

Prof. Jakub Tworzydło  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Pasteura 5, Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
magistra inżyniera Krzysztofa Kolasińskiego  
pt. *"Modelowanie mikroskopii bramki skanującej w układach otwartych z  
dwuwymiarowym gazem elektronowym"*

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Krzysztofa Kolasińskiego została przygotowana w postaci zbioru artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Formę taką dopuszcza USTAWA z dnia 18 marca 2011 r. (o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym). Zbiór artykułów stanowiących treść niniejszej rozprawy obejmuje prace opublikowane w znakomitych czasopismach, spójne tematycznie i podejmujące rozległą problematykę badawczą. Dwa artykuły zostały opublikowane w New Journal of Physics, siedem w Physical Review B oraz jeden w Physical Review B – Rapid Communications, oczywiście wszystkie artykuły są napisane w języku angielskim. Autor rozprawy jest jednocześnie pierwszym autorem wszystkich wymienionych artykułów.

Praca opatrzona jest także krótkim wstępem w języku polskim, syntetycznymi streszczeniami poszczególnych artykułów, spisem cyklu publikacji składających się na rozprawę oraz zestawieniem najistotniejszych odnośników do literatury przedmiotu, potrzebnych w tej wstępnej części pracy (65 pozycji). W dalszej części niniejszej recenzji będę korzystał ze spisu prac podanego przez autora rozprawy, obejmującego pozycje od A.1 do A.10.

Artykuły składające się na pracę mgr inż. Krzysztofa Kolasińskiego mają objętość typową dla artykułów z dziedziny fizyki, licząc około dziesięciu stron każdy, przy czym zostały one włączone do pracy w oryginalnym układzie edytorskim odpowiednich czasopism. Artykuły zawierają bardzo liczne rysunki w postaci typowych wykresów, a także kolorowych map intensywności, opatrzone są też

solidnymi szkicami ilustrującymi rozpatrywaną sytuację fizyczną. Przygotowanie i edycja wszystkich rysunków jest nie tylko bardzo staranna, lecz często po prostu wybitna, zasługująca na najwyższe uznanie, dostarczająca czytelnikowi intensywnych estetycznych i niemal artystycznych doznań (tu szczególną moją uwagę przykuł artykuł A.6). Z drugiej strony, jakość czasopism publikujących wymienione artykuły, upraszcza w pewnym sensie pracę recenzenta, można mieć zaufanie do procesu redakcyjnego i recenzenckiego od strony formalnej: składu, edycji, podziału na rozdziały, cytowań literatury itp. Chciałbym podkreślić, że zapewnienie wysokiej jakości artykułów nie jest automatyczne, zawsze wymaga od autorów staranności, uwzględnienia poprawek i sprostania wymaganiom wnikliwych recenzentów. Nie jest to bynajmniej zadanie łatwiejsze niż przygotowanie typowej książkowej rozprawy. Autorowi należy się w tej kwestii uznanie, tym bardziej, że dokonywanie większych i mniejszych korekt, pracochłonne dopracowanie rysunków, czy dostosowywanie notacji, jest najczęściej zadaniem delegowanym na doktoranta. Uważam, że tak przygotowany cykl publikacji w znakomitych czasopismach w pełni dokumentuje sprawność doktoranta w dbałości o tę stronę pracy naukowej, którą jest przedstawienie, opisanie i zilustrowanie prowadzonych badań.

Samodzielność przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników, oczywiście w stopniu obowiązującym doktoranta, a więc w ramach współpracy z mistrzem-promotorem, nie pozostawia najmniejszej wątpliwości. Pan Krzysztof Kolasiński jest nie tylko pierwszym autorem wszystkich prac, ale w trzech pracach jedynym współautorem jest promotor, ponadto wszyscy współautorzy pozostałych prac potwierdzili pisemnie wiodący wkład doktoranta. Ujmując rzecz najprościej, udokumentowane dokonania publikacyjne autora niniejszej rozprawy sytuowałyby go w obszarze całkowicie satysfakcjonującym dla ubiegania się o stopień i zapewniającym jakość rozprawy habilitacyjnej.

Myślą przewodnią pracy i zarazem platformą fizyczną, na której rozgrywają się przeprowadzone badania, są własności dwuwymiarowego gazu elektronowego, bliskiego, na ile to możliwe, warunkom wysokiej czystości, i poddanego działaniu niskich (kilku kelwinowych) temperatur. Taki układ wykazuje charakterystyczne cechy układu kwantowego i także podejście teoretyczne, które rozwija autor, musi uwzględniać pełną złożoność mechaniki kwantowej. Zjawiska związane z przepływem prądu w układzie elektronowym zdominowanym przez efekty kwantowe noszą skrótową nazwę kwantowego transportu. Charakterystyczną cechą tej grupy zjawisk jest ich czułość na efekty

interferencyjne, powstające wtedy, gdy długość dekoherencji elektronów jest większa od rozmiaru próbki, co w układach dotępnych we współczesnych laboratoriach oznacza skalę kilku mikronów. Przełomem w ilustrowaniu tego typu zjawisk stała się, oczywiście cytowana przez autora, praca Topinka et al. (Nature 2001). W pracy tej wprowadzono nową technikę eksperymentalną nazywaną, tak jak wy tytule przedstawionej rozprawy, mikroskopią bramki skanującej (SGM od scanning gate microscopy).

Zasadniczy pomysł pomiaru jest prosty, polega na standardowym wyznaczeniu przewodności całego układu, podczas gdy wybrany mały fragment przestrzenny gazu elektronowego jest zaburzany przez obecność ostrza mikroskopu sił atomowych (AFM od atomic force microscope). Modyfikowane jest położenie i napięcie ostrza, a wyniki zostają zanotowane w postaci kolorowej mapy intensywności, czy to gradientu przyłożonego napięcia (tzw. transkonduktancji) czy też gradientu zależności od położenia ostrza. Z pojedynczego skanu powstaje niejako mapa topograficzna całego urządzenia.

Zainteresowanie autora koncentruje się wokół zjawisk interferencyjnych, które mogą być zmapowane w takim eksperymencie. Staranna i wnikliwa analiza teoretyczna, którą autor proponuje i rozwija, jest konieczna, bo mimo koncepcyjnej prostoty tego typu eksperyment obejmuje wiele nieoczywistych zależności.

Pierwszy problem badawczy który tutaj się pojawia, i zostaje wyczerpująco przedstawiony przez autora (prace A.1 i A.2), to problem lokalności wpływu ostrza używanego jako próbnik w metodzie SGM. Pierwsza uproszczona intuicja fizyczna podpowiada, że odpowiedź układu powinna być proporcjonalna do gęstości stanów elektronowych w pobliżu ostrza, czyli mapa SGM odpowiadałaby mapom LDOS (local density of states). Należy jednak uwzględnić, że zjawiska kwantowego transportu często wymykają się prostej intuicji. Właśnie nielokalność badanej rzeczywistości fizycznej ma w tej sytuacji decydujące znaczenie, z jednej strony utrudniając prymitywne próby interpretacji, a z drugiej otwierając pole do twórczego wykorzystania zjawisk nielokalnych, interferencyjnych w pozyskaniu nowych ilościowych danych o badanym układzie. Autor przezwycięża te trudności, podając a pracach A.1 i A.2 warunki, w których interpretacja eksperymentu SGM w terminach LDOS jest możliwa (są to: słabe sprzężenie kanału przewodzącego, jedno-modowość transportu lub też oddalenie od sytuacji rezonansowej).

Prace autora pochodzące z początku serii (od A.1 do A.6) są uporządkowane według klucza pewnej logiki fizycznej. Autor przechodzi od ilustracji najprostszych zjawisk interferencyjnych, do sytuacji coraz bardziej złożonych. Po rozstrzygnięciu problemu zgodności map SGM z wielkością LDOS podana zostaje analiza fundamentalnego eksperymentu Younga -- interferencji elektronów na dwu szczelinach (prace A.4 i A.5). Wnioski z tych rozważań są zaskakujące; w typowej spektroskopii SGM nie udaje się zaobserwować wyraźnych wzorów dyfrakcyjnych (A.4), jednak staje się to możliwe po odjęciu prądu upływu (A.5) i wykonaniu map rezystancji obok typowych map przewodności. Kolejna praca A.3 wykracza poza podręcznikowe zjawiska interferencji. Autor prezentuje w niej wyniki badań krawędziowych prądów w reżimie kwantowego efektu Halla (QHE quantum Hall effect), a także ilustruje manipulowanie nimi przy pomocy dodatkowej anty-kropki. Wyniki tej pracy, co jest cenne, pozostają w dobrej korespondencji z wynikami eksperymentu. W końcu, autor podejmuje również intrygującą tematykę zjawisk interferencyjnych w grafenie. Zajmuje się przede wszystkim stanami powstającymi na granicy złącza n-p, tzw. stanami węzowymi (A.8 oraz częściowo A.7), ale także kanonicznym eksperymentem ogniskowania magnetycznego (A.7).

W prowadzonych przez autora pracach najważniejsze są jednak te, które prowadzą do wniosków ilościowych. Takie wnioski otrzymywane są w późniejszych pracach cyklu. I tak, w pracy A.6 zostaje zaproponowany sposób mapowania niejednorodności potencjału, występującej w naturalny sposób w gazie elektronowym. Dopasowanie do prostego modelu pozwala podać konkretne oszacowanie promienia zubożenia gazu i amplitudy potencjału ostrza. Wobec tego, co powiedzieliśmy o nielokalnych własnościach odpowiedzi układu w badaniach SGM, wyprowadzenie takich ilościowych zależności nie jest bynajmniej zagadnieniem banalnym. Pozyskaniu konkretnych, ilościowych przewidywań poświęcone są też dwie ostatnie prace cyklu. Autor bada kolejną ważną właściwość gazu elektronowego, jaką jest oddziaływanie spinowo-orbitalne. Ilościowe wnioski dotyczą zarówno wielkości tego oddziaływania, jak także stosunku oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby do oddziaływania typu Dresselhausa (praca A.10). Autorowi udaje się także określić wpływ oddziaływania spinowo-orbitalnego na pomiary efektywnego czynnika żyromagnetycznego (praca A.9). Wyniki tych dwu prac wydają mi się szczególnie cenne, dotyczą zjawisk będących obecnie w centrum zainteresowania spintroniki i podają nowatorskie metody podejścia do trudnego zagadnienia wyznaczenia podstawowych oddziaływań decydujących o dynamice spinowego stopnia swobody

elektronów. W wielu pracach z przedstawionego cyklu, nawet wtedy, gdy nie jest możliwe uzyskanie wniosków ilościowych, autor analizuje wyniki przy pomocy dodatkowych argumentów analitycznych i modelowych, tak dzieje się w pracach A.1, A.4 i A.5 (oprócz omówionych powyżej A.6, A.9 i A.10). Fakt ten bardzo dobrze świadczy o dojrzałości badawczej i wyrobieniu teoretycznym autora.

Szczególne miejsce w cyklu zajmuje praca A.7, która została opublikowana zaledwie pół roku temu. Praca ta zawiera nowatorskie sformułowanie metody numerycznego rozwiązywania centralnego zagadnienia kwantowego transportu. Autorzy proponują jednoczesne rozwiązanie kwantowego zagadnienia rozpraszania dla czasowo odwróconych stanów rozproszeniowych. Rozwiązanie to dostarcza odpowiednich wielkości, które przy pomocy wariantu równania Lippmanna-Schwingera pozwalają wyznaczyć własności całego układu w obecności zaburzającego potencjału ostrza, bez konieczności czasochłonnego powtarzania całych rachunków. Praca zawiera wiele cennych i twórczo rozwiniętych aspektów metodologicznych, porównuje też szczegółowo podejście autorów z wcześniejszymi próbami (np. metodą algorytmu KNITTING). Niejako na marginesie tej pracy postawiłbym pytania o stabilność zaproponowanych metod np. wiadomo, że odwrotna procedura KNITTING miała poważne problemy ze stabilnością. Czy autor był świadomy tych problemów, czy nowe podejście je usuwa, i w końcu czy zastosowanie perturbacyjnego wyniku równania LS nie powoduje, że obliczana macierz rozpraszania dla stanów asymptotycznych przestaje być unitarna. Muszę podkreślić, że od strony sformułowania metodologicznego ta praca bardzo mnie satysfakcjonuje, gdyż zapoznając się z wcześniejszymi pracami cyklu odczuwałem pewien niedosyt wyjaśnienia technicznych detali metod obliczeniowych, którymi posługiwał się autor. Nie jest dla mnie jednak jasne, czy w pracach chronologicznie wcześniejszych, a więc w A.1, A.3 oraz A.4 dopasowanie funkcji falowej (wave-matching) było wykonywane z uwzględnieniem modów ewanescentnych w doprowadzeniach. Z mojego doświadczenia wynika, że takie uwzględnienie jest kluczowe dla stabilności i poprawności wyników.

Ciekawym pytaniem jest rozważenie perspektyw przedstawionej przez autora ścieżki badawczej. Z jednej strony temat został potraktowany bardzo wnikliwie i oczywiste wątki wydają się być już rozwiązane. Z drugiej strony, w ostatnich pracach pojawiło się zainteresowanie oddziaływaniem spinowo-orbitalnym, będącym bazą spintroniki, a więc grupy zjawisk również dotyczących kwantowego transportu, jednak wyzyskujących możliwość manipulacji spinowym stopniem swobody

elektronów. Oddziaływanie to jest także bardzo istotne w badaniach izolatorów topologicznych, gdzie obliczenia numeryczne dla transportu kwantowego topologicznie protegowanych stanów powierzchniowych nadal pozostają wyzwaniem. Byłbym ciekaw komentarza autora co do możliwości rozwijania opanowanych przez niego technik obliczeniowych w tych, lub zbliżonych, nowych kierunkach.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że autor nie tylko wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną i samodzielnością badawczą w celu rozwiązania oryginalnego problemu naukowego, ale przedstawił też całą spójną strategię rozwiązania kompleksu zagadnień badawczych. Zastosował nowoczesne techniki symulacyjne i pogłębioną analizę numeryczną w celu uzyskania rozwiązania dostosowanego do wyzwań konkretnej sytuacji fizycznej. Udokumentował też umiejętność posługiwania się prostymi modelami analitycznymi, czy to w celu uzasadnienia wniosków jakościowych czy też uzyskania przewidywań ilościowych, jak także, co szczególnie cenne, do bezpośredniego porównania z wynikami doświadczalnymi. Cykl prac przedstawionych do niniejszej recenzji zawiera w sobie wystarczający potencjał, aby przyczynić się do rozwoju wielu gałęzi badań elektroniki opartej na zjawiskach kwantowego transportu.

**Wobec powyższych wniosków stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca z nawiązką spełnia wszystkie zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu, a także zdecydowanie wnioskuję o przyznanie autorowi wyróżnienia.**

Grodzisk Mazowiecki, 20.03.2017 r.

