



Wrocław, 27 października 2022 r.

dr hab. inż. Andrzej Janutka
andrzej.janutka@pwr.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra Szymona Mieszczaka,
pt. „Spin waves in magnonic systems: localization and propagation”**

Rozprawa doktorska pana mgra Szymona Mieszczaka skonstruowana jest jako zestawienie czterech publikacji, poprzedzone obszernym kompendium ogólnych informacji nt. mikromagnetyzmu, magnoniki, zjawisk lokalizacji, stosowanych metod numerycznych. Każdy z artykułów cyklu poprzedzony jest streszczeniem. Wszystkie cztery prace opublikowane są w wysoko punktowanych czasopismach: Physical Review Applied (2x), Scientific Reports, Physical Review B. Trzy prace cyklu (P2-P4) mają charakter badań teoretycznych, a Doktorant jest pierwszym autorem każdej z nich. Praca P1 jest teoretyczno-doświadczalna i zapewne dlatego Doktorant jest drugim na długiej liście autorów, a pierwszym jest eksperymentator. Rozprawa zawiera zbiór licznych deklaracji współautorów publikacji odnośnie ich udziału w realizacji prac, (deklaracji niektórych zagranicznych współautorów pracy P1 zapewne nie udało się uzyskać). Deklaracje nie wzbudzają żadnych wątpliwości co do wiodącej roli Doktoranta w powstaniu publikacji, co jest częścią odpowiedzi na pytanie, **czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata do stopnia doktora.**

Sformułowanie celu pracy, zawarte w streszczeniu budzi głęboki niedosyt, a stwierdzenia „celem mojej pracy doktorskiej są teoretyczne badania...” należało uniknąć, (badania nie powinny być celem, tylko środkiem do osiągnięcia celu). W rozdziale 1, Autor zawarł długi wywód nt. potencjalnych zastosowań magnoniki, ale nie wspominał o jej fundamentalnej trudności, jaką jest krótka droga propagacji fal spinowych. Tymczasem, uzytylarnych uzasadnień dla badań kryształów magnonicznych i „magnonicznego prawa Snella” należałoby szukać w trudnościach koherentnej propagacji fal spinowych w konwencjonalnych (jednorodnych) falowodach magnonicznych. W tym samym rozdziale, Autor znajduje jednak wspólny mianownik dla zrealizowanych zadań badawczych, co jest ważne dla oceny, **czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.** Jest nim lokalizacja fal spinowych w ultra-cienkich warstwach magnetycznych z przestrzenną modulacją magnetycznych parametrów materiałowych. Lokalizacja jest szeroko rozumiana i objawia się także w zjawiskach propagacji: w pracy P1 – jako zwężenia profilu fali periodycznej, w pracy P2 – jako wzmocnienie fali w barierze potencjału, w pracy P3 – jako mody krawędziowe, w pracy P4 – jako lokalizacja na defektach struktury magnonicznej.

Z drugiej strony, prace P2-P4 komponują się w cykl badań nad zastosowaniami w magnonice współczesnych zdobyczy fizyki fal liniowych, pochodzących z kwantowej fizyki ciała stałego i optyki falowej: uogólnionego prawa Snella, topologicznej klasyfikacji pasm energetycznych/częstościowych, technik analizy struktury pasmowej kwazikryształów. Taką zdobyczą jest również sam, stosowany w pracy P1, opis dipolowo-wymiennych fal



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T. +48 71 320 25 79

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



spinowych w kryształach magnonicznych. Każde z tych zagadnień jest złożone i trudne do przyswojenia w stosunkowo krótkim czasie studiów doktoranckich, o czym recenzent nadmienia w kontekście pytania, **czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata.**

Uzupełnienie odpowiedzi na trzy powyższe pytania zasadnicze wymaga omówienia poszczególnych prac składowych rozprawy.

Praca P1 zawiera numeryczne wyznaczenie spektrum modów dipolowo-wymiennych fal spinowych w warstwie magnetycznej w zależności od kąta ustawienia pola magnetycznego w płaszczyźnie taśmy, w obecności modulacji magnetyzacji saturacji. Za pomocą metody fal płaskich wyznaczone zostało spektrum częstości fal spinowych w modulowanym przestrzennie ośrodku magnetycznym. Przedyskutowany został wpływ pola magnetycznego na profil przestrzenny wzbudzenia spinowego. Od kierunku przyłożenia pola zależy stopień lokalizacji przestrzennej modów dipolowo-wymiennych. Rachunek ten służy weryfikacji wniosków z eksperymentalnej obserwacji powierzchniowej fali spinowo-akustycznej w modulowanej optycznie dwuwarstwie, gdzie niejednorodność parametrów materiału magnetycznego jest konsekwencją sprzężenia magneto-elastycznego z aktywnym optycznie podłożem. Praca P1 demonstruje kompetencje w zakresie współpracy z grupą doświadczalną i kompetencje rachunkowe w badaniach kryształów magnonicznych, w tym przypadku, kryształów magnonicznych z ciągłą, a nie typową, skokową modulacją przestrzenną. Praca P1 została dostrzeżona i zacytowana już co najmniej 12 razy (bez autocytowań wszystkich współautorów).

W pracy P2, Autorzy analizują efekt załamania fali spinowej na granicy ośrodków magnetycznych, przy skończonej szerokości tej granicy. W celu kontrolowania ugięcia fali płaskiej, biegnącej w falowodzie magnonicznym (z anizotropią poprzeczną do warstwy) o skończonej szerokości, rozważana granica ośrodków jest paskiem materiału z gradientem magnetyzacji i/lub anizotropii magnetycznej (magnetycznym odpowiednikiem materiału optycznego ze stopniowanym współczynnikiem załamania). propagacja fal spinowych przez tę granicę jest modelowana w analogiczny sposób, jak propagacja cząstki kwantowej przez barierę potencjału, tj. przy użyciu współczynników odbicia i transmisji. Poszerzenie obszaru wyjścia fali z bariery pozwala obserwować zjawisko anomalnego załamania fali, którego kąt zależy od gradientu fazy fali transmitowanej na powierzchni wyjścia z bariery. Podejście analityczne, polegające na wyznaczeniu współczynnika transmisji przez barierę oraz wykorzystaniu relacji pomiędzy wektorami falowymi na wejściu i wyjściu z bariery (uogólnionego prawa Snella), przeprowadzone dla wymiennych fal spinowych jest z sukcesem konfrontowane z symulacjami mikromagnetycznymi załamania fal spinowych. Sukces ten, osiągnięty w szerokim przedziale częstości, przy różnych konfiguracjach parametrów materiałowych, jest dowodem dużej sprawności rachunkowej. Autorzy przeprowadzają też pełne symulacje mikromagnetyczne fali wymiennie-dipolowej, konkludując podobieństwo zjawiska anomalnej refrakcji do zachodzącego w wymiennej fali spinowej. Demonstrowane jest potencjalnie bardzo istotne zastosowanie zjawiska anomalnego załamania fali spinowej do rozwiązywania problemu destrukcji czoła fali płaskiej na zgięciu magnonicznego falowodu. Praca P2 powstała we współpracy z grupą teoretyczną z Kijowa. Została zacytowana już co najmniej 6 razy (bez autocytowań



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T +48 71 320 25 79

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



wszystkich współautorów) i doceniona bardzo prestiżowym zaproszeniem do współautorstwa artykułu przeglądowego typu „roadmap” w czasopiśmie IEEE Transactions on Magnetics.

Sprawności programistycznej wymagało też uzyskanie obrazu fali (anomalnie) ugiętej przy zastosowaniu zasady Huygensa-Fresnela. Wątpliwość budzi jednak wykorzystanie funkcji Greena (a ściślej potencjału punktowego) równania Laplace’a w 3D - równanie (7), ponieważ rozważane układy są kwazi-dwuwymiarowe. Użycie funkcji Greena równania Laplace’a w 2D mogłoby poprawić zgodność obrazu fali ugiętej z uzyskanym w symulacjach mikromagnetycznych, które przeprowadzane są bez dyskretyzacji warstwy magnetycznej w kierunku normalnym, (zgodność obrazów 6a i 6c jest dyskusyjna, nawet jeśli faktem jest podkreślana zgodność kątów rozproszenia fali na tych obrazach).

Praca P3 poświęcona jest charakteryzacji modów międzypowierzchniowych i krawędziowych jednowymiarowych w planarnych strukturach taśm magnetycznych typu kryształów magnonicznych, za pomocą fazy Zaka, która jest jednowymiarowym odpowiednikiem fazy Berry’ego. Faza Zaka jest niezmiennikiem topologicznym pasm energetycznych (częstościowych) fal spinowych. Lokalny warunek zgodności pochodnej logarytmicznej funkcji falowej Blocha, (w przypadku modów zlokalizowanych – warunek przeciwnych znaków pochodnej logarytmicznej), który jest kryterium sklejanie fal spinowych na granicy dwóch jednowymiarowych kryształów magnonicznych o różnych kompozycjach materiałów magnetycznych, udaje się wyrazić za pomocą sumy faz Zaka określonej liczby pasm energetycznych. Wnioskując na podstawie struktury pasmowej kryształów (łańcuchów) magnonicznych, Autorzy przewidują możliwość wzbudzania modów zlokalizowanych na międzypowierzchni dwóch łańcuchów i/lub końcach struktury (modów krawędziowych), o częstości z zakresu wzajemnie dopasowanych przerw energetycznych obu łańcuchów i numerycznie weryfikują przewidywania. Rezultat w postaci wyznaczonego spektrum modów międzypowierzchniowych i krawędziowych jest bardzo ciekawy i potencjalnie ważny, np. dla poszukiwań możliwości wydłużenia czasu życia wzbudzeń spinowych. Poszerzenie przerw wzbronionych (zwężenie pasm) dipolowo-wymiennych fal spinowych w stosunku do występujących w strukturze pasmowej wymiennych fal spinowych skutkuje zwiększeniem stopnia lokalizacji modów międzypowierzchniowych i krawędziowych. W tym przypadku spektrum modów zlokalizowanych komplikuje pojawienie się dodatkowych, wąskich pasm energetycznych po sklejeniu struktur dwóch kryształów magnonicznych. Jest ono skutkiem obecności silnego pola magnetostatycznego na międzypowierzchniach pasków różnych materiałów magnetycznych. Praktyczne wykorzystanie metod topologicznych w analizie struktury pasmowej wymagało głębokiego zrozumienia złożonych pojęć i potężnego nakładu pracy obliczeniowej, zwłaszcza w przypadku dipolowo-wymiennych fal spinowych.

W pracy P4, Autorzy podejmują bardzo złożony problem lokalizacji fal spinowych na defektach (fazonach) aperiodycznych kryształów (kwazi-kryształów) magnonicznych typu sieci Fibonacciego. Odnotujemy, że lokalizacja fal spinowych na defektach punktowych jednowymiarowych (i dwuwymiarowych) periodycznych kryształów magnonicznych jest już nieźle zbadana w referencjach do artykułu, (aczkolwiek w podsumowaniu Kandydat zapowiada dalsze jej studia, skupione na lokalizacji Andersona fal spinowych). Struktura



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kft@pwr.edu.pl
www.kft.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



pasmowa dipolowo-wymiennych fal spinowych jest określana za pomocą miary IDOS(f) („integrated density of states”), charakteryzującej liczbę modów w przedziale częstotliwości $[0, f]$. Zaburzenia struktury kwazi-kryształów Fibonacci, fazy, związane są z destrukcją pasm energetycznych (częstościowych) fal spinowych – wypełnianiem się przerw energetycznych. Powstający w wyniku wzbudzenia fazonów nieporządek jest przyczyną tworzenia się modów zlokalizowanych w ich otoczeniu, dipolowo-wymiennych fal spinowych. W strukturze pasm energetycznych, mody zlokalizowane sytuują się w obszarach przerw „wzbronionych”. Stopień lokalizacji ma związek z szerokością przerw, a szczególnie dużo modów silnie zlokalizowanych na fazonach występuje w obszarach struktury pasmowej – okolic granic pasm.

Koncepcja IDOS, jak i koncepcja miary stopnia lokalizacji modów w kwazi-kryształach magnonicznych pochodzą z publikacji pani dr Justyny Rychły i współautorów - referencji [19] artykułu. Definicja owej miary lokalizacji została zmodyfikowana w stosunku do pierwowzoru, co miało chyba ułatwić czytelnikom zrozumie jej genezy poprzez podobieństwo do entropii informacyjnej Shannona, jednak inaczej niż entropia, miara ta przyjmuje wartości ujemne.

Podsumowanie

Lektura całego cyklu artykułów składających się na pracę doktorską pozwala spojrzeć na lokalizację fal spinowych z szerokiej perspektywy. Zwłaszcza prace P2-P4 są nowatorskie i (zdaniem recenzenta) poszerzają obecny stan wiedzy o falach spinowych. Choć eksperymentalna weryfikacja przewidywań prac P3 i P4 wydaje się być znacznie trudniejsza niż analogicznych zjawisk optycznych i elektronowych, wszystkie wyniki otrzymane są dla realistycznych parametrów materiałowych, (nieuwzględnienie anizotropii krystalicznej w paskach kobaltu w pracach P3 i P4 wynika chyba z założenia obecności silnego pola zewnętrznego, choć powinno być skomentowane). Autor zapowiada zresztą próbę obserwacji lokalizacji Andersona fal spinowych. W związku z warunkami eksperymentalnej weryfikacji wyników, w pracy P4 brakuje jednak rzetelnego uzasadnienia dla optymistycznego stwierdzenia, „w reżimie $T < 3/4 T_c$, efekty termiczne można zaniedbać, a zastosowanie równania LL jest w pełni usprawiedliwione”, (być może obecnością silnego pola..., ale nie odwołaniem się do referencji [43], poświęconej relacjom pomiędzy stochastycznymi wersjami równania LL).

Prace cyklu doktorskiego wzbudzają podziw dla rozmiaru podjętych wyzwań obliczeniowych. Szczegółowe omówienie metodyki przeprowadzonych przez Doktoranta obliczeń numerycznych w podrozdziałach 3.1 oraz 3.2 rozprawy jest bardzo pomocne w ocenie jego technicznych kompetencji. Potwierdza ono, że Kandydat do stopnia doktora wykazuje się biegłością w programowaniu w środowisku Python3, z wykorzystaniem biblioteki algebry numerycznej, znajomością pakietu do symulacji mikromagnetycznych MuMax3. Informacje zawarte w podziękowaniach i w rozdziale 2 rozprawy wskazują na istotne sukcesy Kandydata w zdobywaniu dofinansowania badań i realizacji stażów badawczych (w ramach prac P1 i P2).

Doktorant skutecznie korzysta z periodycznego rozwiązania problemu mikromagnetycznego (równania Landaua-Lifszycy) dla warstw, twórczo adaptuje pojęcia



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ktt@pwr.edu.pl
www.ktt.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



znane z odległych od magnetyzmu działów fizyki, panuje nad interpretacją dużej ilości danych obliczeniowych. Przy objętości wykonanej pracy, uniknięcie potknięć jest niemal niemożliwe. Jedno wskazane w omówieniu artykułu P2 nie zmienia wartości uzyskanych wyników i znakomitego obrazu pracy Doktoranta.

W ocenie recenzenta, wszystkie trzy kryteria oceny rozprawy doktorskiej w dziedzinie Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, w dyscyplinie Nauki Fizyczne (określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule zakresie sztuki); (i) oryginalności i spójności pracy, (ii) zasadniczego wkładu pracy Kandydata w uzyskane wyniki, (iii) prezentacji ogólnej wiedzy Kandydata są bez wątpienia spełnione przez omawianą rozprawę. Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgra Szymona Mieszczaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Andrzej Zamojski



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434