

Poznań, 10 maja 2025 roku

prof. dr hab. Ireneusz Weymann
Zakład Fizyki Mezoskopowej
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Recenzja

w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne Panu dr. inż. Jarosławowi Pawłowskiemu

Pan dr inż. Jarosław Pawłowski jest adiunktem w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Rozprawę doktorską pt. „Operacje na spinie pojedynczego elektronu w kropce kwantowej bez użycia pola magnetycznego” przygotował pod opieką prof. dr. hab. Stanisława Bednarka na Wydziale Fizyki i Informatyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Następnie został zatrudniony na AGH na stanowisku asystenta, na którym pracował do 2016 roku, kiedy to, po uzyskaniu grantu Fuga z Narodowego Centrum Nauki, przeniósł się na Politechnikę Wrocławską. W latach 2016-2019 dr Pawłowski realizował projekt Fuga, po zakończeniu którego uzyskał zatrudnienie na Politechnice Wrocławskiej na stanowisku adiunkta.

Jako swoje osiągnięcie habilitacyjne Kandydat przedstawił cykl siedmiu artykułów naukowych opublikowanych w recenzowanych czasopismach zagranicznych, opublikowanych w latach 2018-2024. Cztery prace ukazały się w *Physical Review B* oraz po jednej w *New Journal of Physics*, *Physical Review Applied* oraz *npj 2D Materials and Applications*. Są to niewątpliwie bardzo dobre czasopisma fizyczne. W pięciu pracach Kandydat jest pierwszym autorem, w tym jedna praca jest monoautorska, natomiast w dwóch kolejnych pracach jest na dalszym miejscu w liście autorów. Z załączonych oświadczeń wynika, że wkład Habilitanta w powstanie publikacji był kluczowy. Dr Pawłowski wskazuje również dwa kolejne artykuły, które stanowią rozszerzenie cyklu, jednak w chwili złożenia wniosku prace nie zostały jeszcze opublikowane.

Problematyka cyklu habilitacyjnego obejmuje teoretyczne zagadnienia na styku fizyki ciała stałego i informatyki kwantowej, ze szczególnym uwzględnieniem kubitów spinowych i dolinowych realizowanych w materiałach dwuwymiarowych, takich jak monowarstwy dichalkogenków metali przejściowych (TMD) (MoS_2 , WSe_2). W szczególności, Kandydat zajmuje się projektowaniem i modelowaniem nanostruktur kwantowych, takich jak kropki kwantowe, w których możliwe jest spułapkowanie pojedynczych elektronów i kontrolowanie ich stanów kwantowych za pomocą przyłożonych napięć bramkujących. Dr Pawłowski szczególną uwagę poświęca możliwościom realizacji operacji logicznych na kubitach poprzez manipulację stopniami swobody związanymi z doliną i spinem elektronów. Jest to z pewnością aktualna tematyka ze względu na możliwości aplikacyjne w technologiach kwantowych oraz informatyce kwantowej.

Pierwsza publikacja cyklu [1] przedstawia badania nad możliwością realizacji i kontrolowania kubitów dolinowych w kropkach kwantowych utworzonych w monowarstwie dwusiarczku molibdenu. Autorzy wykazali możliwość sterowania stanem dolinowym pojedynczego elektronu za pomocą oscylujących napięć bramkujących, co pozwala na realizację

podstawowych operacji kwantowych. Badania oparte były na realistycznym modelowaniu elektrostatycznym oraz samouzgodnionych obliczeniach w oparciu o równania Poissona i Schrödingera.

Druga praca [2], która jest pracą jednoautorską, prezentuje realizację jedno- i dwukubitowego układu spin-dolina opartego na kropce kwantowej wytworzonej w monowarstwie MoS_2 , kontrolowanego poprzez napięcia przyłożone do lokalnych elektrod bramkujących. Inicjalizacja i odczyt stanu kwantowego układu może zostać dokonany wykorzystując zjawisko spinowej i dolinowej blokady Pauliego – spinowa wersja tego zjawiska jest dobrze znana w kontekście transportu przez układy szeregowych kropek kwantowych. W publikacji pokazano między innymi, że dzięki przyłożeniu odpowiedniego zewnętrznego pola magnetycznego można rozseparować wszystkie sześć możliwych przejść w podprzestrzeni spinowo-dolinowej. Tego typu przejścia można interpretować jako implementację różnych bramek kwantowych, takich jak CNOT czy SWAP, a także bramki NOT. Dokładna analiza przejść umożliwiła także oszacowanie wierności realizowanych operacji.

Trzecia praca cyklu [3] przedstawia koncepcję i szczegółową analizę układu podwójnej kropki kwantowej wytworzonej w monowarstwie MoS_2 , w którym zakodowano dwa kubity w dolinowych stopniach swobody elektronów. Urządzenie zostało zaprojektowane z użyciem realistycznego układu ośmiu elektrod bramkujących, umożliwiających precyzyjne kształtowanie potencjału ograniczającego oraz sterowanie barierą tunelową między kropkami kwantowymi. Przeprowadzono symulacje dynamiki kwantowej elektronów, pokazując możliwość realizacji operacji jedno- i dwukubitowych, takich jak rotacje i bramka SWAP, wyłącznie za pomocą przyłożonych napięć. Przeanalizowano także protokół odczytu stanu kubitów, wykorzystując, podobnie jak w pracy [2], zjawisko blokady Pauliego, które umożliwia detekcję stanu dolinowego przez analizę przepływu prądu pomiędzy kropkami kwantowymi. Warto wspomnieć, że publikacja została wyróżniona przez edytorów jako *Editors Suggestion*.

Kolejny artykuł [4] prezentuje teoretyczne podstawy implementacji kubitów typu spin-dolina w kropkach kwantowych wytworzonych w monowarstwach TMD. Proponowany kubit zbudowany jest z dwóch stanów elektronowych: jednego zlokalizowanego w dolinie $+K$ ze spinem w dół i drugiego w dolinie $-K$ ze spinem w górę. Dzięki silnemu sprzężeniu spinowo-orbitalnemu oraz blokadzie spinowo-dolinowej, takie kubity charakteryzują się dużą stabilnością i odpornością na dekoherencję. W pracy wykazano, że operacje kwantowe na spinowo-dolinowym kubicie mogą być realizowane poprzez przyłożenie pionowego pola elektrycznego (wzbudzającego sprzężenie Rashby) oraz bocznego potencjału mieszającego doliny, który można eksperymentalnie generować za pomocą mikroskopu STM.

Publikacja [5] cyklu habilitacyjnego jest pracą doświadczalno-teoretyczną, w której przedstawiono wyniki badań przewodnictwa elektrycznego w jednowymiarowym kanale kwantowym zdefiniowanym elektrostatycznie w monowarstwie WSe_2 . W rozważanym układzie zaobserwowano nietypową (anomalną) kwantyzację przewodnictwa w jednostkach e^2/h , zamiast oczekiwanych $2e^2/h$, co jest charakterystyczną wielkością dla nieskorelowanego transportu. To zjawisko sugeruje obecność stanu podstawowego z polaryzacją dolinową, wynikającego z oddziaływań między dziurami, które prowadzą do złamania degeneracji dolinowej. Wyniki doświadczalne zostały poparte obliczeniami teoretycznymi w ramach modelu ciasnego wiązania, które potwierdziły, że anomalne przewodnictwo wynika z uwzględnienia oddziaływań, które prowadzą do polaryzacji dolinowej. Uzyskane wyniki podkreślają znaczenie oddziaływań wielociałowych w jednowymiarowych kanałach kwantowych zdefiniowanych w monowarstwach TMD, które prowadzą do anomalnych wartości przewodnictwa. Ta tematyka była dalej kontynuowana w pracy [7], która przedstawia teoretyczną analizę oddziałujących dziur z pasma walencyjnego w jednowymiarowym kanale kwantowym monowarstwy WSe_2 . Analizując wpływ silnych oddziaływań między dziurami, asymetrii potencjału poprzecznego, pola magnetycznego oraz silnego sprzężenia spin-orbita typu Rashby, wykazano możliwość powstawania stanów z polaryzacją dolinową, w których degeneracja dolinowa zostaje złamana na skutek wielociałowych

oddziaływań. Dla słabszych oddziaływań zaobserwowano istnienie antyferromagnetycznej fazy dolinowej, charakteryzującej się naprzemiennym uporządkowaniem dolin. Natomiast, dla niskich gęstości dziur przewidziano formowanie się fazy krystalicznej Wignera o strukturze zygzakowatej.

Z kolei w publikacji [6] cyklu habilitacyjnego autorzy przedstawiają koncepcję kubitu dolinowego zaimplementowanego na kropce kwantowej zdefiniowanej elektrostatycznie w pobliżu złącza monowarstw MoS_2/WS_2 . Złącze, zorientowane wzdłuż kierunku *armchair*, generuje stromy potencjał dipolowy, który umożliwia przejścia międzypolinowe elektronów w sąsiedniej kropce kwantowej, gdy zachodzi znaczące nakładanie się funkcji falowych oraz odpowiednie dostrojenie częstotliwości pompowania. Podobnie jak w poprzednich propozycjach, proponowany mechanizm sterowania kubitem jest w pełni elektryczny, realizowany poprzez przyłożenie oscylujących napięć do bramek sterujących. Dodatkowo, w pracy przeanalizowano możliwość manipulacji kubitem dolinowym poprzez akumulację nieabelowej fazy geometrycznej Berry'ego, co otwiera nowe perspektywy dla kontroli stanów kwantowych w układach TMD.

W przedstawionym osiągnięciu habilitacyjnym, Kandydat, poprzez przeprowadzenie zaawansowanych obliczeń w oparciu o model ciasnego wiązania oraz zależne od czasu równanie Schrödingera sprzężone z równaniem Poissona, również z uwzględnieniem oddziaływań wielociałowych, zaproponował szereg realistycznych nanostruktur opartych o dichalkogenki metali przejściowych, w których można zrealizować spinowo-dolinowe kubity kontrolowane przy pomocy pól elektrycznych. Tego typu układy stanowią obiecującą platformę do realizacji skalowalnych operacji kwantowych opartych na elektrycznie sterowanych stanach kwantowych. Nie mam wątpliwości, że przedstawione publikacje wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny, w szczególności fizyki układów dwuwymiarowych oraz dolinotroniki (ang. *valleytronics*), w kontekście zastosowań w technologiach kwantowych, a Habilitant jest wysokiej klasy specjalistą w teoretycznych badaniach układów niskowymiarowych, o czym świadczy także współpraca z grupami doświadczalnymi.

Jeżeli chodzi o całkowity dorobek Habilitanta, na dzień złożenia wniosku Kandydat był autorem bądź współautorem 34 publikacji, które ukazały się w dobrych i bardzo dobrych czasopismach fizycznych, takich jak: *Physical Review B*, *Physical Review A*, *Physical Review Applied*, *Applied Physics Letters*. Warto zauważyć, że Kandydat posiada również w swoim dorobku publikacje o charakterze bardziej interdyscyplinarnym, które ukazały się w *European Heart Journal* czy też w *Journal of Cleaner Production*. Na dzień złożenia wniosku, publikacje Habilitanta były cytowane 198 razy, a indeks Hirsch wynosi 10 (wg bazy WoS). Moim zdaniem wyniki bibliometryczne mieszczą się w typowym zakresie biorąc pod uwagę etap kariery naukowej. Warto również podkreślić, że za swoje osiągnięcia naukowe Kandydat został m.in. kilkakrotnie wyróżniony Nagrodą Rektora Politechniki Wrocławskiej. Jest także laureatem Stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnych młodych naukowców.

Jeżeli chodzi o staże naukowe, Habilitant w zasadzie nie odbył żadnego długoterminowego stażu naukowego w zagranicznym ośrodku naukowym. Warto podkreślić, iż taki staż jest bardzo ważnym elementem rozwoju każdego naukowca, zwłaszcza w naukach ścisłych i przyrodniczych, które z definicji są międzynarodowe. Jeżeli nawet z przyczyn niezależnych nie uda się takiego stażu odbyć, warto chociaż postarać się o odbycie wizyt krótkoterminowych. Niestety, także w tym zakresie Habilitant nie może pochwalić się większą aktywnością: jak wynika z dokumentacji, w trakcie całego ponad dziesięcioletniego okresu podoktorskiego, Kandydat odbył tylko dwie krótkoterminowe wizyty: jedną, tygodniową, na Uniwersytecie w Würzburgu w grupie prof. Ronniego Thomale oraz drugą (dwa tygodnie) na Uniwersytecie w Regensburgu, w grupie prof. Mileny Grifoni oraz grupie prof. Jaroslava Fabiana. Spełnienie warunku określonego w Art. 219 pkt. 2 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym, w interpretacji odbycia zagranicznego stażu naukowego, nie jest zatem w moim przekonaniu spełnione. Jednak, literalnie rzecz biorąc, należy przyznać, że Kandydat wykazał się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni (realizacja projektu Fuga na Politechnice Wrocławskiej, gdzie następnie

Kandydat uzyskał zatrudnienie), zatem w/w warunek spełnia. Myślę, że z brakiem mobilności związany jest po części brak zaproszeń na międzynarodowe konferencje – Habilitant wymienia tylko zapraszone seminaria wygłoszone głównie w kraju (3 seminaria za granicą: w Pradze, Regensburgu i Würzburgu). Ponadto, choć po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, wyniki swoich badań dr Pawłowski prezentował na 17 konferencjach międzynarodowych, były to głównie prezentacje plakatowe (15 plakatów i tylko 2 referaty). Uważam, że od kandydata do stopnia naukowego doktora habilitowanego, stopnia, który definiuje samodzielność i dojrzałość naukową, należy oczekiwać odważnego prezentowania tez i wyników swoich badań przed szerokim gremium naukowej społeczności międzynarodowej.

Dr Pawłowski kierował dwoma projektami z Narodowego Centrum Nauki: projektem Fuga pt. "Projekt i symulacja działania nanourządzeń spintronicznych zbudowanych na bazie nowoczesnych nanomateriałów: monowarstw dwusiarczku molibdenu i innych chalcogenków metali przejściowych" oraz projektem Sonata nt. "Realistyczne modelowanie nanourządzeń kwantowych opartych na nowoczesnych materiałach 2D". Ponadto, kierował również projektem MOCART z Urzędu Miasta Wrocławia dotyczącym "Opracowania innowacyjnego algorytmu do weryfikacji zabezpieczeń w postaci mikroskopowych oznaczeń holograficznych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji" – był to projekt realizowany we współpracy z firmą Nanores. Dr Pawłowski był również wykonawcą w czterech grantach, w tym w grantie NCN Opus oraz w grantie NCN Sonata Bis. Działalność grantową Kandydata oceniam bardzo wysoko.

Jeżeli chodzi o działalność dydaktyczną, Kandydat prowadzi autorski kurs Machine-Learning – Applications. Ma także doświadczenie w prowadzeniu innych zajęć, m.in. Dynamiki Nieliniowej, czy też Metod Obliczeniowych Fizyki i Techniki. Ponadto, Habilitant był promotorem pomocniczym w dwóch doktoratach oraz opiekunem dużej grupy dyplomantów. Jest również zaangażowany w działalność organizacyjną, jest m.in. członkiem komitetu programowego kierunku Big Data Analytics, brał także udział w organizacji Sympozjum Instytutu Fizyki Teoretycznej Politechniki Wrocławskiej.

Od strony edytorskiej, autoreferat i opis osiągnięć są przygotowane rzetelnie, szkoda jednak, że osiągnięcia przedstawione w wykazie nie zostały ponumerowane (np.: publikacje, konferencje) – łatwiej byłoby się do nich odnieść. Szkoda również, że nie zawarto tytułów publikacji w wykazie osiągnięć, a osiągnięciu habilitacyjnemu nie nadano żadnego tytułu. Są to jednak nieistotne uchybienia, które w żaden sposób nie wpływają na ocenę merytoryczną.

Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożone osiągnięcie habilitacyjne – cykl siedmiu publikacji naukowych – spełnia wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego. Dr Pawłowski jest wysokiej klasy specjalistą w zakresie modelowania nanostruktur, w szczególności nowoczesnych układów dwuwymiarowych, oraz posiada szeroką współpracę zarówno z grupami teoretycznymi, jak i doświadczalnymi. Habilitant wykazał się również istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni. Wnoszę zatem o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania oraz **popieram wniosek dr. inż. Jarosława Pawłowskiego o nadanie Mu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.**

