



Mens agitat molem

**Zakład Teorii Fazy Skondensowanej UMCS**  
**Condensed Matter Theory Department**

ul. Radziszewskiego 10  
20 031 Lublin, POLAND

<http://kft.umcs.lublin.pl/ztfs> fax: (+48 (0)81) 537 61 90

---

**Prof. dr hab. Karol Izidor Wysokiński** tel.(081)5376236 e.mail: [karol@tytan.umcs.lublin.pl](mailto:karol@tytan.umcs.lublin.pl)

---

Lublin 13 listopada 2019 r.

Opinia nt. osiągnięcia habilitacyjnego

„Efekty termoelektryczne w niskowymiarowych układach kwantowych”

dra inż. Michała Wierzbickiego

Pan dr inż. Michał Wierzbicki jako rozprawę habilitacyjną przedstawił monotematyczny cykl 13 prac naukowych wykonanych w latach 2009-2017. Jedna z prac została napisana samodzielnie, a pozostałe we współpracy z panią prof. Renatą Świrnikowicz, która jest współautorką 12 publikacji i prof. Józefem Barnasiem (współautorem 5 publikacji wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego). Prace te ukazały się w specjalistycznych czasopismach, w tym w Phys. Rev. B – 5 publikacji, J. Phys. Cond. Matter – 2 publikacje, Acta Physica Polonica – 2 publikacje. Po jednej pracy opublikowano w J. Phys. Conference Series, Physics Letters A, J. Magn, Magn, Materials, Physica E. Ze względu na współautorstwo większości publikacji przez znanych i znakomitych współpracowników zasadne staje się pytanie o to jaki jest wkład Habilitanta do wspólnych publikacji i osiągnięcia habilitacyjnego. Zwykle uważa się, że pomocne są oświadczenia współpracowników. Podsumowując formalnie zadeklarowany udział procentowy Habilitanta we wspólnych publikacjach otrzymujemy 850% co przekłada się na 9 publikacji wykonanych samodzielnie. Wkład współautorów do każdej z publikacji sumuje się do 100%. Zgodnie ze zwyczajem i zapisami Ustawy Habilitacja jest samodzielnym osiągnięciem naukowym wnoszącym istotny wkład dla rozwoju dyscypliny naukowej. Dlatego tak ważne jest stwierdzenie czy Kandydat do tego stopnia naukowego spełnia ten warunek. Współpraca naukowa jest ważna i cenna, ale czasami zaciera indywidualny wkład. Dobrze, że pan Wierzbicki ma przynajmniej jedną samodzielną publikację, gdyż współautorskie publikacje noszą bardzo silne piętno stylu obojga doświadczonych współpracowników. Dotyczy to w szczególności prac [H1-H9].

Tematykę badań stanowiących osiągnięcie habilitacyjne dobrze odzwierciedla jego tytuł „Efekty termoelektryczne w niskowymiarowych układach kwantowych”. Za-

łączone publikacje w sposób naturalny dzielą się na dwie grupy. Dziewięć pierwszych publikacji wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego dotyczy badań kropek kwantowych połączonych do normalnych i/lub magnetycznych elektrod. Ostatnie 4 publikacje osiągnięcia habilitacyjnego także poświęcone są badaniu zjawisk termoelektrycznych, ale w kwazi-jednowymiarowych strukturach grafenu i silicenu.

Osiągnięcie habilitacyjne oraz informacje o zaangażowaniu Habilitanta w kształcenie kadry, działania organizacyjne na rzecz Uczelni i środowiska oraz omówienie innych jego publikacji znajdujemy w dokumencie zatytułowanym Autoreferat. Szkoda, że dokument ten nie zawiera krytycznego podsumowania i samo-oceny osiągnięć habilitanta. Autoreferat nie przekonuje też o samodzielności i dojrzałości naukowej autora. Jest to zadziwiający tekst, napisany w sposób infantylny. Autor zamieścił w nim osobiste i głębiej nieuzasadnione oceny poważnych projektów naukowych. Przykładowo, negatywna ocena obliczeń z pierwszych zasad (str. 5) kończy się wyznaniem Autora: „*Jako historyczną analogię różnicy podejścia do badań naukowych można podać sylwetki Edisona i Faradaya. Pierwszy wykonywał tysiące eksperymentów licząc na szczęśliwy traf, drugi dążył do zrozumienia istoty przyrody. Osobiście stoję po stronie Faradaya.*” Ocena Edisona i Faradaya nie ma nic wspólnego z habilitacją, a ocena obliczeń z pierwszych zasad pewnie nie jest obiektywna, gdyż w pracach [H10] – [H13] pan Wierzbicki posiłkuje się właśnie obliczeniami z pierwszych zasad wprowadzając do opisu grafenu i silicenu efektywne Hamiltoniany ciasnego wiązania. W autoreferacie roi się od naukowo brzmiących stwierdzeń typu „*za pomocą procedury Changa i Kuo stosowanej przy założeniu blokady kulombowskiej*”. Nie znana jest mi żadna procedura Changa i Kuo, mimo że sporo czasu poświęciłem badaniu podobnych jak Habilitant zagadnień, i nie jest mi wiadomo, aby nazwa taka funkcjonowała w literaturze przedmiotu. Takiego epatowania obcymi nazwiskami w kontekście prostych przybliżeń jest w autoreferacie sporo.

Autoreferat zawiera też omówienie wszystkich prac wchodzących w zakres osiągnięcia habilitacyjnego. Autor opisuje model, czasami technikę obliczeniową oraz wielkości, które zostały obliczone, ale już nie zadaje sobie trudu napisać dokładniej o uzyskanych wynikach fizycznych i ich znaczeniu w nieco szerszym kontekście i w świetle nowych badań w tej tematyce. Wyniki są zwykle tylko wymienione. Brak jest pogłębionej analizy badanych zjawisk i uzyskanych wyników, w tym tych które mają szansę na trwałe wejść do kanonu wiedzy w uprawianej dziedzinie. Autoreferat jest napisany poprawną polszczyzną, ale niektóre stwierdzenia Autora są tak ogólne, że aż fałszywe. Na dole strony 11 autoreferatu czytamy „*W pierwszej części pracy rozpatrzono przypadek braku blokady kulombowskiej, możliwy do osiągnięcia przy separacji przestrzennej dwóch kropek.*” Zdanie to nie jest prawdziwe, gdyż istnienie bądź nie, blokady kulombowskiej związane jest z oddziaływaniem  $U$  elektronów na każdej z kropek, a wartość tego oddziaływania jest tym większa im mniejsza jest kropka.  $Z$



separacją kropek związane może być oddziaływanie kulombowskie dalekozasięgowe typu  $U_{12}$ .

Tematyka badań prowadzonych przez Habilitanta zmieniała się z czasem, ale należy mocno podkreślić, że zawsze należała do ważnych zagadnień fizyki ciała stałego i fizyki materiałowej. Kwestia uzyskania materiałów lub struktur o bardzo dobrych właściwościach termoelektrycznych była i wciąż należy do ważnych wyzwań naukowych o potencjalnie dużym znaczeniu teoretycznym, praktycznym i społecznym ze względu na wykorzystanie ciepła traconego w różnych procesach. Badania dr inż. Wierzbickiego znakomicie wpisywały się w aktualne trendy w nauce i często były nowatorskie o czym świadczy duża liczba cytowań niektórych prac. I tak praca nr 1 była cytowana ponad 160 razy, a praca nr 2 -34 razy, kolejna ponad 50 razy, ... . Są to bardzo dobre wskaźniki świadczące o wadze uzyskanych wyników.

Wiodącym zagadnieniem wszystkich prac pierwszej grupy jest wpływ magnetycznego uporządkowania elektrod na właściwości transportowe nano-struktury składającej się z jednej lub więcej kropek kwantowych połączonych z zewnętrznymi ferromagnetycznymi elektrodami. W zależności od względnej polaryzacji elektrod uzyskiwano różne charakterystyki prądowo napięciowe i wartości współczynników transportowych. Potencjalne zastosowanie uzyskanych wyników do projektowania i konstrukcji urządzeń spintronicznych to ważne uzasadnienie badań i dużego nimi zainteresowania w środowisku fizyków materii skondensowanej. Oddziaływanie kulombowskie, zwykle odgrywające ważną rolę w badaniach kropek kwantowych, było bądź pomijane, bądź uwzględniane w przybliżeniu średniego pola.

Inne ważne wyniki przeprowadzonych badań związane są z analizą roli zjawisk interferencyjnych na charakterystyki transportowe badanych złącz, w tym efekty termoelektryczne. W pracach analizowano m. in. zachowanie takich parametrów jak termoelektryczny współczynnik dobroci  $ZT$  oraz współczynnik Lorentza  $L$ . Znajomość tego pierwszego ( $ZT$ ) jest ważna w granicy liniowej reakcji układu na zewnętrzne zaburzenia w postaci pola elektrycznego lub różnicy temperatury. Jego duże wartości sugerują przydatność materiału lub struktury do zastosowań termoelektrycznych (np. zamiany ciepła na energię elektryczną). Związane jest to z tym, że oczekiwana sprawność  $\eta$  urządzenia termoelektrycznego monotonicznie wzrasta ze wzrostem  $ZT$ , w granicy dużych wartości  $ZT$  dążąc do sprawności Carnota. Współczynnik Lorentza jest ilorazem przewodnictwa cieplnego do przewodnictwa ładunkowego i temperatury, i dla gazu słabo oddziałujących elektronów przyjmuje wartość stałą. W strukturach z kropką kwantową współczynnik ten osiąga wartości świadczące o zachowaniu elektronów innym niż cieczer Fermiego.

Najważniejsze wyniki badań w pierwszej grupie prac dotyczą zjawisk spinowych w strukturach z magnetycznymi elektrodami. Te wyniki mogą być ważne dla zrozumienia funkcjonowania istniejących i konstrukcji nowych urządzeń spintronicz-



nych. Wydaje się jednak, że znalezione bardzo wysokie wartości termoelektrycznego (spinowego) współczynnika dobroci dla pewnych konfiguracji elektrod nie muszą świadczyć o przydatności nano-struktury do konstrukcji wydajnych urządzeń spintronicznych. Argumentem za tym przekonaniem jest analogia do zjawisk ładunkowych. Wiemy, że współczynnik  $ZT_c$  ma niewielkie znaczenie dla nano-maszyn cieplnych wykorzystujących ładunki elektryczne, gdyż przybliżenie liniowe w nanostrukturach, w zasadzie nigdy nie ma zastosowania. Ta właściwość układów nano-skopowych została zauważona kilkanaście lat temu, a dość niedawno dobrze przeanalizowana. To, że sporo wyników Autor uzyskał w przybliżeniu liniowym nie jest niczym złym. Wtedy wszyscy tak postępowali.

Należy podkreślić, że trzy ostatnie prace [H7, H8, H9] pierwszej grupy analizują termoelektryczne właściwości poza przybliżeniem liniowym. Korzystając z pełnych wyrażeń na prąd elektryczny i cieplny oblicza się w nich współczynnik sprawności i maksymalną moc urządzenia. Autorzy uzyskują duże wartości sprawności sięgające 0.4 sprawności Carnota. Maksymalna moc urządzenia w zakresie dużych sprawności ma wartości rzędu 0.1 pW co – biorąc pod rozwagę różne wartości parametrów w pracach teoretycznych pana Wierzbickiego i w doświadczeniu – wydaje się być w dobrej zgodności z niedawnymi pomiarami dla podobnego układu (Jalil i inni, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 117701 (2019)).

Druga grupa prac osiągnięcia habilitacyjnego obejmuje publikacje [H10 – H13] i skupia się na badaniach zjawisk termoelektrycznych w nanostrukturach kwazi-jednowymiarowych w postaci wąskich i długich wstążek materiałów dwuwymiarowych: grafenu i silicenu. Grafen to pojedyncza warstwa dobrze znanego grafitu, natomiast silicen to dwuwymiarowy odpowiednik grafenu składający się z atomów krzemu. Niezależnie od pewnych podobieństw materiały te istotnie różnią się od siebie i np. silicen jest pofałdowany w skali atomowej i jak dotąd udaje się go wytworzyć jedynie na odpowiednim podłożu, a nigdy w postaci swobodnej płaszczyzny w próżni, w przeciwieństwie do grafenu.

W tej grupie prac autorzy obliczają numerycznie widmo energetyczne paska np. grafenowego (praca [H10]) z dodatkowymi centrami rozprożeń w postaci otworów nazywanych w publikacji anty-kropkami. Zakładając, że z każdym dozwolonym stanem o energii  $E_i$  związany jest współczynnik transmisji  $t_i=1$  w pracy [H10] i dalszych oblicza się całkowity współczynnik transmisji  $T(E)$  jako sumę indywidulanych wkładów  $t_i$  i za pomocą wzorów typu Landauera znajduje numerycznie transportowe charakterystyki układu. Jest to mocno przybliżone podejście i trudno ocenić w jakim stopniu uzyskane wyniki są wiarygodne. Autorzy stwierdzają, że paski grafenowe z brzegami typu zig-zag są magnetyczne na brzegu, i w związku z tym stany z różnymi spinami są rozseparowane. Dzięki temu przewodnictwo elektryczne i inne współczynniki transportowe zależą od spinu. W rezultacie można określić ładunkowe i spinowe



współczynniki dobroci. Jednym z wyników pracy [H10] jest spostrzeżenie, że jeśli rozmiary anty-kropek są duże, o średnicy tylko nieco mniejszej od szerokości paska, to przewodnictwo cieplne jest istotnie obniżone, a zatem odpowiednie współczynniki dobroci termo-elektrycznej mają spore wartości nawet w temperaturze pokojowej. Nie znane są mi prace eksperymentalne dla podobnych struktur, a dr Wierzbicki też nie dyskutuje swoich obliczeń w kontekście wyników doświadczalnych dla badanych materiałów, choćby w innej geometrii.

Pozostałe prace tej grupy poświęcone są badaniu zjawisk termoelektrycznych w obecności stanów topologicznych silicenu oraz oddziaływań spinowo orbitalnych. Podobnie jak w pracach pierwszej grupy wiele uwagi poświęca się zjawiskom spinowym. Są one wynikiem często pojawiającego się ferromagnetycznego uporządkowania stanów na brzegach nano-wstążek. W paskach silicenu obserwowano pojawienie się czterech różnych magnetycznych stanów brzegowych: z uporządkowaniem ferro- lub antyferromagnetycznym i momentami magnetycznymi w płaszczyźnie struktury lub prostopadle do niej. Autorzy sporo uwagi poświęcają badaniu stabilności tych faz magnetycznych. Dla ferromagnetycznych konfiguracji stanów brzegowych uzyskano gigantyczne wartości współczynników Seebecka (spinowego i ładunkowego) i jednocześnie zaskakująco niskie wartości termoelektrycznych współczynników dobroci:  $ZT_c$  i  $ZT_s$ , co wiąże się z dużym przewodnictwem cieplnym struktur. Oddziaływanie typu Rashby, którego wpływ na termoelektryczne właściwości nano-wstążek grafenowych badano w pracy [H13], stabilizuje prostopadłą (do płaszczyzny warstwy) konfigurację magnetyzacji brzegowych stanów ferromagnetycznych.

Obliczenia teoretyczne zjawisk transportu w pierwszej grupie prac bazują na zaawansowanej teorii nierównowagowych funkcji Greena. Badane układy opisywane tu są za pomocą Hamiltonianu Andersona dla pojedynczej domieszki. W drugiej grupie koniecznym był opis układu w ramach przybliżenia ciasnego wiązania z parametrami dobranymi z dopasowania niskoenergetycznej struktury do obliczeń z pierwszych zasad. Dopiero kolejnym krokiem było numeryczne rozwiązanie równania Schrödingera i określenie wartości współczynników transmisji w zależności od energii dla obu rzutów spinu elektronu na oś kwantowania. W ocenianych pracach obliczenia przeprowadzono dla wąskich warstw grafenu i silicenu, ewentualnie funkcjonalizowanych poprzez okresowe usuwanie części atomów lub przyłożenie zewnętrznych pól – elektrycznego lub magnetycznego. Wyniki opisane w publikacjach osiągnięcia habilitacyjnego przyczyniają się do zrozumienia zjawisk zależnego od spinu transportu badanych nanostruktur. Weszły też one na trwałe do literatury przedmiotu, o czym mogą świadczyć liczne cytowania prac.

Osiągnięcia organizacyjne i dydaktyczne pana Wierzbickiego są typowe dla pracownika Uczelni kształcącej studentów, a pod wieloma względami większe niż średnie na tym etapie kariery. Dowiadujemy się, że jest on autorem dwu skryptów dla

studentów a w latach 2008-2011 był opiekunem Koła Naukowego Fizyków na macierzystym Wydziale. Prowadził różnorodne zajęcia dla studentów i jest laureatem studenckiego wyróżnienia/nagrody „Złota Kreda”. Jest Kierownikiem „Pracowni Modelowania Struktur Niskowymiarowych” oraz administratorem ‘rozproszonego klastra obliczeniowego Zakładu Badań Strukturalnych’.

W dostępnych mi materiałach nie znalazłem informacji o stażach zagranicznych, bo trudno nazwać stażem jedno-miesięczną wizytę sfinansowaną w ramach wymiany Polska – RPA. Jest informacja o udziale w 11 konferencjach, ale brak informacji o konferencyjnych wystąpieniach z referatami na zaproszenie organizatorów ani o kierowaniu grantami naukowymi. Dr inż. Wierzbicki dwa razy był wykonawcą grantów – ale w dokumentacji nie zostało podane nazwisko Kierownika. Wiem, że Kierownikiem jednego grantu był prof. Barnaś. Nie wiadomo też czy Habilitant był proszony o recenzowanie publikacji naukowych. Te braki dość mocno osłabiają wniosek habilitacyjny, choć go nie dyskwalifikują. Jego osiągnięcia naukowe i dydaktyczne są na wysokim poziomie i dwukrotne stanowiły podstawę Nagrody Zespołowej Rektora PW.

Reasumując należy podkreślić, że dr inż. Michał Wierzbicki jest doświadczonym fizykiem o dużych osiągnięciach naukowych i dydaktycznych. **Popieram wniosek o nadanie mu stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk fizycznych.**

