

Paweł Horodecki  
Międzynarodowe Centrum Teorii Technologii Kwantowych  
Uniwersytet Gdański  
ul. Wita Stwosza 63  
80-233 Gdańsk  
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej  
Politechnika Gdańska  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 26.10.2020

Prof. dr hab. Jacek Kossut  
Przewodniczący  
Rady Naukowej  
Instytutu Fizyki PAN  
Al. Lotników 32/46  
02-668 Warszawa

#### Oświadczenie

Niniejszym oświadczam, że w sporządzonej przeze mnie recenzji rozprawy doktorskiej mgr. Damiana Kwiatkowskiego pt. „Decoherence and entanglement decay of nitrogen-vacancy centers in diamond applied to spectroscopy of environmental noise” znalazł się błąd drukarski, mianowicie zamiast roku 2018 w dacie dokumentu powinien widnieć rok 2020.



Paweł Horodecki  
Międzynarodowe Centrum Teorii Technologii Kwantowych  
Uniwersytet Gdański  
ul. Wita Stwosza 63  
80-233 Gdańsk  
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej  
Politechnika Gdańska  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 26.08.2018

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Damiana Kwiatkowskiego pt. „Decoherence and entanglement decay of nitrogen-vacancy centers in diamond applied to spectroscopy of environmental noise ”**

Rozprawa magistra Damiana Kwiatkowskiego dotyczy dość szeroko rozumianej kwantowej informacji ze szczególnym naciskiem na obserwację efektów fizycznych z pomocą bardzo konkretnego układu fizycznego – centrów typu azot-luka w diamencie. Zasadniczym celem rozprawy jest wnioskowanie o własnościach szumu pochodzącego z otoczenia jedynie z pomocą obserwacji procesów dekoherencji czystego stanu centrum lub pary centrów. Drugim celem jest obserwacja splątania centrum-środowisko wyłącznie w oparciu o specyficzną diagnostykę zachowania się samego centrum, a także szczególnym konsekwencjom tego splątania jakim są tzw. struktury rozgłoszeniowe.

Rozprawa oparta jest w znacznej mierze na publikacjach wspólnych autora, jego promotora dr. hab. Łukasza Cywińskiego, profesora IF PAN oraz współpracowników, przy czym doktorant jest pierwszym autorem dwóch publikacji. Prace ukazały się na łamach renomowanych czasopism Physical Review B (dwie), Physical Review A oraz Journal of Physics: Condensed Matter, przy czym ostatnia w mniejszym niż poprzednie stopniu wiąże się z treścią rozprawy.

Rozdział pierwszy pracy zawiera przystępne omówienie podstawowych pojęć dotyczących jednego i dwóch kubitów. Rozdział drugi jest poświęcony strukturze poziomów energetycznych układu azot-luka oraz procesom przygotowania i odczytu stanów, które będą definiować warianty kubitów w kolejnym rozdziale. Rozdział trzeci ma podwójny cel – omówienie oscylacji Rabiego dla kubitów oraz Hamiltonianu centrum azot-luka w otoczeniu spinów jądrowych. Podano tutaj stosowane przybliżenia dotyczące wkładu oddziaływania kontaktowego oraz przybliżenie izotropowe dla dużych pól. Można odnieść wrażenie, że podrozdział 3.1 byłby bardziej odpowiedni jako końcowa część bieżącego rozdziału 2, tworząc w ten sposób całość na temat kubitów jako układów abstrakcyjnych. Rozdział 3 kończy ważna tabela fizycznych parametrów układu azot-luka w diamencie.

To dość niefortunne, że można w omawianych partiach tekstu naliczyć aż trzy różne wartości rozczepienia  $\Delta_0$  poziomu  $^3A_2$  w zerowym polu. Są to kolejno: 2.87 GHz na rysunku 2.1, 2.88 GHz na rysunku 2.2 oraz 2.89 GHz w Tabeli 3.1. Recenzent byłby wdzięczny gdyby autor zechciał sprawdzić jakiej wartości używał w miejsce  $\Delta_0$  podczas obliczeń numerycznych, a jeśli nie była prawidłowa, to czy ewentualna pomyłka miałaby jakikolwiek zauważalny wpływ

na uzyskane krzywe. Uwagę tę czynimy dla porządku, bowiem nie wydaje się, aby dla rozważanego układu i przyjętych wartości pól pomyłka w tym punkcie mogła mieć istotne znaczenie.

Kolejny, czwarty rozdział opisuje proces dekoherencji kubitów w otoczeniu nieoddziałujących spinów o skończonej temperaturze w przypadku oddziaływania defazującego. Oddziaływanie to jest odpowiedzialne za rodzaj kontrolowanych operacji unitarnych na spinach środowiska, poprzez które informacja o spinie centralnym jest transferowana do środowiska. Omówiono dekoherencję w otoczeniu nieoddziałujących spinów oraz modelowanie tego procesu dla czasów krótkich w porównaniu ze skalą sprzężenia nadsubtelnego. Jedną z centralnych wielkości rozdziału tj. parametr dekoherencji  $W(T)$  zostaje wprowadzony jakby mimochodem – dla dobra czytelnika można było podkreślić jego znaczenie. Informacja o założeniu co do stanu środowiska „As an effect in the following sections we shall consider an initial state of the nuclear bath completely mixed (...)” nie precyzuje, o które rozdziały tu chodzi - w ósmym i dziesiątym niezerowa polaryzacja jest wszak zakładana. Zamieszczony rysunek pokazuje ewolucję parametru dekoherencji w wariacie ścisłym oraz w przybliżeniu dla dużej liczby spinów jądrowych, gdy można – jak pokazano – symulować z zewnętrznego pola klasycznego o rozkładzie gaussowskim. Zasadniczy zamysł rozdziału głównego 4 i zawarte w nim informacje są celowe, ale w wykonaniu mamy znaczące usterki. W rozdziale 4.3 czytelnik zostaje zaskoczony symbolami sprzężeń oraz częstości pojawiającymi się we wzorze (4.10), bowiem definiowane są - jako parametry Hamiltonianu – dopiero w rozdziale kolejnym 4.4 (wzór (4.12)). Ponadto częstości  $\omega_i$  nie są w ogóle zdefiniowane w tym rozdziale i musimy się domyśleć, że chodzi tu o pojawiające się wcześniej (rozdział 4.3, strona 24, wers pierwszy) i inaczej oznaczone wielkości  $\omega_{mi}$ . We wzorze (4.15) pominięto czynnik fazowy mimo, że zatrzymano go w definicji  $W(T)$ . Wreszcie Hamiltonian (4.12) jest zdefiniowany przez (4.6), a nie (4.4). Opisany powyżej nieporządek narracyjno-notacyjny może oznaczać, że mamy tu do czynienia z pospiesznym rozdzieleniem jednego rozdziału na dwie części.

Zasadniczą konkluzją rozdziału 4 jest, że jeżeli elementy środowiska nie oddziałują, to w zakresie przyjętej skali czasowej dekoherencja zachodzi w formie kwazistatycznego szumu. Omówienie opatrzone trafnie dobraną ilustracją jak zanika badana koherencja układu w czasie w naturalnej próbie dla średniej wartości pola. W tym i w następnym rozdziale nasuwa się pytanie do autora, ile wynosiła wielkość  $N$  w przypadku ścisłych obliczeń numerycznych. Tekst rozdziału kończy syntetyczna uwaga podsumowująca o ograniczeniach prezentowanego podejścia, która trafia w sedno zagadnienia: potrzeba zmodyfikowania procesu dekoherencji, aby nie zachodził zbyt szybko, jeżeli mamy uzyskać więcej informacji o środowisku. Przy licznych niedostatkach tekstu rozprawy tego typu syntetyczne uwagi, wskazówki, a także zapowiedzi kolejnych kroków należą do jej mocnych stron, zdradzając, że autor dysponuje dużym talentem dydaktycznym, z którego - być może z racji ograniczeń czasowych - nie skorzystał w pełni podczas przygotowania tekstu.

Rozdział 5 krótko opisuje zastosowanie techniki echa spinowego. Przeprowadzono obliczenia dekoherencji w obecności impulsów echa. Zasadniczymi wnioskami jest obserwacja, że po włączeniu techniki echa spinowego następuje wydłużenie czasu koherencji oraz niewielki wpływ korelacji w środowisku dla małych i średnich pól. Nie jest jasne jakiego Hamiltonianu użyto przy sporządzaniu krzywych niebieskich na wykresie (tj. z uwzględnieniem

środowiska oddziałujących spinów jądrowych), czy jest to Hamiltonian w pełni ściśle tj. z członem (3.13) (opis zawiera słowo „exact”). Ważną informacją tego rozdziału jest, że dla silnych pól tj. 0.1 T echo spinowe zasadniczo usuwa zjawisko dekoherencji.

W krótkim rozdziale 6 opisano metodę rozwinięcia typu CCE (ang. *Cluster Correlation Expansion*) wyprowadzoną wcześniej przez innych autorów, które polega na systematycznym uwzględnieniu korelacji coraz wyższego rzędu pomiędzy spinami środowiska. Jest to bardzo cenne narzędzie, ponieważ wymiarowość problemu rośnie eksponencjalnie.

Rozdział 7 zawiera ilustrację zastosowania metody CCE w powiązaniu z echem spinowym. Kluczowy tutaj Hamiltonian (formuła pierwsza, bez numeru) oraz opis członu warunkowego (7.1) podane są bez wyjaśnienia i powiązania z oryginalną strukturą oddziaływania z rozdziału 4. W rozdziale wyjaśniono zachowania krzywej z rysunku 5.1 c) (błędnie przywołanego jako 7.1 c)) pokazując, że zachowanie to można opisać uwzględniając jedynie korelacje dwuskładnikowe (schemat CCE-2, przyczynki CCE-3, CCE-4 nie dają już wkładu do dynamiki, a przyczynki CCE-1 jest usunięty przez echo). W kolejnym podrozdziale postawiono pytanie, czy można dokonać modyfikacji dynamiki, aby uzyskać wgląd w korelacje wyższego rzędu. Użyto tu metodę dynamicznego rozprzęgania z pomocą znanych w literaturze sekwencji impulsów (*dynamical decoupling*) została zastosowana do Hamiltonianu (4.4), ale nie jest jasne czy i jak uzyskany rysunek 7.4 odpowiada na postawione pytanie. Natomiast autor trafnie wykazuje z pomocą szczegółowej analizy, że duża liczba słabo sprzężonych spinów środowiska prowadzi do zachowania podobnego do wywołanego przez klasycznego pola Gaussowskiego. Brakuje jawnego wskazania, której z funkcji z tabeli 7.1 użyto przy wyprowadzeniu wzoru (7.35), co można znaleźć dopiero w oryginalnej pracy [P. Szańkowski et al. *J. Phys. Condens. Matter* (2017)]. Na marginesie nasuwa się pytanie jak szybko ze zwiększeniem liczebności środowiska od przypadku a) do b) zaczynają się zmieniać minima na rysunku (7.4), a także: jak liczne jest otoczenie w przypadku b). (W oryginalnej pracy [70] przejście od jednego do trzech spinów nie prowadzi do żadnej widocznej zmiany).

W rozdziale 8 następuje istotna zmiana: przyjmuje się spolaryzowany stan środowiska. Na początku opisano tu krótko procedurę dynamicznej polaryzacji jądrowej. Następnie autor zakłada, że wkład od frakcji do współczynnika CCE-1 jest decydujący na podstawie obliczeń pokazanych na rysunku 7.1. Wydaje się, że potrzeba tu dodatkowego uzasadnienia, bowiem 7.1 uzyskano dla niespolaryzowanego środowiska. *Nota bene* dla dobra czytelnika można było odwołać się do Hamiltonianu, którego tu użyto. Wyliczono tu (i) ściłą wielkość koherencji całkowitej oraz (ii) jej wielkość w przypadku słabego sprzężenia (małego ilorazu sprzężenia centrum-spin jądra oraz częstości energii swobodnej spinu jądra) gdy fazy i amplitudy kumulują się w określony sposób (formuła (8.10)), a także (iii) w przypadku gaussowskim. W dalszej części przeprowadzono elegancką analizę procesu dekoherencji rozdzielając amplitudę od czynnika fazowego w przypadku środowiska gaussowskiego. Wartościową obserwacją jest konstatacja, że w obecności gaussowskiego środowiska niezerowy czynnik fazowy stanowi swoisty detektor niezerowego śladu członu oddziaływania kubitu ze środowiskiem. Wpisuje się to w konsekwentnie rozwijany w rozprawie program badania własności środowiska poprzez analizę zachowania koherentnych własności centralnego kubitu.

Kolejny rozdział obfituje w szczegółowe wyniki numeryczne dotyczące przypadków (i-iii) powyżej dla echa spinowego i układu zbliżonego do warunków doświadczalnych. Niestety autor nie podaje w tekście co oznaczają konfiguracje (I)-(IV) spinów środowiska, a także - czym

jest wielkość  $R_{\text{cut}}$ , po raz kolejny zmuszając czytelnika do szukania tej informacji w oryginalnej pracy [D. Kwiatkowski, P. Szańkowski, Ł. Cywiński, *Physical Review B* (2020)] (por. wstęp do rozdziału V oraz rys. 1 tamże). Zaobserwowano, że przypadki (i-iii) są silnie rozróżniane przez czynnik fazowy przy czym przypadek ścisły traci wręcz gładkość jeżeli dopuszcza się spiny jądrowe się w odległości do  $R_{\text{cut}}=0.5$  nm. Efekt znika, jeżeli zostawi się tylko spiny w odległości nie większej od 1 nm. Sprawdzone też wyprowadzoną przez innych autorów formułę testującą gaussowskość (8.38) uzyskując dobrą zgodność dla pierwszych kilku oscylacji. Jednak już czynnik fazowy jest niezerowy, co przy zerowym śladzie sprzężenia wskazuje na niegaussowskość. Uważam to za wartościową ilustrację ważnej obserwacji teoretycznej.

Powyższe analizy dotyczyły ustalonej polaryzacji środowiska ( $p=0.5$ ). Dla wybranej konfiguracji (II) zmieniając polaryzację środowiska wykazano, że czynnik fazowy koherencji jest jej silnym detektorem i że do pewnego stopnia wykazuje czułość na zasięg stuprocentowo spolaryzowanych spinów wokół centrum. W dyskusji zwrócono uwagę na ściśle kwantowy charakter czynnika fazowego, determinowany przez komutator członów oddziaływania.

Rozdział 9 poświęcony jest innemu zagadnieniu – kontrola i monitoring spinu centrum w czasie ma w zamiarze dać informację o splątaniu centrum ze środowiskiem. W wykorzystano tutaj wynik z pracy [92] pozwalający wnioskować o splątaniu w przypadku odmiennych ewolucji koherencji dla dwóch początkowych stanów będących stanami niezmienniczymi dynamiki, zwane stanami wskaźnika (ang. *pointer states*) po ich dodatkowej rotacji do stanu komplementarnego. Na rysunku 9.2 widać wyraźnie, że różnica ta rośnie wraz z polaryzacją środowiska. Rysunek kolejny pozwala szukać optimum długości obu czasów (do momentu impulsu oraz od tego momentu do pomiaru). Autor słusznie konkluduje, że systematyczne wyniki dla ośmiu losowych środowisk pozwalają mieć nadzieję, na detekcję doświadczalną ze względu na dużą amplitudę. Nasuwa się tutaj pytanie nadobowiązkowe: dlaczego w panelach (a) oraz (e) układ tak często przechodzi przez fazę separowalną ?

Kolejny, dziesiąty rozdział poświęcono w rozprawie zagadnieniu rozgłaszania informacji o układzie w środowisku w formie tzw. spektralnych struktur rozgłoszeniowych (ang. *Spectrum Broadcast Structures*) i zawiera wyniki niepublikowane. Pierwsze partie tego rozdziału zawierają przejrzyste omówienie problemu obiektywności oraz wspomnianych struktur. Następnie narrator przechodzi do analizy centrum azot-luka w otoczeniu spinów jądrowych. Korzystając z wymiarowości macierzy podano tutaj jawnie wzory na współczynniki dekoherencji oraz parametr wierności w przypadku spolaryzowanego środowiska. Brakuje informacji w jaki sposób dokonano uśrednienia przy uzyskiwaniu wyników na rysunku 10.2. Ponadto w przypadku rysunku 10.3 nie jest jasne czy realizacja II jest tą samą użytą w poprzednim rozdziale, a także czy środowisko jest tutaj nieoddziałujące. Konkluzja o wpływie silnie oddziałujących jąder na proces formowania struktury SBS wydaje się trafna. Interesujące jest też spostrzeżenie, że mikrofrakcje nie muszą osiągać dużych rozmiarów aby się względnie dobrze ortogonalizować. W moim odczuciu mogłoby ono zainspirować w przyszłości badania nad kolektywnymi pomiarami doczytującymi informację klasyczną ze środowiska. Analizę kończy autor pewną metaforą literacką, która nieco wykracza poza ramy narzucane przez dysertację naukową, ale zdradza wspomniane już zacięcie dydaktyczne i sygnalizuje zmianę scenariusza badawczego na kolejnych stronach pracy.

Rzeczywiście w kolejnym, jedenastym rozdziale mamy do czynienia z układem złożonym tj. dwoma centrami azot-luka. Rozdział ten stanowi systematyczne wprowadzenie do

szczegółowych badań koherencji układu. Po wstępie zawierającym przekonującą motywację zaprezentowano tu układ dwóch kubitów oraz pomysłowy element inżynierii kwantowej – włączenie gradientu, który ma zniwelować dipolowe oddziaływanie między centrami, aby mieć do czynienia z ewolucją o czysto defazującym charakterze. Ten moment dobrze oddaje charakterystyczną dla całej rozprawy, stanowiącą jedną z jej mocnych stron, konsekwencję aby badać układy jak najbliższe realnym warunkom laboratoryjnym, a nie jedynie modele z częściowo zgodną strukturą i parametrami. Jako produkt uboczny uzyskuje się tu możliwość tzw. lokalnego adresowania, tj. dodatkowej indywidualnej kontroli dynamicznej kubitów. Niestety omówienie jest bardzo powierzchowne – układ jest bardziej szczegółowo opisany w oryginalnej pracy [D. Kwiatkowski, Ł. Cywiński, Phys. Rev. B (2018)]. Podobnie w dalszej części, w której starano się przedstawić omówienie dekoherencji dwóch kubitów, nic nie stało na przeszkodzie, aby podać wzór analogiczny do (6.1).

Rozdział 12 omawia jedno z głównych wyników rozprawy. W szczegółowy sposób dokonano tu uogólnienia metody CEE na przypadek dwóch kubitów. Centralną wielkością analizy jest obiekt (12.12), który pozwala dostrzec kiedy środowisko działa w sposób skorelowany. Wprowadzono też efektywne wielkości sprzężenia z parami spinów środowiska (Tabela 12.1), które są istotne w sytuacji, gdy obecność pojedynczych spinów nie daje wkładu do dekoherencji. Zanim przejdę do omówienia treści merytorycznej rozdziału pozwolę sobie zilustrować brak empatii pod adresem czytelników ze strony autora. W tekście definitywnie należało się odwołać się w rozsądny sposób do narracji z pierwszego akapitu rozdziału III.A oryginalnej pracy. W rzeczy samej kluczowe dla rozumienia uzyskanych wyników wielkości (12.1), (12.2) pojawiają się niczym *deus ex machina* – nigdzie nie są jawnie zdefiniowane. W szczególności kompletnie niejasne pozostają związki indeksów ze splątanymi stanami Bella  $\Psi$ ,  $\Phi$  dopóki nie zajrzy się do oryginalnego artykułu. Wreszcie jedna z centralnych zależności rozdziału 12.3 - wzór (12.13) - jest podana bez uzasadnienia. Czytelnik musi cofnąć się do rozdziału 12.1 i podać argument samodzielnie lub znów sięgać do oryginalnej pracy. Mamy tu raczej do czynienia z partiami tekstu jakby wyjętymi z - źle napisanego - przewodnika po zbiorze artykułów, a nie z dysertacji doktorskiej. Pozwólmy sobie jeszcze na jedną retrospektywę dotyczącą oznaczeń. W rozdziale 3.2 sprzężenie między spinami jąder jest oznaczone przez indeksowaną literę  $d_{kl}$  (wzór (3.12)). W tabeli (3.1), po wyłączeniu czynnika kąтового jest to już  $b$ , ale bez indeksów i wyjaśnienia dlaczego zniknęły, podobnie w (7.1). Niezależnie autor wprowadza Hamiltoniany warunkowe, gdzie w przeciwieństwie do oryginalnej pracy [D. Kwiatkowski, Ł. Cywiński (PRB 2018)] używa liter  $n$ ,  $m$  dla oznaczenia poziomów Zeemana. Jednak w rozdziale 12, zamiast konsekwentnie przy nich pozostać, zmienia je na  $a$ ,  $b$ , aby równocześnie podać formułę (12.11) (i kilka następnych) z użyciem literki  $b$  oznaczającej owo sprzężenie między jądrami, mimo że w tym samym rozdziale litera  $a$  oznacza już owe poziomy Zeemana. Na koniec w tym samym rozdziale pojawia się po raz pierwszy w rozprawie oznaczenie  $b_{kl}$ , które jest odpowiednikiem symbolu ze wzoru (3.12) tj.  $d_{kl}$ , ale bez czynnika kąтового. W przeciwieństwie do sposobu prezentacji sama analiza jest bardzo wartościowa badawczo. Po pierwsze stopniowo zwiększając dystans pary centrów wychwycono odległość, dla której stabilizuje się ogólne zachowanie ogólne czynnika  $W$  dekoherencji (ok.  $1mn$ ) dla stanu Bella typu  $\Psi$ . Od tego momentu dokonano celowej zmiany, badając odchylenie tego czynnika od iloczynu czynników jednokubitowych, co wciąż pozwala na wychwycenie korelacji w środowisku. Z pomocą tego czynnika w

scenariuszu wspólnej lokalizacji wykazano obecność oddziaływania skorelowanych par środowiska poprzez odchylenie od zachowania gaussowskiego, po czym usunięto spiny jąder w odległości do 2 nm pokazując, że zachowanie gaussowskie (odpowiadające symetrycznemu zachowaniu logarytmów dekoherencji dla par  $\Psi, \Phi$ ) zostaje przywrócone. W następnie konsekwentnie rozsunęto centra do odległości 1nm, 2nm i 3nm badając niegaussowskość, która jest śladem dekoherencji pochodzącej od skorelowanych par. W pierwszym przypadku efekt ten jest czytelny, w drugim – widoczny częściowo. W trzecim na 10 konfiguracji tylko połowa pokazuje gaussowskie zachowanie. Wydaje się, że korzystnie byłoby przypadek 2 nm również przebadać w 10 konfiguracjach.

Wyniki naukowe tego rozdziału należy ocenić wysoko. Okazuje się, że używając techniki echa spinowego i wnikliwej analizy można wychwycić skorelowane zachowanie środowiska w sposób możliwy, przynajmniej w zasadzie, do eksperymentalnej detekcji. Spektakularnie wykorzystano tutaj różne zachowania stanów Bella w obecności badanego szumu. Jestem przekonany, że zarówno uzyskanie wyniku jak i zaproponowana metoda znajdzie trwałe miejsce w literaturze przedmiotu. W podsumowaniu rozdziału autor daje wyraz swojej dociekliwości naukowej, pytając czy odchylenia od gaussowskiego charakteru leżą w naturze samego szumu, czy też są wynikiem sprzężenia zwrotnego układ otoczenie. W kolejnym, trzynastym rozdziale autor podejmuje ciekawą próbę odpowiedzi na to pytanie. Poddaje analizie parę centrów azot-luka w stanie iloczynowym, w którym drugi kubit jest stanem wskaźnika ( tj. jest niezmienniczy ze względu na działanie otoczenia) prowadzącym do kontrolowanej operacji unitarnej w środowisku. Wobec tego kubitu otoczenie jest pasywne, lecz sama jego obecność może mieć aktywny wpływ na środowisko. Natomiast pierwszy kubit, pełniący rolę sensora znajduje się w superpozycji obu stanów wskaźnika. Autor systematycznie bada jakościowo wpływ obecności drugiego kubitu na koherencję pierwszego. Pokazuje, że dla bliskich odległości obecność drugiego kubitu osłabia, a w średnich wzmacnia dekoherencję, przy czym terminy „bliska”, „średnia” zależą od siły pola. Efekt widać szczególnie wyraźnie na rysunkach 13.2, 13.4. Niestety linia przerywana nie jest opisana precyzyjnie, a jej kolor – zielony - jest mylący na tle obecności hipsometrycznego tła. Czytelnik musi się domyślić, że jest to pozycja w czasie, dla której koherencja wynosi  $1/e$  w nieobecności drugiego kubitu. Brakuje też komentarza na temat niezgodności obu linii (białej i zielonej przerywanej) w granicy dużych odległości dla przypadku silnego pola (rys. 13.4). Może ona świadczyć o pojawieniu się długozasięgowych korelacji w środowisku, z pomocą których kubit sensora otrzymuje informację o kubicie wskaźnika mimo dużej odległości między nimi. Badania są poparte kilkoma innymi wykresami pokazującymi, że w średniej odległości sprzężenie zwrotne może manifestować się dodatkową oscylacją. Mimo usterek w prezentacji bardzo pozytywnie oceniam tę część pracy. Należy pochwalić autora za konsekwencję badawczą i świeże spojrzenie na zagadnienie. Pomysł, aby kwestię, czy odstępstwa od gaussowskości nie są wtórne badać z pomocą stanu wskaźnika uważam za znakomity. Ostatni rozdział rozprawy stanowi eleganckie i czytelne podsumowanie przeprowadzonych badań.

Zanim przejdę do oceny formalnej to do zamieszczonych uwag merytorycznych pozwolę sobie dołączyć jeszcze jedno spostrzeżenie krytyczne. W całej rozprawie dość skąpe są informacje o generowanych rozkładach spinów izotopów. Wobec znaczących różnic w zachowaniu koherencji może dobrze byłoby podjąć jakąś próbę ilustracji takich dwóch skrajnie odmiennie zachowujących się przypadków na sieci (np. (a) i (f) z rys. 9.4) ?

Poddając ocenie strukturę pracy należy przyznać, że zasadnicza logika wywodu jest bez zarzutu, a nawet – zważywszy na obfitość materiału – można ją ocenić powyżej średniej. Widać wyraźnie, że autor przemyślał tok narracyjny. Natomiast jego szczegółowe wykonanie należy ocenić bardzo krytycznie. W omówieniu podałem przykładowe wady prezentacji – niektóre partie materiału są powierzchowne, chaotyczne, czasem bardzo trudne to odczytania z powodu braku wyjaśnienia ważnych oznaczeń - rzeczy w dysertacji doktorskiej niedopuszczalnej. Bywają też w tekście fragmenty eleganckie, błyskotliwe pointy i trafne podsumowania. Na osobny komentarz zasługują tytuły rozdziałów nawiązujące do utworów kultury masowej (np. „You spin me around ...: Rabi oscillations”, „One”, „Down with the weakness”, „Comfortably Numb: second qubit as a witness”). Doceniając fantazję i dowcip autora, nie sposób nie stwierdzić, że takie frazy nie powinny być tytułami rozdziałów dysertacji doktorskiej z dziedziny fizyki, bowiem jest to mieszanie gatunków literackich. Z powodzeniem niektóre z owych tytułów lub ich części mogłaby stanowić motta, przy czym wypadałoby podać stosowne odnośniki. Tytuł rozdziału 10.1 zawierający przetworzony, a nie oryginalny, cytat wypowiedzi Einsteina, byłby dużo bardziej właściwy w książce popularnej.

Jeżeli chodzi o warstwę naukową, to w omówieniu postawiłem kilka pytań, które oczekują odpowiedzi. Niemniej jednak już na obecnym etapie pracę oceniam bardzo pozytywnie pod względem badawczym. Rozprawa stanowi wartościowy wkład w procesie zapewniania wciąż widocznej luki między abstrakcyjną kwantową teorią informacji, a fizycznymi implementacjami. Choćby sama treść rozdziału 7 pokazuje, że obiekt na gruncie kwantowej teorii informacji nazywany kanałem bistochastycznym, może mieć (na płaszczyźnie rozszerzenia Steinspringa) w konkretnej realizacji nietrywialne własności fizyczne. W pracy przekonująco pokazano w jaki sposób spektakularne zastosowanie i rozszerzenie metody CCE wraz z odpowiednim wyborem stanów sensorów pozwala na nowatorski wgląd w korelacje środowiska w zakresie parametrów dostępnych eksperymentalnie. Moim zdaniem mamy tu do czynienia z trwałym osiągnięciem w literaturze przedmiotu. Szczególnie pozytywnie oceniam udany pomysł użycia różnych stanów Bella w badaniu korelacji środowiska, a także pomysłową próbę wglądu w naturę szumu i wykrycie sprzężenia zwrotnego układ-środowisko-układ przy pomocy stanu wskaźnika. Przedstawiona praktyczna analiza detekcji splątania centrum-środowisko może doczekać się modyfikacji na potrzeby innych realizacji fizycznych. Analiza struktur rozgłoszeniowych daje szansę na próby doświadczalnego badania procesu emergencji cech obiektywnych na gruncie kwantowej fizyki ciała stałego. Do tej pory eksperymentalne badania tego typu przeprowadzono - całkiem zresztą niedawno - wyłącznie na fotonach. Na pochwałę zasługuje, wspomniana już, konsekwentna dbałość o odwołania do realnych warunków eksperymentalnych, a także związana z tym dobra znajomość literatury przedmiotu. Warto podkreślić, że z treści pracy można wnioskować, iż magister Damian Kwiatkowski dysponuje biegłością analityczną, dobrą intuicją fizyczną oraz kreatywnością badawczą, która może stanowić dobry prognostyk dla przyszłej kariery naukowej.

Stwierdzam, że choć z punktu widzenia kryteriów zwyczajowych przedstawiona dysertacja odbiega od powszechnie uznanych standardów, to wobec bardzo wartościowego poziomu badawczego *summa summarum* w wystarczającym stopniu odpowiada oczekiwaniom stawianym rozprawom doktorskim. Tym samym wnioskuję o dopuszczenie autora rozprawy, magistra Damiana Kwiatkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

