



UNIWERSYTET
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU

WYDZIAŁ FIZYKI
ZAKŁAD FIZYKI MEZOSKOPOWEJ

ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2
61-614 Poznań

prof. dr hab. Ireneusz Weymann

www: weymann.home.amu.edu.pl
email: weymann@amu.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Krzysztofa Ptaszyńskiego
pt. „Nierównowagowa fizyka statystyczna układów kropek kwantowych:
fluktuacje prądowe i termodynamika przepływu informacji”**

Rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Ptaszyńskiego pt. „Nierównowagowa fizyka statystyczna układów kropek kwantowych: fluktuacje prądowe i termodynamika przepływu informacji” została przygotowana pod opieką prof. dr. hab. Bogdana Bułki w Zakładzie Teorii Ciała Stałego w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu. Praca dotyczy teoretycznych badań własności transportowych, dynamiki oraz nierównowagowej termodynamiki kwantowych układów otwartych opartych na kropkach kwantowych dołączonych do zewnętrznych elektrod. Choć własności transportowe złącz tunelowych z kropkami kwantowymi stanowią przedmiot intensywnych teoretycznych i doświadczalnych badań od blisko 30 lat i wydaje się, że są już dobrze poznane, Autorowi udało się zdefiniować kilka interesujących problemów, które nie były dotąd szerzej eksplorowane i wymagały dalszych prac badawczych. Dotyczy to zwłaszcza fizyki układów niskowymiarowych będących w stanach dalekich od równowagi termodynamicznej – Doktorant wykorzystał układy kropek kwantowych do testowania koncepcji nierównowagowej fizyki statystycznej oraz termodynamiki układów otwartych. Tego typu zagadnienia są obecnie przedmiotem intensywnego dyskursu naukowego w najlepszych ośrodkach badawczych na świecie, gdyż wiele eksperymentów jest prowadzonych właśnie w warunkach dalekich od równowagowych. Stąd też zrozumienie dynamiki i termodynamiki układów kwantowych oddziałujących z otoczeniem, a w szczególności kropek kwantowych sprzężonych tunelowo z metalicznymi kontaktami, jest bardzo istotne nie tylko z teoretycznego punktu widzenia, ale także kluczowe do pełnego zrozumienia danych doświadczalnych. Autor przebadął szereg różnych aspektów nierównowagowego transportu oraz dynamiki, zwracając uwagę na pewne uniwersalne cechy własności transportowych i termodynamicznych kwantowych układów otwartych. Doktorant badał między innymi wpływ koherencji kwantowych na działanie kwantowych silników cieplnych opartych o kropki kwantowe, aktywnie włączając się w intensywnie rozwijany nurt badań nad termoelektrycznymi własnościami układów nanoskopowych. Opracował teorię autonomicznych demonów Maxwella opartych o koherentną dynamikę podwójnych kropek kwantowych. Ponadto, zaproponował uogólnioną postać drugiej zasady termodynamiki opisującą lokalny bilans prądu ciepła i prądu informacji. To wszystko sprawia, że dysertacja zawiera szereg interesujących i cennych rezultatów, przyczyniając się do dalszego rozwoju szeroko rozumianej fizyki nanostruktur.

Rozprawa ma formę monotematycznego cyklu publikacji składającego się z sześciu artykułów, które ukazały się w najlepszych specjalistycznych czasopismach

naukowych, takich jak: Physical Review Letters (1 praca), Physical Review B (3 prace) i Physical Review E (2 prace). Pięć publikacji jest jednoautorskich, natomiast artykuł, który ukazał się w Physical Review Letters, został przygotowany we współpracy z prof. Massimiliano Esposito z Uniwersytetu w Luksemburgu. Warto podkreślić, że prof. Esposito jest światowej klasy specjalistą w badaniach nierównowagowej fizyki statystycznej kwantowych układów otwartych. Jak wynika z załączonego oświadczenia dotyczącego wkładu w powstanie pracy, główną rolę w badaniach i przygotowaniu tej publikacji odegrał mgr Ptaszyński. Zwraca tutaj również uwagę wyjątkowa samodzielność naukowa Doktoranta – Promotor nie jest współautorem żadnej z prac przedstawionych w dysertacji.

Od strony formalnej dysertacja liczy 187 stron i składa się z czterech części, streszczenia oraz liczącej 140 pozycji bibliografii. Pierwsza część to wprowadzenie do problematyki transportu i dynamiki kwantowych układów otwartych. W rozdziale pierwszym tej części Autor precyzuje motywację oraz cel badań. Rozdział drugi zawiera opis stosowanych metod badawczych, a także ogólny hamiltonian rozpatrywanych układów. Następnie Doktorant w sposób systematyczny wyprowadza równania opisujące ewolucję macierzy gęstości w przybliżeniu Markova, m. in. równanie Pauliego (stosowane w pracach [A] i [C]), równanie Gurvitzta i Pragera (wykorzystane w pracy [B]), lokalne równanie master (użyte w pracach [D] i [E]), a także niesekularne równanie Lindblada (stosowane w pracy [F]). Dalej przedstawiono formalizm pełnej statystyki zliczeń (*full counting statistics*) oraz dystrybucji czasów oczekiwania (*waiting time distribution*) oraz opisano sposób wyznaczania prądu płynącego przez układ i jego fluktuacji. W dalszej części mgr Ptaszyński omawia pewne istotne pojęcia z teorii informacji oraz podstawy termodynamiki otwartych układów kwantowych. Kolejny rozdział zawiera omówienie podstawowych zjawisk transportowych występujących w układach kropek kwantowych słabo oddziałujących z zewnętrznymi elektrodami. Autor opisuje zjawisko blokady kulombowskiej, fluktuacje prądowe i ich rodzaje, m. in. szum Johnsona-Nyquista oraz szum śrutowy Schottky'ego, a także mechanizmy wzmacniania fluktuacji prądowych. Następnie przedstawia podstawowe zjawiska termoelektryczne oraz prezentuje sposób realizacji demona Maxwella w układzie podwójnych kropek kwantowych.

Trzecia część rozprawy doktorskiej przedstawia podsumowanie i wnioski, a w części czwartej zawarto dodatki – pierwszy opisujący osiągnięcia naukowe Doktoranta oraz drugi przedstawiający oświadczenia współautorów co do ich wkładu w powstanie prac stanowiących dysertację.

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w drugiej, zasadniczej części rozprawy doktorskiej, którą stanowi cykl sześciu publikacji naukowych (artykuły [A]-[F]). Wszystkie prace ukazały się w bardzo dobrych czasopiśmie naukowych i zostały poddane wnikliwemu procesowi recenzji, najpierw na etapie edytorskim, a potem eksperckim, dlatego nie będę ich szczegółowo omawiał, a skupię się na najważniejszych moim zdaniem wynikach.

Większość rozważań została przeprowadzona dla modelu dwóch kropek kwantowych dołączonych do metalicznych elektrod zewnętrznych. Kropki kwantowe opisano rozszerzonym modelem Andersona, zakładając, że tylko jeden poziom orbitalny na każdej z kropek kwantowych jest istotny dla transportu. W zależności od badanego zagadnienia, rozpatrywano geometrię szeregową bądź równoległą podwójnych kropek kwantowych w złączu, zakładając, że kropki są ze sobą sprzężone pojemnościowo, za pomocą całki przeskoku bądź też oddziaływania wymiennego. We wszystkich rozważaniach Autor ograniczył się do przypadku, gdy oddziaływania kulombowskie na kropkach kwantowych są nieskończone, co pozwoliło wykluczyć stany z podwójnie

obsadzonymi orbitalami, a tym samym znacznie zredukować rozmiar przestrzeni Hilberta układu centralnego. Ponadto, w pracach [A] i [C] rozpatrzono model bezspinowych kropek kwantowych. Warto tutaj zauważyć, że w celu realizacji takiego modelu nie wystarczy tylko przyjąć nieskończonego parametru korelacji kulombowskich na każdej kropce kwantowej (jak w sposób niewystarczający opisano w pracy [A]), ale należy także założyć, że do układu przyłożono bardzo duże pole magnetyczne (co zostało doprecyzowane w publikacji [C]). Jak słusznie zauważa Autor, taki model można zmapować na układ pojedynczej kropki kwantowej dołączonej do kontaktów magnetycznych. Badania dynamiki rozpatrywanych układów przeprowadzono stosując odpowiednie równie master dla macierzy gęstości układu centralnego, biorąc pod uwagę procesy tunelowe najniższego rzędu, odpowiadające pojedynczym aktom tunelowania sekwencyjnego, i zakładając w większości rozważań transport jednokierunkowy.

W pierwszej pracy [A], pt. *Nonrenewal statistics in transport through quantum dots*, przebadano fluktuacje prądowe i wykazano istnienie szumu super-poissonowskiego związanego z dynamicznym pułapkowaniem elektronów na kropkach kwantowych, bądź też ze stochastyczną zmianą szybkości tunelowania przez układ (szum telegraficzny). Autor wykazał, że oba mechanizmy prowadzą do takich samych wartości współczynnika Fano, natomiast różnica pomiędzy nimi uwidacznia się w dystrybucji czasów oczekiwania. Mechanizm dynamicznej blokady kanałowej nie prowadzi do powstania korelacji pomiędzy kolejnymi czasami oczekiwania, w przeciwieństwie do przełączania telegraficznego. Jak wskazuje Autor, badanie transportu w krótkich skalach czasowych może dostarczyć istotnych informacji o mechanizmach prowadzących do wzmocnienia fluktuacji prądowych.

Druga publikacja [B], pt. *Waiting times revealing the internal spin dynamics of a double quantum dot*, dotyczy badania wpływu wewnętrznej dynamiki spinowej dwóch kropek kwantowych dołączonych do ferromagnetycznych elektrod zewnętrznych na dystrybucję czasów oczekiwania i fluktuacje prądowe. Pokazano, że wewnętrzna dynamika spinowa uwidacznia się w krótkich skalach czasowych w dystrybucji czasów oczekiwania, a zatem nie prowadzi do istotnych zmian we współczynniku Fano, który charakteryzuje fluktuacje dla długich czasów. Podobnie jak w artykule [A], Autor wykazał, że analiza czasów oczekiwania pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji o układzie, których nie da się otrzymać stosując formalizm pełnej statystyki zliczeń. Przedstawione rozważania zostały przeprowadzone zakładając, że napięcie przyłożone do układu jest bardzo duże, tak że transport może odbywać się tylko w jednym kierunku. W kolejnej pracy rozważania te uogólniono na przypadek transportu dwukierunkowego.

I tak, praca [C] pt. *First-passage times in renewal and nonrenewal systems*, dotyczy analizy czasów pierwszego przejścia w dwóch pojemnościowo sprzężonych kropkach kwantowych. Czasy pierwszego przejścia są uogólnieniem dystrybucji czasów oczekiwania i charakteryzują czasy, po których liczba elektronów przepływających przez układ osiąga pewną ustaloną wartość. Czasy pierwszego przejścia są szczególnie ważne, gdy transport nie jest jednokierunkowy, co w zasadzie dotyczy wszystkich układów eksperymentalnych, w których nie da się wykluczyć fluktuacji termicznych i w których transport odbywa się w obu kierunkach. W powyższej publikacji Autor wyprowadził zależności łączące fluktuacje czasów pierwszego przejścia z pełną statystyką zliczeń. Pokazał także, że badania korelacji czasów pierwszego przejścia pozwalają na określenie mechanizmu fluktuacji prądowych dla transportu dwukierunkowego.

Czwarta praca cyklu (praca [D]) pt. *Coherence-enhanced constancy of a quantum thermoelectric generator* dotyczy badania własności termoelektrycznych układów dwóch połączonych szeregowo kropek kwantowych. Autor wykazał, że w przypadku, gdy

dynamika układu ma charakter koherentny, fluktuacje mocy silnika cieplnego mogą zostać zredukowane w porównaniu do fluktuacji występujących w układach, w których występują tylko procesy stochastyczne, tak jak w przypadku pojedynczych kropek kwantowych. Płyń z tego wniosok, że koherencja kwantowa prowadzi do polepszenia własności kwantowych generatorów termoelektrycznych.

Kolejne dwie publikacje [E] i [F], zatytułowane *Autonomous quantum Maxwell's demon based on two exchange-coupled quantum dots* oraz *Thermodynamics of quantum information flows*, dotyczą w ogólności badania związków pomiędzy termodynamiką układów nanoskopowych a teorią informacji. W pierwszej pracy Doktorant badał układ działający jak autonomiczny demon Maxwella, którego mechanizm działania jest związany z koherentnymi oscylacjami pomiędzy stanami spinowymi układu. Autor pokazał, że działanie demona jest związane z przepływem informacji pomiędzy kropkami kwantowymi. W celu ilościowego opisu termodynamiki badanego układu, mgr Ptaszyński dokonał uogólnienia drugiej zasady termodynamiki opisującej lokalny bilans produkcji entropii i przepływu informacji zaproponowanej przez Horowitza i Esposito w *Phys. Rev. X* **4**, 031015 (2014) na otwarte układy kwantowe. Formalizm ten został przedstawiony w pracy [F], którą uważam za jedną z najważniejszych publikacji cyklu doktorskiego.

Warto zaznaczyć, że cała rozprawa doktorska została zredagowana w sposób bardzo staranny i logiczny. Bibliografia jest trafnie dobrana i uwzględnia najnowsze prace z tematyki dotyczącej nierównowagowej termodynamiki kwantowych układów otwartych, co wskazuje, że Autor na bieżąco śledzi najnowsze osiągnięcia i postęp w badaniach. Na uznanie zasługuje także odwoływanie się do oryginalnych publikacji (Einstein, Smoluchowski, Maxwell, Anderson, Redfield, Lindblad, etc.) przy omawianiu konkretnych zagadnień, zamiast do prac przeglądowych. Przy redakcji dysertacji Autorowi nie udało się uniknąć kilku pomyłek edytorskich, które nie mają jednak żadnego wpływu na jakość całej rozprawy, a które wymieniam tylko z recenzenckiego obowiązku, np.: na stronie 12 błędnie zdefiniowano operatory spinu, zredukowana stała Plancka pojawia się we wzorach (2.4)-(2.6), jej definicja jest jednak podana później na stronie 14, we wzorze (2.58) użyto niezdefiniowanych operatorów $c_{i\sigma}$ (operatory układu centralnego oznaczono wcześniej jako $d_{i\sigma}$), stwierdzenie na stronie 25 „liczba stanów jest iloczynem gęstości stanów oraz funkcji rozkładu Fermiego-Diraca” nie jest precyzyjne, w równaniu (3.4) brakuje oznaczenia po jakiej zmiennej przebiega całkowanie, na stronie 65 pojawia się powtórzenie „forma forma”, słowo „hamiltonian” w środku zdania piszemy małą literą (w przeciwieństwie do języka angielskiego). Jak już podkreśliłem, te drobne uchybienia w niczym nie umniejszają rangi uzyskanych wyników i jakości dysertacji, które oceniam bardzo wysoko.

Mgr Ptaszyński jest autorem bądź współautorem 14 publikacji naukowych, z których 13 w większości ukazało się w najlepszych czasopismach naukowych, natomiast jedna praca jest wysłana do redakcji. Wyniki swoich badań prezentował na 17 konferencjach międzynarodowych, z czego 7 w formie referatu (jeden referat proszony). Mgr Ptaszyński był wykonawcą w dwóch grantach kierowanych przez swojego Promotora, natomiast obecnie kieruje projektami NCN: Preludium oraz Etiuda. W ramach projektu Etiuda odbył półroczny staż naukowy w grupie prof. Massimiliano Esposito na Uniwersytecie w Luksemburgu. Za swoje dotychczasowe osiągnięcia naukowe otrzymał szereg stypendiów i nagród, m.in. Nagrodę Oddziału Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu za najlepszą oryginalną pracę twórczą doktoranta w 2017 roku, Stypendium dla młodych badaczy z poznańskiego środowiska naukowego oraz Stypendium Prezesa PAN. Powyższe dane jednoznacznie wskazują, że mgra Ptaszyńskiego można niewątpliwie zaliczyć do grona czołowych młodych fizyków w Polsce.

Podsumowanie

Z wielką przyjemnością zrecenzowałem rozprawę doktorską mgra inż. Krzysztofa Ptaszyńskiego. Odwaga i bardzo duża samodzielność w formułowaniu problemów badawczych oraz waga uzyskanych wyników, opublikowanych w najlepszych czasopismach specjalistycznych, nie pozostawiają złudzeń, że mamy do czynienia z dysertacją na bardzo wysokim poziomie. Moim zdaniem sam cykl publikacji mógłby stanowić osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego, oczywiście poza innymi wymogami ocenianymi w takiej procedurze – dysertacja spełnia zatem z naddatkiem wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane pracom doktorskim. **W związku z tym, wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Krzysztofa Ptaszyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego, jednocześnie, ze względu na wysoki poziom naukowy dysertacji oraz rangę naukową opublikowanych wyników, wnoszę o wyróżnienie dysertacji.**

Jerzy Weyman