



Wrocław, 31 lipca 2023 r.

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

**Recenzja osiągnięć naukowych  
dra Pawła Gruszeckiego,  
będących podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego**

**Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. „Wykorzystanie pola magnetycznego i konfiguracji magnetycznej do kontroli propagacji fal spinowych”**

Na osiągnięcie naukowe dra Pawła Gruszeckiego składa się sześć artykułów opublikowanych w okresie lat 2017-2023. W czterech z nich, pracach o charakterze teoretycznym, Habilitant jest pierwszym współautorem, a w dwóch, pracach o charakterze eksperymentalnym z analizą teoretyczną, Habilitant jest drugim współautorem, (co można chyba uznać za typowe w fizyce dowartościowanie składowej eksperymentalnej badań, kosztem części teoretycznej, reprezentowanej przez Pana dra Gruszeckiego). Wskazuje to na jego wiodący udział w realizacji prac, który jest potwierdzony deklaracjami Habilitanta zawartymi w omówieniach każdego z artykułów oraz załączonymi oświadczeniami współautorów. Wszystkie artykuły cyklu są opublikowane w bardzo cenionych czasopismach, przypisanych do dyscypliny Nauki Fizyczne. W Autoreferacie zawarte zostało zwięzłe wprowadzenie do opisu osiągnięcia naukowego, z jasno sprecyzowanym celem naukowym „demonstracji i zrozumienia metod kontroli propagacji fal spinowych przy wykorzystaniu pola magnetycznego”.

Publikacje cyklu są blisko powiązane tematycznie, wszystkie, w opinii recenzenta, w sposób oryginalny i twórczy, traktują zjawiska magnoniczne występujące w warstwach, będących kwazi-dwuwymiarowymi ośrodkami magnetycznie niejednorodnymi, w których niejednorodności efektywnego pola są wprowadzane za pomocą specyficznych rozkładów przestrzennych lub przestrzenno-czasowych zewnętrznego pola magnetycznego lub pola demagnetyzacji (konfiguracji namagnesowania). Takie pole pozwala kontrolować sposób propagacji fal spinowych bez konieczności tworzenia złożonych struktur magnonicznych, jak złącza i kryształy magnoniczne. Podobnie jak niejednorodności struktury materiału magnetycznego, niejednorodności pola mogą prowadzić do przestrzennych zależności prędkości punktów czoła fali spinowej i w efekcie, do uginania fal w ośrodkach ciągłych oraz odbijania i załamania się fal na (powierzchniowych) nieciągłościach pola. Efekty znane z optyki (całkowite wewnętrzne odbicie, miraż, rozpraszanie, modulacja) odtwarzane są w symulacjach numerycznych propagacji fal spinowych. Dodatkowo mogą być modyfikowane przez specyficzne dla ultra-cienkich warstw magnetycznych oddziaływania/anizotropie; poprzeczną anizotropię magnetyczną i anizotropię typu Dzyaloshinskii-Moriya.

**Omówienie poszczególnych artykułów cyklu stanowiącego osiągnięcie naukowe.**

Praca H1 (pt. *Spin-wave beam propagation in ferromagnetic thin films with*



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Instytut Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ift@pwr.edu.pl  
www.ift.pwr.edu.pl  
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-58-51  
Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434





*graded refractive index: Mirage effect and prospective applications*) zawiera numeryczną analizę propagacji fal spinowych i w obecności niejednorodnego pola magnetycznego o rozkładzie ciągłym („gradientowym”) lub nieciągłym. Dla cienkich warstw magnonicznych materiału YIG, za pomocą symulacji mikromagnetycznych propagacji wiązki ze źródła monochromatycznego, demonstrowane są zjawiska odbicia i załamania oraz całkowitego wewnętrznego odbicia od liniowej bariery gwałtownie zmieniającego się pola magnetycznego, pełniących podobną rolę jak powierzchnia rozgraniczenia ośrodków w optyce geometrycznej. Analizowane są różne kształty barier. (i) Skokowa zamiana (nieciągłość) umożliwia formułowanie magnonicznych praw Snella. (ii) Wąski impuls, przy którym ujawnia się efekt Goos-Hanchen rozciągnięcia, odbijającej się lub załamanej wiązki falowej wzdłuż bariery w przylegającym do niej obszarze. (iii) Niegładkość na granicy ośrodka z gradientową zmianą pola magnetycznego, przy której występuje zjawisko mirażu. Dla ośrodków ostatniego typu (z gradientowym rozkładem ciągłego pola magnetycznego), sformułowane i zweryfikowane numerycznie zostało równanie różniczkowe opisujące propagację punktu czoła fali.

Podsumowując, artykuł H1 stanowi weryfikację stosowalności praw optyki geometrycznej w jednorodnym ośrodku – warstwie magnonicznej, w niejednorodnych zewnętrznych polach magnetycznych. Wcześniej znane były podobne efekty odbicia i załamania fal spinowych na granicy dwóch różnych jednorodnych ośrodków ferromagnetycznych, (m. in. dzięki działalności Habilitanta), jednak powierzchnie łączenia takich ośrodków są niedoskonałe, a realizacja gradientowej niejednorodności materiału magnetycznego jest bardzo złożona (np. przy zastosowaniu bombardowania jonami). Autorzy podjęli problem (magnonicznych praw Snella) o fundamentalnym znaczeniu dla realizacji urządzeń magnonicznych, ale też potencjalnie ważny dla modelowania zjawisk magnonicznych w obecności pola demagnetyzacji. Artykuł doczekał się już 16 cytowań (bez autocytowań, wg. Scopus).

W artykule H2, (pt. *Local non-linear excitation of sub-100 nm bulk-type spin waves by edge-localized spin waves in magnetic films*), autorzy analizują możliwość wzbudzenia płaskiej, dwuwymiarowej fali spinowej za pomocą źródła punkowego, znajdującego się na krawędzi płytki ferromagnetycznej, w procesie reemisji z modu krawędziowego. Dwuetapowy proces wykorzystuje nieliniowość dynamiki magnetyzacji w pobliżu krawędzi magnetyka (specyfikę silnie zlokalizowanego modu krawędziowego fal spinowych), która objawia się zdwojeniem częstości drgań składowej magnetyzacji poprzecznej do pola wymuszającego, w stosunku do składowej podłużnej. Poza obszarem krawędzi, drganie składowej podłużnej (normalnej do powierzchni warstwy magnetycznej) jest stłumione przez silne pole magnetostaticzne, a propagująca się fala ma częstość zdwojoną w stosunku do częstości źródła.

Niepozorny wynik wydaje się być bardzo wartościowy, wskazując możliwość redukcji częstotliwości źródła fali spinowej poniżej częstości progowej. Tymczasem, trudność operowania wymuszającym polem magnetycznym z zakresu GHz szybko narasta z częstotliwością. Drobne zdzwienie budzi tylko niska wartość stałej tłumienia Gilberta 0.0001 dla materiału Permalloy, świadomie przyjęta dla symulacji mikromagnetycznych i wynikający z niej, wątpliwy zasięg propagacji fali spinowej. Praca H2 nie ma bezpośredniego powiązania z pracą H1, ale obie stanowią podstawę kolejnego artykułu cyklu habilitacyjnego.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Instytut Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ift@pwr.edu.pl  
www.ift.pwr.edu.pl  
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-58-51  
Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434





Praca H3 (pt. *Inelastic spin-wave beam scattering by edge-localized spin waves in a ferromagnetic thin film*) poświęcona jest odbiciu/rozpraszaniu wiązki fal spinowych na krawędzi cienkiej warstwy ferromagnetycznej Permalloy'u w obecności wzbudzonego modu krawędziowego. Przeprowadzone symulacje mikromagnetyczne ukazują jako wynik niesprężystego rozpraszania, rozdzielenie propagującej się wiązki na wiązkę odbitą (bez zmiany częstości) oraz parę wiązek reemitowanych przez mod krawędziowy, o częstościach pomniejszonej i powiększonej w stosunku do wiązki padającej (o częstość modu krawędziowego). Ubocznym efektem wzbudzenia modu krawędziowego jest dodatkowa emisja objętościowej fali płaskiej o częstości dwukrotnie zdwojonej w stosunku do jego częstości, jak przewiduje to praca H2. W artykule zaproponowano i zweryfikowano numerycznie model analityczny, oparty na technice magnetostatycznych funkcji Greena, umożliwiający wyznaczenie amplitud procesów rozpraszania na modzie krawędziowym.

Analiza procesów odbicia/rozpraszania od krawędzi warstwy magnetycznej pogłębia wiedzę na temat rozszerzeń magnonicznych praw Snella o przypadek dynamicznie zmodyfikowanej (przez obecność modu krawędziowego) powierzchni odbicia. Równocześnie, praca H3 zapoczątkowuje mini-cykl badań (H3-H5) nad propagacją fal spinowych w warstwach jednorodnych strukturalnie, ale z niejednorodnością namagnesowania spontanicznego.

W pracy H4 (pt. *Magnonic band structure in a Co/Pd stripe domain system investigated by Brillouin light scattering and micromagnetic simulations*) studiowana jest struktura pasmowa spektrum fal spinowych w ultra-cienkiej warstwie ferromagnetycznej położonej na powierzchni ciężkiego metalu (warstwa kobaltu na powierzchni palladu), tj. w warstwie z poprzeczną anizotropią magnetyczną i silnym, indukowanym przez międzypowierzchnię, oddziaływaniem Dzyaloshinskii-Moriya (anizotropią wymienną). Współobecność obu anizotropii prowadzi do spontanicznej kreacji paskowej, chiralnej struktury domen magnetycznych o niewielkim okresie przestrzennym. W warstwach tego typu, przewidywane były niskoenergetyczne wzbudzenia spinowe postaci fal o pasmowej strukturze spektrum częstości, analogiczne jak w kryształach magnonicznych, tj. periodycznych układach magnetycznych o niejednorodnej strukturze. Wyznaczone numerycznie i eksperymentalnie pasma spektralne odpowiadają modom powierzchniowym i poprzecznym stojącym falom spinowym.

Praca dostarczyła weryfikacji eksperymentalnej i komputerowej (symulacje mikromagnetyczne) stabilności fal spinowych propagujących się w warstwie namagnesowanej niejednorodnie. Według wiedzy recenzenta, znajomość fal spinowych w takich układach, ograniczała się wcześniej do modów zlokalizowanych, jak mody krawędziowe, czy mody Winter'a, występujące w obszarze ściany domenowej. Nowego typu periodyczny potencjał magnoniczny w strukturalnie jednorodnej warstwie to cenny obiekt, zasadniczo upraszczający falowody z kontrolowaną prędkością grupową fal spinowych. Praca została zacytowana 24 razy (bez autocytowań, wg. Scopus).

Praca H5 (pt. *Influence of Dzyaloshinskii-Moriya interaction and perpendicular anisotropy on spin waves propagation in stripe domain patterns and spin spirals*) jest kontynuacją pracy H4. O ile wcześniejsze badania numeryczne poświęcone były falom spinowym w



University Network for Innovation,  
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Instytut Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ift@pwr.edu.pl  
www.ift.pwr.edu.pl  
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434





konkretnej warstwie Co/Pd, analizowanym na potrzeby weryfikacji eksperymentu, w artykule H5 przestudiowano strukturę najniższych pasm spektralnych modów spinowych w zależności od parametrów anizotropii; stałej poprzecznej anizotropii magnetycznej i stałej oddziaływania Dzyaloshinskii-Moriya. Obliczenia przeprowadzono dla ultra-cienkiej warstwy kobaltu, zatem wartości stałych anizotropii są zdeterminowane rodzajem podłoża. Od wartości stałych anizotropii zależą szczegóły paskowych tekstur magnetycznych; mogą one być ciągami domen z bardzo wąskimi ścianami domenowymi albo spiralnymi strukturami magnetyzacji, bez wyraźnego rozdzielenia domen i ścian domenowych. Wąskie ściany domenowe umożliwiają jednokierunkową propagację modów zlokalizowanych (magnonów Winter'a), a ich pary mogą służyć za potencjał kwantujący fale spinowe w osi poprzecznej do kierunku propagacji. Ukazana jest możliwość głębokiej inżynierii struktury pasmowej spektrum fal spinowych w szerokim zakresie częstości, w tym inżynierii topologii tej struktury w odniesieniu do pasm magnonów Winter'a.

Rezultaty pracy H5 znacząco rozszerzają wiedzę o wzbudzeniach spinowych w warstwach z poprzeczną anizotropią magnetyczną i oddziaływaniem Dzyaloshinskii-Moriya. Artykuł zawiera istotne przewidywania co do możliwości wzbudzania fal spinowych o bardzo różnych charakterach, przez co łatwo rozróżnialnych. Taka cecha może być wykorzystana np. w konstrukcji sensorów.

W artykule H6 (pt. *Real-space observation of magnon interaction with driven space-time crystals*) kontynuowane są rozważania propagacji fal spinowych w niejednorodnych magnetycznie, lecz jednorodnych strukturalnie warstwach. Artykuł otwiera badania nad własnościami fal spinowych w magnonicznych kryształach czasowo-przestrzennych. Eksperyment wspomagany symulacjami mikromagnetycznymi jest pierwszą demonstracją takich fal o okresie przestrzennym dwukrotnie mniejszym od periodu dynamicznego kryształu. Magnetyczny kryształ czasowo-przestrzenny istnieje przy częstościach bliskich częstości rezonansu magnetycznego, a symulacje mogą być kluczowe dla wyboru jego parametrów, przy uniknięciu niestabilności typu Suhl'a.

Magnony w kryształach czasowo-przestrzennych są ciekawymi obiektami, umożliwiającymi bezpośrednią obserwację ewolucji w obecności dynamicznych pól cechowania. Praca H6 (z 2021 r.) ma pionierski charakter i jest już zacytowana 19 razy (bez autocytowań, wg. Scopus).

### Podsumowanie

Metodologia symulacji mikromagnetycznych oraz metody analizy danych wyjściowych są wspólne dla całego cyklu artykułów. Habilitant konsekwentnie rozwiązuje numerycznie pełne równanie Landaua-Lifszycza. Jest to niezbędne z uwagi na efekty nieliniowości, obecne zwłaszcza w opisie procesów wielomagnonowych i modów krawędziowych fal spinowych (prace H2 i H3), ale też silnie zlokalizowanych fal spinowych w niektórych układach domen paskowych (praca H5), oraz w opisie zjawisk z pobliża rezonansu ferromagnetycznego (praca H6). Nieliniowość jest także potencjalnie istotna w pracy H1, gdzie symulowana jest propagacja nie promieni, ale wiązek fal spinowych.

Pomiędzy pracami H2 i H3 występuje bezpośrednie powiązanie, polegające na poszerzeniu badań procesu reemisji fali spinowej o nowy bardziej złożony proces



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Instytut Fizyki Teoretycznej  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ift@pwr.edu.pl  
www.ift.pwr.edu.pl  
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-58-51  
Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434





wielomagnonowy w kolejnej z prac. Podobnie prace H4 i H5 są bezpośrednio powiązane poprzez rozszerzenie badań fal spinowych w warstwach z poprzeczną anizotropią magnetyczną i oddziaływaniem Dzyaloshinskii-Moriya o badania układów ze zmienionymi parametrami materiałowymi w kolejnej z prac. Pozostałe powiązania pomiędzy artykułami nie są już tak bezpośrednie, co w odczuciu recenzenta, nie wpływa jednak na ogólne wrażenie tworzenia logicznej struktury cyklu habilitacyjnego. Stopień złożoności pola magnetycznego, generującego efekty magnoniczne, w kolejnych artykułach stopniowo narasta, od statycznych modeli barier, przez pole demagnetyzacji na krawędziach warstw i w układach domen paskowych, do pól periodycznych w czasie i przestrzeni. Kolejne prace wykorzystują elementy modelowania zastosowane w poprzednich. W opinii recenzenta, cykl spełnia kryterium powstania w ramach świadomego, zaplanowanego procesu badawczego, podnoszone w zaleceniach Rady Doskonałości Naukowej.

Cykl artykułów zawiera rozwiązania problemów ważkich, umożliwiających dalsze badania aplikacyjne. Sądząc z przeglądu pozostałego dorobku naukowego Habilitanta, cykl habilitacyjny mógłby zostać znacznie poszerzony, jednak ze względu na określone w Ustawie kryterium znacznego wkładu w rozwój określonej dyscypliny naukowej, wybór sześciu najważniejszych prac jest zrozumiałą decyzją. Znaczący wkład w rozwój dyscypliny Nauki Fizyczne i magnoniki w szczególności jest też potwierdzony wysokimi wskaźnikami bibliometrycznymi. Słabszą stroną osiągnięcia naukowego jest obecność na liście współautorów wszystkich artykułów poza jednym, najnowszym promotora pracy doktorskiej Habilitanta. Nie stanowi to jednak przeszkody formalnej w ocenie osiągnięcia, a w ostatnim czasie Pan dr Gruszecki zaczyna wykazać w swoim dorobku publikacyjnym niezależną działalność, potwierdzając aspiracje do pełnej samodzielności naukowej.

### Inne osiągnięcia i aktywność naukowa

Stopień naukowy doktora w dziedzinie Nauk Fizycznych w zakresie Fizyki został nadany Panu Pawłowi Gruszeckiemu w 2017 roku, uchwałą Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, co wyczerpuje przesłankę do nadania stopnia doktora habilitowanego określoną w art. 219 ust. 1 pkt 1 Ustawy.

Przesłankami określonymi w art. 219 ust. 1 pkt 2-3 Ustawy jest wykazywanie się przez Habilitanta innymi osiągnięciami, stanowiącymi znaczny wkład do rozwoju dyscypliny oraz istotną aktywnością naukową, realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej. Te warunki są spełnione ze znacznym naddatkiem, co ukazują następujące fakty.

- (i) Będąc związanym z grupą badawczą prof. Macieja Krawczyka od początku kariery naukowej w dziedzinie/dyscyplinie Nauki Fizyczne, odbył półroczny staż podoktorski w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu (w 2020 r.), a także krótkich, jedno-, dwu- i trzymiesięcznych wizyt badawczych w: Donieckim Instytucie Fizyczno-Technicznym Narodowej Akademii Nauk Ukrainy (w 2013 r.), Instytucie Radio-inżynierii i Elektroniki im. Koletnikowa Rosyjskiej Akademii Nauk w Moskwie (w 2013 r.), Instytucie Magnetyzmu Narodowej Akademii Nauk Ukrainy w Kijowie (w 2015 r.), Narodowym Centrum Nauk Podstawowych im. N. S. Bose w Kalkucie (w 2016 r. i w 2018 r.) oraz w Instytucie Politechnicznym im. Igora Sikorskiego w Kijowie (w 2016 r. i



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Instytut Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ift@pwr.edu.pl  
www.ift.pwr.edu.pl  
www.pwr.edu.pl

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

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434





w 2018 r.). Wszystkie liczne staże naukowe miały miejsce w uznanych grupach badawczych, zajmujących się magnoniką i owocowały publikacjami naukowymi.

- (ii) Oprócz publikacji włączonych do ocenianego osiągnięcia naukowego, Habilitant ma w dorobku współautorstwo aż 40 opublikowanych artykułów naukowych, (wszystkie w wysoko ocenianych czasopismach naukowych, przypisanych do dyscypliny Nauki Fizyczne) i 7 rozdziałów monografii naukowych. Prace dotyczą różnych aspektów magnoniki: analogii zjawisk magnonicznych z optyką geometryczną i falową, falam spinowym w kryształach magnonicznych, w układach o ograniczonej geometrii, kryształach czasoprzestrzennych, rozpraszaniu fal spinowych, a jedna praca dotyczy nanoanten fotonicznych. Zwłaszcza seria prac 8 prac poświęconych „optyce” fal spinowych, a nie wliczonych do cyklu habilitacyjnego zasługuje na dostrzeżenie. Jedna z tych prac została doceniona zaproszeniem do bardzo prestiżowej dla środowiska publikacji przeglądowej (A. Chumak, et al. *Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing*. IEEE Trans. Magn. 58, 0800172 (2022)). Produktowność publikacyjna Pana dra Gruszeckiego jest bardzo wysoka i przyspiesza, a indeks Hirscha wynosi 16 wg. WoS i 17 wg. Scopus. To rzadko spotykane wartości, uzyskane w krótkim czasie.
- (iii) Kandydat jest kierownikiem grantu NCN i grantu ID-UB, był uczestnikiem kilku innych grantów, w tym trzech międzynarodowych. Otrzymał wiele nagród i stypendiów. Czterokrotnie wygłosił zaproszone referaty konferencyjne, w tym podczas prestiżowej konferencji MMM-Intermag, a dziewięciokrotnie wygłosił referaty seminaryjne w różnych instytucjach naukowych. Był uczestnikiem lub organizatorem bardzo wielu wydarzeń naukowych. Recenzował artykuły naukowe dla prestiżowych czasopism (w tym Nature Communications, Physical Review Letters, Advanced Functional Materials), był recenzentem pracy doktorskiej.
- (iv) Kandydat posiada standardowe, ale istotne doświadczenie dydaktyczne, w tym kilkakrotnie prowadził wykłady specjalistyczne Elektronika cyfrowa i automatyka, a raz Automatyka układów fizycznych. Kilkakrotnie poprowadził wydarzenia popularyzatorskie. Był opiekunem czterech studenckich prac dyplomowych i jest promotorem pomocniczym aż trzech doktoratów.

**Podsumowując, recenzent wyraża zdecydowaną opinię, że dorobek Pana dra Pawła Gruszeckiego spełnia wszystkie wymagania dla nadania Mu stopnia doktora habilitowanego określone w art. 219 ust. 1 pkt 1-3 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami).**

*Andrzej Jamnik*



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Instytut Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.ift@pwr.edu.pl  
www.ift.pwr.edu.pl  
www.pwr.edu.pl

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

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434