

dr hab. Bogdan Damski
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Fizyki Teoretycznej
ul. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
bogdan.damski@uj.edu.pl

Kraków, 8-8-2022

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Jana Krzywdy zatytułowanej
„Adiabatic evolution of driven quantum systems
in the presence of dissipation and noise possessing spatial and temporal correlations”**

Omawiana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim pod opieką dr. hab. Łukasza Cywińskiego w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Szeroko są w niej przedstawione zagadnienia dotyczące transportu elektronów w układach złożonych z półprzewodnikowych kropek kwantowych. Badania takich układów są obecnie prowadzone w wiodących ośrodkach naukowych na świecie i mają charakter zarówno teoretyczny jak i eksperymentalny. W szczególności są one podejmowane w kontekście prac dotyczących budowy komputerów kwantowych.

Rozprawa jest oparta głównie na oryginalnych wynikach przedstawionych w dwóch pracach

- Adiabatic electron charge transfer between two quantum dots in presence of $1/f$ noise
Krzywda & Cywiński, Phys. Rev. B **101**, 035303 (2020)
- Interplay of charge noise and coupling to phonons in adiabatic electron transfer between quantum dots
Krzywda & Cywiński, Phys. Rev. B **104**, 075439 (2021)

Pomimo tego, że ww. artykuły zostały ostatnio opublikowane, były one do tej pory cytowane około dwadzieścia razy wg Google Scholar. Wspomniana liczba nie pozostawia wątpliwości, że oryginalne wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej dobrze wpisują się w tematykę współczesnych badań.

W kwestii oceny dorobku naukowego mgr. Krzywdy warto podkreślić, że poza ww. pracami jest on również współautorem jednego artykułu przeglądowego i pięciu prac prezentujących oryginalne wyniki (cztery z nich zostały już opublikowane w czołowych czasopismach: Physical Review A, New Journal of Physics, Scientific Reports). Wszystkie prace mgr. Krzywdy były do tej pory cytowane około 100 razy wg bazy Web of Science, co jest imponującym osiągnięciem. Bardziej istotne jest jednak to, że dorobek naukowy mgr. Krzywdy jasno pokazuje jego rozległe doświadczenie w pracy naukowej. Tytułem podsumowania stwierdzam, że mgr. Krzywda posiada wyróżniający dorobek naukowy na obecnym etapie kariery akademickiej. Poniżej pokrótce omówię treść jego rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 1 przedstawiona jest pogładowa dyskusja zagadnień omawianych w dalszej części rozprawy. Jest tam jasno określony cel badań oraz aktualny stan prac eksperymentalnych. Przedstawione rozważania w interesujący sposób wprowadzają czytelnika

w dziedzinę eksplorowaną w rozprawie bez „zasypywania” go dużą ilością szczegółów technicznych.

W rozdziałach 2 do 5 przedstawiony jest techniczny wstęp do fizyki omawianych układów. Nacisk w tych rozważaniach został położony na wyprowadzenie wzorów przydatnych podczas dyskusji oryginalnych wyników autora. Całość jest opisana na kilkudziesięciu stronach, co zapewne ilustruje złożoność badanych układów. W rozdziale 2 wprowadzone są pojęcia potrzebne do opisu dwupoziomowego układu sprzężonego ze środowiskiem. W rozdziałach 3 i 4 omawiane są wzory pozwalające na opis ewolucji dwupoziomowego układu w obecności jego tzw. poprzecznego i podłużnego sprzężenia ze środowiskiem. Formalizm związany z równaniem Master jest tam systematycznie omówiony. Ponadto w rozdziale 4 dyskutowany jest opis układu dwupoziomowego poddanego działaniu klasycznego szumu, który modyfikuje jego Hamiltonian. To z kolei prowadzi do formalnej charakteryzacji szumu wykorzystywanego podczas oryginalnych badań mgr. Krzywdy. W rozdziale 5 omawiane są wyniki dotyczące dynamicznych przejść typu Landau-Zenera rozpatrywanego modelu dwupoziomowego, podczas których Hamiltonian układu jawnie zależy od czasu. W pierwszej linii rozważana jest izolowana wersja tego paradygmatycznego układu, gdzie poza ścisłym wynikiem dyskutowany jest wpływ klasycznego szumu na ewolucję oraz przybliżenie adiabatyczno-impulsowe. Następnie wyprowadzane jest adiabatyczne równanie Master. Na koniec chciałbym nadmienić, że nie rozumiem po co autor w przybliżony sposób analizuje wolne przejścia Landaua-Zenera, czyli wyprowadza wzór (5.25) i porównuje go do ścisłego wyniku Landaua-Zenera na rysunku 5.2. Moje wątpliwości wynikają stąd, że wzór (5.25) w granicy wolnych przejść nie odtwarza ścisłego wyniku Landaua-Zenera.

Rozdział 6 poświęcony jest prezentacji podstawowych aspektów fizycznych dotyczących półprzewodnikowych kropek kwantowych w krzemie i arsenku galu. Po pierwsze, dyskutowany jest teoretyczny opis kropek kwantowych i prosty model charakteryzujący zachowanie elektronu uwięzionego w nich. Po drugie, przedstawiona jest szeroka dyskusja własności takich układów bazująca na wynikach uzyskanych eksperymentalnie. Obydwa tematy są w mojej ocenie interesująco przedstawione. Zastanawia mnie jednak po co wprowadzany jest jednowymiarowy opis funkcji falowych we wzorach (6.11) i (6.12). Jakie jest jego uzasadnienie? W rozdziale 7 dyskutowane jest sprzężenie między elektronem w kropce kwantowej a środowiskiem go otaczającym. W szczególności autor wiele uwagi ponownie poświęcił charakteryzacji szumu, czyli kontynuowane są rozważania z rozdziału 4. Tym razem jednak nacisk został położony na dyskusję eksperymentalnych uwarunkowań rozpatrywanego problemu. W rozdziale 8 przedstawione są rozważania dotyczące transportu (sprzężonego ze środowiskiem) elektronu z jednej kropki kwantowej do drugiej. W pierwszej linii środowisko jest modelowane przez klasyczny szum. Prowadzi to do dyskusji prawdopodobieństwa transferu elektronu, które niemonotonicznie zależy od tempa ewolucji. Przedstawiony w rozprawie analityczny opis tego interesującego efektu został numerycznie zweryfikowany przez mgr. Krzywdę dwoma różnymi metodami. W dalszej części rozdziału 8 przedstawiona jest analiza ww. zagadnienia w układach niskotemperaturowych, gdzie klasyczny szum nie modeluje poprawnie wpływu środowiska na elektron w kropce kwantowej. Uzyskane wyniki są analizowane w kontekście kropek kwantowych w krzemie i arsenku galu. W tym drugim przypadku prawdopodobieństwo transferu elektronu między kropkami okazuje się być monotoniczne w szerokim zakresie wartości parametru opisującego tempo ewolucji.

W rozdziale 9 dyskutowane są podstawowe efekty wynikające z tego, że spuląpkowany w kropce kwantowej elektron posiada niezerowy spin. W szczególności analizowane jest sprzężenie spinowo-orbitalne oraz sprzężenie ze spinami jądrowymi atomów, z których

zbudowany jest półprzewodnik. Ponownie ogólne rozważania są zilustrowane w układach zbudowanych na bazie krzemu i arsenku galu. W rozdziale 10 przedstawiona jest dyskusja formalizmu, który może być użyty do opisu transportu elektronu między kropkami kwantowymi z uwzględnieniem sprzężenia spinowo-orbitalnego. Uogólniane są tam wcześniej dyskutowane równania opisujące dynamikę zarówno izolowanego, jak i sprzężonego ze środowiskiem elektronu. W rozdziale 11 rozpatrywany jest transport elektronu, przygotowanego w określonym stanie spinowym, między dwoma kropkami kwantowymi. Autor koncentruje się na określeniu wydajności tego procesu. W szczególności ta wielkość jest dyskutowana, gdy transport odbywa się bez sprzężenia elektronu ze środowiskiem oraz w obecności kwazistatycznego szumu. Z fizycznego punktu widzenia interesujące jest to, że podczas jednej ewolucji analizowany układ może być przeprowadzony przez dwa antyskrzyżowania, co prowadzi do wystąpienia efektów interferencyjnych. Z „technicznego” punktu widzenia interesujące są analityczne wyniki autora bazujące na przybliżeniu adiabaticzno-impulsowym, których dokładność mogłaby być w mojej ocenie lepiej omówiona. Rozdział kończy dyskusja symulacji numerycznych przeprowadzonych dla konkretnych materiałów półprzewodnikowych. W rozdziale 12 ponownie analizowany jest transport elektronu między dwoma kropkami kwantowymi. Tym razem jednak elektron jest początkowo przygotowany w superpozycji dwóch stanów spinowych, co jest interesujące w kontekście przetwarzania informacji kwantowej. Celem dyskusji jest ustalenie w jakim zakresie tracona jest koherencja tak stworzonego „spinowego” kubitu na skutek jego transportu. Głównym jej wynikiem jest analiza utraty koherencji w układach na bazie krzemu i arsenku galu. Jest ona oparta na symulacjach numerycznych mgr. Krzywdy, które są porównywane do jego analitycznych wyników.

W rozdziale 13 przedstawione jest kompleksowe podsumowanie rozprawy doktorskiej, które jest zajmująco napisane. Znajduje się tam również dyskusja wyników przedstawionych w manuskrypcie, którego współautorem jest mgr. Krzywda (arXiv:2202.11793 w którym analizowany jest „długodystansowy” transport „spinowego” kubitu zrealizowanego przy pomocy elektronu). W załączniku umieszczonym na końcu rozprawy omawiane są szczegóły techniczne dotyczące symulacji numerycznych.

Poniżej przedstawię ogólne uwagi na temat rozprawy doktorskiej. Mianowicie składa się ona z około 180 stron, zawiera 200 odnośników do prac naukowych i niezliczoną ilość przypisów objaśniających różne kwestie. Biorąc pod uwagę, że jej celem jest omówienie oraz niezbyt obszerne uogólnienie wyników przedstawionych w dwóch ww. pracach, jej rozmiar jest dla mnie zaskakujący. Na pewno ilustruje on zaangażowanie autora w analizę dyskutowanych problemów. Jednakże prowokuje on też pytanie, czy przypadkiem bardziej treściwa dyskusja nie byłaby lepszą opcją. Tego typu refleksja bierze się po części z tego, że w omawianej rozprawie nie brakuje różnych drobnych niedociągnięć, których ilość zapewne można byłoby zmniejszyć kładąc większy nacisk na zwięzłą prezentację wyników. Poniżej pozwolę sobie wymienić kilka niedoróbek, aby zilustrować powyższą uwagę

- we wzorze (2.3) powinien być stan $|\uparrow\rangle$ zamiast $|1\rangle$,
- we wzorze (3.20) powinno być $F(\omega - \Omega)$ zamiast $F(\Omega - \omega)$,
- w przypisie 11 na stronie 26 powinno być $f(x)/x$ zamiast $f(x)$,
- we wzorze (5.8) powinno być a^- zamiast a^+ ,
- w przypisie 5 na stronie 43 dwa różne stany są oznaczone przez ten sam symbol,

- w wielu całkach gubiona jest informacja o tym, po jakiej zmiennej wykonywane jest całkowanie (np. między wzorem (5.26) a wzorem (5.28) cztery razy został pominięty symbol $d\tau$),
- opis pod rysunkiem 5.2: powinno być $t_c^2 \gg v$ zamiast $t_c^2 \gg 1$ a przypisanie kolorów do krzywych przedstawiających wzory (5.21) i (5.25) jest błędne,
- we wzorze (6.2) brakuje modułu,
- wyrażenia przyrównane do siebie we wzorze (10.33) nie zgadzają się ze sobą dla zespolonego współczynnika tunelowania t_{ff} .

Ponieważ tego typu braki nie przeszkadzają w zrozumieniu tekstu, nie wpływają one na moją merytoryczną ocenę rozprawy.

Tytułem uwag końcowych chciałbym podkreślić, że omawiana rozprawa jest w mojej ocenie wartościową lekturą na temat fizyki półprzewodnikowych kropek kwantowych, a uzyskane przez mgr. Krzywdę rezultaty są interesujące i potencjalnie przydatne w kontekście eksperymentalnym. Warto dodać, że poza dyskusją „teoretycznych” wyników, w rozprawie przedstawione są rozliczne uwagi na temat rzeczywistych własności fizycznych badanych układów. Zakres dyskusji eksperymentalnych uwarunkowań analizowanego problemu jest moim zdaniem zdecydowanie ponadprzeciętny biorąc pod uwagę, że rozprawa została napisana przez teoretyka.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska magistra Jana Krzywdy spełnia wszystkie kryteria wymienione w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2016 r. poz. 882). Z tego powodu wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów jej obrony.

Bogdan Dawsko