



Mens agitat molem

Zakład Teorii Fazy Skondensowanej UMCS
Condensed Matter Theory Department

ul. Radziszewskiego 10
20 031 Lublin, POLAND

<http://kft.umcs.lublin.pl/ztfs> fax: (+48 (0)81) 537 61 90

Prof. dr hab. Karol Izidor Wysokiński tel.(081)5376236 e.mail: karol@tytan.umcs.lublin.pl

Lublin 12 lipca 2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Jan A. Krzywda

„Adiabatic evolution of driven quantum systems in the presence of dissipation and noise possessing spatial and temporal correlations”

Recenzowana praca doktorska została wykonana w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie pod kierunkiem dr hab. Łukasza Cywińskiego, profesora IF PAN. Praca liczy 174 strony tekstu i zawiera 200 pozycji literatury. Spis literatury obejmuje aż 8 publikacji autora rozprawy wykonanych w latach 2016 – 2022 i już cytowanych blisko 100 razy. Trzy prace są bezpośrednio związane z rozprawą, a pozostałe dotyczą nieco innych, choć pokrewnych zagadnień.

Tematyka badawcza rozprawy to kwantowe przetwarzanie informacji w komputerach kwantowych opartych o półprzewodnikowe kropki kwantowe. Aby takie przetwarzanie informacji było możliwe odpowiednio przygotowany stan kwantowy musi przez pewien czas pozostawać niezmienny mimo jego nieuniknionego kontaktu z otoczeniem. Kontakt z otoczeniem sprawia, że stan kwantowy układu w niekontrolowany sposób zmienia się w czasie w wyniku różnorodnych zaburzeń prowadzących do zaniku koherencji kwantowej i ewentualnego przeskoku układu do innych niż początkowy stanów kwantowych. Wykonanie obliczeń przez komputer kwantowy wymaga transferu stanu kwantowego pomiędzy różnymi qubitami (kropkami kwantowymi). Idealnie byłoby, aby ewolucja układu, mimo koniecznych zmian parametrów, była adiabatyczna (czyli układ cały czas pozostawał w konkretnym stanie) i faza stanu kwantowego pozostawała niezmienna. Niestety niemożliwe do wyeliminowania oddziaływania układu kwantowego z otoczeniem temu przeszkadzają. Autor rozważa elektron ze spinem i analizuje warunki jego adiabatycznej ewolucji, gdy zmieniając odpowiednio potencjały sąsiadujących kropek kwantowych zmuszamy elektron/spin do przemieszczania się w przestrzeni. Bada przy tym dwie proponowane metody transferu kwantowego nośnika informacji, przy czym ta będąca kwantową analogią taśmy transmisyjnej wydaje się lepsza.

Praca doktorska powstała w oparciu o dwa opublikowane, wraz z promotorem, artykuły naukowe. Jest ona bardzo ‘nowatorska’ i nietypowa pod względem edytorskim. Oprócz prawie standardowego wstępu składa się z czterech części, z których każda składa się z kilku

rozdziałów. Rozdziały dzielą się na mniejsze numerowane sekcje, które z kolei podzielone są na dziesiątki zatytułowanych niewielkich, czasami jedno-akapitowych fragmentów. Sporo rysunków oraz (zbyt) liczne przypisy zamieszczone są na marginesach. Wbrew pozorom wszystko to nie zawsze ułatwia, a często utrudnia czytanie pracy i śledzenie myśli autora. Każda pozycja spisu literatury zawiera informacje o stronie/stronach gdzie była cytowana. Gdyby pracę tę potraktować jako monografię, to brakuje skorowidza, spisu rysunków i tablic oraz zestawu stosowanych akronimów. Ten ostatni pewnie i tak by się przydał.

Językiem rozprawy jest język angielski. Zwykle w takich przypadkach nie komentuję poprawności języka, gdyż nie jestem anglistą. W tym przypadku też powstrzymam się od poważniejszych uwag stwierdzając jedynie, że liczba zdań, w których liczba mnoga rzeczownika i pojedyncza czasownika są błędnie użyte jest zbyt duża jak na dokument tej rangi i ambicje autora. Jako przykłady niech służą: „fluctuations of parameters affects”, “modifications of [...] corresponds” -str. 47, “faster sweeps results” – str. 50, “these crossings involves” – str. 117. itd. Spora jest też liczba literówek, brakujących lub błędnych wyrazów, niedokończonych (i niezrozumiałych) zdań. Ta uwaga jest niezależna od języka. Świadczy o braku staranności podczas korekty tekstu. Nawet nazwisko promotora w pozycji [2] bibliografii zawiera literówkę. Nazwisko Lindblad jest często błędnie pisane jako Linblad (w tym m.in. w spisie treści, w tekście na str. 14, w tytule paragrafu na str. 54 i wielu innych miejscach). Inne przykłady literówek to: “hates” zamiast “gates” na str.9, „However presence such a dipole” - str. 5, „ground state thought the evolution” – str. 42, “for the an undoped” – str. 62, “for with the relaxation and excitation rates are equal” -str. 89, itd.). Znalazłem też kilka błędnych odniesień do wzorów lub rysunków. Odnośnik do wzoru (5.71) (str.56) jest niewłaściwy. Na str. 79 autor błędnie odwołuje się do rysunków (7.1a) i (7.1b). Powtórzenia informacji w kolejnych akapitach czasami skutkują oczywistymi pomyłkami jak ta w części 6.3 pracy. Na str. 68 gdzie jest mowa o kropkach kwantowych GaAs czytamy (cytuję zgodnie z oryginałem): „Due to **small** effective mass, the size of *GaAs* devices are relatively large [...]” natomiast pod koniec kolejnej strony (str. 69) jest zdanie zaprzeczające „[...] which we will refer to as *GaAs*. Due to much **larger** effective mass the quantum dots are expected to be larger [...]”

Praca doktorska rozpoczyna się rozdziałem wstępnym, w którym autor pobieżnie zapoznaje czytelnika ze spinowymi qubitami i bardziej złożonymi elementami komputera kwantowego o architekturze bazującej na układach półprzewodnikowych kropek kwantowych. Część I pracy zatytułowana „Driven open two – level system” składająca się z 4 rozdziałów zapoznaje czytelnika z kwantową teorią układów otwartych i poddanych działaniu zewnętrznych, zależnych od czasu pól. Część druga pracy „Charge transfer of spin qubit” (rozdziały 6-8) zawiera opis realistycznej podwójnej kropki kwantowej i analizuje zjawisko przeniesienia ładunku z lewej na prawą kropkę układu. Część ta podobnie jak i kolejna szczegółowo omawia i uzupełnia (o ile zdołałem to wychwycić) wyniki zamieszczone w publikacjach [1] i [2]. W części II główną uwagę skupiono na sprzężeniu ładunku elektronu z zewnętrznymi zaburzeniami i zbadaniem ich wpływu na dynamikę elektronu. Część III zatytułowana „Spin degree of freedom during charge transfer” to badanie spinowych stopni swobody elektronu na kropce jako nośników informacji i badanie wpływu fluktuujących pól spinów jądrowych i pól elektrycznych. Te ostatnie wpływają na spin poprzez sprzężenie spin-orbita. Ostatnia IV część pracy „Outlook and discussion” składa się z jednego rozdziału i stanowi podsumowanie naj-

ważniejszych wyników oraz ich dyskusję w kontekście możliwości praktycznej realizacji komputera kwantowego składającego się z setek, jeśli nie tysięcy qubitów.

Stosowana w pracy numeryczna technika obliczeniowa to równanie ewolucji dla macierzy gęstości, nazywana przez doktoranta ‘metodą uśrednionego równania mistrza’ – ‘average Master equation method’. Autor rozwiązuje zależne od czasu równanie metodą Runge-Kutta czwartego rzędu dla zbioru N losowych zestawów parametrów. Uzyskane wyniki są uśredniane po wszystkich realizacjach parametrów. Wyniki zadziwiająco dobrze zgadzają się z uproszczonymi obliczeniami analitycznymi w adekwatnych zakresach parametrów. Często wyniki obliczeń są przedstawiane w zależności od szybkości zmian przestrojenia kropki, co wymusza ruch nośnika informacji z jednej kropki do drugiej. Doktorant przekonująco zestawia wyniki obliczeń numerycznych z odpowiednimi oszacowaniami teoretycznymi.

Już w pierwszym rozdziale pracy autor sygnalizuje najważniejsze, jego zdaniem, wyniki doktoratu. Zgodnie z celem pracy, w streszczeniu sformułowanym zdaniem „*Celem pracy doktorskiej jest zrozumienie zagrożeń stojących na drodze do realizacji koherentnego transportu elektronu w komputerze kwantowym zbudowanym z półprzewodnikowych kropek kwantowych.*” wyniki te są związane z ilościową analizą błędów pojawiających się, gdy nośnik informacji kwantowej ma być przemieszczony pomiędzy sąsiadującymi kropkami. Wśród najważniejszych autor wymienia m.in. niemonotoniczną zależność błędów od szybkości zmian potencjałów kropek kwantowych, potrzebę silnego sprzężenia pomiędzy sąsiadującymi kropkami kwantowymi i inne szczegółowe rezultaty. Należy jednak wyraźnie stwierdzić, że ilościowa analiza układów złożonych z kilku lub kilkunastu kropek kwantowych jest zagadnieniem skomplikowanym, nawet jeśli dokonuje się upraszczających założeń. Nawet pozornie drobne wyniki szczegółowe mogą mieć istotne znaczenie dla funkcjonowania komputera. Możliwe zaburzenia rozważane w pracy związane są z niekontrolowanymi szumami typu $1/f$, oddziaływaniami ze spinami jądrowymi, które wydaje się mieć spore znaczenie nawet w przypadku izotopowo oczyszczonego krzemu, drganiem sieci, itp. Autor porównuje kropki kwantowe krzemowe z tymi na bazie struktur z arsenku galu (GaAs/GaAlGa) i przekonuje czytelnika, że bardziej obiecujące są struktury krzemowe. To akurat dobra informacja biorąc pod rozwagę znakomicie rozwiniętą technologię krzemową. Niedawne doniesienia (Zwerver i inni „Qubits made by advanced semiconductor manufacturing”, *Nature Electronics* **5**, 184 (2022)) faktycznie sugerują możliwości uzyskiwania dużej liczby kropek kwantowych z dobrze kontrolowanym sprzężeniem tunelowym pomiędzy nimi i z innymi parametrami spełniającymi stawiane wymagania.

Trudno jest mi stwierdzić, który z wyników doktoratu jest najważniejszy. Wiele oszacowań jest ważnych i wydają się one dość realistyczne. Mimo to, po przeczytaniu pracy mam wrażenie, że jeszcze trzeba pokonać wiele problemów, aby urzeczywistnić scenariusz budowy działającego komputera na kropkach kwantowych. W doktoracie mgr. Jan A. Krzywda optymistycznie podchodzi do zagadnienia i taki też jest wydźwięk pracy [3] dyskutowanej w ostatniej części rozprawy. Rodzą się jednak różne pytania. Czy oszacowania błędów dla transferu informacji pomiędzy dwiema kropkami można prosto skalować na układy z kilkudziesięcioma kropkami? Co ze zjawiskami interferencji w przypadku większej liczby kropek? Jaka jest szansa na pojawienie się wtedy w widmie punktów specjalnych, czyli takich, w których stany przecinają się? Czy nowe technologie jak choćby ta użyta we wspomnianej wyżej pracy

pozwołą na dalsze ograniczenie szumów w układzie i zmniejszenie pojawiających się błędów?

Przygotowując pracę doktorską mgr Jan A. Krzywda zapoznał się z wieloma problemami praktycznych obliczeń kwantowych i wymaganiami, które muszą spełniać komputery kwantowe. Analiza zachowania ich najprostszych składowych jakimi są qubity wymagała od autora zaznajomienia się z zaawansowaną teorią otwartych układów kwantowych. Nauczył się jakościowo i ilościowo analizować otwarte układy kwantowe i zwracać baczność uwagę na różne zjawiska występujące w realnym świecie. Ta cenna wiedza będzie z pewnością owocowała w przyszłości. Mimo, że formalnie nie podlega to ocenie, chciałbym podkreślić, że doktorant był mocno zaangażowany w badania dotyczące innych pokrewnych problemów naukowych. Aż 5 spośród jego dotychczasowych ośmiu publikacji nie wchodzi w skład opinio- wanej rozprawy doktorskiej. Na podkreślenie zasługuje współautorstwo, licznie już cytowa- nego przeglądowego artykułu „Environmental noise spectroscopy with qubits subjected to dynamical decoupling” opublikowanego jako ‘Topical review’ w J. Phys.: Condensed Matter w 1917 roku. Część badań została wykonana w ramach grantów NCN.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymaga- nia ustawowe stawiane takim pracom. Wnoszę zatem aby mgr. Jan Krzywda został do- puszczony do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

