Kraków, 9 grudnia 2013

dr hab. Adam Rycerz

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego
Zakład Teorii Materii Materii Skondensowanej
i Nanofizyki

email: rycerz@th.uj.edu.pl
www: http://th.if.uj.edu.pl/~adamr/

Ocena dorobku naukowego i recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Bartłomieja Spisaka *"Własności transportowe i lokalizacja stanów jednoelektronowych w układach o zaburzonej symetrii translacyjnej"*.

Dr Bartłomiej Spisak jest absolwentem Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, gdzie obronił pracę magisterską zatytułowaną *"Modelowy opis własności elektronowych półprzewodnikowej kropki kwantowej"* a wykonaną pod kierunkiem prof. dr. hab. Janusza Adamowskiego (w 1997 roku) i doktorską *"Wpływ oddziaływania spin-orbita na przewodnictwo elektryczne w układach nieuporządkowanych"*, pod kierunkiem dr. hab. Antoniego Paji (z wyróżnieniem, w 2002 roku). Od 2003 roku pracuje na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Ma za sobą liczne krótko- i długoterminowe staże zagraniczne, w przeważającej liczbie odbyte w zespole prof. G.J. Morgana na Uniwersytecie w Leeds (Wielka Brytania). Obecnie prowadzi badania naukowe dotyczące opisu teoretycznego transportu ładunku elektrycznego w układach o zaburzonej symetrii translacyjnej (a w szczególności układów nieuporządkowanych, takich jak szkła metaliczne), regularnie uczestniczy w konferencjach naukowych, i prowadzi zajęcia dydaktyczne, głównie z zakresu mechaniki kwantowej oraz metod matematycznych i metod obliczeniowych fizyki.

W swojej pracy naukowej w okresie po obronie pracy doktorskiej, dr. Spisak zajmował się początkowo zagadnieniem zależnego od spinu transportu ładunku w układach niskowymiarowych i warstwowych, a w szczególności wykorzystaniem metod macierzy transferu i formalizmu Landauera-Büttikera do opisu wspomnianej grupy zjawisk. Warto podkreślić, że opracowana przez dr. Spisaka metoda jest nadal wykorzystywana w zespole prof. Adamowskiego w badaniach nanourządzeń rezonansowo-tunelowych, a wyniki dotyczące heterostruktur magnetycznych GaN/GaMnN zostały ostatnio opublikowane w prestiżowym czasopiśmie *Applied Physics Letters*. W poźniejszym

okresie, badania dr. Spisaka koncentrowały się wokół zastosowań formalizmu Kubo-Greenwooda i metody funkcji Greena do opisu zjawisk transportowych w układach nieuporządkowanych. We współpracy z prof. G.J. Morganem, dr. Spisak opracował teorię magnetooporu w granicy słabych pól i zastosował ją z powodzeniem do wyjaśnienia wyników doświadczalnych dla szkła metalicznego $Ca_{70}Al_{30}$. Równolegle, zajmował się zastosowaniem funkcji Wignera do opisu transportu kwantowego i lokalizacji elektronów, zarówno w układach nieuporządkowanych jak również nanourządzeniach. Jednym z ciekawszych wyników otrzymanych w ramach tego tematu jest opis zachowania elektronów tunelujących przez aperiodyczny łańcuch barier potencjału umieszczony w zewnętrznym polu elektrycznym, który przedstawiono w artykule opublikowanym w *Physical Review B* w 2009 roku (wspólnie z M. Wołoszynem).

Przedstawiony w dużym skrócie powyżej zakres tematyczny badań dr. Spisaka jednoznacznie pokazuje, że jest on w pełni dojrzałym i samodzielnym naukowcem, który biegle posługuje się zasadniczo wszystkimi współczesnymi metodami fizyki teoretycznej materii skondensowanej, które mają zastosowanie w opisie kwantowego transportu nieodziałujących elektronów. W ujęciu ilościowym, dorobek naukowy dr. Spisaka stanowi 28 publikacji w czasopismach recenzowanych, które wg bazy danych *Web of Science* są cytowane 43 razy. 12 spośród tych artykułów ukazało się w czasopismach o współczynniku *impact factor* większym od jedności (IF>1.0), a są to: Applied Physics Letters (1 praca), Physical Review B (2 prace), Journal of Applied Physics (2 prace), Semiconductor Science and Technology (4 prace), Journal of Non-Crystalline Solids (1 praca), European Physical Journal B (1 praca), oraz Physica Status Solidi B (1 praca). Wśród pozostałych 16 prac dominują artykuły opublikowane w Acta Physica Polonica A i B (odpowiednio, 9 i 1 praca) a także Materials Science Poland (3 prace). Zwraca uwagę dominacja czasopism adresowanych do środowiska osób zainteresowanych fizyką materiałów i technologiami półprzewodnikowymi, co nie jest typowe dla fizyka teoretyka badającego fundamentalne problemy kwantowej teorii materii skondensowanej. Być może jest to przyczyną niewielkiej liczby dotychczasowych cytowań prac dr. Spisaka (zaledwie 12 po odjęciu cytowań własnych), która jednak w ostatnich dwóch latach zaczęła systematycznie rosnąć.

Ponadto, na dorobek dr. Spisaka składają się dwie książki. Pierwsza z nich to podręcznik akademicki zatytułowany “Wybrane rozdziały matematycznych metod fizyki. Rozwiązane problemy”, napisany wspólnie z prof. A. Lendą, a druga to monografia habilitacyjna “Własności transportowe i lokalizacja stanów elektronowych w układach o zaburzonej symetrii translacyjnej”, której zawartość szczegółowo omówię w dalszej części tej oceny. Warto podkreślić, że zarówno Autoreferat jak i wszystkie dodatkowe materiały dokumentujące dorobek naukowy i dydaktyczny dr. Spisaka zostały przygotowane z ogromną starannością, co nie zawsze ma miejce w toku postępowań o nadanie stopni naukowych. Kończąc część oceny dotyczącą całości dorobku naukowego stwierdzam, że bez wątpienia spełnia on wymagania stawiane przy ubieganiu się o stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Osiągnięciem naukowym stanowiącym podstawę postępowania habilitacyjnego jest monografia autorstwa dr. Spisaka, zatytułowana *“Własności transportowe i lokalizacja stanów elektronowych w układach o zaburzonej symetrii translacyjnej”* (wyd. Libron, Kraków 2013). Monografia składa się ze Wprowadzenia, w którym omówiono podstawy opisu układów kwantowych za pomocą rozkładów określonych na przestrzeni fazowej, tj. funkcji Wignera i funkcji Husimiego, oraz trzech rozdziałów powiązanych tematycznie z pracami badawczymi autora.

Rozdział drugi, “Dynamika stanów jednoelektronowych w przestrzeni fazowej”, rozpoczyna umówienie równania ruchu dla funkcji Wignera w przestrzeni fazowej i jego podstawowych konsekwencji zilustrowanych przykładami. Autor omawia szczegółowo własności diod rezonansowo-tunelowych i przedstawia opis dynamiki elektronów w takich urządzeniach w oparciu o funkcję Wignera. Przedstawione są także wyniki własne Autora dotyczące relacji pomiędzy tzw. parametrem nieklasyczności a prądem płynącym przez diodę rezonansowo-tunelową. Następnie, omówione są wyniki dotyczące dynamiki pakietu falowego w jednowymiarowym układzie aperiodycznym, tzw. supersieci Fibonacciego. Autor wykazuje w szczególności, że stany elektronowe w takim układzie nie są zlokalizowane, oraz że dyfuzja nośników ładunku ma charakter anomalny (wartość oczekiwana kwadratu przemieszczenia rośnie z czasem wyraźnie szybciej, niż dla procesu błądzenia przypadkowego).

W rozdziale trzecim, “Nieporządek strukturalny i kwantowe metody opisu własności transportowych”, zawarte jest wyczerpujące wprowadzenie do fizyki transportu kwantowego układów nieuporządkowanych, z uwzględnieniem równania Boltzmana jak również formalizmu funkcji Greena i równania Kubo-Greenwooda dla tensora przewodnictwa w zakresie liniowej odpowiedzi. Rozdział kończy prezentacja formalizmu Keldysha dla nierównowagowych funkcji Greena i założeń fizycznych, przy których formalizm ten redukuje się do równania kinetycznego Boltzmanna. Z całą pewnością, materiał zawarty w tym rozdziale ma znaczne walory dydaktyczne i stanowi, wraz z opisem teorii słabej lokalizacji zawartym w rozdziale następnym, o unikalności monografii dr. Spisaka na polskim rynku wydawniczym.

Rozdział czwarty, “Zjawisko lokalizacji w układach nieuporządkowanych”, stanowi ponad jedną trzecią objętości całej monografii i zawiera omówienie największej liczby wyników własnych Autora. Rozdział rozpoczyna omówienie mechanizmów fizycznych będących przyczyną zjawisk silnej i słabej lokalizacji w układach nieuporządkowanych. Następnie, Autor przedstawia szczegółowo konkurencyjne modele Vollhardta-Wölflego i Morgana-Howsona-Šauba (MHŠ) opisujące przewodnictwo elektryczne układów nieuporządkowanych, a w szczególności wpływ mechanizmu rozpraszania wstecznego na przewodnictwo w obszarze słabej lokalizacji. Pierwszym z oryginalnych osiągnięć Autora przedstawionych w tym rozdziale jest wyprowadzenie ogólnego wyrażenia przedstawiającego czas relaksacji dla procesów rozpraszania elektronów jako funkcję parametru rozfazowania, który to parametr opisuje w efektywny sposób wpływ różnych możliwych mechanizmów utraty koherencji fazowej. Kolejnym ważnym wynikiem jest

interpretacja zależności temperaturowej oporu szkła metalicznego $Ca_{70}Al_{30}$ w ramach modelu MHŠ i określenie warunków, jakie muszą być spełniene, aby obowiązywały prawa $T^{1/2}$ lub $T^{1/4}$ rządzące zależnością temperaturową oporu w zakresie niskich temperatur. Na zakończenie, Autor prezentuje wyprowadzoną z modelu MHŠ teorię magnetooporu szkła metalicznego $Ca_{70}Al_{30}$ w zakresie niskich pól magnetycznych, jak również szkic teorii opisującej wpływ oddziaływania spin-orbita na własności transportowe tego układu.

Z poczucia obowiązku recenzenta, przedstawię teraz własne komentarze i uwagi krytyczne dotyczące poszczególnych części monografii habilitacyjnej dr. Spisaka.

Początkowe fragmenty monografii, tj. rozdziały 1. oraz 2.1, są niewątpliwie starannie zredagowane, jednak silne nasycenie matematyką i koncentracja na aspektach formalnych omawianych zagadnień sprawia, że są one dość trudne w odbiorze. Wydaje się, że prezentację formalizmu matematycznego dobrze byłoby poprzedzić wprowadzeniem do fizyki rozważanych układów mezo- i nanoskopowych (w tym także głównych wyników eksperymentalnych) ze szczególnym uwzględnieniem tych jej aspektów, które najgłębiej można zrozumieć dzięki podejściu opartemu o funkcje rozkładu w przestrzeni fazowej. Mogłoby to stanowić przekonujące uzasadnienie, dlaczego formalizm prezentowany dalej jest niezbędny dla zrozumienia mechanizmów rządzących omawianymi zjawiskami, a na pewno przyczyniłoby się do większej przejrzystości tekstu. Z tych samych powodów część wyprowadzeń formalnych, które mogą być pominięte przy pierwszym czytaniu, warto byłoby umieścić w dodatkach na końcu książki; uwaga ta stosuje się także do dalszych rozdziałów monografii, a w szczególności znacznej części materiału zaprezentowanego w rozdziale 3.

Wyniki własne Autora, zaprezentowane w rozdziale 2. nasuwają dwie główne uwagi o charakterze merytorycznym. Po pierwsze, omawiana charakterystyka prądowo napięciowa diody rezonansowo-tunelowej jest dobrze znana w literaturze przedmiotu, a oryginalny wkład Autora polega tutaj na wyznaczeniu zależności napięciowej parametru nieklasyczności opisującego w syntetyczny sposób kształt funkcji Wignera w przestrzeni fazowej. Brak jednak jakichkolwiek wskazówek, jak taki parametr nieklasyczności mógłby zostać zmierzony w eksperymencie. Być może, pomocna byłaby tutaj dyskusja wyższych kumulant transferu ładunku przez rozważany układ, w tym natężenia szumu śrutowego? W podrozdziale 2.3 [str. 69-71] przedstawione są uwagi o braku lokalizacji elektronów w jednowymiarowej strukturze aperiodycznej (supersieci Fibonacciego). Można mieć jednak wątpliwości, czy konkluzja taka nie jest zbyt pochopna na podstawie badań struktury złożonej z N=100 delt Diraca; standardową procedurą stosowaną w takich przypadkach jest analiza numeryczna zachowania wybranych kryteriów lokalizacji nośników w granicy 1/N -> 0.

Rozdział 3. jest poprzedzony dobrze zredagowanym wprowadzeniem do fizyki układów nieuporządkowanych o znacznych walorach dydaktycznych, nie posiada zatem głównych wad rozdziału 2. Pewnym dysonansem jest tutaj jedynie sformułowanie *“[...] ciała stałe mogą być postrzegane jako [...] układy dynamiczne [...] znajdujące się w stanie stabilnej*

równowagi termodynamicznej" [s. 75], podczas gdy zdecydowana większość rozważanych w monografii przypadków to układy metastabilne! Jest to oczywiście wyjaśnione w dalszych partiach tekstu; warto jednak pamiętać o usunięciu wspomnianej nieścisłości w przypadku przygotowywania drugiego w wydania książki. Podobna uwaga dotyczy obszernych fragmentów rozdziału 3. zawierających długie wyprowadzenia formalne, które można by w przyszłości przenieść do dodatków na końcu książki.

Zawartość tematyczna rozdziału 4. została znakomicie zaplanowana a tekst dobrze zredagowany, jest to bez wątpienia najbardziej wartościowa część całej monografii. Niemal doskonały jest podrozdział 4.1, zawierający intuicyjne wyjaśnienie znaczenia efektów interferencji kwantowej w układach mezoskopowych i mechanizmu tzw. słabej lokalizacji nośników ładunku. Drobną usterką techniczną jest błąd literowy we wzorze (4.3), gdzie po lewej stronie równania zamiast funkcji ϕ powinno być ψ. Szkoda, że ten znakomity rozdział pozbawiony jest chociażby krótkiego wstępu historycznego opisującego detekcję doświadczalną zjawiska słabej lokalizacji. Przydatne mogłoby być tutaj również omówienie zjawiska Aharonowa-Bohma w pierścieniach mezoskopowych, które to zjawisko stanowi chyba najbardziej spektakularną demonstrację efektów intereferencji kwantowej w tej klasie układów. Dodatkowo, w pewnym obszarze parametrów oscylacje magnetoprzewodnictwa pierścienia Aharonowa-Bohma wykazują interesujące analogie ze zjawiskiem słabej lokalizacji w dwu- i trójwymiarowych układach nieuporządkowanych [por. Yu.V. Nazarov, Ya.M. Blanter, *Quantum Transport: Introduction to Nanoscience,* Cambridge University Press, Cambridge 2009, Rozdział 1.6].

Wymienione powyżej drobne niedoskonałości nie przekreślają w najmniejszym stopniu wartości naukowej i dydaktycznej monografii dr. Bartłomieja Spisaka, która nie ma obecnie odpowiednika w polskojęzycznej literaturze przedmiotu. Tym bardziej wydaje się celowe rozważenie możliwości przygotowanie drugiego, poprawionego i rozszerzonego wydania tej monografii.

Podsumowując, jestem przekonany, że zarówno dorobek naukowy jak i monografia habilitacyjna dr. Bartłomieja Spisaka spełniają wymagania stawiane przy ubieganiu się o stopień naukowy doktora habilitowanego nauk fizycznych i wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Adam Rycerz