



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy: mgr Mathieu Moalic

Tytuł rozprawy: *Numerical Investigations of Collective Spin-Wave Dynamics in Complex Magnetic Textures and Patterned Ferromagnetic Films*

Dziedzina: Nauki ścisłe i przyrodnicze

Dyscyplina: Nauki fizyczne

Podmiot prowadzący postępowanie: Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Promotor: prof. dr hab. Maciej Krawczyk

Promotor pomocniczy: dr Mateusz Zelent

Recenzent: dr hab. Mirosław Werwiński, prof. IFM PAN

Jednostka zatrudnienia recenzenta: Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk

Ocena formalna i merytoryczna rozprawy

Rozprawę stanowi zbiór pięciu opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych:

- 4.1. M. Moalic, M. Krawczyk, M. Zelent, *Spin-wave spectra in antidot lattice with inhomogeneous perpendicular magnetic anisotropy*, J. Appl. Phys. 132 (2022) 213901.
- 4.2. M. Moalic, M. Zelent, K. Szulc, M. Krawczyk, *The role of non-uniform magnetization texture for magnon–magnon coupling in an antidot lattice*, Sci. Rep. 14 (2024) 11501.
- 4.3. M. Moalic, Y. Patat, M. Zelent, M. Krawczyk, *Efficient generation of second-harmonic propagating spin waves in a thin, out-of-plane-magnetized ferromagnetic film*, arXiv:2509.07705v1 (2025).

- 4.4. R. Mehta, M. Moalic, M. Krawczyk, S. Saha, *Tunability of spin-wave spectra in a 2D triangular shaped magnonic fractals*, J. Phys.: Condens. Matter. 35 (2023) 324002.
- 4.5. K.O. Levchenko, K. Davidková, R.O. Serha, M. Moalic, A.A. Voronov, C. Dubs, O. Surzhenko, M. Lindner, J. Panda, Q. Wang, O. Wojewoda, B. Heinz, M. Urbánek, M. Krawczyk, A.V. Chumak, *1D YIG hole-based magnonic nanocrystal*, Appl. Phys. Lett. 127 (2025) 172401.

Rozprawę doktorską przygotowano w Instytucie Spintroniki i Informacji Kwantowej na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Pięć prac wchodzący w skład rozprawy opublikowano w okresie od 2022 do 2025 roku. Rozprawę uzupełniono o streszczenie w języku angielskim, a ponieważ całość rozprawy przygotowano w języku angielskim, dodane zostało również streszczenie w języku polskim. Ponadto do rozprawy dołączono: (1) krótką sylwetkę naukową Doktoranta, (2) listę publikacji naukowych Doktoranta, (3) krótkie wprowadzenie prezentujące zasadnicze pytania badawcze, (4) liczące 21 stron wprowadzenie do metod symulacji mikromagnetycznych oraz omówienie programów Amumax i Pyzfn oraz (5) bibliografię. Spośród pięciu prac wchodzących w skład rozprawy, cztery zostały wydane w recenzowanych czasopiśmie naukowych o zasięgu międzynarodowym, a piąta praca (4.3) została opublikowana w otwartym repozytorium arxiv.org.

Publikacje stanowią spójną całość i realizują wspólną ideę badawczą. We wszystkich przedłożonych publikacjach Doktorant koncentruje się na obliczeniach dynamiki fal spinowych w strukturyzowanych warstwach ferromagnetycznych i strukturach o złożonej konfiguracji magnetyzacji. W pracach Doktorant bada dynamikę fal spinowych w kolejnych układach; od dysku, przez pasek, trójkąt, aż do dwuwymiarowej warstwy. Każdy układ jest strukturyzowany otworami (*antidots*), które w części układów posiadają zmodyfikowane krawędzie o właściwościach różnych od części litej. Przeprowadzone badania w przypadku każdej pracy miały określony nadrzędny cel. Doktorant badał na przykład możliwość wystąpienia silnego sprzężenia pomiędzy różnymi falami spinowymi lub możliwość generowania fal spinowych o podwojonej częstotliwości. Do wykonania symulacji mikromagnetycznych Doktorant użył kodu Mumax3. Nie poprzestał jednak tylko na korzystaniu z programu, ale podjął się jego dalszego rozwoju, tworząc osobną gałąź kodu pod kreatywną nazwą Amumax. Ponadto Doktorant napisał bibliotekę Pyzfn do wizualizacji i analizy wyników za pomocą narzędzi języka programowania Python. Rozwinięcie własnych narzędzi obliczeniowych, tematyka przeprowadzonych badań oraz opublikowane wyniki jednoznacznie potwierdzają, iż przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Ponieważ wszystkie przedłożone prace są wieloautorskie, należy na tym tle rozważyć

zagadnienie samodzielności naukowej Doktoranta. W załączonych do rozprawy oświadczeniach współautorzy publikacji potwierdzają przewodni wkład Doktoranta w większość z przedłożonych prac (4.1, 4.2, 4.3), a w kolejnych dwóch pracach (4.4 i 4.5) wkład Doktoranta był mniejszościowy i polegał między innymi na wykonaniu obliczeń mikromagnetycznych. W przedłożonych pracach Doktorant wykazał się wyróżniającą umiejętnością zarówno współpracy we własnym zespole, jak i współpracy z innymi grupami teoretycznymi i eksperymentalnymi; tym samym, co może brzmieć nieco nieintuicyjnie, w mojej ocenie potwierdził właśnie umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Jakkolwiek szczegółowe może się wydawać zagadnienie symulacji dynamiki fal spinowych, to badania w tej dziedzinie poza doświadczeniem badacza i jego wiedzą praktyczną, bazują przede wszystkim na jego ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie nauki fizyczne. Przedłożone prace prezentują wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne. Swoją ogólną wiedzę teoretyczną Doktorant zaprezentował ponadto w przewodniku dołączonym do zbioru publikacji, gdzie szczegółowo omówił podstawy teoretyczne wykonywanych przez siebie symulacji.

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest istotna i aktualna, a prace wchodzące w skład rozprawy wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny. Cztery spośród pięciu prac zostało opublikowanych w uznanych czasopismach, a trzy spośród nich były już cytowane. Nie licząc autocytowań współautorów, praca 4.1 była cytowana jeden raz, praca 4.2 dwa razy, a praca 4.4 cztery razy. Oznacza to, iż mimo krótkiego czasu, jaki upłynął od ich publikacji, wchodzące w skład rozprawy prace zostały dostrzeżone w środowisku naukowym i zainspirowały kolejnych badaczy.

Oceny publikacji wchodzących w skład rozprawy

Poniżej krótko omówię każdą z przedłożonych prac oraz zadam pytania do przedstawionych wyników.

Praca 4.1

W pracy 4.1 Doktorant wraz z Promotorem i Promotorem pomocniczym badają widma fal spinowych w układach zawierających sieć otworów (antykropek), których brzegi różnią się pod względem stałej anizotropii magnetycznej od pozostałej części układu. Jak podają autorzy: „*we selected a structuralized Co/Pd multilayer with high PMA (with the anisotropy constant $K_{u,bulk}$) and reduced anisotropy around the antidots, already investigated in Ref. 30.*” [Phys. Rev. B 2020, 101, 014403]. Cytowany artykuł to praca Promotora i Promotora pomocniczego, która ukazała się dwa lata wcześniej bez udziału Doktoranta.

Wskazuje to, iż Doktorant aktywnie włączył się w prace zespołu prof. Krawczyka i podjął zagadnienie, które wcześniej było już wstępnie zbadane, ale domagało się szerszej analizy. W mojej ocenie stosunkowo krótka praca 4.1 reprezentuje wysoki poziom merytoryczny i zawiera dużą ilość syntetycznie zaprezentowanych wyników. W trakcie jej lektury nasuwały mi się następujące pytania:

Pytanie 4.1.1

Modelowany układ składa się z ośmiokrotnie powtórzonej dwuwarstwy Co(0.75 nm)/Pd(0.9 nm), jednakże w symulacjach Doktoranta jest on traktowany jako ośrodek jednolity. Chciałbym prosić Doktoranta o oszacowanie grubości poszczególnych warstw Co(0.75 nm) i Pd(0.9 nm) jako liczby monowarstw atomowych. Czy zastosowanie metod symulacji mikromagnetycznych dla periodycznego układu o tak niewielkiej grubości jest metodologicznie bezpieczne? Co tracimy, zakładając jednolity charakter ośrodka o właściwościach uśrednionych względem właściwości warstw składowych? Ponadto dla szerokości $w = 6$ nm na Rysunku 4 obserwujemy jeszcze obecność modów krawędziowych. Czy więc bezpiecznie jest założyć, że dopiero od grubości warstwy rzędu kilku nanometrów, a nie pojedynczego nanometra, jak w przypadku warstw Co/Pd), spodziewamy się wkładów do widma w zakresie częstotliwości GHz?

Pytanie 4.1.2

Autorzy badają widma fal spinowych w zakresie średnicy otworu (antykropki) od 200 nm do 0. Autorzy zauważają, iż: „*At last value of d , there is no antidot and only a circular area with reduced anisotropy*”, co wynika z obecności zdefiniowanej krawędzi o grubości w . Dla szerokości otworu $d = 0$ (brak otworu) rozważany układ obejmuje więc sieć kropek magnetyczne o średnicy $2w$ (100 nm) i materiale kropki z anizotropią magnetyczną odmienną od obszaru poza kropką. Dla tego przypadku, na Rysunku 3(a) widzimy wyrażenie również mody *krawędziowe*. Czy mody pochodzące od miękkich magnetycznie kropek ($d = 0$) istotnie różnią się od modów obserwowanych dla miękkich magnetycznie pierścieni (np. dla $d = 100$ nm)?

Pytanie 4.1.3

Czy z technologicznego punktu widzenia nie byłoby łatwiej lub korzystniej wytworzyć kryształy magnoniczne z obszarami (kropkami) o zmodyfikowanych właściwościach magnetycznych, zamiast z otworami?

Praca 4.2

Praca 4.2 jest kontynuacją badań omówionych w pracy 4.1. Podobnie jak w poprzedniej pracy, autorzy badają widma fal spinowych cienkiej warstwy magnetycznej z regularną siecią otworów (antykropek). Pierwszym autorem publikacji jest Doktorant, a listę współautorów, obejmującą, jak poprzednio, również Promotorów, uzupełnia tym razem dr Krzysztof Szulc. W pracy 4.2 autorzy rozwijają badania układu w dwóch głównych kierunkach. Mianowicie, badają wpływ wielkości zewnętrznego pola na uzyskiwane widma fal spinowych oraz testują trzy typy geometrii: (1) sieć otworów bez miękkiego magnetycznie pierścienia; (2) sieć otworów z miękkim magnetycznie pierścieniem oraz (3) sieć miękkich magnetycznie pierścieni. Zaprezentowane wyniki stanowią szczegółową analizę otrzymanych widm fal spinowych, która to z kolei prowadzi do wniosku na temat sprzężenia magnon-magnon pomiędzy modami podstawowym objętościowym (*fundamental bulk*) i drugiego rzędu promieniowo-azymutalnym (*second-order radial azimuthal*). Porównując wyniki z prac 4.2 i 4.1 nie znalazłem odpowiedzi na następujące pytanie:

Pytanie 4.2.1

Prace 4.1 i 4.2 prezentują widma fal spinowych w zakresach odpowiednio do 40 GHz i do 20 GHz. Dlaczego w pracy 4.1 do wzbudzenia fal spinowych autorzy wybrali częstotliwość graniczną pola magnetycznego wynoszącą 40 GHz, a w pracy 4.2 częstotliwość 20 GHz? Jakie są kryteria doboru częstotliwości granicznej?

Praca 4.3

Kolejną pracę ze zgłoszonego zbioru stanowi manuskrypt udostępniony w bazie arxiv.org. Na liście autorów, poza Doktorantem, znajdują się także Promotorzy. Listę dopełnia Youenn Patat z UAM. Wychodząc z rozważanej w pracach 4.1 i 4.2 struktury hybrydowej (typu miękki magnetyk/twardy magnetyk), autorzy modelują układ, którego zadaniem jest wytworzenie fali spinowej o częstotliwości drugiej harmonicznej względem częstotliwości fali wzbudzonej w regionie magnetycznie miękkim. Proponowane rozwiązanie pozwala na wytwarzanie w układzie fal spinowych o wysokich częstotliwościach przy pomocy źródeł promieniowania o niższych częstotliwościach, co jest ważnym zagadnieniem aplikacyjnym. W pracy rozważana jest geometria dysku oraz jej jednowymiarowy analog w formie paska. Szczegółowa analiza bierze pod uwagę kilka stopni swobody układu, w tym szerokość miękkiego magnetycznie pierścienia i wartość statycznego pola zewnętrznego B_0 . Praca jest czysto obliczeniowa, prowadzi natomiast do szczegółowych rekomendacji dotyczących geometrii i rodzaju materiałów umożliwiających praktyczną realizację układu. Do pracy mam następujące pytanie:

Pytanie 4.3.1

Rysunki 1(a) i 1(b) prezentują geometrię rozważanego dysku oraz obraz stanu równowagowego fali spinowej dla zadanej częstotliwości. Geometria dysku, złożonego z mniejszego pierścienia z otworem oraz większego pierścienia ze spiralną doliną fali spinowej, przypomina płytę winylową. Jakkolwiek mały otwór w płycie analogowej jest niezbędny do prawidłowego działania gramofonu, to czy po jego usunięciu z rozważanego dysku magnetycznego układ nadal generowałby drugą harmoniczną? Alternatywnie, czy dodanie kolejnych otworów w obszarze magnetycznie miękkim wpłynęłoby jakościowo na właściwości układu?

Praca 4.4

Trójkąt Sierpińskiego to dobrze znany prosty fraktal geometryczny. W przedłożonej pracy jego geometria została wykorzystana do przygotowania modeli dwuskładnikowych kryształów magnonicznych. Modele składają się z trójkątnych warstw magnetycznych oraz pustych przestrzeni między nimi. W pracy autorzy badają wpływ parametrów układu na dynamikę fal spinowych. Parametrami podlegającymi kontroli są stopień iteracji trójkąta Sierpińskiego (TRI-0, TRI-1, ...), geometrie wychodzące poza formę trójkąta Sierpińskiego (pojedyncze trójkąty i periodyczny układ trójkątów), rozmiar jednostkowego trójkąta oraz kierunek i wartość zewnętrznego pola magnetycznego. Badania zostały zrealizowane we współpracy Doktoranta i Promotora z parą badaczy z Uniwersytetu Ashoka w Sonipat w Indiach. Cała praca jest czysto teoretyczna, lecz Doktorant korzysta z innego kodu obliczeniowego niż współautorzy z Uniwersytetu Ashoka. Dzięki temu możliwa była zarówno wzajemna weryfikacja wyników, jak i rozwinięcie badania o nowe możliwości, jakie daje kod Amumax. Doktorant miał natomiast okazję poznać słabe i mocne strony własnej metody obliczeniowej na tle metody współpracowników.

Jak wskazuje sam Doktorant w krótkim wstępie poprzedzającym publikację, Jego wyniki stanowią tym razem mniejszościowy udział w pracy. Na tle trzech poprzednich publikacji, w których Doktorant każdorazowo wykazał przewodnią rolę, należy ocenić taką formę współpracy jednoznacznie pozytywnie. Potwierdza ona bowiem twierdzenie, iż Doktorant potrafi współpracować z innymi grupami badawczymi, wnosząc swój unikatowy wkład i silne wsparcie; rozumiejąc jednocześnie, że we współpracy nie trzeba każdorazowo być liderem. Do przedstawionych w pracy wyników uzyskanych przez Doktoranta mam następujące pytania:

Pytanie 4.4.1

Proszę o wyjaśnienie głównych różnic pomiędzy wynikami na Rysunku 5(b) dla TRI-5, TRI-6 i TRI-7, a wynikami dla tych samych struktur, przedstawionymi na Rysunku 3.

Pytanie 4.4.2

Rysunki 5(a) i 5(c) przedstawiają wyniki dla układu opisanego jako periodyczne uporządkowanie pojedynczych trójkątów (P5, P6, P7). Przykładowo dla układu P6, przedstawionego na Rysunku 5(c), długość podstawy pojedynczego trójkąta wynosi 44 nm, a długość podstawy wieloelementowego trójkąta wynosi 3000 nm, co oznacza około 70 małych trójkątów w podstawie dużego trójkąta. Niestety rozdzielczość Rysunku 5(c) jest niedostateczna, żeby dostrzec istotę geometrii tego układu. Proszę o zaprezentowanie struktury układów z oznaczeniem P.

Pytanie 4.4.3

W świetle prac 4.1-4.3, przychodzi mi na myśl model trójkąta Sierpińskiego złożonego z trójkątów magnetycznie twardych i miękkich, zamiast z obszarów pełnych i pustych. Co intuicja Doktoranta podpowiada na temat potencjalnych właściwości takiego układu?

Praca 4.5

Ostatnia praca ze zgłoszonego zbioru omawia właściwości jednowymiarowego kryształu magnonicznego w formie paska magnetycznego z periodycznymi otworami. W odróżnieniu od poprzednich prac jest ona wynikiem współpracy z eksperymentatorami, a jej trzon stanowią właśnie wyniki eksperymentalne. W wykonanie badań zaangażowani byli naukowcy z siedmiu instytucji i pięciu krajów. Przeprowadzone pomiary potwierdziły transmisję fal spinowych w konfiguracji Damona-Eshbacha oraz obecność przerw energetycznych w widmie. W pracy wyniki symulacji programem Mumax3 dla jednowymiarowego kryształu magnonicznego zestawione są z wynikami symulacji dla modelu jednorodnego uzyskanymi za pomocą programu TetraX. Podobnie jak w przypadku poprzedniej pracy (4.4), uważam, iż współpraca Doktoranta z innymi grupami badawczymi zasługuje na uznanie. Ponieważ nadrzędnym celem symulacji jest praktyczna realizacja struktur magnonicznych, prace łączące symulacje i eksperyment pozwalają w optymalny sposób zastosować umiejętności teoretyków, zmuszając ich do wyjścia poza ramy czystych modeli komputerowych. Szeroka współpraca zakończona niniejszą publikacją doprowadziła do wzajemnych weryfikacji pomiędzy wynikami symulacji, jak i eksperymentu.

Pytanie 4.5.1

Skoro Mumax3 poradził sobie z symulacją perforowanego paska, to nie powinien mieć także kłopotu z paskiem jednorodnym. Dlaczego do symulacji paska jednorodnego wykorzystano więc program TetraX? Jakie są zalety programu TetraX względem Mumax3?

Uwagi szczegółowe

Poniżej przedstawię komentarze dotyczące strony redakcyjnej, a w szczególności usterek, jakie dostrzegłem w przedłożonych do zrecenzowania materiałach. W zbiorze publikacji nie zauważyłem usterek redakcyjnych, poza pracą 4.4, do której zamieszczam poniżej trzy drobne uwagi. Przeciwnie, wszystkie publikacje napisane są w wyśmienitym stylu, a równie dobre wrażenie sprawia strona graficzna prezentowanych wyników. Doktorant nie uniknął pomniejszych błędów, które nie wpływają jednak na moją wysoką ocenę całości rozprawy.

Abstrakt w języku polskim

Abstrakt w języku polskim zawiera przynajmniej pięć słów zapisanych z myślnikami, np. „dwu-wy-mia-ro-we”, „sub-mikro-metro-wego”.

Author publication list

Brakuje numeru woluminu dla pracy opublikowanej w Small Structures.

Rozdziały 1, 2, 3

Rozdziały 1, 2 i 3, stanowiące wprowadzenie do zbioru publikacji, zawierają drobne usterki redakcyjne:

- usterki w interpunkcji występujące po wypisaniu równań (brak przecinków lub kropek);
- strona 9: podwójna kropka na końcu zdania przy cytowaniach „86,87”;
- strona 20 i 21: powtórzenia w odwołaniach do rysunków: „Fig.Figure 5” i „Fig.Figure 6”.

Praca 4.3

Opublikowana na arxiv.org wersja pracy 4.3 różni się od wersji załączonej do rozprawy. Różnice są drugorzędne i obejmują między innymi format graficzny i ilość pozycji bibliograficznych.

Bibliografia

- Zdublowane pozycje bibliograficzne 68 i 69.
- Błędy w szczegółach bibliograficznych pozycji 77. Wskazana praca nie ma dodatkowych współautorów poza Landauem i Lifshitzem, a jej pierwsza strona ma numer 153. Wskazany zakres stron (101-114) pochodzi z wersji prac zebranych Landaua z 1965 r.

Praca 4.4

- Strona 7, kolumna lewa, sekcja 3.1.3.: Autorzy odwołują się do rysunku 5(b) zamiast do rysunku 5(c).
- Strona 7, kolumna prawa: Autorzy odsyłają czytelników do rysunków 5 i S4. Mam wrażenie, że wskazany rysunek S4 w materiale dodatkowym to jednak nie te wyniki, które autorzy mieli w tym miejscu na myśli.
- Zarówno prezentacja geometrii typu P, jak i informacje na temat wykorzystania kodu Mumax3 do obliczeń nie trafiły do sekcji „2. *Micromagnetic simulations*”. Umieszczenie określonych informacji w dedykowanych sekcjach pracy może ułatwić czytelnikom zrozumienie omawianych wyników.

Materiały dodatkowe do pracy 4.5

Choć inne przedłożone publikacje również były publikowane wraz z materiałami dodatkowymi, Doktorant przedłożył jedynie materiały dodatkowe (Supplementary materials) do pracy 4.5. W wersji drukowanej, którą otrzymałem, brakuje ponadto strony S1 materiałów dodatkowych do pracy 4.5. Wersja materiałów dodatkowych załączona do rozprawy różni się od publicznie dostępnej wersji między innymi całkowitą ilością stron i liczbą pozycji bibliograficznych.

Rozdział 5

W punkcie 5.2.1 podano numer grantu OPUS 19, kierowanego przez prof. Krawczyka, zamiast wskazanego grantu PRELUDIUM, kierowanego przez Doktoranta.

Podsumowanie

Przedłożona rozprawa doktorska w formie zbioru pięciu opublikowanych prac jest wzorowym przykładem rozprawy w dyscyplinie nauki fizyczne. Tematyka podjęta przez mgra

Mathieu Moalica jest aktualna oraz obiecująca z punktu widzenia zastosowań. Przygotowując rozprawę, Doktorant wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami. Uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład do dyscypliny nauki fizyczne poprzez umiejętne łączenie teorii magnetyzmu, symulacji komputerowych i odwzorowania układów eksperymentalnych. Rozprawa potwierdza zarówno duże indywidualne zaangażowanie Doktoranta w prowadzone badania, jak i jego olbrzymi talent do współpracy. Taka kombinacja cech świadczy o dobrych predyspozycjach Doktoranta do kontynuacji badań naukowych na jeszcze szerszą skalę.

Niniejszym stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska, złożona w formie zbioru pięciu publikacji naukowych, spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.).

Biorąc pod uwagę: (1) aktywność Doktoranta na każdym etapie badań, od rozwijania kodu obliczeniowego, poprzez przygotowanie modeli, wykonywanie symulacji, po analizę i opracowanie wyników, (2) bardzo wysoki poziom badań, (3) dominujący udział Doktoranta w realizację większości prac, (4) różnorodność badanych układów i efektów oraz (5) międzynarodową współpracę badawczą, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra Mathieu Moalica.

Wnoszę do Rady Naukowej Dyscyplin Nauki Fizyczne i Astronomia Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu o przyjęcie niniejszej rozprawy i dopuszczenie mgra Mathieu Moalica do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Poznań, 9 lutego 2026 r.

dr hab. Mirosław Werwiński, prof. IFM PAN
Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk