

Prof. dr hab. inż. Janusz Tobiła
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Email: tobola@ftj.agh.edu.pl
Tel: 12 617 44 55

Recenzja rozprawy habilitacyjnej przedstawionej jako cykl publikacji pt.:
Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych
oraz dorobku naukowego dr inż. Michała P. Nowaka

/postępowanie kwalifikacyjne o nadanie stopnia doktora habilitowanego/

Dr inż. Michał P. Nowak ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie w 2008 r. na kierunku fizyka techniczna, broniąc pracy pt.: *Sprężenie molekularne dla pary elektronów w stosie samozorganizowanych kropek kwantowych* (promotor: prof. Bartłomiej Szafran). Następnie na macierzystym wydziale rozpoczął studia doktoranckie, kontynuowane, z uwagi na współpracę naukową oraz pobyt na Uniwersytecie w Antwerpii, jako doktorat polsko-belgijski, zakończone w 2013 r. obroną rozprawy doktorskiej pt. *Electronic structure of artificial atoms and molecules: spin-orbit coupling effects* ze strony polskiej również pod kierunkiem prof. Bartłomieja Szafrana, a ze strony belgijskiej prof. Francois Peeters'a, wyróżnionej przez Radę WFIS AGH. Można zauważyć, że zainteresowanie już na wczesnym etapie rozwoju naukowego habilitanta, tematyką kwantowych zachowań elektronów, nie zawsze typowych i intuicyjnych, w praktyce obserwowanych w układach niskowymiarowych strukturach półprzewodnikowych, stanie się w późniejszych latach trwałym i dominującym kierunkiem badawczym dr M. Nowaka. Doprowadzi go, dzięki zaawansowanym i systematycznym pracom teoretycznym, do uzyskania wyników dotyczących egzotycznych, ale zarazem niezwykle intrygujących stanów elektronów, jakimi są stany związane Majorany. Nie wydaje się to przypadkowe, gdyż umiejętne łączenie ciekawych pomysłów teoretycznych w celu interpretacji zachowań kwantowych elektronów i ich emanacji kwazi-cząstkowych, z rozległym warsztatem matematycznym inżynierii obliczeniowej, jest cechą wyróżniającą doktorantów i późniejszych współpracowników prof. B. Szafrana. Niemniej dr inż. Michał Nowak zdaje się posiadać jeszcze jedną cenną cechę fizyka-teoretyka, jaką jest nie tylko dogłębne zainteresowanie wynikami eksperymentalnymi, ale przede wszystkim umiejętność współpracy z grupami doświadczalnymi. Mam wrażenie, że właśnie dzięki pogłębionemu rozumieniu szczegółów wyrafinowanych często eksperymentów, wykonywanych często w trudno powtarzalnych nanostrukturach, bywa, że otrzymanych po raz pierwszy w świecie, oraz dzięki przypatrywaniu się z bliska niekiedy nieoczywistym i nieintuicyjnym krzywym uzyskiwanym w pomiarach, udanymi okazały się próby

zasymulowania procesów fizycznych, w czym można przypuszczać dyskusje z eksperymentatorami okazały się szczególnie istotne. Kluczowym też stało się zastosowanie właściwych przybliżeń w przeprowadzonych obliczeniach kwantowych, co w efekcie pozwoliło na zidentyfikowanie zasadniczych mechanizmów odpowiedzialnych za uzyskiwane charakterystyki przewodnościowe. Niektóre z wykonanych obliczeń oraz uzyskane wyniki teoretyczne mają charakter pionierski, na co zwraca uwagę Autor w autoreferacie, i jeśli zostaną potwierdzone w dalszych badaniach eksperymentalno-teoretycznych, mają szansę znaleźć trwałe miejsce w literaturze naukowej i stać się podstawą interpretacji eksperymentów w nanostrukturach zawierających złącze półprzewodnik-nadprzewodnik. Jest to szczególnie istotne w aspekcie badań nowych faz topologicznych materii i towarzyszących temu egzotycznym stanom układów fermionów (np. zerowe mody Majorany). Nie jest odkrywczym stwierdzenie, że zjawiska magnetyzmu oraz nadprzewodnictwa od momentu ich odkrycia, należą do najbardziej fascynujących zagadnień fizyki materii skondensowanej, a stopień ich zrozumienia jest ciągle daleki od zadowalającego. Stąd tematyka badawcza podjęta przez dr M. Nowaka, realizowana ponadto z innej perspektywy niż zazwyczaj (w materiałach litych) w nanostrukturach 1- i 2-wymiarowych, należy do trudnych, ale niezwykle atrakcyjnych i emocjonujących, przez co znajduje się w głównym nurcie badań najlepszych grup pracujących w obszarze nanomateriałów oraz nanotechnologii. Świadczy o tym choćby bliska współpraca autora z grupami eksperymentalnymi z Delft, Kopenhagi oraz Cambridge.

Dr Michał Nowak zaraz po doktoracie zaczął pracować w Akademii Górniczo-Hutniczej, najpierw na stanowisku asystenta naukowego na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej (2013-2017) a następnie na stanowisku adiunkta naukowego w Akademickim Centrum Materiałów i Nanotechnologii (od 2017). W międzyczasie odbył dwuletni staż naukowy typu post-doc (2015-2016) w znakomitym ośrodku holenderskim *Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology*, który to pobyt okazał się decydujący dla uzyskania wyników będących podstawą osiągnięcia habilitacyjnego.

Ocena cyklu publikacji pt. *Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych*, stanowiącego podstawę osiągnięcia habilitacyjnego.

Podstawą ubiegania się dr Michała Nowaka o nadanie stopnia doktora habilitowanego jest cykl jedenastu publikacji ([H1-H13] w autoreferacie) teoretycznych lub doświadczalno-teoretycznych opublikowanych w latach 2013-2019 i tematycznie skoncentrowanych wokół zagadnień stanów spinowo-orbitalnych elektronów badanych w aspekcie nowych zachowań ujawniających się w nanostrukturach półprzewodnikowych (na przykład na złączu półprzewodnik-nadprzewodnik). Wszystkie prace zostały opublikowane w znakomitych czasopismach takich jak *Nature Communications* (3), *Physical Review B* (5), *Applied Physics Letters* (2) oraz *Physical Review Applied* (1). Prace są wieloautorskie, choć aż 5 prac jest dwuautorskich, a w 6 publikacjach

dr M. Nowak jest pierwszym autorem. W pozostałych 4 publikacjach będących wynikiem współpracy z grupami eksperymentalnymi, na liście autorów habilitant jest pierwszym teoretykiem, co zresztą podkreśla. Zanim przejdę do bardziej szczegółowego omówienia tych artykułów, zwrócę uwagę na ułożenie prac w prostym porządku chronologicznym, co okazało się dobrym pomysłem, gdyż bardzo dobrze odzwierciedla nie tylko pewien ciąg logiczny procesu poznawczego, ale – jak można przypuszczać – przedstawia czasową ewolucję fascynacji naukowych oraz sukcesywnego poszerzania zainteresowań teoretycznych habilitanta, które w efekcie pozwoliły włączyć się w nurt najbardziej aktualnych tematów badawczych, do jakich należy obecnie poszukiwanie egzotycznych cząstek tożsamych z antycząstami w tzw. materiałach ‘topologicznych’ (w nanostrukturach półprzewodnikowych dotyczy to raczej przypadku kwazicząstka-antykwazicząstka), których hipotezę istnienia postulował już w 1937 r. Ettore Majorana. Stąd też, z uwagi na podkreślone powyżej nowatorskie, wręcz odkrywcz walory artykułów stanowiących dysertację, moim zdaniem rozprawa bynajmniej nie straciłaby na jakości i znaczeniu, gdyby liczba wybranych artykułów była mniejsza. Metody obliczeniowe zastosowane do uzyskania wyników w cytowanych pracach są dość podobne i bazują na rozwiązaniach stacjonarnego równania Schrödingera z uwzględnieniem kolejnych oddziaływań, tj. SO Rashby, rozszczepienia Zeemana, parowania Coopera, a ponadto dotyczą tego samego materiału InGaAs (pomimo rozważania różnych geometrii nanoukładów).

W pracach [H1-H3] przedstawiono metodologię obliczeń stanów elektronowych w kropkach kwantowych, gdzie efektywne potencjały jednocząstkowe zostały przybliżone wyrażeniami analitycznymi zawierającymi parametry dopasowania w postaci masy efektywnej uwięzionego elektronu, stałej sprzężenia SO typu Rashby, znanych wcześniej dla układu InGaAs. Założenie odpowiedniego kształtu potencjału ostrza umożliwia wprowadzenie i uwzględnienie w rachunkach dodatkowego zaburzenia w tzw. kwantowym punkcie kontaktowym (QPC – *quantum point contact*), stosowanego w technice mikroskopii bramki skanującej (SGM – *scanning gate microscopy*), która jest wykorzystywana do rejestracji dwuwymiarowych rozkładów gęstości ładunkowych oraz pomiaru prądu elektronowego przepływającego przez QPC. Dzięki zastosowaniu formuły Landauera możliwe jest policzenie wypadkowego przewodnictwa nanostruktury dla geometrii zgodnej z badanym doświadczalnie układem, która to formuła umożliwia ponadto identyfikację wkładów do przewodnictwa pochodzących od poszczególnych pasm energetycznych w pobliżu poziomu Fermiego. Tego typu teoretyczne mapy i przebiegi można z kolei porównać z wynikami eksperymentalnymi SGM, przy założeniu, że zmiana potencjału ostrza wprowadza zaburzenie, które modyfikuje potencjał chemiczny układu. Na podkreślenie zasługuje bardzo interesujący wynik z pracy [H3] ilustrujący asymetrię czynnika Landego g względem rozszczepienia Zeemana wskutek obecności silnego sprzężenia SO, co jest rezultatem nietrywialnym. Tym bardziej, że wielkość asymetrii g z uwagi na polaryzację spinu elektronu

względem pola magnetycznego, staje się jeszcze silniejsza wraz ze wzrostem liczby elektronów w kropce kwantowej, co jest zgodne z danymi doświadczalnymi i dało nową podstawę interpretacji rezultatów eksperymentalnych w oparciu o rolę sprzężenia SO Rashby jako źródła tej asymetrii.

Opracowanie algorytmów numerycznych do symulacji rozkładów ładunkowych dla kilku elektronów uwięzionych wewnątrz kropek kwantowych (z wykorzystaniem tzw. metody mieszania konfiguracji jednoelektronowych) należy uznać za oryginalny wkład habilitanta, co stało się skutecznym narzędziem umożliwiającym realizację badań teoretycznych bardziej złożonych heterostruktur typu półprzewodnik-nadprzewodnik, we współpracy z grupą eksperymentalną w Kopenhadze. Wspólne badania prowadzone podczas stażu post-doc w ośrodku nanotechnologicznym Kavli Institute of Nanoscience na Uniwersytecie w Delft w słynnej grupie prof. L. Kouwenhovena (uznawana za pierwszą, która zaobserwowała stan związany Majorany), zaowocowały wydaje się najciekawszymi i przypuszczalnie przełomowymi pracami opublikowanymi w czasopiśmie *Nature Communications* [H4, H6, H7] oraz *Physical Review Applied* [H5], w których realizacji części teoretycznej habilitant nie tylko brał udział, ale wniósł zasadniczy wkład do interpretacji wyników doświadczalnych na gruncie obliczeń kwantowych. Dowodem uznania jego roli w interpretacji tych pionierskich eksperymentów są nie tylko oświadczenia współautorów, ale umieszczenie dr M. Nowaka na liście autorów tych prac jako pierwszego teoretyka (wśród wielu świetnych teoretyków!). W pracy [H5] autorom udało się zarejestrować stany związane Majorany poprzez pomiar skwantowanego przewodnictwa dla energii wzbudzeń mniejszych od przerwy nadprzewodzącej w dwuwymiarowej heterostrukturze półprzewodnik-nadprzewodnik InGaAs/Al. *Novum* w stosunku do wcześniejszych wyników teoretycznych uzyskanych przez dr M. Nowaka, było wykonanie symulacji obliczeń przewodnictwa G z uwzględnieniem wpływu temperatury T , co pozwoliło na bezpośrednią interpretację zależności $G(T)$ silnie zmieniającą się z uwagi na obecność temperatury krytycznej przejścia metal-nadprzewodnik. Pokazano ponadto, że odbicie Andreeva na granicy złącza jest zasadniczym mechanizmem transportu przez QPC, co daje impuls do dalszych poszukiwań topologicznego nadprzewodnictwa. W kolejnej pracy [H6] badano przewodnictwo w tzw. stanie helikalnym (elektrony o przeciwnych spinach mogą posiadać przeciwne wektory falowe) przez nanodrut wykonany z InSb dla różnej konfiguracji i kierunku zewnętrznego pola magnetycznego w stosunku do własnego pola elektronów powstałego wskutek silnego sprzężenia SO. Udało się oszacować energię oddziaływania SO oraz pokazać, że tego typu nanostruktura pozwala filtrować spiny elektronów. Warto podkreślić, że podczas pobytu w Delft dr M. Nowak przyczynił się do rozwinięcia pakietu KWANT, autorstwa holenderskiej grupy teoretycznej, w kierunku obliczeń różniczkowego przewodnictwa układu w ramach podejścia Landauera-Buttikera.

Bardzo interesujące wyniki transportowe uzyskano również dla pomiarów przepływu

ładunku przez złącze Josephsona zbudowane z kwantowej heterostruktury InGaAs/InAs/InGaAs oraz metalicznego Al, nadprzewodzącego w niskich temperaturach [H5]. Okazuje się, że uzyskana zależność przerwy nadprzewodzącej od temperatury nie udaje się interpretować przebiegiem przewidywanym przez model BCS. Na końcu warto zwrócić uwagę, że podejście teoretyczne zaproponowane dla wielokrotnych rozprożeń Andreeva na granicy badanego złącza w pracy [H5] zostało z powodzeniem rozszerzone i zastosowane do analizy zachowań elektronowych w nanostrukturach półprzewodnikowych o bardziej rozbudowanej geometrii [H11].

Na końcu należy zwrócić uwagę na kolejną niezwykle ciekawą koncepcję wykorzystania nanostruktur ze złączem półprzewodnik-nadprzewodnik do pomiaru długości koherencji wzbudzeń kwazicząstkowych z wykorzystaniem rozproszenia Andreeva oraz zjawiska Aharonova-Bohma w pierścieniu kwantowym na granicy półprzewodnik-nadprzewodnik. Uzyskano silną zależność parametru koherencji od przerwy nadprzewodzącej dla wybranej geometrii heterostruktury.

W podsumowaniu stwierdzam, że cykl publikacji przedstawiony przez dr Michała Nowaka jako rozprawa habilitacyjna (osiągnięcie habilitacyjne) znacznie przewyższa wymogi stawiane tego typu dysertacjom, m.in. ze względu na pionierski charakter podejmowanych tematów, oryginalność i doniosłość uzyskanych wyników oraz rozpoznawalność w środowisku międzynarodowym. O szerokim oddźwięku publikacji ze współautorstwem dr M. Nowaka, świadczą imponujące liczby cytowań prac włączonych do rozprawy ([H4] – 61 cytowań, [H5] – 39 cytowań, [H6] – 24 cytowań, [H7] – 81 cytowań), pomimo bardzo krótkiego czasu jaki upłynął od ich opublikowania. Są to prace, które udało się zrealizować habilitantowi we współpracy z zagranicznymi grupami eksperymentalnymi. Osiągnięcie habilitacyjne dr M. Nowaka oceniam jako ponadprzeciętne, zdecydowanie zasługujące na wyróżnienie. Docenić należy nie tylko talent i kreatywność w podejmowaniu trudnych problemów i wyzwań teoretycznych, ale również skuteczność w realizacji zaawansowanych i żmudnych obliczeń. Na końcu podkreśliłbym jeszcze raz, nie tylko otwartość dr M. Nowaka na współpracę z eksperymentatorami, ale przede wszystkim umiejętność wspólnego dochodzenia do odkrywczych interpretacji.

Komentarz: Do beczki miodu muszę niestety dorzucić małą łyżeczkę dziegiu. Autoreferat w języku polskim, będący *de facto* częścią dokumentacji habilitacyjnej oraz ogólnie dostępnym streszczeniem-wizerunkiem dokonań naukowych habilitanta, został napisany bez właściwej dbałości. Nie ze względu na nieścisłości czy też niezgodności z wynikami przedstawionymi w 11 publikacjach, tylko ze względu na język, który w wielu miejscach jest żargonowy, zawiera dużo błędów gramatycznych oraz niedopuszczalną moim zdaniem liczbę makaronizmów. Kilka z zaproponowanych określeń czy wyrażeń powstało wyłącznie na użytek autoreferatu lub zastosowane określenia używane są w całkowicie innym kontekście niż zwyczajowo stosowane w języku polskim. Chwilami można mieć wrażenie, że tekst angielski tłumaczony jest na polski z użyciem *google translate*. Trochę szkoda, że habilitant nie przywiązuje większej wagi do przedstawiania swoich wyników oraz wyrażania myśli poprawnym językiem. Nie jest jednak moją intencją, aby uwagi te skądinąd drugorzędne (publikacje są przecież w języku angielskim) wpływały na wyrażoną wcześniej bardzo wysoką ocenę cyklu publikacji habilitacyjnych dr Michała Nowaka.

Ocena pozostałego dorobku naukowego

Pomimo stosunkowo krótkiego okresu działalności naukowej - rozpoczętej w 2008 r. - dorobek dr M. Nowaka jest nadzwyczaj bogaty, choć w pewnym stopniu monotematyczny. Właściwie wszystkie opublikowane prace dotyczą badań teoretycznych struktury elektronowej oraz transportu ładunku w „sztucznych” atomach oraz molekułach, które w późniejszych latach zostały z powodzeniem rozszerzone na bardziej złożone nanostruktury i nanourządzenia półprzewodnikowe. Cechą immanentną badanych przez dr M. Nowaka zjawisk jest transport spinu w obecności silnego sprzężenia SO oraz zewnętrznych pól (elektrycznego, magnetycznego, temperaturowego). Już na etapie doktoratu, habilitant pokazał się jako nadzwyczaj płodny autor, publikując z promotorem 10 artykułów, w tym 9 w *Phys. Rev. B*, 1 w *J. Phys. CM* (w 9 jest pierwszym autorem).

Również po doktoracie dorobek naukowy dr M. Nowaka nie będący podstawą wniosku habilitacyjnego jest rozległy (11 publikacji w bardzo dobrych czasopismach). Zajmowane stanowiska kolejno asystenta naukowego, a następnie adiunkta naukowego, nie wymagające prowadzenia zajęć dydaktycznych, niewątpliwie stwarzają duży komfort prowadzenia intensywnej działalności naukowej, co okazuje się szczególnie cenne w przypadku utalentowanych młodych naukowców. Dr M. Nowak aktywnie uczestniczył w realizacji doktoratów w grupie prof. B. Szafrana, w roli promotora pomocniczego, co znalazło wyraz w kilku dodatkowych publikacjach. Wśród prac po doktoracie na podkreślenie zasługują dwa artykuły opublikowane w prestiżowym czasopiśmie *Nano Letters* ([P20] i [P21]) we współpracy z grupą eksperymentalną z Delft. Kontynuują one podjęty problem wykorzystania złącza Josephsona w nanodrutach półprzewodnikowych do obserwacji fermionów Majorany, w których podstawą interpretacji między innymi związku wielokrotnych rozprożeń Andreeva na granicy półprzewodnik-nadprzewodnik z transparentnością złącza, są obliczenia dr Michała Nowaka. O atrakcyjności tematyki, a przede wszystkim o dużym zainteresowaniu wspomnianymi pracami, świadczy choćby liczba cytowań publikacji [P20] z 2017 – 47 cytowań.

Aby dopełnić niezwykle bogaty już wizerunek naukowy habilitanta należy dodać, że środowisko naukowe rozpoznało i szczerze nagrodziło osiągnięcia naukowe dr M. Nowaka. Był wielokrotnym stypendystą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, najpierw dla wybitnych doktorantów, a następnie dla młodych naukowców, stypendystą Fundacji Nauki Polskiej, laureatem prestiżowych nagród takich jak Nagroda Polskiego Towarzystwa Fizycznego za rozprawę doktorską, Nagroda im. prof. Zbigniewa Engela dla młodych teoretyków, wielokrotnie uzyskał Nagrody Rektora AGH za publikacje naukowe. Z powodzeniem zdobywa i realizuje projekty naukowe finansowane przez MNiSW (Juventus), NCN (OPUS, SONATA) czy FNP (HOMING) występując w roli wykonawcy, a w ostatnim czasie również kierownika projektów.

W podsumowaniu, na podstawie przedstawionej rozprawy habilitacyjnej pt.: *Zjawiska spinowe oraz wzbudzone nadprzewodnictwo w nanostrukturach półprzewodnikowych*, którą oceniam nadzwyczaj wysoko oraz na podstawie dorobku naukowego uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora stwierdzam, że dr inż. Michał P. Nowak spełnia z nadmiarem formalne i zwyczajowe wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) i jego dorobek zasługuje na wyróżnienie. Michał Nowak jest bardzo utalentowanym, wybitnym teoretykiem, który wniósł znaczący wkład w rozwinięcie kwantowych symulacji transportu ładunku w nanostrukturach półprzewodnikowych. Szczególnie prace opublikowane we współpracy z zespołami eksperymentalnymi spotkały się z dużym oddźwiękiem w świecie. Część uzyskanych rezultatów badań teoretycznych ma charakter pionierski i następne lata zweryfikują jak przełomowe i trwałe okażą się interpretacje wyników transportu elektronów przez tak egzotyczne heterostruktury nanoskopowe jak półprzewodnik-nadprzewodnik. Należy pamiętać, że pełniejszy obraz zjawisk elektronowych szczególnie w układach z silnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym daje dopiero zastosowanie w pełni relatywistycznego równania Diraca.

Wnoszę o dopuszczenie dr inż. Michała P. Nowaka do dalszych etapów postępowania kwalifikacyjnego.



Kraków, 6 sierpnia 2019 r.