



**Instytut Fizyki Molekularnej
Polskiej Akademii Nauk**
Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań
www.ifmpan.poznan.pl
tel. 61 8695 100, fax 61 8684 524

Poznań, 05.09.2019 roku

Prof. dr hab. Jan Martinek,
Instytut Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu

Ocena osiągnięcia naukowego:

„Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych”

oraz dorobku naukowego, dra Michała Nowaka

zatrudnionego w Akademickim Centrum Materiałów i Nanotechnologii w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie w związku z postępowaniem
o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Informacje ogólne o Kandydacie i jego działalności dydaktyczno-organizacyjnej

Dr Michał Nowak ukończył studia magisterskie w 2008 roku na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Pracę magisterską pod tytułem „Sprzężenie molekularne dla pary elektronów w stosie samozorganizowanych kropek kwantowych” wykonał pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana. Po ukończeniu studiów kontynuował pracę naukową jako doktorant na tym samym wydziale oraz na Uniwersytecie w Antwerpii, gdzie współpracując z prof. Bart Partoens i prof. Francois Peeters z grupy Condensed Matter Theory spędził rok akademicki 2010/2011 prowadząc badania w ramach pracy doktorskiej. W roku 2013 obronił pracę doktorską zatytułowaną „Electronic structure of artificial atoms and molecules: spin-orbit coupling effects”, wykonaną pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana i promotora pomocniczego prof. Francois Peeters, która została wyróżniona przez Radę Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. W tym samym roku uzyskał stopień doktora nauk fizycznych dwóch uczelni Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz Uniwersytetu w Antwerpii.

Działalność naukowa Habilitanta była dalej związana z Wydziałem Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, gdzie po doktoracie otrzymał on stanowisko asystenta naukowego, a w 2017 roku zatrudniony został jako adiunkt. W okresie tym w latach 2015-

2016 odbył dwuletni staż podoktorski w QuTech and Kavli Institute of Nanoscience, na Delft University of Technology w Delft w Holandii, gdzie blisko współpracował z wiodącymi grupami eksperymentalnymi prof. Leo Kouwenhoven i prof. Lieven Vandersypen. W międzyczasie podjął również współpracę z kolejną wiodącą grupą eksperymentalną prof. Charels Marcusa z Niels Bohr Institute w Kopenhadze (Dania).

Dzięki tej aktywności dr Michał Nowak miał możliwość uczestniczenia w wielu (pięciu) krajowych projektach naukowych finansowanych przez NCN oraz FNP, z których trzema miał też okazję kierować – dwóch NCN i jednym FNP. Wziął też udział w dwóch projektach międzynarodowych w roli wykonawcy. Jego praca naukowa została wyróżniona ośmioma stypendiami, nagrodami i wyróżnieniami, z czego sześć dotyczy badań prowadzonych w ramach doktoratu, a dwie dotyczą okresu podoktorskiego.

Sprawował opiekę naukową jako promotor dwóch prac magisterskich oraz jednej doktorskiej jako promotor pomocniczy, których promotorem był prof. dr hab. inż. Bartłomiej Szafran. Prowadził też szereg zajęć dla studentów na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Brał też udział w przygotowaniach pokazów dla młodzieży szkolnej w ramach Dni Nauki i Sztuki.

Ocena całego dorobku naukowego

Dorobek naukowy dra Michała Nowaka, łącznie z 11 pracami wchodzącymi w skład rozprawy habilitacyjnej, obejmuje 32 publikacji, z czego 31 prac opublikowanych zostało w czasopiśmie z bazy Web of Science, a 1 praca w innych czasopiśmie lub wydawnictwach książkowych. Jest w tym również 10 prac wykonanych przed doktoratem. Wszystkie te publikacje to prace współautorskie. Trzeba podkreślić, że Kandydat do stopnia dra habilitowanego w połowie prac, w 16 (z tego 6, które wchodzi do rozprawy habilitacyjnej), jest pierwszym z współautorów i jego wkład w te prace jest dominujący, gdyż przekracza 50%. W pozostałych publikacjach (16) Habilitant znajduje się na dalszej pozycji. W ramach 11 prac habilitacyjnych 4 prace to prace „eksperymentalne”, w których Kandydat odpowiadał za część teoretyczną, a wśród pozostałych prac są kolejne 4 takie „eksperymentalne” prace.

W działalności naukowej dra Michała Nowaka można wyodrębnić trzy okresy. Okres pierwszy obejmuje lata przed uzyskaniem stopnia doktora w październiku 2013 roku oraz okres do roku 2014. Był to okres bardzo aktywnej działalności publikacyjnej Kandydata. W okresie przed doktoratem ukazało się aż 10 prac naukowych i kolejnych 9 bezpośrednio po doktoracie z których 3 weszły do rozprawy habilitacyjnej. Prace te powstały we współpracy z

promotorem prof. dr hab. inż. Bartłomiejem Szafranem, a także część z nich we współpracy z prof. Bart Partoens i prof. Francois Peeters z Uniwersytetu w Antwerpii. Drugi okres obejmuje lata od 2015 do 2016 roku, kiedy Kandydat przebywał na stażu podoktorskim w Delft University of Technology w Delft w Holandii, gdzie nawiązał współpracę z dwoma lokalnymi grupami eksperymentalnymi, a co zaowocowało w kolejnych latach aż 8 pracami „eksperymentalnymi”, w których odpowiadał on, również z innymi współautorami, za część teoretyczną. 4 z tych prac weszło do zbioru prac habilitacyjnych. Po powrocie do Krakowa w trzecim okresie od 2018 roku powraca do publikowania prac teoretycznych (4) w niewielkich zespołach teoretycznych już bez osoby promotora pracy doktorskiej co tak jak prace „eksperymentalne” wskazuje na pełne usamodzielnienie się względem wcześniejszego promotora. Te 4 prace również weszły do rozprawy habilitacyjnej.

Wśród prac przygotowanych po uzyskaniu stopnia doktora znajdują się artykuły opublikowane w bardzo dobrych czasopismach z dziedziny fizyki m.in.: *Nature Communication* (3), *npj Quantum Information* (1), *Nano Letters* (2), *Physical Review Applied* (1), *Physical Review B* (9), *Applied Physics Letters* (2), i innych. Sumaryczny *impact factor* publikacji naukowych według listy JCR zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 157. Całkowita liczba cytowań wynosi 395, a bez autocytowań 346. Jednakże ich dynamika sugeruje, iż może nastąpić ich dalszy wzrost w następnych latach. Indeks Hirscha wynosi 11 i należy do dobrych jak na habilitację.

Tematyka prac naukowych wchodzących do dorobku naukowego (z wyłączeniem prac wchodzących do habilitacji) obejmuje zarówno badania eksperymentalne wsparte wykonaną przez Habilitanta analizą teoretyczną oraz szereg prac teoretycznych.

W pracach „eksperymentalnych” [P20]-[P21] badane były nadprzewodnikowe efekty biskości czyli indukowane nadprzewodnictwo w różnych układach półprzewodnikowych nanodrutów, gdzie badano efekt Josephsona, a także wielokrotne odbicia Andreeva, które mogą być wykorzystane do oszacowania transparentności złącza, liczby podpasm i indukowanej przerwy nadprzewodzącej w półprzewodniku. Kandydat wykazał m.in., że nanodruły te mają charakter jednowymiarowy (tylko jedno podpasmo) co jest istotne w zastosowaniach tych nanodrutów w uzyskiwaniu stanów fermionów Majorany, a które w przyszłości mogą być wykorzystywane w budowie topologicznych komputerów kwantowych.

W kolejnej grupie prac Habilitant badał stany elektronowe oraz ekscytonowe w półprzewodnikowych kropkach kwantowych, gdzie zajmował się m.in. efektami spinowymi w obecności oddziaływań nadsubtelnych, blokady Pauliego, oddziaływaniem z fononami, a także oddziaływaniami spin-orbita w tych układach.

Kolejne prace dotyczą transportu elektronowego w dwuwymiarowym gazie elektronowym, gdzie na uwagę może zasługiwać praca [P18]. Pokazano, że w kwantowym kontakcie punktowym oddziaływanie elektron-elektron skutkuje powstaniem spolaryzowanej spinowo wyspy ładunku, która może być odpowiedzialna za obserwowane eksperymentalnie anomalne plateau konduktancji.

Dorobek naukowy obejmuje również prezentacje na konferencjach krajowych i zagranicznych. W tym zakresie dorobek dra M. Nowaka wygląda dość dobrze. Habilitant uczestniczył łącznie w ponad dwudziestu konferencjach. W okresie ostatnich lat wygłosił 8 referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych oraz 3 wykłady prozzone. W podsumowaniu całego dorobku dra Nowaka, zawierającego się w 32 publikacjach, pragnę podkreślić dużą samodzielność Kandydata, gdyż w połowie prac jest pierwszym współautorem oraz utrzymywanie intensywnej i twórczej działalności w całym okresie pracy naukowej. Jak można wnioskować z autoreferatu, działalność ta jest, i będzie, z powodzeniem kontynuowana.

Ocena cyklu publikacji (rozprawy habilitacyjnej) zatytułowanej "Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych", stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego.

Rozprawa habilitacyjna "*Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych*" dra Michała Nowaka dotyczy teoretycznych badań nadprzewodnikowego zjawiska bliskości prowadzącego do indukowania nadprzewodnictwa w nanodrutach i innych nanostrukturach półprzewodnikowych, a także efektów spinowych w tych układach. Całość rozprawy habilitacyjnej obejmuje 11 prac naukowych opublikowanych w recenzowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej. Z tych 11 prac, 5 prac jest dwuautorskich, a kolejne 2 są pracami z trzema autorami. Z tych 7 prac w 6 dr Nowak jest pierwszym autorem z przeważającym wkładem większym niż 50%. W pozostałych 5 pracach, gdzie Habilitant jest dalszym współautorem, jego wkład jest mniejszy niż 50%.

Współautorem 3 prac jest prof. dr hab. inż. Bartłomiej Szafran promotor pracy doktorskiej, z którego oświadczenia wynika, że jego wkład polegał na konsultacjach naukowych dotyczących koncepcji prac, metod obliczeniowych, oraz na pomocy w redagowaniu manuskryptów. Również z oświadczeń Habilitanta można wywnioskować, że w tym przypadku jego wkład jest dominujący. Prace wchodzące w skład rozprawy opublikowane zostały we wiodącym czasopiśmie naukowym, *Nature Communication* (3),

oraz dobrych czasopismach: *Physical Review Applied* (1), *Physical Review B* (5), *Applied Physics Letters* (2).

Za jedno z największych osiągnięć Habilitanta można byłoby uznać fakt odbycia stażu podoktorskiego w jednym z czołowych uniwersytetów europejskich pod względem badań eksperymentalnych w dziedzinie fizyki mezoskopowej i nawiązanie współpracy z wiodącymi grupami eksperymentalnymi z tego Uniwersytetu oraz Uniwersytetu w Kopenhadze. Współpraca ta zaowocowała ośmioma pracami, z których 4 [H4,H5,H6,H7] opublikowane w *Nature Comm.* (3), oraz *Physical Review Applied* (1), weszły w skład rozprawy habilitacyjnej. Wkład Kandydata w tych pracach polegał na dyskusji, interpretacji i teoretycznej analizie wyników prowadzonego eksperymentu. Przeprowadzał obliczenia oraz uzyskał wyniki teoretyczne prezentowane w pracach, redagował części teoretyczne manuskryptów. Wszystkie te prace uzyskały już wysokie cytowania odpowiednio 58, 39, 24, 80.

Dwie z tych prac [H6] i [H7] powstałych we współpracy z grupą prof. L. Kouwenhoven'a z Uniwersytetu z Delft z Holandii, moim zdaniem najciekawsze z tej czwórki, dotyczą własności półprzewodnikowych nanodrutów w obecności nadprzewodnika, która indukuje topologiczne nadprzewodnictwo w tym nanodrucie w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, dzięki silnemu sprzężeniu spin-orbita występującemu w tych układach. W pracy wykazano wyjątkowo silne oddziaływanie spin-orbita prowadzące do pojawienia się przerwy helikalnej pokazanej w eksperymencie.

Badania eksperymentalne z pracy [H7] wykazały podwajanie przewodności kwantowego kontaktu punktowego w nanodrucie dzięki obecności nadprzewodnika na skutek odbić Andreeva. To podwojenie wynika z obecności nośników o podwójnym ładunku tzw. par elektronów Coopera. Wyniki te wykazały jednoznacznie, że transport elektronowy w tym układzie odbywa się w limicie balistycznym. Taka balistyczna natura nanodrutów jest konieczna dla obserwacji fermionów Majorany w tych układach, gdyż obecności nieporządku w tych strukturach może prowadzić do efektów nie pozwalających na jednoznaczną detekcję tych fermionów. W pracach [H6] i [H7] uzyskano wysoką zgodność pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a obliczeniami teoretycznymi przeprowadzonymi przez dra Nowaka jak zaprezentowano na Rys. 13 i 14, co pozwoliło na jednoznaczną interpretację uzyskanych wyników eksperymentalnych.

Kolejne dwie prace eksperymentalne, [H4] i [H5], powstały we współpracy z grupą prof. C. Markusa z Uniwersytetu z Kopenhagi. Praca [H4] dotyczy układu hybrydowego półprzewodnik-nadprzewodnik, gdzie indukowano nadprzewodnictwo poprzez nadprzewodnikowy efekt bliskości w dwuwymiarowym gazie elektronowym, w którym

warstwa nadprzewodząca nakładana była na etapie epitaksjalnego wzrostu struktury. W dwuwymiarowym gazie elektronowym wytwarzano kwantowe złącze punktowe (Quantum Point Contact - QPC). Kandydat wykonał symulacje teoretyczne, których porównanie z wynikami eksperymentalnymi pozwoliło na wykazanie podwajania wartości konduktancji dla nośników ładunku o energii leżącej w przerwie nadprzewodzącej. Wykazało to również, iż efekt odbicia Andreeva jest dominującym mechanizmem transportu przez kwantowe złącze punktowe. W pracy [H5] wytworzono po raz pierwszy w historii złącze Josephsona w układzie nadprzewodnik-dwuwymiarowy gaz elektronowy-nadprzewodnik, w którym badano stratny nienadprzewodzący prąd elektryczny płynący w na skutek wielokrotnych odbić Andreeva. Zaobserwowane charakterystyki prądowo-napięciowe zostały dobrze opisane poprzez symulacje teoretyczne wykonanymi przez Habilitanta wskazując na wysoką transparentność złącza, a co umożliwiło ich późniejsze wykorzystanie do realizacji topologicznej fazy nadprzewodzącej w tych układach. Analizy heterostruktur w dwóch powyższych pracach wykazały, że dwuwymiarowy gaz elektronowy w bliskości nadprzewodnika stanowi bardzo dobrą bazę do budowy nanostruktur hybrydowych o arbitralnej geometrii

Jak Kandydat sam zauważa w opracowaniu, we wszystkich czterech pracach eksperymentalnych jest On pierwszym teoretykiem na liście autorów.

Pozostałe 7 prac są już pracami czysto teoretycznymi. Pierwsze trzy prace [H1-H3] dotyczą badań wpływu oddziaływania spin-orbita na spinową polaryzację stanów elektronowych i prądu płynącego przez otwarte struktury półprzewodnikowe. Pierwsza z prac [H1] poświęcona jest zbadaniu efektów oddziaływania spin-orbita na prąd płynący przez kwantowy kontakt punktowy w dwuwymiarowym drucie kwantowym. Układy takie, jak proponują autorzy, mogą służyć do wytwarzania spinowo spolaryzowanego prądu elektrycznego w układach półprzewodnikowych wykorzystując oddziaływanie spin-orbita.

W kolejnej pracy [H2] badano możliwość obserwacji zjawiska mieszania stanów kwantyzacji przez oddziaływanie spin-orbita bezpośrednio przez zobrazowanie struktury prądu wypływającego z kwantowego kontaktu punktowego (QPC). Wskazano, że efekty mieszania pasm przez oddziaływanie spin-orbita może prowadzić do polaryzacji spinowej prądu płynącego przez nanodrut oraz uwidaczniać się w sposobie płynięcia prądu przez przewężenie w kanale.

W pracy [H3] rozpatrywany był układ sprzężonych wieloelektronowych kropek kwantowych zdefiniowanych w kwazi-jednowymiarowym drucie kwantowym. Pokazano, że czynnik Landego spektroskopowego rozszczepienia (czynnik g) dla wieloelektronowych

kropek kwantowych, który jest kluczowy dla wielkości rozszczepienia Zeemana istotnego dla wzbudzenia fazy topologicznej, będzie miał inną wartość niż dla kropek z pojedynczymi elektronami.

Kolejne artykuły teoretyczne, [H8], [H9], [H10] podają przewidywania dotyczące zjawisk spinowych, wzbudzanego nadprzewodnictwa oraz stanów związanych Majorany w nanostrukturach półprzewodnikowych, w szczególności w kontekście zaniedbywanych dotychczas w literaturze efektów orbitalnych pola magnetycznego. W szczególności praca [H8] opisuje przestrzenny rozkład stanów Majorany w polu magnetycznym ułożonym prostopadle do nanodrutu i podłoża. Wykazano w niej, że efekty orbitalne pola magnetycznego do tej pory uznawane za szkodliwe dla generowania stanów związanych Majorany mogą w istocie stabilizować stany o zerowej energii.

Tematem kolejnej pracy [H9] były badania efektu orbitalnego pola magnetycznego dla struktur o arbitralnej geometrii. Uwzględniając efekty orbitalne pola magnetycznego otrzymano m.in. teoretyczne wartości pola krytyczne odpowiadające wartościom mierzonym eksperymentalnie.

W pracy [H10] zaproponowano wykorzystanie interferometru kwantowego łączącego zjawisko Aharonova-Bohma i obicia Andreeva do pomiaru jednej z kluczowych wartości w nanostrukturach hybrydowych – długości koherencji kwazicząstek penetrujących obszar przykryty nadprzewodnikiem.

W ostatniej pracy [H11] zostało opisane trójterminalowe złącze Josephsona utworzone na jednowymiarowych drutach kwantowych połączonych z nadprzewodzącymi elektrodami. W układzie tym, po przyłożeniu napięć elektrycznych do nadprzewodzących elektrod własności elektryczne mogą być zdefiniowane poprzez wielokrotne lokalne i nielocalne odbicia Andreeva. W układzie tym pokazano nowy rodzaj prądu nadprzewodzącego wzbudzanego przez kwazicząstki w wieloterminalowym złączu Josephsona.

Dr Michał Nowak w swoich pracach implementował szereg metod obliczeń kwantowych przygotowując własne kody obliczeniowe. W pracach [H4], [H6], [H7], [H10], korzystał z pakietu obliczeniowego Kwant, przy którego powstaniu współpracował. Ponadto w pracach przedstawionych w autoreferacie wykorzystywał również szereg metod analitycznych,

Muszę przyznać, że z pracą [H1] mam pewne wątpliwości czy może one formalnie być traktowana jako jedna z prac habilitacyjnych, gdyż została ona wysłana i zaakceptowana do druku jeszcze przed uzyskaniem przez dra Michała Nowaka stopnia doktora.

Co charakteryzuje prace teoretyczne Habilitanta wchodzącego w skład rozprawy habilitacyjnej to stosunkowo niewielkie ich cytowania. Tych 7 prac było łącznie cytowanych 26 razy, co mogłoby świadczyć o umiarkowanym wpływie na tę dziedzinę badań. Cześć z tych prac jest stosunkowo nowa więc można mieć nadzieję, że ich rozpoznawalność w przyszłości jeszcze wzrośnie. Niewątpliwie mocnym punktem pracy habilitacyjnej jest uzyskanie istotnej zgodności wyników teoretycznych w pracach eksperymentalnych ze stosunkowo nowymi bardzo ważnymi wynikami eksperymentalnymi, których rozpoznawalność już obecnie jest bardzo wysoka.

Chciałbym pochwalić Kandydata za bardzo dobrze napisany, bogato ilustrowany przewodnik po pracach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, co znacznie ułatwia zapoznanie się z najważniejszymi uzyskanymi wynikami.

Podsumowując prace stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego pragnę stwierdzić, że reprezentują one wysoki poziom, a wkład Habilitanta jako pomysłodawcy, osoby prowadzącej obliczenia, a następnie dokonującej analizy uzyskanych wyników, jest niekwestionowalny. Przedstawiony cykl artykułów świadczy nie tylko o ugruntowanej wiedzy na temat efektów spinowych związanych z oddziaływaniem spin-orbita oraz indykowanego efektem bliskości nadprzewodnictwa w nanostrukturach półprzewodnikowych, ale i o inwencji, intuicji badawczej i bogatym warsztacie teoretycznym Kandydata. Tworzą one również bardzo dobrą podstawę do kontynuacji prac badawczych w tym kierunku. Biorąc pod uwagę wszystkie uwagi pozytywne jak i krytyczne, przedstawione w jednotematycznym cyklu osiągnięcia naukowe oceniam jako wystarczające i spełniające wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Wniosek końcowy

Przedstawione wyżej uwagi pozytywne jak i krytyczne pozwalają stwierdzić, że zarówno cykl prac oraz rozprawa habilitacyjna zatytułowana *”Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych”* jak i pozostały dorobek naukowy dra Michała Nowaka spełniają wymagania stawiane przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym. W swoich pracach dr Michał Nowak uzyskał szereg interesujących wyników a tematyka jego prac, niewątpliwie obejmuje ważne i aktualne zagadnienia fizyki hybrydowych układów nadprzewodzących i półprzewodnikowych bardzo istotnych materiałów dla przyszłych technologii. Dlatego też pozytywnie oceniam pracę

habilitacyjną i całość dorobku naukowego dra Michała Nowaka. W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy habilitacyjnej dra Michała Nowaka i uważam za uzasadnione nadanie autorowi tej rozprawy stopnia doktora habilitowanego.

Prof. dr hab. Jan Martinek,



