

Prof. dr hab. Romuald Lemański  
Instytut Niskich Temperatur  
i Badań Strukturalnych PAN  
we Wrocławiu

Wrocław, 4.07.2019 r.

**Recenzja**  
**pracy habilitacyjnej i dorobku naukowego**  
**dr. inż. Pawła Wójcika**

**Informacje ogólne o karierze naukowej Habilitanta**

Dr inż. Paweł Wójcik, zwany dalej również Habilitantem, uzyskał tytuł magistra inżyniera fizyki technicznej w 2007 r. po ukończeniu studiów na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie. Promotorem jego pracy magisterskiej zatytułowanej „*Opis transportu kwantowego w heterostrukturach półprzewodnikowych oparty na metodach przestrzeni fazowej*” był dr inż. B. Spisak. Rok później, tj. w 2008 r. uzyskał dodatkowo tytuł inżyniera informatyki stosowanej. Swoją karierę naukową rozwinął pod kierunkiem prof. dr. hab. J. Adamowskiego, który był promotorem jego pracy doktorskiej, pt. „*Symulacje komputerowe transportu kwantowego w warstwowych nanostrukturach półprzewodnikowych*” i uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w roku 2012.

Po obronie pracy doktorskiej dr inż. Paweł Wójcik został zatrudniony na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie najpierw na stanowisku asystenta (od października 2012 do września 2014), a od października 2014 do chwili obecnej na stanowisku adiunkta.

Jeszcze przed uzyskaniem doktoratu Habilitant odbył dwa kilkumiesięczne staże zagraniczne:

1. Wydział Fizyki, Uniwersytet w Leeds, Anglia (01.07.2009 -01.01.2010, 6-miesięczny pobyt naukowy w grupie prof. Bryana Hickey),
2. Wydział Fizyki, Uniwersytet w Antwerpii, Belgia (01.02.2011 -01.04.2011, 2-miesięczny pobyt naukowy w grupie prof. Francois Peetersa).

Natomiast po uzyskaniu doktoratu pogłębiał swoje doświadczenie naukowe w czasie trzech krótkich (poniżej 2 tygodni) pobytów w ośrodkach w Europie Zachodniej: dwukrotnie (w roku 2016 i 2017) na Uniwersytecie w Modenie, Włochy, w grupie prof. Guido Goldoniego i raz (w 2018 r.) na Uniwersytecie w Bazylei, Szwajcaria, w grupie prof. Daniela Lossa.

**1. Ocena osiągnięcia naukowego**

Osiągnięcie naukowe dr. inż. Pawła Wójcika, będące podstawą jego pracy habilitacyjnej nosi tytuł: „**Wpływ oddziaływania spin-orbita oraz efektów orbitalnych na własności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych i nadprzewodzących**” i opiera się na cyklu 11 publikacji (H1 – H11). W publikacjach tych przedstawiono wyniki badań teoretycznych dotyczących roli oddziaływania spin-orbita (SO) i efektów orbitalnych w tranzystorach i filtrach



spinowych oraz w strukturach półprzewodnik/nadprzewodnik, w których występują efekty topologiczne (stany Majorany). Rozpatrywano tam różne interesujące problemy, proponując jednocześnie ich rozwiązania prowadzące m.in. do otrzymywania efektywnie działających tranzystorów spinowych, a także do zrozumienia i lepszej kontroli zjawisk w nanodrutach metalicznych. Ta różnorodność zagadnień została ujęta w monotematyczny cykl prac, który moim zdaniem spełnia wymogi osiągnięcia naukowego w postępowaniu habilitacyjnym.

Także od strony formalnej cykl publikacji H1-H11 nie budzi zastrzeżeń zarówno pod względem ilościowym (ich liczba jest nawet wyraźnie większa niż w innych recenzowanych przeze mnie do tej pory osiągnięciach habilitacyjnych), jak również dlatego, że prace wchodzące w jego skład ukazały się w renomowanych czasopismach: H1 i H2 w *J. Appl. Phys.*, H3 oraz H8-H10 w *Phys. Rev B*, H4-H6 w *Semicond. Sci. Technol.*, H11 w *Appl. Phys. Lett.* oraz H7 w *Scientific Reports*. Na szczególne podkreślenie zasługuje tutaj fakt, że aż 4 z tych prac ukazały się w *Phys. Rev. B*, a jedna z nich (H7) w prestiżowym *Scientific Reports*.

Współautorem sześciu spośród tych publikacji (H1-H2, H4-H7) jest promotor pracy doktorskiej Habilitanta, prof. dr hab. J. Adamowski, przy czym trzy z nich (H1, H2 i H4) powstały przy współdziałaniu jeszcze dwóch innych samodzielnych pracowników naukowych (dr hab. inż. J. Spisak i dr hab. inż. M. Wołoszyn). Współautorami pracy H3 są prof. dr hab. J. Spałek oraz dr M. Zegrodnik. Prace H10 i H11 powstały przy współpracy zagranicznej (współautorami są dr A. Bertoni oraz prof. G. Goldoni z Uniwersytetu w Modenie). Natomiast współautorem prac H7 i H8 jest dr inż. M. P. Nowak.

Chociaż w zestawie prac H1-H11 nie ma publikacji samodzielnej Habilitanta, to jednak aż w 10 spośród nich jest on pierwszym autorem. Z oświadczeń wszystkich współautorów, a także z informacji dostarczonej przez Habilitanta wynika, że odegrał on kluczową rolę w ich powstaniu. Utwierdza mnie w tym również dokumentacja dostarczona razem ze zbiorem tych 11 publikacji, która zawiera m.in. informacje o zakresie pracy wykonanej przez Habilitanta w każdej z nich, a także dość obszerny opis całości badanego zagadnienia wskazujący na głębokie zrozumienie przedmiotu badań przez Habilitanta.

Głównym celem badań przeprowadzonych przez Habilitanta w ramach przedstawionego do recenzji osiągnięcia naukowego było wykorzystanie oddziaływania SO i efektów orbitalnych do polepszenia efektywności i opracowania nowych typów tranzystorów spinowych, a także głębsze zrozumienie zjawisk występujących w nanodrutach metalicznych. Zadanie to było bardzo ambitne nie tylko ze względu na złożoność wynikającą m.in. z kwantowej natury występujących tutaj zjawisk, ale również dlatego, że ta tematyka (spintronika, efekty topologiczne) wzbudza obecnie ogromne zainteresowanie i w związku z tym jest duża konkurencja w tej dziedzinie.

Badając tranzystory spinowe Habilitant skupił się na dwóch zagadnieniach. Pierwsze z nich dotyczyło ulepszenia pierwotnej wersji tego tranzystora zaproponowanej przez Dattę i Dasa i polegało na stworzeniu warunków do uzyskiwania większej wartości sygnału na wyjściu. Drugim zagadnieniem była analiza nowego typu tranzystora spinowego opartego na zupełnie innej architekturze elementów nanoskopowych.

Natomiast badania układów hybrydowych półprzewodnik/nadprzewodnik były ukierunkowane na znalezienie wpływu oddziaływania SO i efektów orbitalnych na stany Majorany.



W celu zwiększenia sygnału na wyjściu tranzystora zaproponowano zastosowanie półprzewodnikowych filtrów spinowych jako generatorów i detektorów spolaryzowanego spinowo prądu elektronowego. Modele tych filtrów zaprezentowano w pracach H2 i H7. Jeden z nich jest oparty na półprzewodnikowej strukturze typu Y z punktowym kontaktem kwantowym zlokalizowanym w jednej z gałęzi nanostruktury. Natomiast zasada działania drugiego z tych filtrów opiera się na międzypasmowym oddziaływaniu SO w układzie sprzężonych drutów kwantowych z kwantowym kontaktem punktowym zlokalizowanym w środku nanodrutu Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że zastosowanie pierwszego z wymienionych filtrów spinowych prowadzi do wzrostu sygnału wyjściowego o trzy rzędy wielkości, a oczekuje się, że zastosowanie drugiego pozwoli uzyskać jeszcze znacznie większą wydajność pracy tranzystora.

W celu lepszego zrozumienia i kontroli przepływu spinu w tranzystorach z kanałem przewodzenia opartym na sprzężonych drutach kwantowych, w pracy H6 przeanalizowano wpływ oddziaływania SO wewnątrz poszczególnych pasm oraz między pasmami. Natomiast w pracy H1 przedstawiono symulacje komputerowe tranzystora spinowego opartego na nanodrucie InAs, w którym akcja tranzystorowa jest indukowana oddziaływaniem SO typu Rashby wytwarzanym przez potencjał bramki.

Z kolei w pracach H10 i H11 wyznaczono we współpracy z grupą teoretyków z Uniwersytetu w Modenie (Włochy) stałą oddziaływania SO typu Rashby, która jest podstawowym parametrem określającym własności tranzystorów opartych na nanodrutach. Obliczenia te wykonano posługując się metodą  $k \cdot p$  i uzyskano dobrą zgodność ilościową z danymi eksperymentalnymi.

W pracy H4 przedstawiono wyniki badań nad zupełnie nowym rodzajem tranzystora spinowego, który kilka lat temu został zaproponowany w czasopiśmie *Science* [*Science* **337**, 1221350 (2012)]. W tym tranzystorze kontrola spinu dokonuje się za pomocą pola magnetycznego, będącego złożeniem przyłożonego pola zewnętrznego oraz pola spiralnego pochodzącego od pasków ferromagnetycznych umieszczonych nad kanałem przewodzenia. W pracy H4 zbadano efekt nieadiabatyczności i wykazano, że w układzie, w którym transport spinu staje się nieadiabatyczny powstają przejścia rezonansowe Landaua-Zenera powodujące całkowitą blokadę przepływu prądu przez tranzystor.

Natomiast w pracy H5 zaproponowano ulepszoną wersję tego tranzystora nowego typu ze spiralnym polem magnetycznym, w którym do wywołania akcji tranzystorowej pole magnetyczne zastąpiono polem elektrycznym wytworzonym przez bramki boczne dołączone do nanodrutu.

Poza układami spintronicznymi (filtry i tranzystory spinowe) Habilitant badał też wpływ oddziaływania SO i efektów orbitalnych na topologiczne stany materii (stany Majorany) w układach hybrydowych półprzewodnik/nadprzewodnik. W szczególności w pracy H3 wykazano, że efekty orbitalne w nanodrutach nadprzewodzących indukują fazę Fulde-Ferrela, w której pary Coopera mają pęd różny od zera. W kolejnej pracy H8 zbadano wpływ efektu orbitalnego pochodzącego od pola magnetycznego na długość zaniku funkcji falowej stanów Majorany dla słabego sprzężenia pomiędzy półprzewodnikiem i nadprzewodnikiem. Natomiast w pracy H9 zbadano wpływ stanów Landaua na wielkość wyindukowanej przerwy energetycznej w zakresie silnego sprzężenia pomiędzy półprzewodnikiem i nadprzewodnikiem.

Po zapoznaniu się z dostarczoną mi dokumentacją stwierdzam, że wyniki opublikowane w cyklu prac H1-H11 wyraźnie i w sposób przekonujący ukazują bardzo istotny wpływ oddziaływania



SO i efektów orbitalnych na własności badanych układów spintronicznych oraz hybrydowych typu półprzewodnik/nadprzewodnik. Dlatego moim zdaniem główny cel badań przedstawionych jako osiągnięcie naukowe Habilitanta został osiągnięty. Wartość merytoryczna tych badań jest na wysokim poziomie światowym, co m.in. potwierdza fakt, że ukazały się w wysoko notowanych czasopismach naukowych.

Należy jeszcze dodać, że zastosowane w tych pracach obliczenia wymagały m.in. dobrej znajomości metod symulacji komputerowych, a także formalizmu związanego z kwantowo-mechanicznym opisem układów elektronowych oddziałujących z polem elektromagnetycznym.

Wszystko to wskazuje na znaczny wkład Habilitanta w rozwój badań nad udoskonaleniem urządzeń spintronicznych oraz pogłębienie zrozumienia topologicznych stanów materii.

## **2. Ocena aktywności naukowej**

### **a) dorobek publikacyjny**

Do momentu złożenia wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego dr inż. Paweł Wójcik opublikował w sumie 38 prac w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, przy czym 30 z nich powstało po uzyskaniu przez niego stopnia doktora. Prace te ukazały się w następujących czasopismach: *Scientific Reports* (1 praca), *Phys. Rev. B* (5 prac), *J. Appl. Phys.* (4 prace), *Appl. Phys. Lett.* (3 prace), *J. Phys.: Condens. Matter* (3 prace), *Physica E* (3 prace), *Acta Phys. Pol. A* (7 prac), *Physica Status Solidi B* (2 prace), *Semicond. Sci. Technol.* (6 prac), *J. Supercond. Nov. Magn.* (2 prace) oraz *J. Phys.: Conf. Ser.* (1 praca).

Pod względem ilościowym, a przede wszystkim ze względu na wysoką rangę wymienionych tu czasopism, jest to wynik bardzo dobry. Można przypuszczać, że uzyskanie tak dobrego rezultatu wynikało przede wszystkim z twórczej pracy Habilitanta, ale także z jego umiejętności współpracy z naukowcami pracującymi w jego środowisku na AGH jak również w innych ośrodkach w Polsce i za granicą. Rzeczywiście, zdecydowana większość tych prac jest wieloautorska, a Habilitant jest samodzielnym autorem tylko 2 z nich. Jednak dr inż. Paweł Wójcik jest pierwszym autorem aż 27, czyli zdecydowanej większości spośród 38 publikacji, co oznacza, że jego wkład w ich powstanie był wiodący. Dlatego nie mam najmniejszej wątpliwości co do samodzielności i dojrzałości naukowej Habilitanta.

Biorąc pod uwagę przedstawione tutaj informacje i dane jestem całkowicie przekonany, że dorobek publikacyjny dra inż. Pawła Wójcika zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym, spełnia wymagania niezbędne do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego. Istotnie, całkowity *impact factor* wszystkich opublikowanych prac wynosi 80,13, co jest dobrym wynikiem, świadczącym m.in. o tym, że prace Habilitanta ukazały się w czasopismach cieszących się dużym uznaniem.

Według naukowej bazy danych *Web of Sciences* całkowita liczba cytowań prac Habilitanta wynosi 124, a bez auto cytowań 60, natomiast indeks Hirscha jest równy 6. Te dane są raczej na średnim poziomie, niemniej jednak świadczą o tym, że prace Habilitanta zostały już zauważone w środowisku naukowym.



### **b) inne osiągnięcia naukowo-badawcze**

Na uznanie zasługuje fakt, że Habilitant został kierownikiem finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki projektu badawczego p.t. *"Nadprzewodnictwo niekonwencjonalne w cienkich warstwach metalicznych"*, który został przyznany na lata 2018–2021 w ramach konkursu Sonata. Był też w latach 2013-2015 kierownikiem grantu *"Symulacje komputerowe własności nadprzewodzących nanostruktur metalicznych"* finansowanego przez MNiSW w ramach programu Juventus Plus. Natomiast aktualnie jest on wykonawcą w dwóch projektach krajowych, a był wykonawcą w kilku zakończonych już projektach krajowych i jednym zagranicznym.

Za swoją działalność naukową dr inż. Paweł Wójcik otrzymał następujące nagrody:

1. Nagroda im. prof. Zbigniewa Engela, I stopnia za cykl publikacji w latach 2014-2016 (2017).
2. Nagrody Rektora Akademii Górniczo–Hutniczej drugiego stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2010, 2013, 2015, 2016.
3. Nagrody Rektora Akademii Górniczo–Hutniczej trzeciego stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2014, 2017.
4. *"Małopolskie Stypendium Doktoranckie"* w ramach programu *"Działania Zintegrowane Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego"*, jednostka przyznająca: Zarząd Województwa Małopolskiego (2009)

Swoje wyniki Habilitant prezentował ustnie na dwóch konferencjach krajowych i dwóch międzynarodowych, a na kilkunastu konferencjach przedstawiał swoje wyniki na plakatach, w tym 6 razy za granicą. Ponadto jego wyniki jako współautora były prezentowane kilkanaście razy w czasie ustnych wystąpień konferencyjnych i prawie trzydzieści razy na sesjach plakatowych.

Oprócz wystąpień konferencyjnych dr inż. Paweł Wójcik wygłosił też 4 referaty na seminariach poza AGH, w tym 2 w Polsce (Uniwersytet Jagielloński i Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii w Krakowie) oraz 2 za granicą (Uniwersytet w Modenie, Włochy oraz Uniwersytet w Bazylei, Szwajcaria).

Habilitant recenzował kilkanaście prac w renomowanych czasopismach naukowych, w tym m.in. w *Phys. Rev. B, Physica B, Phys. Lett. A, Int. J. Mod. Phys. B, J. Appl. Phys.*

### **c) działalność dydaktyczna**

W ramach działalności dydaktycznej Habilitant prowadził ćwiczenia rachunkowe i laboratoria z Fizyki dla studentów Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska oraz Wydziału Odlewnictwa AGH. Natomiast dla studentów Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH prowadził ćwiczenia rachunkowe z Metod Matematycznych Fizyki oraz ćwiczenia laboratoryjne z Metod Obliczeniowych Fizyki, a także z Podstaw Informatyki i Programowania Proceduralnego. Jego działalność dydaktyczna obejmowała też opiekę nad studentami przygotowującymi swoje prace dyplomowe; był on promotorem 6 prac magisterskich, oraz 11 prac inżynierskich

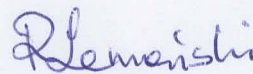
Warto tutaj jeszcze podkreślić, że na podstawie ankiet studenckich w roku 2016 Habilitant został umieszczony na liście 10 najlepiej ocenionych nauczycieli akademickich Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.

**d) działalność organizacyjna**

W latach 2015-2017 Habilitant był członkiem Rady Młodych Naukowców - organie doradczym Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu osiągnięcie naukowe w postaci cyklu publikacji pt. „Wpływ oddziaływania spin-orbita oraz efektów orbitalnych na własności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych i nadprzewodzących” oraz pozostałe dokonania dr. inż. Pawła Wójcika uzyskane przez niego po otrzymaniu stopnia doktora wnoszą istotny wkład w rozwój fizyki układów nanoskopowych, a w szczególności spintroniki. Natomiast z przedstawionej mi dokumentacji wynika, że wykazuje on dużą aktywność naukową i dydaktyczną.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy oraz wszystkie inne przedstawione tu aspekty działalności Habilitanta uważam, że spełnione są wymogi Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym, dlatego wnioskuję o dopuszczenie dr. inż. Pawła Wójcika do dalszych etapów postępowania mającego na celu nadanie mu stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk fizycznych.



Romuald Lemański