje mikromagnetyczne, których wyniki wykazały wysoką zgodność z rezultatami zaproponowanego modelu półanalitycznego (porównanie to przedstawiono na rys. 5). Ponadto Doktorant przygotował opis przeprowadzonych symulacji zamieszczony w artykule oraz opracował ilustracje prezentujące uzyskane wyniki. Chociaż jego wkład nie był wiodący, miał istotne znaczenie dla całej publikacji, ponieważ jego symulacje umożliwiły walidację modelu oraz potwierdzenie jego zgodności z obliczeniami mikromagnetycznymi, co znacząco wzmacnia zasadność przedstawionego rozwiązania.

W czwartej pracy cyklu (podrozdział 5.5) przeprowadzono badania procesu odbicia fal spinowych od krawędzi cienkiej warstwy magnetycznej umieszczonej pod ferromagnetycznym paskiem. W zaprezentowanym układzie zaobserwowano dwa zjawiska będące magnonicznymi odpowiednikami znanych efektów optycznych. Pierwszym z nich jest efekt Goosa–Hänchena, przejawiający się jako boczne przesunięcie odbitej wiązki fal spinowych względem klasycznego toru odbicia. Drugim efektem jest anomalia Wooda, polegająca na redukcji amplitudy fali odbitej, związana z rezonansowym wzbudzeniem modu własnego na krawędzi interferometru. Wykazano, że warunki prowadzące do wystąpienia anomalii Wooda pokrywają się z tymi, w których następuje znaczne zwiększenie bocznego przesunięcia fali odbitej. Zaobserwowano także, obecność rezonansowego modu upływowego (*leaky-mode*) w ferromagnetycznym pasku, który został wzbudzony przez falę spinową w warstwie magnetycznej. W pracy określono warunki rezonansowe, przy których obserwuje się zarówno wyraźną anomalię Wooda, jak i istotne zwiększenie przesunięcia Goosa–Hänchena — nawet o kilka długości fali. W szczególności wykazano, że przesunięcie to może osiągać wartości rzędu 450 nm dla wiązki głównej oraz 1600 nm dla wiązki wtórnej, co czyni efekt mierzalnym przy użyciu współczesnych technik eksperymentalnych. Wyniki te mają istotne znaczenie dla projektowania układów magnonicznych, a prezentowany system stanowi efektywną platformę do kontrolowanego rozpraszania i odbicia fal spinowych. Co istotne, warunki rezonansowe nie wymagają precyzyjnie określonej wartości namagnesowania nasycenia i obejmują zakres typowy dla powszechnie stosowanych materiałów magnetycznych, co wskazuje na realną możliwość eksperymentalnej realizacji proponowanej struktury.

W piątej pracy (podrozdział 5.6) przedstawiono szczegółową analizę nieelastycznego rozpraszania wiązek fal spinowych na modach brzegowych w cienkich warstwach ferromagnetycznych. Badano dwa główne procesy nieliniowe — wymuszone rozszczepienie (SSP) oraz proces konfluencji (CP) — które prowadzą do generacji nowych fal spinowych o częstotliwościach będących kombinacjami częstotliwości wiązki padającej i modu brzegowego. Zaobserwowano, że fale rozproszone przyjmują postać wiązek i ulegają bocznemu przesunięciu na interfejsie, wykazując efekt analogiczny do przesunięcia Goosa–Hänchena. W zależności od kąta padania, kierunku propagacji oraz częstotliwości modu brzegowego, przesunięcie to osiągało wartości sięgające nawet kilkuset nanometrów. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano dla procesu CP, w którym obserwowano kaskadę nieliniowych efektów prowadzących do wzbudzenia modu upływowego (*leaky-mode*) o wyższych częstotliwościach. Zjawisku temu towarzyszył znaczny wzrost bocznego przesunięcia rozproszonej wiązki fal spinowych. Uzyskane wyniki poszerzają wiedzę z zakresu tzw. optyki fal spinowych i tworzą podstawy dla przyszłych zastosowań w technologii fal spinowych. Aby było to możliwe, niezbędna jest eksperymentalna realizacja dość nietypowego umiejscowienia anteny wzbudzającej mody brzegowe, która znajduje się na bocznej krawędzi warstwy (Fig. 1a). Czy takie umiejscowienie anteny jest konieczne? A jeśli tak, to w jaki sposób można to zrealizować eksperymentalnie?

W rozdziale 6 przedstawiono informacje o dwóch dodatkowych artykułach autorstwa Doktoranta. W jednej z tych prac występuje jako pierwszy i korespondencyjny autor, co świadczy o jego aktywnym udziale w badaniach wykraczających poza cykl publikacyjny rozprawy. Prace te dotyczą zastosowania symulacji mikromagnetycznych do analizy własnych modów oscylacyjnych hopfionów oraz lokalizacji fal spinowych w układzie hybrydowym złożonym z warstwy ferrimagnetycznej i nadprzewodnika. Świadczy to o szerokim wachlarzu zainteresowań naukowych Doktoranta i utwierdza mnie w przekonaniu, że posiada on rozległą wiedzę w dziedzinie magnoniki oraz jest bardzo dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Rozprawa kończy się podsumowaniem, w którym zebrano kluczowe wnioski wynikające z rozprawy.

Całość została przygotowana z dużą starannością. Tekst cechuje się wysoką jakością redakcyjną, jest klarowny i logicznie uporządkowany, a język rozprawy precyzyjny i zrozumiały. Rysunki

opracowano starannie. Ich jakość graficzna i opisowa wspiera zrozumienie prezentowanych wyników, z drobnymi wyjątkami, o których wspominałem wcześniej. Pomimo niewielkich uchybień o charakterze edytorskim, które nie wpływają istotnie na odbiór pracy, uważam, że rozprawa zawiera bardzo cenne i oryginalne wyniki badań. Przedstawiony cykl pięciu publikacji stanowi spójny tematycznie materiał badawczy dotyczący fal spinowych, dynamicznie rozwijającego się obszaru fizyki ciała stałego, który w niedalekiej przyszłości może znaleźć zastosowanie w nowoczesnych technologiach informacyjnych. Autor, dzięki przemyślanej strukturze badań oraz trafnie dobranym symulacjom, skutecznie opisuje i wyjaśnia interesujące zjawiska fizyczne, wnosząc istotne, nowe treści do wiedzy na temat propagacji, rozpraszania i kontroli fal spinowych w strukturach magnonicznych. Wyniki zawarte w publikacjach nie tylko poszerzają wiedzę podstawową, ale również otwierają konkretne perspektywy zastosowań w technologiach przetwarzania informacji opartych na falach spinowych. Wszystkie zaprezentowane badania cechują się wysokim poziomem oryginalności oraz znaczącym potencjałem aplikacyjnym. W mojej ocenie, cykl ten stanowi istotny wkład w rozwój tzw. optyki fal spinowych i wyróżnia się zarówno wartością poznawczą, jak i praktyczną. Obecnie wiele ośrodków badawczych intensywnie pracuje nad rozwojem metod umożliwiających precyzyjne sterowanie falami spinowymi. Zrozumienie mechanizmów leżących u podstaw tych zjawisk otwiera drogę do projektowania nowej generacji urządzeń do przetwarzania informacji, charakteryzujących się znacznie większą szybkością działania niż współczesne technologie. Może to w istotny sposób przyspieszyć rozwój technologii wykorzystujących fale spinowe, w szczególności w kontekście zastosowania nowoczesnych interferometrów magnonicznych. Wyniki uzyskane przez Doktoranta stanowią istotny krok w kierunku realizacji tego celu, przyczyniając się do pogłębienia zrozumienia oraz skuteczniejszej kontroli propagacji fal spinowych. W mojej ocenie osiągnięcia te zasługują na wyróżnienie.

Biorąc pod uwagę przytoczoną wcześniej ocenę poszczególnych części rozprawy, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Sobuckiego pt. „Resonance effects in linear and nonlinear spin wave dynamics for control of propagating spin waves” stanowiąca zbiór powiązanych tematycznie artykułów, spełnia wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia doktora. W związku z tym wnioskuję o dopuszczanie mgra Krzysztofa Sobuckiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauki ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie Nauki Fizyczne i wnoszę o wyróżnienie rozprawy.



