



Toruń, dn. 01.09.2023

Dr hab. Piotr Maślowski
Instytut Fizyki UMK
ul. Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń
Tel. (+48) (56) 6113276
email: pima@fizyka.umk.pl

Recenzja osiągnięcia habilitacyjnego oraz dorobku dr. Adama Wojciechowskiego w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Dr Adam Wojciechowski ukończył studia w roku 2007 na kierunku fizyka w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, broniąc z wyróżnieniem pracę magisterską pt. „Megnetometr atomowy” (opiekun naukowy: prof. dr hab. Wojciech Gawlik). W roku 2011 na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej uzyskał stopień doktora nauk fizycznych broniąc także z wyróżnieniem pracę doktorską pt. "Koherencje kwantowe w zimnych atomach". Promotorem tej pracy był prof. dr hab. Wojciech Gawlik. Praca ta została nagrodzona przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Nagrodą indywidualną II stopnia.

W roku 2011 został zatrudniony na wspomnianym wcześniej Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ na stanowisku asystenta. W latach 2015-2017 odbył staż podoktorski na Wydziale Fizyki Duńskiego Uniwersytetu Technicznego (DTU) w Kogens Lyngby w Danii. Od roku 2018 do chwili obecnej jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Opinia o osiągnięciu habilitacyjnym.

Dr Adam Wojciechowski jako osiągnięcie habilitacyjne przedstawił cykl 12 powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. „Charakteryzacja i zastosowania centrów barwnych typu azot-wakancja w diamencie do pomiarów i obrazowania pól magnetycznych”. Na cykl składają się artykuły naukowe w uznanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Są to prace opublikowane w Physical Review B, Optics Express (2 artykuły), Review of Scientific Instruments, Scientific Reports (2 artykuły), Applied Physics Letters, Materials (2 artykuły), Diamond and Related Materials, Optics Materials Express i Carbon. Wszystkie przedstawione prace zostały opublikowane w latach 2017 – 2022, a więc wyraźnie po uzyskaniu doktoratu, a 6 z nich zostało opublikowanych w ostatnich 3 latach.



Wszystkie publikacje składające się na przedstawiony cykl są współautorskie. Jest to zrozumiałe, biorąc pod uwagę doświadczalny jak i szeroki tematycznie, a w niektórych przypadkach interdyscyplinarny charakter tych prac. Z załączonych oświadczeń współautorów jak i z opisów w autoreferacie i w samych publikacjach jednoznacznie wynika, że wkład habilitanta w ich powstanie był co najmniej istotny.

Wspólnym mianownikiem wszystkich prac są układy centrów barwnych typu azot-wakancja (NV⁻) w diamencie. Układy takie cieszą się dużym zainteresowaniem środowiska ze względu na wiele możliwych zastosowań, m.in. w komunikacji czy metrologii kwantowej, w pomiarach magnetometrycznych, także w nanoskali czy układów biologicznych, obrazowaniu (w tym super-rozdzielczym) oraz termometrii z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Jednym ze sposobów badania i wykorzystania takich układów jest metoda optycznie rejestrowanego rezonansu magnetycznego (z j. ang. ODMR), gdzie informację na temat układu otrzymuje się poprzez pomiar fluorescencji w optycznym lub podczerwonym zakresie widmowym. Interpretacja teoretyczna mierzonych sygnałów, zwiększenie czułości takich układów oraz ich zastosowania do pomiarów i obrazowania pola magnetyczne są tematem prac składających się na przedstawione osiągnięcie habilitacyjne.

Z uwagi na fakt, że wyniki wchodzące w skład osiągnięcia zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach naukowych i zostały docenione przez środowisko naukowe (pierwsze dwie z prac cyklu wg usługi Google Scholar w dniu 29.08.2023 były cytowane odpowiednio 38 i 58 razy, a te najnowsze z roku 2022 mają liczbę cytowań 11, 7 i 5, odpowiednio dla prac A10-A12), pozwolę sobie pominąć szczegółowy opis tych wyników. Postaram się jednak podsumować najważniejsze wyniki i osiągnięcia przedstawione w pracy habilitacyjnej:

1. Obserwacja i interpretacja teoretyczna zjawiska oscylacji populacji (coherent population oscillation – CPO) w układzie stałociąłowym w postaci próbki diamentowej z wysoką gęstością centrów barwnych typu azot-wakancja. Efekt został zaobserwowany przy pomiarach optycznie rejestrowanego rezonansu magnetycznego w obecności dwóch pól mikrofalowych – stałego pola pompującego oraz przestrajanego pola próbkującego, dostrojonych do tego samego przejścia. pomiędzy stanami $m_s=0$ oraz $m_s=\pm 1$. Zaobserwowano także, związane z powyżej wymienionym zjawiskiem, wąskie struktury spektralne o szerokości mniejszej niż szerokość naturalna. Przedstawiona przez habilitanta teoretyczna interpretacja zjawiska wiąże te struktury spektralne z czasami podłużnej relaksacji populacji. Oznacza to, że poprzez wykonanie pomiaru widma ODMR można uzyskać dokładną informację o dynamice i czasach relaksacji badanych układów.

2. Analiza i stworzenie modelu sygnału magnetometru opartego na centrach NV z detekcją fazoczułą. Układ pomiarowy wykorzystywał w tym celu odpowiednią modulację pola mikrofalowego. Stworzony model pozwala na odtworzenie z wysoką dokładnością danych doświadczalnych. Pozwala on na dobranie funkcji modulacji i jej głębokości dla konkretnych układów azot-wakancja optymalizujących rejestrowane widmo ODMR. Dzięki temu możliwe jest zbudowanie magnetometrów o zwiększonej czułości.

4. Analiza teoretycznej czułości magnetometrów wykorzystujących centra NV w diamencie i kamerę w roli detektora. Wskazanie, że jedynie kamery o dużej głębokości studni piksela (*deep well CMOS*) oraz kamery z detekcją fazoczułą mogą zapewnić najlepszą czułość i zdolność rejestracji widma ODMR w czasie pojedynczej akwizycji, bez długoczasowego uśredniania sygnału. Demonstracja

czułości obrazowania na poziomie 142 nT przy akwizycji przez czas 1 s , dzięki wykorzystaniu po raz pierwszy w tego typu pomiarach kamery z detekcją fazoczułą.

5. Opracowanie sensora opartego na centrach NV z modulacją dwóch pól mikrofalowych, układu optycznego i protokołu pomiaru pozwalającego na czułą detekcję pola magnetycznego i/lub temperatury w zależności od sygnałów modulujących pola mikrofalowe. Zademonstrowana czułość układu to $1,4 \text{ nT/Hz}^{1/2}$, co przekłada się na czułość względem temperatury na poziomie $430 \text{ }\mu\text{K/Hz}^{1/2}$.

6. Wykazanie możliwości wykorzystania proszków i zawiesin nanodiamentowych z wysoką koncentracją centrów NV jako warstwy nanodiamentów w sensorach pola magnetycznego. Aby było to możliwe, opracowano metody pomiarów pola magnetycznego z wykorzystaniem ciągłego widma optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego w zbiorze nanodiamentów. Zademonstrowano m.in. wykorzystanie obrazowodu z osadzoną warstwą nanodiamentów na jednym z jego końców do pomiarów widm ODMR, w których zarówno doprowadzenie światła wzbudzającego jak i detekcja fluorescencji odbywa się przez obrazowód.

7. Demonstracja możliwości zastosowania magnetometrii opartej na centrach barwnych do detekcji pól magnetycznych pochodzących od złożonych układów biologicznych, **w tym pierwsza na świecie demonstracja rejestracji sygnałów biologicznych z tkanek ssaków przy użyciu sensora diamentowego z warstwą centrów NV.** Osiągnięta czułość układu na poziomie $50 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ pozwoliła na skuteczne zarejestrowanie bardzo słabych ($\sim 300 \text{ pT}$ amplitudy) sygnałów magnetycznych związanych z propagacją potencjału czynnościowego w komórkach tkanki mięśniowej myszy. Dzięki wykorzystaniu zaawansowanych technik analizy sygnałowej te słabe sygnały magnetyczne zostały zarejestrowane bez stosowania żadnego ekranowania magnetycznego. Oznacza to, że takie pomiary mogą być realizowane w typowym środowisku laboratoryjnym czy klinicznym.

8. Dokładne scharakteryzowanie próbek diamentowych wytworzonych poprzez oddziaływanie wysokoenergetycznej wiązki protonów z diamentem o relatywnie wysokiej zawartości azotu oraz poprzez naświetlanie próbki diamentowej wiązką elektronową o wysokiej energii. Wyniki te pozwalają na dobranie techniki i parametrów wytwarzania diamentu z centrami NV dających próbkę o pożądanych właściwościach, na przykład zwiększających czułość budowanych układów pomiarowych.

9. Wykazanie możliwości połączenia magnetometrii opartej na pomiarach widm centrów NV z zaawansowaną techniką światłowodową, co umożliwia m.in. wytwarzanie cienkich warstw nanodiamentowych na powierzchni światłowodów, stworzenie światłowodu z rdzeniem domieszkowanym w całej jego objętości czy włókien optycznych z zawieszonym rdzeniem domieszkowanym nanodiamentami. Poprzez opracowane koncepcje i technologie domieszkowania rdzenia światłowodu diamentami o wysokiej koncentracji centrów NV uzyskano możliwość precyzyjnej kontroli parametrów otrzymywanego światłowodu a przez to właściwości optycznych i magnetycznych. Rozwój tych technik wytwarzania sensorów światłowodowych ma kluczowe znaczenie dla ich zastosowań praktycznych, m.in. w biofizyce.

Uzyskanie opisanych powyżej osiągnięć wymagało od habilitanta zarówno warsztatu teoretycznego, pozwalającego na interpretację i modelowanie obserwowanych zjawisk i sygnałów, jak również jednocześnie umiejętności praktycznych przygotowywania układów pomiarowych i analizy uzyskanych danych. Warto zauważyć, że ww. umiejętności zostały docenione i wykorzystane przez inne

grupy badawcze w czasie stażu podoktorskiego, a jednocześnie silnie widoczne jest poszerzenie zainteresowań naukowych, warsztatu doświadczalnego i umiejętności habilitanta jako rezultat stażu naukowego na Duńskim Uniwersytecie Technicznym.

Chciałbym podkreślić, że zarówno dobór prac do „osiągnięcia” habilitacyjnego jak i przedstawiony autoreferat zostały zrobione profesjonalnie i pozwala na ocenę różnych aspektów prowadzonych przez habilitanta badań. W przypadku samego autoreferatu jasno i klarownie przedstawione są motywacja i cele badań opisanych w przedstawionych publikacjach oraz syntetycznie wskazane najważniejsze wyniki. Co również ważne, wkład habilitanta w przygotowanie każdej ze wskazanych publikacji jest opisany w sposób nie budzący wątpliwości.

Podsumowując, osiągnięcie naukowe dr. Adama Wojciechowskiego, skoncentrowane na rozwoju i zastosowaniach magnetometrii wykorzystującej centra barwne typu azot-wakancja w diamencie, opisane w cyklu publikacji [A1-A12], **w mojej ocenie stanowi istotny i znaczący wkład w rozwój nauk fizycznych.**

Ocena pozostałej działalności naukowej.

Wg załączonego wykazu osiągnięć w dorobku dr Adama Wojciechowskiego znajdują się 32 prace opublikowane w czasopismach recenzowanych o zasięgu międzynarodowym, włączając w to 12 składające się na przedstawione osiągnięcie habilitacyjne. Na dorobek składa się także 5 prac opublikowanych jako recenzowane materiały konferencyjne. Prace nie wchodzące w skład osiągnięcia opublikowane są w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu globalnym, takich jak Physical Review A, Journal of Applied Physics, Optics Letters, Physical Review B, Scientific Reports, Optics Express czy Advanced Quantum Technologies. Przedstawiony dorobek w mojej ocenie jest odpowiedni na tym etapie kariery habilitanta. Co warto podkreślić z wyżej wspomnianych 32 prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach, sześć z nich powstało przed obroną doktoratu, a trzynastie w okresie 2 lat przed złożeniem wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego, wyraźnie widoczna jest zwiększona aktywność naukowa w ostatnich okresie, jak również wyraźnie rozszerzenie zainteresowań badawczych. Warte podkreślenia jest także fakt uzyskania opublikowanych wyników, często w szerokiej współpracy naukowej w czasie pandemii COVID19 i związanych z nią trudności. Wyniki prac naukowych prowadzonych przez habilitanta cieszą się zainteresowaniem środowiska, o czym świadczy liczba cytowań (416 w sumie), przy czym w mojej opinii, z uwagi na fakt zwiększonej aktywności naukowej w ostatnich latach, ta liczba będzie szybko rosła. Wyniki swoich prac prezentował także na 25 konferencjach międzynarodowych i krajowych

W roku latach 2015-2017 habilitant wyjechał na dwuletni staż podoktorski na Duńskim Uniwersytecie Technicznym (DTU) do grupy Fizyki Kwantowej i Teorii Informacji kierowanej przez prof. Ulrika Lunda Andersena. Jak wynika z autoreferatu, uczestniczył on tam przede wszystkim w realizacji projektu *Extreme sensitive magnetometry using nitrogen-vacancy centers in diamond (EXMAD)*, mającym na celu „badanie pól magnetycznych przy użyciu diamentów z centrami barwnymi typu: objętościowego (bulk), planarnego (z cienką warstwą centrów barwnych) oraz punktowego (z wykorzystaniem

pojedynczych centrów)". W czasie wyjazdu zbudował on mikroskop fluorescencyjny szerokiego pola do obrazowania pól magnetycznych, a także, w szerokiej współpracy międzynarodowej (Uniwersytet w Ulm, Niemcy, CNRS, Francja, Uniwersytet w Lipsku) zaprojektował i przygotował próbki i sensory diamentowe o zwiększonej czułości. Staż podoktorski był bardzo owocny, co jest poparte szeregiem ważnych publikacji opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych, jak również nawiązaniem wielu kontaktów w międzynarodowym środowisku naukowym, co ma także odzwierciedlenie we aplikowaniu o granty badawcze wspólnie ze współpracownikami ze Słowenii, Hiszpanii, Niemiec czy Izraela.

Podsumowując, stwierdzam, że Pan dr Adam Wojciechowski wykazał się istotną aktywnością naukową zrealizowaną w więcej niż jednej instytucji naukowej.

Ocena dorobku organizacyjnego i dydaktycznego.

Dr Adam Wojciechowski ma bogate doświadczenie w realizacji projektów badawczych. Obejmuje to pracę w roli wykonawcy (m.in. granty NCN, MNiSW, MEiN, Węgierskiej Akademii Nauk, Novo Nordisk Foundation (Dania) czy Innovation Fund Denmark (Dania)), jak i w roli kierownika grantu lub grupy badawczej. W tym ostatnim wypadku wartym podkreślenia jest fakt pełnienia takiej roli w trzech trwających w tym momencie grantach:

FNP TEAM-NET: *Nanosensoryka i obrazowanie z wykorzystaniem efektów kwantowych: synergia szkła i diamentu dla zastosowań w biodiagnostyce nowej generacji*; NCN OPUS LAP: *Zaawansowana magnetometria optyczna wirów w nadprzewodnikach niekonwencjonalnych oraz NCN QuantERA: (jako uczestnik konsorcjum wraz z partnerami z Hiszpanii, Niemiec i Izraela).*

Fakt prowadzenia projektów w konsorcjach krajowych i międzynarodowych wskazuje na uznanie umiejętności i dorobku habilitanta oraz rozpoznawalność w środowisku naukowym i potwierdza zdolności ubiegania się o finansowanie swoich przyszłych pomysłów badawczych.

Umiejętności organizacyjne zostały także potwierdzone poprzez urządzenie laboratorium spektroskopii centrów barwnych NV w diamentach (wartość zakupionej aparatury przekroczyła 2 mln zł), które zapewni bazę infrastrukturalną dla kontynuacji jego badań a najbliższe lata. Warto także dodać, że wychodząc poza zakres swojej głównej aktywności badawczej, habilitant, wspólnie ze współpracownikami, zaprojektowali i skonstruowali pierwszy polski mikroskop wykorzystujący stymulowane rozpraszanie Ramana (SRS) na Wydziale Chemii UJ.

Działalność organizacyjna dr. Wojciechowskiego obejmuje także recenzowanie 13 artykułów dla redakcji renomowanych czasopism naukowych (m.in. ACS Sensors,, Applied Physics Letters, Laser Physics czy Scientific Reports). Uczestniczył także w organizacji 50. Konferencji European Group on Atomic Systems (współorganizowanej przez European Physical Society), jako Sekretarz tej konferencji. Zaangażowanie w tego typu działalność jest czasochłonne i związane z odpowiedzialnością, ale jest także niezbędne dla aktywności naszego środowiska naukowego i jednocześnie niestety jest niedoceniane, tym bardziej należy podkreślić aktywność na tych polach.

Dorobek dydaktyczny obejmuje szeroki zakres zajęć prowadzonych na UJ, zarówno wykładów specjalistycznych (*Zaawansowane materiały* oraz *Nanotechnologia, fotonika i mikroelektromechanika*), jak i ćwiczeń (m.in. do wykładu *Podstawy fizyki: Elektryczność i magnetyzm, Fizyka* oraz do ww. wykładów specjalistycznych) i zajęć praktycznych (m.in. *I i II Pracowni Fizycznej* czy *Pracownia Metod Fizycznych Biologii II*). Habilitant był także opiekunem naukowym w 2 pracach magisterskich i 6 pracach licencjackich oraz pełnił rolę promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim dra K. Sycza w roku 2015. Dorobek dydaktyczny dr. Adama Wojciechowskiego jest uzupełniony przez działalność popularyzatorską. Obejmuje ona szereg wygłoszonych referatów popularno-naukowych wygłoszonych osobiście oraz na platformie YouTube oraz publikacje artykułów popularyzujących naukę w czasopiśmie *Foton*.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując przedstawioną wyżej ocenę dorobku naukowo-badawczego, ocenę osiągnięcia naukowego w postaci jednotematycznego cyklu publikacji zatytułowanej „*Charakteryzacja i zastosowania centrów barwnych typu azot-wakancja w diamencie do pomiarów i obrazowania pól magnetycznych*” oraz ocenę dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego Pana dra Adama Wojciechowskiego w związku z postępowaniem habilitacyjnym prowadzonym przez Radę Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego stwierdzam, że jego dorobek wskazuje na znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne oraz dużą aktywność naukową, dydaktyczną oraz organizatorską habilitanta. Dlatego też osiągnięcia naukowe, dydaktyczne i organizacyjne wnioskodawcy spełniają wszystkie kryteria określone w art. 219 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 30 sierpnia 2018 poz. 1668) oraz są w pełni wystarczające do nadania mu stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie Nauki Fizyczne.

Pan dr Adam Wojciechowski jest już doświadczonym naukowcem o dobrze określonych planach badawczych, który jest zdeterminowany do ich realizacji a jednocześnie otwarty na nowe technologie i zastosowania, które zwiększają jego potencjał naukowy. W dotychczasowej karierze wykazał zdolność do organizowania pracy badawczej, w tym do nawiązywania efektywnej współpracy z najlepszymi grupami z kraju i Europy, czym potwierdza predyspozycje do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Stwierdzam też, że dr Adam Wojciechowski od chwili otrzymania stopnia naukowego doktora uzyskał istotny dorobek naukowy oraz przedstawił wartościowe osiągnięcie naukowe. Tym samym, wyrażam swą pozytywną opinię w sprawie nadania dr. Adamowi Wojciechowskiemu stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Masiowski