

Prof. dr hab. Włodzimierz Jaskólski  
Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
w Toruniu

**Opinia na temat osiągnięcia naukowego oraz dorobku i aktywności w zakresie  
badawczym i dydaktycznym  
w postępowaniu habilitacyjnym dr. Tomasza Chwieja**

I. Ocena osiągnięcia naukowego

Przedstawione do oceny osiągnięcie naukowe to jednotematyczny cykl sześciu publikacji zatytułowany „*Analiza zlokalizowanych i przewodzących stanów elektronowych w półprzewodnikowych pierścieniach kwantowych*”. Wszystkie prace są dwuautorskie, przy czym we wszystkich habilitant jest pierwszym autorem; w pięciu z nich drugim autorem jest prof. Bartłomiej Szafran a w szóstej współautorem jest mgr. inż. Kamil Kutorasiński. Pięć z tych publikacji ukazało się w latach 2008-2014 w Physical Review B, jedna w Journal of Physics: Condensed Matter w 2013r. Publikacje te doczekały się łącznie 39 cytowań (wraz z autocytoowaniami).

Pierwsze dwie z tych publikacji, także chronologicznie wcześniejsze, poświęcone są pierścieniom otwartym, tzn. niesprężonym z rezerwuarami nośników ładunku. Praca [R1] dotyczy pojedynczego pierścienia, odpowiadającego parametrycznie nanostrukturze, którą można otrzymać metodą wytrawiania z heterozłącza InGaAs/GaAs, z uwięzionym jednym, dwoma lub trzema elektronami o energiach z zakresu pasma przewodnictwa. Autorzy pracy przeanalizowali jak, w obecności prostopadłego pola magnetycznego, struktura energetyczna takich układów a także rozkłady gęstości ładunku, potencjały chemiczne, prądy trwałe oraz indukowane w nich momenty magnetyczne, zależą od zaburzenia cylindrycznej symetrii układu poprzez wprowadzenie do pierścienia jednej lub dwóch (symetrycznie ułożonych) kropek kwantowych modelowanych gaussowskim potencjałem wiążącym. Obliczenia dla układu z dwoma lub trzema nośnikami wykonane zostały metodą oddziaływania konfiguracji, zbudowanych z jednocząstkowych funkcji rozpiętych na obszernej i wariacyjnie optymalizowanej bazie typu gaussowskiego. Te numerycznie bardzo dokładne i obliczeniowo wymagające, przekrojowe badania zaowocowały kilkoma bardzo ciekawymi rezultatami. Jednym z nich jest zaobserwowanie specyficznego zachowania (dla różnych zaburzeń i różnej liczby elektronów w pierścieniu) energii elektronów w funkcji zmian pola magnetycznego, co w konsekwencji może pozwolić na określanie rodzaju zaburzenia w pierścieniu poprzez badanie tylko potencjału

chemicznego. Inny interesujący rezultat to sformułowanie warunków dla formowania się molekuly Wignera z elektronów w pierścieniu.

W publikacji [R2] przeprowadzono analogiczne badania dla układu dwóch, niezaburzonych wewnętrznymi kropkami kwantowymi, sąsiadujących ze sobą pierścieni o takich samych lub różnych promieniach. Głównym celem pracy było zbadanie jak struktura elektronowa zależy od odległości między pierścieniami (czyli od tunelowego sprzężenia między nimi) i od liczby  $N=1,2,3$  uwięzionych w nich elektronów przewodnictwa. Autorzy pokazują w jaki sposób różne parametry: odległość między pierścieniami, pole magnetyczne, oddziaływanie kulombowskie między elektronami oraz asymetria układu, wpływają na lokalizację elektronów w poszczególnych pierścieniach. Pokazują też jak w różnych reżimach sprzężenia tunelowego zmienia się lub nie, symetria stanów jedno- i wieloelektronowych pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Wyniki te mogą okazać się ważne w badaniach doświadczalnych, gdyż mogą pozwolić na „rozpoznanie” danego układu poprzez badanie np. tylko zmienności potencjału chemicznego w funkcji pola magnetycznego. Inny ważny rezultat tej pracy to pokazanie, że w przypadku pierścieni o różnych promieniach, pole magnetyczne może być wykorzystane do „przepychania” elektronów z jednego pierścienia do drugiego.

W kolejnych dwóch publikacjach badany jest transport elektronów przez kwantowy pierścień, podłączony do dwóch metalicznych kontaktów. Tym razem parametry układu odpowiadają pierścieniom wytwarzanym metodą oksydacji powierzchni w planarnej strukturze zawierającej heterozłącze GaAs/AlGaAs. W publikacji [R3], w odpowiedzi na eksperymentalne prace [16] i [41], w których mierzono magnetotransport w podwójnym, koncentrycznym pierścieniu (wewnętrzny pierścień niepodłączony do kontaktów) lub w pierścieniu stowarzyszonym z boczną kropką kwantową, autorzy zbadali jak taki transport zależy od naładowanej kropki kwantowej umieszczonej w środku pierścienia. Istotą tych badań było udzielenie odpowiedzi na pytanie o wpływ korelacji kulombowskich na transport w efekcie Aharonova-Bohma. Autorzy pokazali, że prawdopodobieństwo przejścia elektronu przez pierścień silnie zależy od polaryzacji ładunkowej kropki kwantowej. Szczegółowo przeanalizowali też wpływ ładunku przepływającego przez pierścień na stany elektronowe i wzbudzenia w kropce kwantowej. Pokazali, że gdy energia kulombowskiego oddziaływania między transportowanym elektronem a ładunkiem kropki kwantowej jest porównywalna do energii wzbudzenia w kropce, elektron w pierścieniu ulega nieelastycznemu rozpraszaniu, w efekcie czego następuje zmniejszenie oscylacji Aharonova-Bohma. Dzięki tym szczegółowym badaniom autorzy mogli poddać krytycznej analizie interpretację zawartą w doświadczalnej pracy [16], w której także obserwowano redukcję amplitudy oscylacji transportu elektronów w zewnętrznym pierścieniu kwantowym.

W publikacji [R4] analizowano transport elektronu przez pierścień kwantowy w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego i przy obecności jednego lub dwóch elektronów

uwięzionych w pierścieniu. Potwierdzony został efekt występowania ułamkowego okresu oscylacji Aharonova-Bohma, przewidziany niemal dwie dekady temu. Autorzy wykazali także istnienie ścisłego związku pomiędzy amplitudą ułamkowych oscylacji a siłą oddziaływania kulombowskiego w pierścieniu. Ważnym elementem nowości w tej pracy nie są same rezultaty badań, ale opracowanie i zastosowanie numerycznej procedury rozwiązywania zależnego od czasu równania Schrödingera z uwzględnieniem kulombowskich oddziaływań i korelacji między elektronami w badanym układzie.

Ostatnie dwie publikacje, oznaczone jako [R5] i [R6], poświęcone są badaniu transportu elektronu przez pierścień kwantowy w mikroskopii bramki skanującej. W pierwszej z nich autorzy szczegółowo analizują modelowy układ odpowiadający rzeczywistej strukturze planarnej InP/InAlAs/InGaAs/InAlAs, w której pierścień kwantowy wytworzony jest w kanale InGaAs, a bariera InAlAs zawiera warstwę  $\delta$ -domieszkowaną donorowo, która stanowi źródło elektronów dla pierścienia i powierzchni układu. Taka sytuacja, z metaliczną bramką skanującą umieszczoną nad powierzchnią, wymaga samouzgodnionego rachunku, w którym rozwiązuje się problem Poissona-Schrödingera w celu pełnego uwzględnienia wzajemnego wpływu ładunków zlokalizowanych w różnych obszarach na ich rozkłady gęstości. Stosując takie postępowanie autorzy wychodzą poza wcześniej stosowane prostsze modele i w rezultacie otrzymują wiarygodne zależności wartości przewodnictwa w pierścieniu od położenia bramki skanującej, która modyfikowana jest przez ładunki zgromadzone na powierzchni układu. Wykorzystując tak precyzyjnie zbudowany model obliczeniowy, autorzy analizują również w jaki sposób defekty wynikające z niejednorodności w warstwie donorowej wpływają na potencjał w pierścieniu i jego konduktancję. Ta publikacja dowodzi wysokich umiejętności habilitanta w budowaniu zaawansowanych modeli pozwalających na precyzyjne i wiarygodne obliczenia dla eksperymentalnie realizowanych układów.

W ostatniej publikacji, [R6], autorzy badają jakie zmiany w konduktancji pierścienia kwantowego i w lokalnej gęstości stanów wywołuje przemieszczająca się nad pierścieniem bramka skanująca. Zbadano także w jaki sposób zmiany te zależą od poziomu Fermiego (zdefiniowanego przez zewnętrzne kontakty) oraz od pola magnetycznego. Jednym z najważniejszych i bardzo ciekawym rezultatem tej pracy jest pokazanie, że przy pewnych określonych warunkach i dla ustalonego poziomu Fermiego oraz ustalonej wielkości indukcji pola magnetycznego, wyznaczenia lokalnej gęstości stanów w pierścieniu można dokonać pośrednio poprzez badanie zmian konduktancji wywołanych obecnością bramki skanującej.

Wszystkie publikacje składające się na osiągnięcie habilitacyjne prezentują wysoki poziom badań naukowych. Habilitant podejmuje w nich aktualne problemy z zakresu fizyki kwantowych struktur półprzewodnikowych; buduje precyzyjne modele, dobrze odzwierciedlające warunki eksperymentalne, i proponuje nowatorskie metody do rozwiązywania tych problemów. W pracach tych osiągnięto szereg interesujących

rezultatów, najważniejsze z nich zostały omówione wyżej. Wnoszą one znaczny wkład w rozwój fizyki, w szczególności fizyki kwantowych struktur półprzewodnikowych.

## II. Ocena dorobku i aktywności naukowej, dydaktycznej, popularyzatorskiej oraz w zakresie współpracy międzynarodowej

### A. Dorobek i aktywność naukowa

W przedstawionej dokumentacji brak jest szczegółowej informacji na temat całokształtu osiągnięć naukowych habilitanta. Autor wykazuje jedynie cztery dodatkowe prace, opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych, które nie weszły do „osiągnięcia habilitacyjnego”. Choć łączna liczba dziesięciu prac po doktoracie, czyli opublikowanych w okresie dziewięciu lat, nie jest imponująca, to należy jednak przyznać, że są to prace bardzo solidne, wielostronicowe, zawierające szerokie spektrum badań i wymagające znacznego wysiłku numerycznego oraz czasu do ich realizacji. Poza tym, globalne parametry dotyczące całego dorobku, tzn. indeks Hirsha=8 oraz liczba cytowań=227, są na dobrym poziomie, akceptowalnym dla kandydatów do stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych. Te cztery (w większości wieloautorskie) prace opublikowane zostały w dobrych czasopismach, część z nich przy współpracy z profesorem Francois Peetersem z Uniwersytetu w Antwerpii, a średni wkład habilitanta w ich powstanie sięga 50%. W okresie przed doktoratem kandydat odbył sześciomiesięczny staż naukowy na Uniwersytecie w Antwerpii w ramach stypendium sfinansowanego z programu Marie Curie Training Site. W okresie po doktoracie dr Tomasz Chwiej pełnił rolę wykonawcy w dwóch grantach finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Nauki. Trzy razy (w latach 2012 i 2013) prezentował wyniki swoich badań na międzynarodowych konferencjach w Ustroniu, Jaszowcu i Wrocławiu. W dokumentacji brak jest jednak informacji czy były to prezentacje plakatowe czy ustne. Siedmiokrotnie uzyskał Nagrodę Zespołową Rektora AGH, a w okresie przed doktoratem był wyróżniany dwukrotnie: raz nagrodą indywidualną Rektora AGH a raz Nagrodą Zespołową Ministra. Recenzował łącznie 30 prac naukowych dla dwunastu różnych czasopism fizycznych. Choć kandydat nie ma w swoim dorobku (po doktoracie) staży w zagranicznych instytucjach naukowych, nie prezentował wyników swoich badań w innych ośrodkach badawczych ani nie wygłaszał referatów na konferencjach naukowych, to w całokształcie jego aktywność naukową można uznać za spełniającą warunki określone w Art.16, ust.1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (...„wykazuje się istotną aktywnością naukową”...).

### B. Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji

Dr Tomasz Chwiej prowadził w swojej karierze typowe zajęcia ćwiczeniowe i laboratoryjne zlecane zwyczajowo teoretykom-obliczeniowcom: z fizyki ogólnej i teoretycznej, mechaniki kwantowej, metod numerycznych i obliczeniowych oraz podstaw informatyki. Prowadzi też wykład „Metody numeryczne” dla dwóch kierunków studiów *Informatyka Stosowana* oraz *Inżynieria Obliczeniowa*. Dr Chwiej nie prowadził niestety żadnej innej działalności stricte popularyzatorskiej. Na uznanie zasługuje jednak długa lista wypromowanych inżynierów (ponad 20) i magistrów (8), a tematy prac magisterskich pokrywają szerokie spektrum wiedzy: od struktury elektronowej i transportu w nanostrukturach, poprzez zastosowania metod numerycznych w mechanice kwantowej, po metody wizualizacji widm w trzech wymiarach.

### C. Współpraca międzynarodowa

Poza wzmianką o półrocznym stażu naukowym odbytym przed doktoratem na Uniwersytecie w Antwerpii w ramach stypendium sfinansowanego z programu Marie Curie Training Site, brak jest w dokumentacji informacji na temat współpracy międzynarodowej. Trzy z spośród czterech wieloautorskich publikacji, niewchodzących do osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę habilitacji, wykonane zostały przy współautorstwie profesora Francois Peetersa, jednak nie wiadomo czy jest to rezultat współpracy międzynarodowej habilitanta czy też pozostałych autorów tych prac. Dr Chwiej nie odbył po doktoracie żadnego, ani krótkiego ani dłuższego, stażu podoktorskiego w zagranicznych ośrodkach naukowych. Nie prezentował wyników swoich badań ani w polskich ani w zagranicznych instytucjach badawczych. Ocena w tym punkcie nie może być jednoznacznie pozytywna.

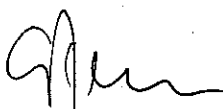
### III. Uwagi końcowe

Na uznanie zasługuje dobrze przygotowany i dobrze napisany autoreferat. Dowodzi on, że autor bardzo dobrze rozumie dziedzinę, w której pracuje, zarówno od strony doświadczalnej jak i teoretycznej. Wykazuje się też umiejętnością syntetycznego i klarownego prezentowania zarówno uzyskanych przez siebie wyników jak i problemów naukowych pojawiających się w obszarze, w którym prowadzi badania. Autoreferat nie jest jednak wolny od pewnych nieścisłości. We rozdziale 3.1 p.t. „Wprowadzenie” autor pisze, że „...Podstawową cechą wspólną nanostruktur [...] jest występowanie w nich efektu rozmiarowego. Małe rozmiary nanoobjektów sprawiają, iż energia uwięzionych w nich nośników ładunku staje się skwantowana, ich ruch jest skorelowany ze względu na wzajemne oddziaływanie elektrostatyczne, a pełny opis własności układu można otrzymać jedynie na gruncie mechaniki kwantowej...”. W rzeczywistości także właściwości makroskopowych kryształów mogą być poprawnie opisane tylko na gruncie mechaniki kwantowej; ciągłe lub kwazi-ciągłe pasma energetyczne też są zespołem skwantowanych poziomów energetycznych, jednak

tak gęstych, że nierozróżnialnych eksperymentalnie. Efekt rozmiarowy prowadzi jedynie do dyskretyzacji widm energii, nie do ich kwantyzacji, a ruch nośników ładunku jest skorelowany także w makroskopowych obiektach.

Na pewne słowa krytyki zasługuje przygotowanie wykazu osiągnięć. Nie zawiera on pełnej listy publikacji a informacje o udziale w konferencjach naukowych są niejednoznaczne. Szkoda też, że nie podano tytułów pozahabilitacyjnych prac autora; ułatwiłoby to ocenę na ile ich tematyka różni się od tematyki osiągnięcia habilitacyjnego.

Podsumowując, stwierdzam, że pomimo pewnych braków dotyczących głównie aktywności we współpracy międzynarodowej i działalności popularyzatorskiej, pozytywnie oceniam dorobek naukowy i dydaktyczny dr Tomasza Chwieja. Posiada on spory zasób wiedzy z fizyki ciała stałego, jest dobrze zorientowany w budzących ciągle zainteresowanie kwantowych strukturach półprzewodnikowych, umie formułować naukowe problemy i rozwiązywać je. Jego publikacje dowodzą także głębokiej znajomości metod i technik obliczeniowych oraz biegłości w ich stosowaniu. Natomiast wkład jego osiągnięć w rozwój dyscypliny naukowej (fizyki, a w szczególności teorii ciała stałego i fizyki nanostruktur półprzewodnikowych) zawarty w cyklu prac habilitacyjnych oceniam wysoko. Na wkład ten składa się szereg istotnych rezultatów, które znacząco pogłębiają naszą wiedzę o właściwościach i zjawiskach fizycznych zachodzących w półprzewodnikowych pierścieniach kwantowych. Rezultaty te stanowią także ważny materiał naukowy dla badań eksperymentalnych.



Toruń, 15-05-2015