

Białystok, 5 września 2025 r.

prof. dr hab. Andrzej Stupakiewicz
Wydział Fizyki
Uniwersytet w Białymstoku

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra Mateusza Gołębiewskiego
pt. „Novel approaches to control spin waves using structuring and complex geometry of
ferromagnetic nanostructures”**

Rozprawa doktorska Mateusza Gołębiewskiego została przygotowana w ramach studiów w Szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Maciej Krawczyk, a promotorem pomocniczym - dr hab. Paweł Gruszecki, prof. UAM z Wydziału Fizyki i Astronomii. *Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscyplin Nauki Fizyczne i Astronomia Wydziału Fizyki i Astronomii UAM z dnia 13 czerwca 2025 roku.*

Tematyka rozprawy dotyczy dynamicznie rozwijającego się obszaru fizyki fal spinowych, tzw. magnonika, który znajduje się na styku magnetyzmu, optyki nieliniowej oraz spintroniki. W przeciwieństwie do klasycznej elektroniki, magnonika nie opiera się na konwencjonalnym przepływie elektronów, co znacząco ogranicza dyssypację ciepła. Szczególnie istotnym aspektem jest możliwość kontrolowania fal spinowych w skali nawet nanometrów, co otwiera drogę do zastosowań w skalowalnych układach logicznych, sieciach neuromorficznych, oraz w urządzeniach służących do konwersji energii i bezstratnej transmisji informacji. Ze względu na aktualność oraz wysoką atrakcyjność poznawczą, obszar ten jest intensywnie rozwijany przez wiodące ośrodki naukowe na świecie, w tym przez grupę badawczą z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, czego dowodem jest ciągłość wartościowych publikacji oraz regularna obecność na uznanych konferencjach naukowych i w konsorcjach grantowych.

Celem rozprawy doktorskiej było wyjaśnienie i zbadanie kontroli lokalizacji oraz propagacji fal spinowych w złożonych ferromagnetycznych układach magnonicznych o różnej wymiarowości przy wykorzystaniu modelowania mikromagnetycznego. Rozprawa dotyczy głównie wyników symulacji numerycznych jednak należy podkreślić, że Doktorant włączył się poprzez szeroką współpracę międzynarodową do badań eksperymentalnych, które potwierdzają lub wyjaśniają założenia teoretyczne.

Rozprawa doktorska Pana mgra Mateusza Gołębiewskiego została przedstawiona w formie jednotematycznego zbioru opublikowanych artykułów i w sposób oczywisty została przygotowana w języku angielskim. Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem (również w języku polskim) oraz listą dziewięciu publikacji oznaczonych jako P1–P9. Rozdział pierwszy zawiera bardzo krótki wstęp, który w zasadzie sprowadza się do przedstawienia różnorodności badanych w rozprawie struktur magnonicznych. Rozdziały drugi i trzeci omawiają skrótowo podstawy magnetyzmu z perspektywy prowadzonych badań. W rozdziale czwartym szczegółowo opisano metody numeryczne wykorzystywane w symulacjach mikromagnetycznych. Kluczowy rozdział piąty zawiera właściwie oryginalne wersje publikacji P1–P9 wraz z krótkim komentarzem Doktoranta zawierającym informację o jego wkładzie do poszczególnych publikacji. Lista publikacji została uszeregowana w kolejności badania struktur ze zmienną wymiarowością od 1D do 3D. Na końcu tego rozdziału zamieszczono oświadczenia współautorów ze względu na wieloautorski charakter wymienionych publikacji. Rozprawę kończy bardzo dobrze i ciekawie merytorycznie przedstawiona perspektywa

dalszych badań oraz klarowne i szczegółowe podsumowanie badań. Ostatecznie umieszczono spis literatury liczący 179 pozycji.

Rozprawa przedstawia wyniki badań struktur ferromagnetycznych zawierających jednowymiarowe siatki dyfrakcyjne, dwuwymiarowe sieci dziur o kształcie kołowym oraz nanostruktur trójwymiarowych uwzględniając warunki periodyczności. Badania zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu metod różnicowych i elementów skończonych zaimplementowanych w podstawowych do tego typu badań środowiskach obliczeniowych, takich jak MuMax3 (P1-P3, P6), COMSOL Multiphysics (P4, P5, P8, P9), a także w środowisku „tetmag” (P7). Szczególną wartością rozprawy stanowi umiejętność łączenia teorii z eksperymentem, jak również zaproponowanie koncepcji nowego eksperymentu (w przypadku potwierdzenia efektu Talbota w pracy P6). Doktorant aktywnie uczestniczył w interpretacji danych przy zastosowaniu standardowych metod do badania dynamiki magnetyzacji w domenie częstotliwości, takich jak metoda rozpraszania Brillouina (BLS) oraz rezonans ferromagnetyczny (FMR).

Dorobek publikacyjny Pana Mateusza Gołębiewskiego, stanowiący integralną i zasadniczą część rozprawy doktorskiej, zasługuje na uznanie zarówno pod względem ilościowym i co jest niezwykle ważne - jakościowym. Kandydat jest współautorem dziewięciu artykułów naukowych, z których osiem opublikowano w renomowanych czasopismach indeksowanych na liście JCR, takich jak *Physical Review B/Applied*, *Applied Physics Letters*, *ACS Applied Materials & Interfaces* czy *Advanced Electronic Materials*. Natomiast jedna publikacja jest w trakcie recenzji i została udostępniona jako preprint na *arXiv*.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Pan Mateusz Gołębiewski pełnił rolę pierwszego autora w siedmiu publikacjach (uwzględniając preprint). Ponadto, w siedmiu pracach (w jednej jako drugi autor) występuje jako autor korespondencyjny, co w mojej opinii jednoznacznie wskazuje na jego wiodący wkład. Również poszczególne wkłady (prawie wszystkich) autorów do każdej publikacji podano w oświadczeniach zamieszczonych w rozprawie. Pozytywnie oceniam to, iż większość publikacji Doktoranta zawiera tylko 3-4 autorów, do których wlicza się promotor i pomocniczy promotor.

Publikacje umieszczone w rozprawie doktorskiej obejmują szeroki zakres tematyczny, od fundamentalnych badań nad efektem Talbota dla fal spinowych, poprzez projektowanie programowalnych układów logicznych opartych na interferencji magnonicznej, aż po analizę rezonansów w trójwymiarowych strukturach gyroidalnych oraz lokalizację modów powierzchniowych w nanostrukturach ferromagnetycznych. Spójność tematyczna oraz aktywny udział w międzynarodowej współpracy z zespołami ze znakomitych ośrodków naukowych (m.in. z Kaiserslautern, Lozanny, Sendai i Strasburga) świadczą o wysokim poziomie kompetencji badawczych Doktoranta, a także o jego zdolności do zainicjowania zaawansowanych badań nie tylko w ośrodku macierzystym.

Dalej omówię **najważniejsze wyniki publikacji** według oznaczeń Doktoranta:

Publikacja P1 prezentuje najbardziej oryginalne osiągnięcia Doktoranta, które były wynikiem pracy magisterskiej i w istocie zainicjowały nurt badań rozwijany w rozprawie doktorskiej. W artykule przedstawiono analizę oraz numeryczną demonstrację efektu Talbota dla fal spinowych w cienkiej warstwie ferromagnetycznej. Doktorant po raz pierwszy wykazał numerycznie, że klasyczne zjawisko optyczne, efekt Talbota, polegające na samoobrazowaniu periodycznego wzorca fali wzdłuż kierunku jej propagacji, może być również obserwowane dla fal spinowych w układach magnetycznych. Zjawisko to zostało szczegółowo przeanalizowane przy użyciu symulacji mikromagnetycznych, opartych na rozwiązaniu równania Landaua-Lifshitz-Gilberta, z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów materiałowych oraz geometrii wzbudzenia. Doktorant pokazał, że interferencja fal spinowych generowanych przez

periodyczne układy magnonowe prowadzi do powstania wyraźnych obrazów Talbota zarówno dla konfiguracji magnetyzacji w płaszczyźnie, jak i poza nią. Wyniki numeryczne zostały porównane z przybliżeniem analitycznym, co pozwoliło na potwierdzenie uniwersalności zjawiska oraz jego zgodności z klasyczną teorią falową. Szczególnie istotnym aspektem pracy jest wskazanie potencjalnych zastosowań efektu Talbota w magnonice, m.in., w projektowaniu układów obrazujących, filtrów fal spinowych oraz struktur logicznych opartych na interferencji. Doktorant podkreślił również możliwość eksperymentalnej weryfikacji zjawiska w warunkach laboratoryjnych, co zostało przedstawione w jego publikacji P6.

W publikacji P2 wykazano, że generowane fale spinowe mogą interferować tworząc obrazy samoogniskujące wzdłuż kierunku propagacji fali. Praca ta stanowi kontynuację pracy P1. Efekt Talbota zaobserwowano numerycznie w strukturach wielomodowych, co znacząco rozszerza zakres jego zastosowań w układach magnonicznych. W pracy tej przedstawiono warunki geometryczne i częstotliwościowe niezbędne do uzyskania efektu samoobrazowania. Wykazano również, że odpowiednie dostrojenie źródła wzbudzenia magnonów oraz właściwości falowodów pozwala na kontrolę interferencji fal spinowych, co może być wykorzystane w projektowaniu magnonicznych układów logicznych.

Praca P3 zawiera koncepcję programowalnych układów logicznych opartych na falach spinowych, wykorzystujących zjawisko samoobrazowania. W pracy tej zaproponowano nowy typ układów logicznych, w których interferencja fal spinowych w cienkich, wielomodowych falowodach ferromagnetycznych prowadzi do powstania obrazów w efekcie Talbota. Proponowane podejście z pracy P1 zostało bardzo ciekawie zaadaptowane do demonstracji skalowalnego i kompatybilnego z architekturą FPGA, układu bramek logicznych. To podejście otwiera drogę do integracji fal spinowych jako nośników informacji w nowej generacji elektroniki o niskiej dyssypacji ciepła. Dzięki możliwości kodowania informacji zarówno amplitudowej jak i fazowej, systemy te oferują większą elastyczność niż klasyczne układy elektroniczne.

Praca P4 dotyczy analizy widmowej fal spinowych w nanoprętach ferromagnetycznych o kształcie półksiężyca. Doktorant przeprowadził szczegółowe symulacje mikromagnetyczne, w celu dokonania analizy, w jaki sposób zmiana kierunku zewnętrznego pola magnetycznego wpływa na symetrię układu oraz lokalizację modów własnych względem pola od magnesowania wynikającego z ograniczeń geometrycznych. Wykazano w pracy, że manipulacja kierunkiem i amplitudą pola prowadzi do kontrolowanej zmiany częstotliwości rezonansowej fal spinowych. Niezwykle interesującym wynikiem jest zademonstrowanie nieliniowej asymetrii dyspersji fal spinowych, której charakter można kontrolować poprzez geometrię półksiężycowych struktur oraz pola magnetycznego.

Praca P5 prezentuje wyniki dotyczące koncepcji wzbudzania fal spinowych o wysokiej częstotliwości (powyżej częstości typowego zakresu modu FMR rzędu kilku-kilkunastu GHz) i krótkiej długości fali poprzez wykorzystanie wyższych harmonicznym modów rezonansowej wnęki magnonicznej. W pracy wykazano, że poprzez odpowiednie zaprojektowanie rezonansowej wnęki magnonicznej w cienkiej warstwie ferromagnetycznej oraz zastosowanie mikrofalowego pola wzbudzającego o odpowiednio dużej amplitudzie, możliwe jest generowanie wyższych harmonicznym modów wnęki. Dzięki temu uzyskano drugą i trzecią harmoniczną, które odpowiadają falom spinowym o częstotliwościach 48,6 GHz i 72,9 GHz, odpowiednio o długościach fal 44 nm i 22 nm. Zjawisko to zachodzi po przekroczeniu progu amplitudy pola wzbudzającego i osiąga nasycenie, gdy antena do wzbudzeń mikrofalowych pokrywa całą wnękę, co czyni układ technicznie wykonalnym.

Praca P6, z częściowym udziałem Doktoranta, przedstawia eksperymentalną demonstrację efektu Talbota, która została wcześniej zaproponowana przez Doktoranta (praca P1). Doktorant

w tej pracy przeprowadził symulacje mikromagnetyczne wyjaśniające wyniki eksperymentu przy zastosowaniu techniki BLS oraz ferrimagnetycznych warstw YIG. W zależności od częstotliwości wzbudzenia oraz geometrii układu, obserwowane były zarówno kaustyczne paczki falowe, jak i klasyczne, optyczne obrazy Talbota. Wyniki pracy nie tylko potwierdzają dużą uniwersalność zjawisk falowych w materiałach magnetycznych, ale również otwierają nowe możliwości projektowania struktur magnonicznych o kontrolowanej geometrii propagacji. Ponadto, interesującym jest fakt, że eksperymentalna weryfikacja efektu Talbota także została zademonstrowana przez grupę z Aalto University [Phys. Rev. Applied 22, 014038 - Published 16 July, 2024]. Natomiast praca tego zespołu ukazała się dwa miesiące później.

Praca P7 łączy ze sobą zaawansowane modelowanie mikromagnetyczne z eksperymentem przy zastosowaniu FMR. W tym przypadku udowodniono, że struktury gyroidalne, które charakteryzują się chiralną i periodyczną geometrią, wykazują unikalne właściwości propagujących fal spinowych, między innymi lokalizację kolektywnych modów oraz silną zależność odpowiedzi magnetycznej od orientacji zewnętrznego pola magnetycznego. Szczególnie istotnym wynikiem jest pokazanie, że struktury te mogą być traktowane jako efektywne materiały magnoniczne. Badania ujawniły również, że odpowiednio zaprojektowane gyroidalne nanostruktury mogą pełnić funkcję falowodów o właściwościach metamateriałowych pokonując ograniczenia dyfrakcyjne, co pozwoli na ich zastosowanie w filtrach radiowych, rezonatorach oraz układach przetwarzania sygnału w technologii spintronicznej.

Praca P8 (opublikowana jako preprint na platformie *arXiv*) przedstawiona raczej w formie przeglądu i poświęcona jest analizie właściwości magnetycznych trójwymiarowych struktur ferromagnetycznych o geometrii gyroidalnej, jak i dynamicznych tekstur w układach o złożonej topologii. W pracy przedstawiono analizę rezonansów ferromagnetycznych w warstwach gyroidalnych poddanych rotacyjnemu działaniu pola zewnętrznego, co pokazuje silny wpływ anizotropii geometrii (magnetostatyczne efekty) na intensywność sygnału rezonansowego. Wyniki te potwierdzają, że struktury gyroidalne mogą pełnić funkcję funkcjonalnych materiałów magnonicznych, szczególnie w zakresie częstotliwości mikrofalowych.

Praca P9 obejmuje badania kontrolowanej lokalizacji powierzchniowych modów FMR w trójwymiarowych nanostrukturach magnetycznych. Rozwiązanie warunków brzegowych i periodyczności w dynamice magnetyzacji dla układów 3D jest niezwykle trudne i pracochłonne. Doktorant przeprowadził systematyczne symulacje mikromagnetyczne dla struktur typu „woodpile” oraz gyroidów z chiralnością o periodycznej geometrii. Uważam, że tego typu struktury są bardzo obiecujące do weryfikacji w eksperymencie ze względu na uzyskanie wysokich częstotliwości propagacji magnonów wraz ze sterowaną asymetrią. Poza tym takie struktury można implementować dla różnych stanów magnetycznych uwzględniając syntetyczne antyferromagnetyki i altermagnetyki. W pracy zaprezentowano numerycznie, że rozkład modów FMR w tych strukturach jest silnie asymetryczny względem grubości próbki, a ich lokalizacja powierzchniowa może być dynamicznie przełączana pomiędzy górną a dolną częścią struktury poprzez zmianę kierunku pola magnetycznego. Ważnym osiągnięciem w prowadzonych badaniach jest identyfikacja roli lokalnych pól odmagnesowania oraz energii wymiany w kształtowaniu widma rezonansowego. Doktorant wykazał, że geometryczne cechy struktur, takie jak punkty potrójnego styku i lokalna krzywizna, determinują charakter lokalizacji modów oraz umożliwiają ich selektywne wzbudzenie.

Uwagi krytyczne. Ogólnie rzecz biorąc, nie jestem zwolennikiem przygotowywania rozpraw doktorskich w formie tzw. „zszywki artykułów”, nawet jeśli lista publikacji poprzedzona jest wstępem, który często przypomina kompilację podstaw zaczerpniętych z podręczników akademickich i specjalistycznych. Moim zdaniem, klasyczna forma rozprawy doktorskiej,

wymaga od doktoranta umiejętności przedstawienia swoich osiągnięć w sposób spójny i całościowy, wskazując jego kompetencje w zakresie samodzielnej prezentacji wyników badań.

W przypadku rozprawy Mateusza Gołębiewskiego muszę jednak z przyjemnością stwierdzić, że załączone publikacje zostały przygotowane z dużą starannością. Dodatkowo są one rozbudowane o dodatkowe wyniki badań oraz pogłębioną analizę danych, często zawartą w „supplementary”. Publikacje te zachowują spójny styl, zarówno pod względem językowym, jak i graficznym, a także wykazują konsekwencję w stosowaniu oznaczeń i parametrów. Także dobrym pomysłem było uporządkowanie artykułów w rozprawie według wymiarowości badanych struktur magnonicznych, co pokazuje postęp w badaniach nad wpływem strukturyzacji na zjawiska lokalizacji i propagacji fal spinowych.

Z uwagi na fakt, że publikacje zawarte w rozprawie zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych i poddane recenzji przez ekspertów z dziedziny magnoniki, nie widzę potrzeby doszukiwania się słabych stron czy też błędów w części publikacyjnej rozprawy. Niemniej jednak, mam drobne uwagi oraz kilka pytań dotyczących rozprawy:

1) Jedna z uwag dotyczy struktury części wstępnej rozprawy. Uważam, że rozbudowane streszczenie już zawiera część wstępu. Natomiast sam wstęp nie w pełni eksponuje najistotniejsze osiągnięcia w dziedzinie magnoniki, które mogłyby stanowić silną motywację do podjęcia dalszych badań w tym zakresie. Dodatkowo, rozdziały 2 i 3 zawierają kilka, często zaledwie półstronicowych podrozdziałów o charakterze akademickim. Występuje w nich powtórzenie niektórych pojęć, takich jak np. energia anizotropii, kształtu, przedstawionych najpierw w formie zapisu hamiltonianu (rozdz. 2.5), następnie w ujęciu fenomenologicznym (rozdz. 2.7) oraz w formie potencjału termodynamicznego Gibbsa (rozdz. 3.1). Niejasne pozostaje odniesienie we wstępie do anizotropii magnetokrystalicznej (kubicznej), magnetoelastycznej, krzywych magnesowania, struktur i ścian domenowych, skoro nie były one przedmiotem dalszych analiz w rozprawie.

2) Wektor k przedstawiony w Fig. 3.2 powinien mieć jednoznaczny kierunek propagacji, aby uniknąć niejednoznaczności interpretacyjnej.

3) Uwzględnienie efektywnego tłumienia Gilberta w równaniu opisującym dynamikę magnetyzacji jest kluczowe. Czy zostało uwzględnione w jaki sposób odnosi się ono do wkładów tłumienia poprzecznego i podłużnego, które opisują efekty nieliniowe w propagacji fal spinowych zwłaszcza kiedy M_s nie jest równy M_{eff} ? Tego typu rozszerzony model tłumienia został zaproponowany w pracy [*Physical Review B*, 98, 104408 (2018)] oraz był dyskutowany w innych. W kontekście ograniczonej wymiarowości oraz obecności anizotropii w polach odmagnesowujących, jak ma to miejsce np. w nanoprętach, logiczne wydaje się pytanie, czy może występować anizotropia tłumienia fal spinowych? Czy w takich strukturach podłużny wkład tłumienia może wpływać na charakter lokalizacji i propagacji magnonów zwłaszcza w układach z DMI?

4) Czy w równaniu 4.1, przedstawiającym raczej różnicę typu „forward difference” wzdłuż osi x , uwzględniono również wersję z różnicą wsteczną „backward difference”?

5) Nie zauważyłem w pracy odniesienia czy zaproponowana koncepcja samoobrazowania fal spinowych oraz przedstawiony model ograniczają się wyłącznie do ferromagnetyków?

Podsumowując, nie mam wątpliwości, że rozprawa doktorska Mateusza Gołębiewskiego spełnia wszystkie kryteria stawiane pracom doktorskim. Praca wnosi istotny i oryginalny wkład w rozwój koncepcji falowej logiki spinowej. Zawiera wartościowe wyniki badawcze dotyczące kontroli fal spinowych w ferromagnetykach, które zostały uzyskane przy wykorzystaniu zaawansowanych narzędzi modelowania, kompleksowej analizie danych oraz porównania wyników numerycznych z eksperymentem. Doktorant wykazał się dojrzałością naukową,

publikując swoje wyniki w bardzo dobrych czasopismach, w zdecydowanej większości jako pierwszy oraz korespondencyjny autor. Potwierdzeniem jego aktywności naukowej jest również imponujący udział w uznanych konferencjach międzynarodowych (takich jak MMM, Intermag, JEMS), gdzie zaprezentował własne wyniki w formie referatów. Mateusz Gołębiewski zademonstrował szeroką wiedzę merytoryczną, wysokie kompetencje badawcze na poziomie międzynarodowym oraz biegłość w stosowaniu zaawansowanego i rozbudowanego warsztatu symulacji mikromagnetycznych.

Na podstawie powyższej oceny stwierdzam, że w mojej opinii recenzowana praca doktorska spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stawiane dysertacjom doktorskim, oraz spełnia zapisy określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024, poz. 1571 z późn. zm.) do nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauk fizycznych. Wobec tego wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgr Mateusza Gołębiewskiego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Biorąc pod uwagę aktualność podjętej tematyki, znaczenie uzyskanych wyników na tle światowego dorobku naukowego oraz wysoką jakość publikacji naukowych, wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr Mateusza Gołębiewskiego przez Radę Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

A. Stępień