

**Dr hab. Michał Oszmaniec**

**Centrum Fizyki Teoretycznej PAN**

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Damiana Kwiatowskiego pt.**

**„Decoherence and entanglement decay of nitrogen-vacancy centers in diamond applied to spectroscopy of environment noise”**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Damiana Kwiatowskiego poświęcona jest badaniom kwantowej dekoherencji w układach centrów azot-dziura (ang. NV) w diamencie. Tematyka pracy wypisuje się w szerszy kontekst współczesnych badań w obszarze technologii kwantowych i informacji kwantowej. Do niedawna kwantowa informacja była dyscypliną głównie teoretyczną i oderwaną od konkretnych implementacji czy zastosowań. Jednak wraz z rozwojem technologii oraz postępowaniem doświadczalnym coraz bliższa wydaje się praktyczna implementacja wywodzących się z niej metod i algorytmów. Aby jednak ta optymistyczna wizja mogła być zrealizowana, należy najpierw lepiej poznać fizykę konkretnych układów, w których będzie się zapisywać i przetwarzać kwantową informację. Kluczowe jest tutaj precyzyjne zrozumienie szumu i dekoherencji, jako że to właśnie te procesy odpowiadają za zanik cech kwantowych przy skalowaniu układów kwantowych.

Omawiana praca stanowi przekrojową analizę dekoherencji, jakiej podlegają spinowe kubity realizowane w centrach NV w diamencie. Kubity te mają długi czas koherencji co, wraz z dostępnymi możliwościami manipulacji oraz odczytu powoduje, że rozpatruje się je w kontekście potencjalnych zastosowań w kwantowej metrologii czy komunikacji. Kubity w centrach NV oddziałują z efektywnym otoczeniem składającym się ze spinów jądrowych izotopu węgla  $^{13}\text{C}$ . Rozprawa zawiera rozważania teoretyczne i numeryczne, ale są one motywowane rzeczywistymi układami. Skupia się ona na badaniu jakie cechy samego otoczenia można wywnioskować z obserwacji zaniku koherencji w układzie jednego lub dwóch kubitów NV. Ponadto badane są również korelacje, takich jak splątanie czy występowanie tak zwanych widmowych struktur rozgłoszeniowych (ang. Spectrum-Broadcast-Structures), jakie mogą wystąpić między kubitami i otoczeniem w trakcie dekoherencji.

Kluczowymi metodami eksperymentalnymi, które Pan Kwiatowski proponuje użyć w celu uzyskania informacji na temat struktury otoczenia i korelacji między nim, a rozważanym układem są: mechanizm dynamicznego rozprzęgania (uogólnienie schematu echa spinowego) oraz manipulowanie polaryzacją spinów otoczenia, jak i początkowym stanem układów dwukubitowego. Od strony technicznej głównymi narzędziami są metoda rozwinięcia skorelowanych klastrów (ang. Cluster-Correlation Expansion), podstawy teorii procesów stochastycznych oraz analizy Furierowskiej.

Doktorant w swoich badaniach nie wyprowadza nowych technik pozwalających zrozumieć dekoherencję w rozważanym układzie, a raczej skupia się na wykorzystaniu dobrze ugruntowanych technik w nowym kontekście. Warto nadmienić również, że wyniki prezentowane w rozprawie zostały wcześniej w większości opublikowane w czterech artykułach w czasopiśmie z listy filadelfijskiej, z czego jeden ma charakter przeglądowy, a w dwóch pracach autor rozprawy jest pierwszym autorem. Ponadto, badania składające się na rozprawę były finansowane z grantów NCN promotora oraz, co ważne, z indywidualnego grantu doktoranckiego Etiuda. Świadczy to w mojej ocenie o pewnym stopniu samodzielności naukowej Pana Kwiatkowskiego.

Rozprawa doktorska ma dość nietypowy układ ponieważ składa się z aż czternastu rozdziałów. Mają one różną długość oraz charakter, który jest z początku trudny do odgadnięcia przez czytelnika. Jest to po części związane z nieco ekscentrycznym doбором tytułów poszczególnych sekcji czy rozdziałów (*Poking the word with a qubit*, *A polarized society*, czy *Reaching Nirvana*). Poza pierwszym i ostatnim rozdziałem, nie jest jasne czy treści zawarte w danej części zawierają wyniki oryginalnych badań, czy też mają charakter przeglądowy. Dopiero po szczegółowej lekturze tekstu oraz porównaniu jego fragmentów z publikacjami doktoranta, możliwe jest wskazanie części, które traktują o oryginalnych wynikach. Sytuację utrudnia do tego brak klarownego wstępu, w którym czytelnik byłby wprowadzony w strukturę pracy oraz główne wyniki w niej zaprezentowane.

Pierwsze siedem części pracy ma charakter wstępu teoretycznego i poświęcone jest kolejno: wprowadzeniu podstawowych pojęć z kwantowej informacji (rozdział 1), fizyce centrów NV (rozdziały 2 i 3), dekoherencji w tych układach (rozdział 4), zjawisku echa spinowego (rozdział 5), technice CCE, która pozwala uwzględniać korelacje otoczenia w opisie dekoherencji (rozdział 6), oraz zastosowaniu metody dynamicznego rozprzęgania do spektroskopii szumu otoczenia (rozdział 7). Druga część pracy zwiera głównie oryginalne wyniki dotyczące różnych aspektów dekoherencji w układach centrów NV w diamencie. W Rozdziale 8 analizuje się wpływ, jaki polaryzacja spinów z otoczenia kubitu NV wpływa na jego dekoherencję w trakcie procedury dynamicznego rozprzęgania. Rozdział 9 przedstawia protokół pozwalający na wykrycie w tym scenariuszu splątania między kubitem a otoczeniem. Następnie, w rozdziale 10 analizowane jest powstawanie tak zwanych widmowych struktur rozgłoszeniowych w otoczeniu w wyniku oddziaływania z centrum NV. Pozostała część pracy poświęcona jest dekoherencji układu dwóch oddziałujących kubitów w centrach NV. W rozdziale 11 opisane jest, jak narzędzia wprowadzone w rozdziałach 4-7 adaptują się do przypadku dwukubitowego. Następnie w rozdziałach 12 i 13 przeanalizowane odpowiednio jest jak dekoherują stany splątane i separowalne dwóch kubitów w przypadku, kiedy oddziałują one z otoczeniem spinów jądrowych.

Jak wynika z powyższej listy, zakres tematów poruszonych w pracy jest szeroki. Prowadząc swoje rozważania doktorant wykazuje się znajomością fizyki centrów NV w diamencie, podstawowych technik teorii dekoherencji oraz analizy stochastycznej. Wyniki uzyskane w rozprawie są w większości ciekawe i nowatorskie oraz wpisują się w badania prowadzone obecnie na świecie. W mojej ocenie najważniejsze z nich to

- I. Analiza wpływu polaryzacji otoczenia wywołanej przez dynamiczną polaryzację jądrową na dekoherencję pojedynczego kubitów poddanego procedurze dynamicznego rozprzęgania a w szczególności:
  - a. Zidentyfikowanie fazy funkcji dekoherencji, jako nietrywialnego i czysto kwantowego aspektu dekoherencji
  - b. Wykorzystanie fazy funkcji dekoherencji jako mierzalnej charakterystyki niegausowskiego charakteru otoczenia
- II. Analiza tworzenia się widmowych struktur rozgłoszeniowych w makroczęściach otoczenia oddziałującego z kubitami spinowymi w centrum NC. W szczególności, określenie skali czasu, na której pojawiają się takie struktury rozgłoszeniowe i porównanie jej ze skalą czasu dekoherencji. Problem ten ma kluczowe znaczenie dla przejścia klasyczno-kwantowego w rozważanych układach.
- III. Opisanie wpływu obecności drugiego kubitów spinowych z centrum NC na proces dekoherencji. Należy tu podkreślić istotną ważną obserwację, że dla specjalnie przygotowanych stanów splątanych pomiar echa spinowego umożliwia określenie, czy otoczenie działa na kubity są w istotny sposób skolorowane, czy też nie (patrz na przykład Rysunek 12.1). Ważna wydaje się również obserwacja z Rysunku 13.2, że obecność odpowiednio przygotowanego i bliskiego zlokalizowanego kubitów spinowych może w istotny sposób spowalniać dekoherencję drugiego kubitów.

Wyniki te stanowią dorobek, który w mojej ocenie w zupełności wystarcza na solidną rozprawę doktorską. Niestety sama rozprawa przygotowana jest w sposób niestaranny, zarówno pod względem redakcyjnym jak i merytorycznym. Utrudnia to znacznie odbiór wagi i znaczenia zaprezentowanych w niej wyników.

Jeśli chodzi o kwestie edytorskie to, poza uchybieniami już wcześniej wspomnianymi, należy wspomnieć o licznych zmianach i niekonsekwencjach notacji używanej w tekście. Przytoczyć tu można wiele przykładów, ale skupię się na trzech. Po pierwsze, stałe sprzężenia oddziaływania kubitów z otoczeniem pojawiają się po raz pierwszy na stronie 18, a następnie na stronie 23 i w dalszej części tekstu pojawiają się pod zupełnie inną. Po drugie w sposób bardzo niekonsekwentny używana jest notacja na funkcję fundamentalną dla problemów rozważanych w rozprawie – tak zwaną funkcję dekoherencji. Jest ona zdefiniowana przez symbol  $W$  we wzorze (4.9) a następnie, jeszcze na tej samej stronie, używa się na nią symbolu  $L$ . W końcu, na stronie 114 konwencje na indeksy dolne funkcji  $L$  we wzorach (13.12) oraz (13.13) są inne niż te używane w pozostałej części rozdziału 13. Ponadto, ogólnej prezentacji bardzo pomogłoby przedstawienie wyników w taki sposób, aby rozwiązania w danych rozdziałach odpowiadały na wcześniej postawiony lub chociaż zarysowany problem badawczy. Szczególnie w częściach pracy dotyczących układu dwóch kubitów można odnieść wrażenie, że najpierw wymienione zostają wszystkie wyniki, które udało się uzyskać, a dopiero potem następuje ich pełniejsza analiza.

Pewnych niedociągnięć można się doszukać również w warstwie merytorycznej. Tłumaczenia pojęć i zjawisk fizycznych we wstępnych rozdziałach pozostawiają wiele do życzenia i cechują się pewną nonszalancją. Podam tu kilka przykładów:

- Wyprowadzenie na ograniczenie długości wektora Blocha we wzorze (1.13) jest błędne.
- Przedstawienie fizyki spinowych kubitów w centrach NV w diamencie w rozdziałach 2, 3 oraz 7 jest bardzo skrótowe i, aby je zrozumieć konieczna jest wcześniejsza znajomość fizyki atomowej. Równocześnie nie znajduje się w nich wyjaśnienie podstawowego dla całej pracy faktu, że otoczenie kubitu spinowego zadane jest przez spiny jądrowe w węglu  $^{13}\text{C}$ .
- Wprowadzenie do metody Cluster-Correlation-Expansion jest niezwykle skrótowe i nie daje czytelnikowi możliwości zrozumienia na czym polega ta technika i w czym kryją się jej ograniczenia.

Moim zdaniem Pan Kwiatkowski nie wykorzystał w pełni szansy, aby w przystępny sposób przybliżyć tematykę swoich badań szerszemu środowisku naukowców związanemu z kwantową informacją. Wielka szkoda, bo kubity spinowe w centrach NV wydają się być bardzo ciekawym poligonem testowym dla różnych idei wywodzących się z tej dziedziny.

W moim odczuciu praca traci też sporo ze względu na dość niedbałe potraktowanie kwestii jednostek: do określenia wartości pola magnetycznego używa się naprzemiennie Tesli i Gaussów. Autor, pomimo używania mianowanych jednostek, nie używa w pracy symbolu  $\hbar$ . Z kontekstu jasne jest, że wielkości używane w rozdziałach 2 i 3 sprowadzone są do postaci bezwymiarowej w dalszych częściach rozprawy. Nie zostało to jednak wyjaśnione w adekwatny sposób w samym tekście.

Ponadto, niektóre wyniki i wyliczenia zaprezentowane są niestarannie. Przykładem mogą być tu równania (10.18)-(10.20), w których operatory  $U_0$  oraz  $U_1$  pojawiają się w złym miejscu iloczynu tensorowego (powinny być na zewnątrz). Mam też wątpliwości co do równań (9.3) i (9.4), o których autor twierdzi, że opisują wartości oczekiwane. Tak jednak nie może być ze względu na strukturę operatorów pojawiających się pod śladem w tych wyrażeniach. W końcu, w wyprowadzeniu na funkcję  $W(t)$  dla Gaussowskiego otoczenia na stronie 53 autor twierdzi, że  $\langle \hat{V}(\tau) \rangle = 0$ , po czym sam sobie zaprzecza w stopce na tej samej stronie. Ostatecznie wyrażenia prezentowane przez autora są poprawne, jednak logika do nich prowadząca jest spójna.

Chciałbym też zwrócić uwagę na problem efektywnej siły oddziaływań spinów jądrowych w węglu  $^{13}\text{C}$ . W prawdziwym układzie oddziaływania, zarówno pomiędzy spinami jak i otoczeniem, a rozważanym kubitem zależą od (losowej) konfiguracji izotopów węgla  $^{13}\text{C}$  względem rozważanego defektu NV. Fakt ten przejawia się pośrednio w tekście rozprawy, ale nie jest on wystarczająco uwypuklony. W rozprawie zabrakło mi analizy ilościowej jak procesy dekoherencji w rozważanym układzie zależą od własności rozkładu przestrzennego cząstek  $^{13}\text{C}$ .

Po przeczytaniu rozprawy i zapoznaniu się z jej głównymi wynikami nasuwają się dodatkowe pytania i uwagi.

- Czy możliwe jest przygotowanie kubitów otoczenia w stanach wykazujących koherencję? Jaki jakiego wpływu można się spodziewać na proces dekoherencji spinowego kubitu w centrum NV w takim przypadku?

- W rozdziale 10 pokazano, że w obecności polaryzacji w spinach jądrowych w otoczeniu kubitów spinowych w centrum NV, w wyniku oddziaływań w układzie tworzą się struktury rozgłoszeniowe w makrofrakcjach otoczenia. Czy tego zjawiska można by użyć aby dokonywać efektywnego pomiaru spinu kubitów? Jak wyniki zaprezentowane w rozdziale 10 są związane z wcześniejszą, opublikowaną już pracą [Phys. Rev. Lett. 123 (14) 140402 (2019)]
- Moje wątpliwości budzi kryterium stosowalności przybliżenia skończonego rzędu w rozwinięciu CCE. W rozdziale 7 na stronach 36 i 37 argumentuje się, że dla dużych wartości pól magnetycznych ( $B > 0.1$  T) oraz dla niespolaryzowanego otoczenia wystarczy ograniczać się do drugiego poziomu hierarchii CCE. Analizie podlega tutaj jednak wyłącznie dekoherencja pojedynczego kubitów. Nie jest dla mnie jasne na ile przybliżenie CCE-2 może być stosowane w bardziej skomplikowanych sytuacjach, jak na przykład te rozważane w rozdziałach 12 i 13.
- Czy ewolucja kubitów sprzęgniętych z otoczeniem może być traktowana jako ewolucja Markowska? Jeśli tak, to w jakich przypadkach?

Mimo uchybień w samej rozprawie, zaprezentowane w niej wyniki oceniam jako ważny wkład w zrozumienie zjawisk dekoherencji w układach centrów NV w diamencie. Jako dużą zaletę pracy oceniam też bliski związek otrzymanych wyników z eksperymentalnie dostępnymi układami fizycznymi. Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska pana mag. Damiana Kwiatkowskiego pt „Decoherence and entanglement decay of nitrogen-vacancy centers in diamond applied to spectroscopy of environment noise” spełnia wymagania formalne stawione tego typu rozprawom. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Warszawa 30.06.2020

Michał Oszumaniec