



Prof. dr hab. Józef Barnaś
Wydział Fizyki,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

Recenzja pracy doktorskiej
mgra Jana Krzywdy
(Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie)
pt. *Adiabatic evolution of driven quantum systems in the presence of*
dissipation and noise possessing spatial and temporal correlations

Rozprawa doktorska mgra Jana Krzywdy pt. *'Adiabatic evolution of driven quantum systems in the presence of dissipation and noise possessing spatial and temporal correlations'* przygotowana została w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk pod kierunkiem dra hab. Łukasza Cywińskiego, profesora IF PAN. Rozprawa napisana jest w języku angielskim i składa się z obszernego wstępu w formie rozdziału oraz trzech części zawierających główne elementy i wyniki uzyskane w pracy doktorskiej (części I, II, i III). Części te składają się odpowiednio z czterech, trzech i czterech rozdziałów. Ponadto, rozprawa zawiera jeszcze część IV w formie jednego rozdziału, który zawiera podsumowanie i dyskusję uzyskanych wyników.

Tematyka pracy doktorskiej dotyczy ważnych i aktualnych problemów leżących na pograniczu informatyki kwantowej, fizyki układów otwartych, oraz fizyki

półprzewodnikowych nanostruktur. W ogólności, tematyka rozprawy dotyczy możliwości wykorzystania półprzewodnikowych kropek kwantowych do konstrukcji kubitów i ich wykorzystania w obliczeniach kwantowych. Rolę kubitu może pełnić dowolny dwustanowy układ kwantowy, jednakże aby kubit mógł mieć praktyczne znaczenie, muszą istnieć możliwości jego kontroli, w szczególności możliwości koherentnej komunikacji między kubitami. Jak Autor pokazuje w swojej rozprawie doktorskiej, takie możliwości, między innymi, daje spin elektronu zlokalizowanego w kropce kwantowej. W pracy doktorskiej Autor koncentruje się na spinie (pełniącym rolę kubitu) elektronu zlokalizowanego na kropce kwantowej w orbitalnym układzie dwustanowym (najwyższy poziom obsadzony i najniższy pusty). Głównym problemem przy implementacji kubitów opartych na kropkach kwantowych są procesy dekoherencji. Wynika to z faktu, że kubit nie jest obiektem izolowanym a jest elementem układu zbudowanego z materii skondensowanej, w którym kubit oddziałuje z całym statycznym i dynamicznym otoczeniem (np. jądra atomowe, drgania sieci krystalicznej, itd). Oddziaływanie to prowadzi do utraty koherencji funkcji falowej kubitu (tzw. dekoherencji), jak również do procesów dyssypacyjnych (relaksacji). Poza tym, w operacjach logicznych na kubitach wymagana jest koherentna komunikacja między kubitami. Procesy dekoherencji niszczą taką komunikację, redukując możliwości obliczeniowe. To wszystko ogranicza możliwości praktycznego wykorzystania tego typu kubitów. Autor pracy doktorskiej jako główny cel postawił sobie zbadanie tych wszystkich ograniczeń dla przypadku najbardziej obiecujących półprzewodnikowych kropek kwantowych, tj. kropek na bazie arsenku galu (GaAs) i krzemu (Si), oraz wyznaczenie najbardziej optymalnego zakresu kontrolowalnych parametrów.

Praca doktorska mgra Jana Krzywdy jest pracą teoretyczną, wspartą numerycznymi symulacjami. W pierwszej kolejności Autor rozważa dwustanowy układ orbitalny zlokalizowany na kropce kwantowej, pomijając przy tym spin elektronu. Dopiero po zbadaniu procesów dyssypacji i dekoherencji w orbitalnym układzie dwustanowym wprowadza do rozważań spin elektronu, czyli kubit spinowy. Część I rozprawy stanowi, w pewnym sensie, wprowadzenie do kolejnych dwóch części. Pierwsze trzy rozdziały (2-4) tej części zawierają opis kwantowej dynamiki otwartego układu dwustanowego na kropce kwantowej i w dużym stopniu oparte są na literaturze poświęconej adiabaticznej i nieadiabaticznej dynamice układów kwantowych z uwzględnieniem procesów dyssypacji i dekoherencji. I tak w rozdziale 2 Autor wprowadza podstawowe elementy teorii dynamiki dwustanowego układu kwantowego bez procesów dyssypacji i dekoherencji jak również w ich obecności. Przy braku

oddziaływania z otoczeniem ewolucja takiego układu opisana jest prostą transformacją unitarną. W ogólnym przypadku Autor wprowadza zredukowaną macierz gęstości i definiuje podłużne i poprzeczne (diagonalne i niediagonalne) składowe Hamiltonianu opisującego sprzężenie układu dwustanowego z otoczeniem. Fluktuacje czasowe i przestrzenne tego sprzężenia (w wyniku fluktuacji zachodzących w otoczeniu) prowadzą do procesów relaksacyjnych i dekoherencji w układzie. W rozdziale 3 Autor rozprawy pokazuje, że sprzężenie poprzeczne między układem dwustanowym i otoczeniem prowadzi do procesów dyssypatywnych (relaksacji) w układzie i jednocześnie powoduje dekoherencję. W opisie tym Autor wykorzystuje podejście oparte na równaniu ‘master’ w formie Lindblada. Efektem końcowym jest powiązanie gęstości spektralnych fluktuacji w otoczeniu z parametrami opisującymi szybkość relaksacji i dekoherencji. Z kolei w rozdziale 4 Autor prezentuje opis wpływu składowej podłużnej sprzężenia układu z otoczeniem na procesy dekoherencji. Podobnie jak w rozdziale 3, do wyznaczenia szybkości dekoherencji wykorzystuje równanie typu ‘master’. Wprowadza również uproszczony opis dynamiki kwantowych układów otwartych, w którym złożoną dynamikę otoczenia zastępuje się odpowiednim szumem klasycznym, który stochastycznie modyfikuje unitarną ewolucję układu. Rozważa przy tym kilka typów szumów, takich jak szum gaussowski, szum typu $1/f$, oraz szum quasi-statyczny. W szczególności ten ostatni jest wykorzystywany w dalszych rozdziałach.

Ostatni rozdział (5) części I dotyczy układu dwóch kropek kwantowych, w którym pod wpływem odpowiednio modulowanych napięć bramkujących zmienia się względne położenie poziomów energetycznych kropek i zachodzi kontrolowany transfer elektronu z jednej kropki do drugiej. Część ta zawiera oryginalne wyniki uzyskane przez Autora rozprawy. Podobnie jak dla pojedynczych kropek kwantowych, Autor wykorzystuje metody kwantowej dynamiki zarówno w przypadku unitarnym (bez oddziaływania z otoczeniem) jak i w przypadku nieunitarnym, kiedy sprzężenie z otoczeniem prowadzi do dyssypacji i dekoherencji w trakcie kontrolowanego transferu elektronu między kropkami. Autor pracy pokazuje, że przy odpowiednio małej szybkości zmiany położenia poziomów obydwu kropek, układ adiabaticznie przechodzi ze stanu podstawowego z elektronem w jednej kropce do stanu podstawowego z elektronem w drugiej kropce. Przy większej szybkości zmiany położenia poziomów występują pewne odstępstwa od adiabaticzności. Procesy adiabaticznego transferu elektronu Autor opisuje w ramach modelu Landaua-Zenera. Z kolei do opisu procesów dyssypacyjnych i dekoherencji Autor rozszerzył równanie ‘master’ na przypadek układu dwustanowego z wymuszonym transferem elektronu między kropkami. W końcowej

części rozdziału 5 wykorzystał adiabatyczne równanie ‘master’ do analizy wpływu sprzężenia z otoczeniem (zarówno poprzecznej jak i podłużnej jego składowej) na procesy dyssypacji i dekoherencji. Rezultaty uzyskane z adiabatycznego równania ‘master’ zostały porównane z wynikami uzyskanymi z numerycznego uśrednienia równania Schrodingera w ramach opisu wykorzystującego klasyczny szum i zobrazowane graficznie w Dodatku A. Autor uzyskał bardzo dobrą zgodność wyników obydwu metod.

Części II i III stanowią zasadnicze części rozprawy doktorskiej i zawierają oryginalny wkład Autora. Ogólny formalizm i metody opisane w części I zastosowane są w nich do realnych układów dwustanowych opartych na pojedynczych i podwójnych półprzewodnikowych kropkach kwantowych. W szczególności, Autor rozważa kropki kwantowe na bazie arsenku galu (GaAs), krzemu (Si), oraz struktur Si/SiGe. Funkcje falowe oraz energie orbitalnych stanów elektronowych definiujących układ dwustanowy są wyznaczone w ramach odpowiednich przybliżeń. Dla wybranych układów Autor analizuje nieunitarną dynamikę wynikającą ze sprzężenia z otoczeniem, w tym procesy relaksacji i dekoherencji. Rozważa, między innymi, relaksację w układzie dwóch stanów orbitalnych w wyniku oddziaływania z drganiami sieci krystalicznej (fononami). Uzyskane wyniki zobrazowane zostały odpowiednimi wykresami pokazującymi szybkość relaksacji w funkcji szczeliny energetycznej między poziomami zarówno dla pojedynczych jak i podwójnych kropek kwantowych, rozdział 7. W rozdziale tym Autor rozważył również procesy relaksacji i dekoherencji w podwójnych kropkach kwantowych, indukowanych szumem pola elektrycznego w czasie kontrolowanego transferu ładunku z jednej kropki do drugiej. Ten problem jest szczególnie istotny z punktu widzenia koherentnej komunikacji między dwoma kubitami. W ostatnim rozdziale części II Autor rozważa transfer ładunku w realistycznych kropkach na bazie arsenku galu i krzemu. Uwzględnia przy tym strukturę wielopoziomową włączając spinowy i dolinowy stopień swobody. Jednakże redukuje liczbę poziomów do dwóch efektywnych poziomów reprezentujących orbitalny układ dwustanowy. Dla wybranych przykładów kropek kwantowych analizuje przede wszystkim transfer elektronu z jednej kropki do drugiej w zależności od szybkości zmian położenia poziomów kropek. W szczególności, wyznacza prawdopodobieństwo przeniesienia ładunku do stanu podstawowego drugiej kropki (adiabatyczny transfer) a tym samym również prawdopodobieństwo przeniesienia ładunku do stanu wzbudzonego drugiej kropki (tzw. błąd transferu ładunku). Zależności te są przedstawione graficznie w funkcji szybkości modulacji położenia poziomów

kropek kwantowych. Uwzględnione są przy tym procesy dekoherencji i relaksacji generowane przez szum klasyczny jak i kwantowy.

Część III poświęcona jest kubitowi spinowemu, czyli sytuacji w której spin elektronu uwięzionego w kropce kwantowej sam pełni rolę układu dwustanowego i jest nośnikiem kwantowej informacji. Rozszerza to wcześniejsze rozważania dotyczące układu dwustanowego złożonego z dwóch orbitalnych stanów o spin elektronu zlokalizowanego w takim układzie, przy czym informacja kwantowa zapisana jest w spinowej funkcji falowej. W pierwszym rozdziale tej części (rozdział 9) Autor omawia sposób kontroli stanu spinu w pojedynczej kropce przy pomocy pola magnetycznego i oddziaływań spinowo-orbitalnych. Analizuje również nieunitarną ewolucję kubitów w wyniku sprzężenia z jądrowymi momentami magnetycznymi oraz z fluktuacjami pola elektrycznego. Wyznacza przy tym czas rozfazowania funkcji falowej oraz czas relaksacji spinowej. Przypadek podwójnej kropki kwantowej rozważony jest w kolejnym rozdziale. Ten przypadek jest istotny z praktycznego punktu widzenia, gdyż stwarza on możliwość transportu kubitów spinowych z jednej kropki do drugiej, zapewniając koherentną komunikację między kubitami. Na początku Autor analizuje transfer w ramach modelu Landaua–Zenera w przypadku układu zamkniętego (bez wpływu otoczenia) ale z uwzględnieniem oddziaływań spinowo-orbitalnych, oraz wyprowadza efektywny Hamiltonian opisujący adiabatyczny transfer kubitów spinowych sprzężonego z orbitalnym układem dwustanowym. W tej tzw. bazie adiabatycznej włącza następnie oddziaływanie z otoczeniem i wyznacza w kolejnych rozdziałach podstawowe parametry opisujące transfer spinowego kubitów między kropkami w wyniku modulacji położenia poziomów orbitalnych, między innymi prawdopodobieństwo transferu spinu w stanie wzbudzonym oraz czas koherencji spinowej. Wyniki analityczne obrazuje wynikami numerycznymi dla realnych kropek półprzewodnikowych rozpatrywanych w rozprawie.

Praca napisana jest poprawnym językiem. Zauważyłem pewną ilość literówek i innych niedociągnięć redakcyjnych, ale nie mają one żadnego wpływu na pozytywną ocenę pracy więc nie będę ich wymieniał. Wyniki zawarte w pracy doktorskiej stanowią istotny i ważny wkład do aktualnych badań dotyczących możliwości konstrukcji kubitów na bazie półprzewodnikowych kropek kwantowych i ich wykorzystania w kwantowych obliczeniach. Ale przede wszystkim wyniki te stanowią istotny wkład do opisu zjawisk fizycznych takich jak kwantowa ewolucja układów otwartych zbudowanych z kropek kwantowych oraz procesy dekoherencji i relaksacji (dyssypacji energii) wynikające z oddziaływania z otoczeniem.

Dotyczy to również układów, w których zachodzi transfer elektronu (oraz spinowego kubit) między kropkami kwantowymi w wyniku zewnętrznej modulacji poziomów energetycznych kropek. Autor uzyskał szereg istotnych wyników, nie tylko analitycznych ale i numerycznych, co pozwoliło mu oszacować niektóre wielkości fizyczne ważne z punktu widzenia koherencji kwantowej i ewentualnego wykorzystania tych układów do konstrukcji półprzewodnikowych procesorów kwantowych. Część wyników została już opublikowana w uznanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, mam tutaj na myśli w szczególności publikacje 1 i 2 w spisie literatury. Całkowity dorobek publikacyjny Autora rozprawy doktorskiej to współautorstwo 8-miu prac, z czego jedna jest w formie preprintu a pozostałe ukazały się w uznanych czasopismach naukowych (pozycje 1-8 w spisie literatury). Dwie prace opublikowane zostały w Physical Review A, dwie w Physical Review B, oraz po jednej w New Journal of Physics, Journal of Physics: Condensed Matter i Scientific Reports. W sześciu publikacjach Autor pracy doktorskiej jest na pierwszej pozycji, co sugeruje jego dominujący wkład do tych publikacji.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że Autor rozprawy doktorskiej wykazał się bardzo dobrą znajomością zagadnień związanych z tematyką rozprawy, w tym znajomością odpowiednich metod teoretycznych służących do opisu układów otwartych i procesów adiabatycznych. Tematyka rozprawy jest ważna w kontekście aktualnych prac dotyczących możliwości wykorzystania półprzewodnikowych kropek kwantowych w obliczeniach kwantowych. Uzyskane wyniki stanowią również istotny przyczynek do fizyki układów otwartych oraz procesów adiabatycznych i quasi-adiabatycznych). Praca zawiera wiele nowych rezultatów i według mojej opinii z nadmiarem spełnia wymogi i oczekiwania. Wyniki te częściowo zostały już opublikowane w uznanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Biorąc to wszystko pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Jana Krzywdy spełnia wymogi określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *‘Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce’* i wnioskuję o dopuszczenie Autora rozprawy do dalszych etapów postępowania. Ponadto, biorąc pod uwagę ilość oraz wartość i znacznie wyników uzyskanych w pracy uważam, że praca doktorska mgra Jana Krzywdy zasługuje na wyróżnienie.

Poznań, dnia 26 lipca 2022r.

Józef Barnas

