

Warszawa, 8 sierpnia 2023 r.

prof. dr hab. Andrzej Wawro
Instytut Fizyki PAN w Warszawie

**Recenzja osiągnięcia habilitacyjnego dra Pawła Gruszeckiego pt.:
*Wykorzystanie pola magnetycznego i konfiguracji magnetycznej do
kontroli propagacji fal spinowych***

Przedmiotem niniejszej oceny jest przedstawione przez dra Pawła Gruszeckiego jego habilitacyjne osiągnięcie naukowe w związku z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.

Profil naukowy Habilitanta

Dr Paweł Gruszecki początkowo podjął studia na Politechnice Poznańskiej (PP) i w lutym 2010 r. uzyskał tytuł zawodowy inżyniera automatyki i zarządzania, a w kolejnym roku – magistra inżyniera automatyki i robotyki. W międzyczasie rozpoczął równoległe studia na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (UAM). W roku 2012 uzyskał licencjat z fizyki, a na początku 2015 r. tytuł zawodowy magistra fizyki. Dwa lata później, po obronie rozprawy zatytułowanej: *Theoretical study of the spin wave beams in thin ferromagnetic films*, został nadany mu stopień naukowy doktora nauk fizycznych. Należy nadmienić, że rozprawa ta uzyskała wyróżnienie. Habilitant związany jest zawodowo z UAM od roku 2014 będąc zatrudnionym początkowo na stanowisku asystenta, a po uzyskaniu doktoratu – na stanowisku adiunkta.

Kandydat przebywał na ok. 10 krótkoterminowych (trwających od kilkunastu dni do dwóch miesięcy) zagranicznych stażach naukowych w różnych ośrodkach badawczych w Rosji, Ukrainie i Indiach. Większość z nich odbył w okresie poprzedzającym uzyskanie stopnia doktora. Po tym wydarzeniu miały miejsce jeszcze dwa staże: jeden w Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (Ukraina), a drugi, półroczny, na stanowisku post-doc w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN. Znakomita większość tych pobyty kończyła się uzyskaniem wyników charakteryzujących naturę fal spinowych, które były później przedstawione w opublikowanych pracach współautorstwa Kandydata (również habilitacyjnych).

Tematyka prac habilitacyjnych

W zasadzie cała aktywność naukowa dra Pawła Gruszeckiego, jeszcze przed uzyskaniem doktoratu, jak również i w późniejszym okresie, była poświęcona mikromagnetycznym obliczeniom numerycznym, których wyniki opisywały właściwości fal spinowych. Autor badał czysto teoretycznie ich zachowanie w różnorodnych

materiałach i warunkach. Ponadto część prac powstała we współpracy z zespołami eksperymentalnymi. Modelowanie teoretyczne pozwalało na głębszą i pewniejszą interpretację dokonanych obserwacji.

Fale spinowe są dynamicznym zaburzeniem namagnesowania o częstotliwościach mikrofalowych, propagującym się w materiałach ferromagnetycznych. Można je rozpatrywać jako strukturę falową, a także jako kwazicząstki – magnony. Wraz z rozwojem nowej dziedziny – magnoniki – zainteresowanie nimi gwałtownie rośnie. Fale spinowe są przedmiotem intensywnych badań prowadzonych zarówno pod kątem poznawczym, jak i aplikacyjnym. Główne oczekiwania dotyczą nowej metody przesyłu informacji – fale spinowe mogą być ich nośnikami – oraz wykonywania przy ich wykorzystaniu operacji logicznych. Ich podstawową zaletą jest oddziaływanie z promieniowaniem elektromagnetycznym, istotnie obniżone zapotrzebowanie na energię niezbędną do ich propagacji oraz możliwość rozchodzenia się ich w materiałach przewodzących oraz izolatorach. Złożoność efektów fizycznych związanych z transmisją fal spinowych jest bardzo bogata. Do ich kontrolowanej generacji, propagacji i odczytu niezbędne są materiały o złożonej strukturze wewnętrznej (budowa materiału i jego zmienne parametry) jak i zewnętrznej (kształt materiału nadany na drodze litograficznej). Symulowanie numeryczne rozchodzenia się fal spinowych w różnych warunkach jest tematyką aktywności naukowej habilitanta, opisaną także w wybranych pracach.

Do szczegółowej oceny dr Paweł Gruszecki wybrał zestaw 6 prac habilitacyjnych, których najistotniejszą zawartość merytoryczną omówię pokrótce poniżej:

- [H1] P. Gruszecki, M. Krawczyk; **Spin-wave beam propagation in ferromagnetic thin films with graded refractive index: Mirage effect and prospective applications**; *Physical Review B* **97**, 094424 (2018).
- [H2] P. Gruszecki, I. L. Lyubchanskii, K. Y. Guslienko, M. Krawczyk; **Local non-linear excitation of sub-100 nm bulk-type spin waves by edge-localized spin waves in magnetic films**; *Applied Physics Letters* **118**, 062408 (2021).
- [H3] P. Gruszecki, K. Y. Guslienko, I. L. Lyubchanskii, M. Krawczyk; **Inelastic spin-wave beam scattering by edge-localized spin waves in a ferromagnetic thin film**; *Physical Review Applied* **17**, 044038 (2022).
- [H4] C. Banerjee, P. Gruszecki, J. W. Klos, O. Hellwig, M. Krawczyk, A. Barman; **Magnonic band structure in a Co/Pd stripe domain system investigated by Brillouin light scattering and micromagnetic simulations**; *Physical Review B* **96**, 024421 (2017).
- [H5] P. Gruszecki, J. Kisielewski; **Influence of Dzyaloshinskii–Moriya interaction and perpendicular anisotropy on spin waves propagation in stripe domain patterns and spin spirals**; *Scientific Reports* **13**, 1218 (2023).

[H6] N. Träger, P. Gruszecki, F. Lisiecki, F. Groß, J. Förster, M. Weigand, H. Głowiński, P. Kuświk, J. Dubowik, G. Schütz, M. Krawczyk, J. Grafe; **Real-space observation of magnon interaction with driven space-time crystals**; *Physical Review Letters* **126**, 057201 (2021).

W pracy [H1] autorzy omawiają wpływ przestrzennej zmiany pola magnetycznego na rozchodzenie się fal spinowych. Efekt zmiany natężenia pola jest analogiczny do zmiany współczynnika załamania ośrodka, w którym propaguje się fala. Dla stałej wartości wektora falowego ze wzrostem pola rośnie częstotliwość fal spinowych. Rozważano różne profile pola: zmianę gradientową (rozciągniętą w przestrzeni próbki) i skokową (gwałtowną) w relacji do długości fali spinowej. Lokalne zmniejszenie pola wykazuje pewną analogię do efektu studni energetycznej, prowadzącą do lokalizacji fal spinowych. W przypadku słabej gradientowej zmiany zaobserwowano, że wiązka fal spinowych ugina się sukcesywnie i prowadzi do efektu mirażu. Wyraźne odbicia fali nie są obserwowane. Widoczne jest również zwężenie szerokości wiązki fal w obszarze niejednorodności pola. Schodkowy profil pola może prowadzić natomiast do ostrych odbić wiązki. Wzrost gradientu pola powoduje, że zachowanie układu stopniowo ewoluuje od gradientowego do schodkowego. Istotną rolę odgrywa również wielkość zmiany amplitudy pola. Wpływa ona na relacje natężenia wiązki ugiętej i odbitej. Coraz większy wzrost amplitudy powoduje wzmacnianie wiązki odbitej i osłabianie ugiętej. Przez odpowiedni dobór charakteru przestrzennych zmian pola w relacji do długości fal spinowych można uzyskać wiele ciekawych efektów. Pokazano, że obszar o gradientowej zmianie pola działa jak soczewka rozpraszająca.

Praca habilitacyjna [H2] poświęcona jest efektom pojawiającym się na krawędzi próbki. Jednorodnie namagnesowana nieskończona cienka warstwa charakteryzuje się polem odmagnesowania zależnym od kierunku namagnesowania warstwy. W przypadku występowania krawędzi próbki pole odmagnesowania staje się niejednorodne, modyfikując tym samym pole efektywne determinujące propagację fal spinowych. W pracy tej analizowano rozchodzenie się fal spinowych zlokalizowanych na krawędzi warstwy wskutek wspomnianej niejednorodności, która jest namagnesowana w płaszczyźnie i prostopadle do krawędzi. Pokazano, że krawędziowa fala spinowa ma częstotliwość wyraźnie niższą niż fala rozchodząca się wewnątrz warstwy. W pewnym zakresie wzbudzających częstotliwości można zatem generować jedynie fale krawędziowe. Punktowe wzbudzenie fali krawędziowej prowadzi również do powstania fal płaskich o podwojonej częstotliwości w porównaniu do fal krawędziowych i ukośnie rozchodzących się w głąb warstwy. Wywnioskowano, że oscylujący komponent namagnesowania fali krawędziowej, równoległy do pola efektywnego jest odpowiedzialny za wzbudzenie wspomnianych fal płaskich.

Efekty interakcji fal spinowych rozchodzących się w warstwie z falami krawędziowymi zostały opisane w pracy [H3]. Fale spinowe przychodzące z wnętrza warstwy odbijały się od jej krawędzi oddziałując jednocześnie ze zlokalizowanymi falami krawędziowymi. Wyraźnie pokazano nieelastyczny charakter tych oddziaływań. W spektrum fal odbitych pojawiają się stany rezonansowe o obniżonych

i podwyższonych częstotliwościach w odniesieniu do fali padającej o wartość częstotliwości fali krawędziowej. Pokazano również, że zmiana kierunku rozchodzenia się fali krawędziowej na przeciwny znacząco zmienia kierunki wiązek rozproszonych nieelastycznie w stosunku do wiązki odbitej elastycznie. Silny wpływ na kierunek wiązek rozproszonych wywiera również zmiana częstotliwości wiązki fali krawędziowej. Właściwość ta pozwala na uzyskanie efektu demultipleksacji sygnału fali krawędziowej – rozdzielenia sygnałów pochodzących od fal o różnych częstotliwościach.

Kolejna praca [H4] została przygotowana we współpracy z grupą eksperymentalną. W tym przypadku wyniki symulacji mikromagnetycznych korelowane były z rezultatami doświadczalnymi i pozwalały na głębsze rozumienie obserwowanych zjawisk. Badana struktura wielowarstwowa Co/Pd cechowała się prostopadłą anizotropią magnetyczną (PMA). W stanie remanencyjnym formowała się domenowa struktura paskowa. Z punktu widzenia magnoniki taka konfiguracja tworzyła kryształ magnoniczny, w którym jeden z parametrów, jakim był kierunek namagnesowania zmieniał się periodycznie. Ponadto skrętność namagnesowania w ścianach domenowych również wykazywała regularność. Takie periodyczne układy magnetyczne mogą istotnie modyfikować propagację fal spinowych. Pomiary i symulacje mikromagnetyczne zostały przeprowadzone dla trzech przypadków. Rozchodzenie się fal spinowych w jednorodnym magnetycznie materiale w obecności pola magnetycznego (konfiguracja Damona-Eshbacha) było w pewnym sensie modelem referencyjnym, występującym bez magnetycznej strukturyzacji przestrzennej. Widoczne były dwa pasma, z czego niższe wykazywało minimum. Gdy fale spinowe rozchodziły się w stanie remanencyjnym (brak pola) w kierunku prostopadłym do pasków domenowych, zaobserwowano otwieranie się przerw energetycznych, które prowadziło do powstania struktury pasmowej magnonów, oczekiwanej dla kryształów magnonicznych. Z kolei w przypadku propagacji fal spinowych równoległe do struktury pasmowej fale z dwóch najniższych pasm propagowały głównie wzdłuż ścian domenowych. Zależność amplitudowa sugerowała, że taka propagacja ma charakter jednokierunkowy. Należy podkreślić bardzo dobrą zgodność występującą pomiędzy wynikami eksperymentu i symulacji, która dowodzi, że zaproponowany model teoretyczny badanych struktur był bardzo realistyczny.

W pracy [H5], ponownie czysto teoretycznej, wprowadzono dodatkowe oddziaływanie Dzyaloshinskii-Moriya (DMI). W ostatnim czasie jest ono również intensywnie badane eksperymentalnie ze względu na pojawiające się ciekawe konfiguracje magnetyczne, np.: spirale spinowe czy skyrmiony. Jednym z układów wykazujących taki efekt są warstwy wielokrotne, w których warstwa magnetyczna jest otoczona asymetrycznie przez warstwy niemagnetyczne metali ciężkich, charakteryzujących się wysokim sprzężeniem spin-orbita. Obecność DMI manifestuje się dwoma podstawowymi zjawiskami: tendencją do powstawania stabilnych skręconych konfiguracji spinowych oraz złamaniem kierunkowej symetrii propagacji fal spinowych. W omawianej pracy jej autorzy zajęli się analizą generowanej tekstury magnetycznej i propagacją fali spinowej w tej teksturze w zależności od wielkości PMA i DMI. Pokazano, że mogą formować się zarówno spirale spinowe, jak i domeny paskowe, tworząc w ten sposób jednowymiarowy kryształ magnoniczny. Zademonstrowano również, że mody rezonansowe fal spinowych są selektywne – silnie zależą od kierunku

polaryzacji wzbudzającego pola mikrofalowego. Podobnie, jak w poprzedniej pracy habilitacyjnej [H4], analizowano rozchodzenie się fal spinowych w kierunkach równoległych i prostopadłych do magnetycznej modulacji. W kierunku modulacji przerwy energetyczne mogą otwierać się i zamykać, prowadząc jednocześnie do zmiany kolejności pasm, podobnie jak to ma miejsce w materiałach topologicznych. Z kolei dla kierunku prostopadłego pokazano selektywność kierunkową propagujących fal, wskazując na możliwość pojawienia się efektu kanałowania.

Ostatnia praca [H6], będąca wynikiem współpracy grupy eksperymentalnej i teoretycznej, rozpatruje najbardziej złożoną sytuację – wpływ jednoczesnej przestrzennej i czasowej modulacji magnetycznych parametrów materiału na rozchodzenie się fal spinowych. Materiał taki można uzyskać przez naświetlanie (pompowanie) promieniowaniem mikrofalowym miękkiego magnetycznie materiału (np. permalaju). W ten sposób można wytworzyć kryształy magnoniczne o zmiennych w czasie i przestrzeni parametrach (kryształy rekonfigurowalne). Efekt takiego czasowo-przestrzennego kryształu magnonicznego uzyskano powyżej pewnej amplitudy wzbudzającego pola mikrofalowego. Rozpraszanie się fal spinowych na takiej dynamicznej strukturze magnetycznej skutkowało pojawieniem się modów o długościach dwukrotnie mniejszych niż wynikałoby to z relacji dyspersji uzyskanej dla jednorodnie namagnesowanego falowodu. Podobnie, jak w przypadku pracy [H4], również i tu uzyskano bardzo dobrą zgodność pomiędzy wynikami eksperymentu i symulacji mikromagnetycznych.

Wybrane prace habilitacyjne tworzą logiczny cykl artykułów opisujących progresywne badania propagacji fal spinowych w układach o coraz większym stopniu złożoności. Habilitant rozpoczyna od wyjaśnienia jak wpływa na nią statyczna przestrzenna zmiana jednego z podstawowych parametrów, jakim jest namagnesowanie. W kolejnym kroku wprowadza efekt krawędzi próbki i pokazuje pojawienie się fal krawędziowych. Następna praca charakteryzuje oddziaływanie fal przychodzących z głębi warstwy z krawędziowymi. W dwóch kolejnych pokazany jest wpływ periodycznej struktury domenowej na rozchodzenie się fal spinowych, dodatkowo modyfikowanej stabilizującym oddziaływaniem DMI. Dotychczasowe rozważania dotyczyły stałych w czasie modyfikacji przestrzennych namagnesowania materiału. Natomiast w ostatniej pracy dodatkowo wprowadzono zmienną w czasie modulację przestrzenną. Przedstawione wyniki pokazują jak sukcesywnie rosnąca złożoność modyfikacji właściwości materiału wzbogaca efekty związane z propagacją w nim fal spinowych.

Z deklaracji Habilitanta dotyczących zakresu jego wkładu oraz podobnych oświadczeń złożonych przez współautorów poszczególnych prac wynika, że jego rola była kluczowa w powstawaniu prac habilitacyjnych. Zawsze formułował on problem badawczy, planował i wykonywał symulacje mikromagnetyczne, interpretował uzyskane wyniki i brał udział w przygotowaniu manuskryptu do publikacji. We wszystkich pracach teoretycznych jest pierwszym współautorem, a w trzech z nich – autorem korespondencyjnym. Z kolei w pracach przygotowanych z grupami eksperymentalnymi jest pierwszym na liście spośród współautorów odpowiedzialnych

za modelowanie mikromagnetyczne. Prace habilitacyjne zostały opublikowane w uznanych przez światowe środowisko fizyczne, wysoko notowanych i recenzowanych czasopismach, takich jak: *Physical Review B* (i.f. = 4,036), *Physical Review Applied* (4,985) czy *Physical Review Letters* (9,161). Starsze prace znalazły duże uznanie w społeczności zajmującej się badaniami fal spinowych zilustrowane wysoką ich cytawalnością, przekraczającą liczbę 20.

Pozostała aktywność publikacyjna

Oprócz wybranych prac habilitacyjnych po uzyskaniu stopnia doktora Kandydat został współautorem około 20 prac naukowych opublikowanych w wysoko notowanych czasopismach o zasięgu światowym, takich jak: *ACS Nano* (15,9), *Nanoscale* (7,8) czy *Advanced Electronic Materials* (7,3). Tematyka tych artykułów związana była z falami spinowymi w kontekście różnych zagadnień, m.in.: optyki fal spinowych, ich dynamiki w kryształach magnonicznych, nanorezonatorów czy propagacji w układach o ograniczonej rozmiarowości. Ponadto jest on współautorem 7 prac opublikowanych w postaci rozdziałów książkowych bądź artykułów przeglądowych typu mapa drogowa. Na konferencjach międzynarodowych w tym okresie wygłosił 4 referaty zaproszone, 11 referatów zgłoszonych oraz przedstawił kilka prezentacji plakatowych. Wygłosił też kilka seminariów w ośrodkach polskich i zagranicznych. Bogaty dorobek publikacyjny Habilitanta uzyskany po doktoracie świadczy o jego bardzo aktywnej działalności naukowej w tym okresie.

Wyniki bibliometryczne

W celu ilościowej oceny publikacyjnej w ostatnich latach coraz częściej używa się statystyki bibliometrycznej. Wg oświadczenia Habilitanta jego prace były cytowane 587 razy (dane z bazy *Web of Science*), w tym 478 razy bez uwzględniania autocytowań, a indeks Hirscha osiągnął wartość 16. W dniu pisania niniejszej recenzji parametry te wynosiły odpowiednio (baza *Web of Science*, tytuł kwerendy: *Author: Gruszecki Pawel*): 645, 523, 16. Na obecnym etapie kariery naukowej wynik ten plasuje się powyżej średniej.

Działalność dydaktyczna i recenzencka

Jako pracownik naukowy jednostki dydaktycznej, jaką jest UAM, Habilitant prowadził liczne zajęcia ze studentami w latach 2013-2022. Obejmowały one laboratoria, ćwiczenia i wykłady prowadzone na Wydziale Fizyki UAM. Ponadto pełnił lub pełni naukowe funkcje opiekuńcze nad indywidualnymi studentami. Obecnie jest promotorem pomocniczym trzech prac doktorskich, był promotorem pracy licencjackiej oraz pełnił rolę opiekuna naukowego dwóch prac magisterskich i jednej licencjackiej.

Do potencjalnych obowiązków naukowców należy również działalność recenzencka. Dr Paweł Gruszecki był recenzentem zagranicznym jednej pracy doktorskiej (przygotowanej na Słowacji) oraz pracy inżynierskiej wykonanej w jednostce macierzystej. Był recenzentem wielu artykułów nadesłanych do publikacji w renomowanych czasopismach. Z jego pomocy korzystały takie wysoko uznane periodyki naukowe, jak: *Nature Communications*, *Physical Review Letters*, *Advanced*

Functional Materials, Physical Review Applied, Physical Review B. Powierzenie funkcji recenzenta wiąże się z dobrą rozpoznawalnością Habilitanta przez środowisko naukowe przedmiotowej dziedziny.

Rozwój warsztatu naukowego i zdobywanie funduszy

Do kolejnych obowiązków rzetelnego pracownika naukowego należy rozwój warsztatu naukowego oraz zdobywanie funduszy. Obecnie Habilitant jest kierownikiem własnego projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w konkursie Sonata. W kilku innych projektach pełnił rolę wykonawcy. Choć nie jest wspomniane w przesłanych materiałach habilitacyjnych, należy podkreślić, że dr Paweł Gruszecki tworzy fragmenty oprogramowania do symulacji mikromagnetycznych, którymi chętnie dzieli się z innymi pracownikami naukowymi.

Promowanie nauki

Zadania działalności naukowej obejmują również promowanie i popularyzowanie nauki. Do jednych z ważniejszych należy m. in. organizacja konferencji naukowych. Habilitant był współorganizatorem dwóch konferencji krajowych i jednej zagranicznej (Ukraina). Aktywnie brał udział w popularyzacji nauki prowadząc pokazy doświadczalne i wykłady w czasie akcji o charakterze „otwartych drzwi nauki”.

Nagrody i wyróżnienia

Naukowa aktywność dra Pawła Gruszeckiego i uzyskane przez niego wyniki zostały również docenione przez organizacje przyznające wyróżnienia. W okresie po uzyskaniu stopnia doktora został on uhonorowany kilkoma nagrodami. Część z nich była związana z rozprawą doktorską obronioną z wyróżnieniem. W późniejszym czasie Habilitant otrzymał dwa dwuletnie stypendia będące wsparciem najbardziej produktywnej naukowo młodej kadry. Ponadto zespół, w którym pracuje, uzyskał dwukrotnie nagrody Rektora UAM.

Ocena końcowa

Osiągnięcia naukowe dra Pawła Gruszeckiego po nadaniu mu stopnia doktora nauk fizycznych stanowią oryginalny i istotny wkład w badania dynamicznych właściwości magnetycznych struktur cienkowarstwowych. Przedstawione do oceny prace habilitacyjne tworzą cykl sześciu artykułów powiązanych ze sobą w logiczny sposób. Zostały one opublikowane w renomowanych, recenzowanych czasopismach naukowych o zasięgu globalnym, charakteryzujących się wysokim czynnikiem wpływu (*impact factor*). Prace te opisują zachowanie się fal spinowych w coraz bardziej złożonych strukturalnie materiałach. Uzyskane wyniki mają aspekt poznawczy oraz potencjał aplikacyjny. Habilitant posiada tytuł doktora nauk fizycznych. Po uzyskaniu doktoratu wykazał się również aktywnością naukową realizowaną w innych niż macierzysty UAM instytucjach naukowych, zarówno zagranicznych jak i krajowych. Kandydat może się pochwalić innymi niż habilitacyjne licznymi artykułami opublikowanymi po uzyskaniu stopnia doktora. Ma bogate doświadczenie dydaktyczne. Zdobywał fundusze na prowadzenie badań i brał udział w promowaniu nauki. Wszystkie jego aktywności i osiągnięcia świadczą, że Habilitant jest pełni dojrzałym, samodzielnym

pracownikiem naukowym. Wypełnia on również wszystkie wymagania zawarte w art. 219 Ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r.

Po zapoznaniu się przedstawionymi osiągnięciami naukowymi uważam, że nadanie drowi Pawłowi Gruszeckiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne jest w pełni uzasadnione i zdecydowanie popieram jego wniosek o przyznanie tego stopnia.