

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Manfredi Scalici pt. „Protecting quantum resources from noise”

Uwagi wstępne

Recenzowana rozprawa napisana jest w języku angielskim i liczy 118 stron. Składa się na nią 5 zasadniczych rozdziałów, krótkie podsumowanie doktoratu oraz dodatkowe dwa apendyksy. Rozprawa powstała na bazie wyników doktoranta opublikowanych w dwóch czasopismach punktowanych na liście ministerialnej i jednego nieopublikowanego manuskryptu zamieszczonego w bazie arXiv:

1. [MWS⁺]: Optimally preserving quantum correlations and coherence with eternally non-Markovian dynamics, *Marek Miller, Kang-Da Wu, **Manfredi Scalici**, Jan Kołodyński, Guo-Yong Xiang, Chuan-Feng Li, Guang-Can Guo, and Alexandre Streltsov*, New J. Phys. 24 053022
2. [MSFAS24]: Power of noisy quantum states and the advantage of resource dilution, *Marek Miller, **Manfredi Scalici**, Marco Fellous-Asiani, and Alexander Streltsov*, Phys. Rev. A 109, 022404 (2024)
3. [SNS24]: Coherence generation with Hamiltonians, ***Manfredi Scalici**, Moein Naseri, and Alexander Streltsov*, arxiv:2402.17567

Na uznanie zasługuje fakt, że praca nr 1 oraz 2 zostały opublikowane w pismach o wysokiej nocie ministerialnej 140 punktów.

Przedmiot rozprawy i jej wartość naukowa

Głównym celem złożonej rozprawy doktorskiej jest teoretyczna analiza wpływu, a także możliwości i metod ochrony układów kwantowych w ich procesie niepożądanego oddziaływania z otoczeniem, potocznie zwanego szumem. W swojej pracy doktorant skupia się na metodach ochrony oddziaływujących układów, nie korzystając z metody kwantowej korekcji błędów, a nawet artykułuje odpowiednie wykorzystanie szumu w celu zwiększenia efektywności pewnych protokołów ważnych

dla teorii zasobów. Innymi słowy, autor w swojej rozprawie stawia tezę a następnie dowodzi, że oddziaływanie badanego układu z otoczeniem niekoniecznie musi mieć negatywny skutek dla rozważanego procesu i można go wykorzystać do pewnych celów, takich jak np. efektywniejsza destylacja zasobów. Komplementarnie, autor także studiuje możliwości generacji użytecznych zasobów (np. splątania) wykorzystując teorię kwantowych półgrup dynamicznych.

W rozdziale 1 rozprawy autor omawia niezbędne pojęcia i fakty wykorzystywane przy formułowaniu i dowodzeniu głównych tez doktoratu. Główną część omawianego rozdziału stanowi opis teorii zasobów w ogólnym znaczeniu, tj. bez odwoływania się do konkretnej realizacji fizycznej. Autor wprowadza takie pojęcia jak: darmowe operacje (ang. free operations), darmowe stany (ang. free states) czy stany zasobu (ang. resource states), a także podaje ich podstawowe własności w ramach teorii. Dodatkowo, omawia też w jaki sposób mierzyć użyteczność danego zasobu poprzez na przykład funkcje entropowe. Do zrozumienia ogólnej zasadności studiowania tego typu teorii, w kontekście szumu, bardzo dobrze spisał się pomysł przedstawienia ogólnego problemu na przykładzie kwantowej teleportacji. W końcowej części rozdziału autor przedstawia kilka dalszych, konkretnych realizacji teorii zasobów, takich jak: teoria operacji termicznych oraz teoria koherencji. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że nie chodzi tutaj o teorie koherencji w kontekście (wzmocnionych) operacji termicznych. Podsumowując, rozdział ten stanowi zbiór dość luźno zaprezentowanych definicji i twierdzeń. Sprawia wrażenie jakby był pisany w dużym niedoczasie. Niemniej jednak, rozdział ten spełnia swoją funkcję i pozwala czytelnikowi na lekturę dalszej części rozprawy bez zbytejnej potrzeby odwoływania się do innych źródeł – zakładając, że czytelnik przyjmie wiele przytoczonych faktów 'na wiarę'. W przypadku dość ubogiej bibliografii w tym rozdziale, może to stanowić pewne wyzwanie dla bardziej ambitnego czytelnika.

W rozdziale 2 autor kontynuuje wprowadzanie czytelnika w tematykę swoich badań. W tym rozdziale główny nacisk kładziony jest na przybliżenie formalizmu kwantowych procesów niemarkowskich. Wywód rozpoczyna się od ogólnego opisu idei dynamiki układów otwartych jako ewolucji układ (S)-otoczenie (E), gdzie ewolucja zadana jest poprzez globalną operację unitarną działającą na SE oraz ślad częściowy względem otoczenia (ang. Stinespring dilation). W szczególności autor pokazuje, że pozwalając na korelacje pomiędzy S oraz E badane odwzorowanie nie musi być jednoznacznie zadane. Celem tego wprowadzenia jest zilustrowanie, że oddziaływanie badanego układu z otoczeniem niszczy jego koherencje. Tutaj bardzo podoba mi się przykład odwołujący się do eksperymentu z dwiema szczelinami, dający czytelnikowi szybką ilustrację zagadnienia. W dalszej części omawiane są klasyczne procesy stochastyczne ze szczególnym uwzględnieniem procesów Markova. Autor wprowadza takie pojęcia jak równanie Chapmana-Kolmogorova, macierz stochastyczną i pojęcie podzielności procesu. Dodatkowo, autor udowadnia także twierdzenie mówiące, kiedy macierz stochastyczna opisuje proces podzielny w terminach kontrakcji normy

$\| \cdot \|_1$ i wprowadza pojęcie wstecznego przepływu informacji. W dalszej części rozdziału autor skupia się na kwantowych analogach wprowadzonych uprzednio pojęć. W szczególności zostaje przywołany model kolizyjny oddziaływania badanego układu z otoczeniem oraz zostaje sformułowane i udowodnione słynne twierdzenie wiążące dynamikę Markowską z własnościami równania master. Wykorzystując to twierdzenie autor wprowadza także pierwszą miarę niemarkowskości, zadaną poprzez współczynniki zaniku. Dodatkowo, w końcowej części rozdziału wprowadzone są dodatkowe dwie mary niemarkowskości, odpowiednio w równaniach (2.59) oraz (2.72). Pierwsza z nich jest wnioskiem z kryterium Choi-Jamiołkowskiego, natomiast druga bazuje na pojęciu kontrakcyjności odwzorowania dynamicznego i metodach inspirowanych dowodem równania Helstroma, dla rozróżnialności dwóch stanów kwantowych. Bardzo pouczająca jest dyskusja zawarta na końcu rozdziału dotycząca rozróżnialności dwóch stanów kwantowych zależnych od czasu. Autor argumentuje, że w przypadku, gdy stany podlegają dynamice markowskiej prawdopodobieństwo ich rozróżnienia może tylko maleć z czasem, zatem eksperyment pomiarowy powinien być przeprowadzony możliwie szybko. Natomiast w przypadku dynamiki niemarkowskiej, optymalne może być wstrzymanie się z dokonaniem pomiaru w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa porażki rozróżniania.

Kolejne trzy rozdziały, to jest rozdziały 3, 4 oraz 5, stanowią już oryginalne rezultaty wypracowane przez autora wraz ze współpracownikami. Omówimy teraz po krótku zawartość każdego z wymienionych rozdziałów.

Rozdział 3 stanowi opis wyników otrzymanych przez autora w publikacji nr 1. W tej części pracy pokazane jest, że niektóre modele szumów niemarkowskich posiadają przewagę nad szumami markowskimi w kontekście zachowywania kwantowych korelacji oraz koherencji podczas ewolucji układów kwantowych oddziałujących z otoczeniem. W pierwszej części rozdziału autor wprowadza niezbędne pojęcia dla badania dynamik kubitowych, m.in. pokazuje, że każda dynamika markowska działająca na jednym kubicie, po odpowiednio długim czasie przekształca każdy stan dwukubitowy w stan produktowy. Inaczej mówiąc dynamika markowska niszczy wszelkie formy korelacji pomiędzy kubitami. Dalej, w kolejnym podrozdziale, autor przechodzi do konkretnej realizacji dynamik. Mianowicie rozważane są odwzorowanie kowariantne komutujące z obrotami dookoła osi z na sferze Blocha. Dla tego typu odwzorowań autor podaje postać macierzy dekoherencji, postać lindbladianu odwzorowania, warunki CP, CP-podzielności oraz efekt działania rozważanego odwzorowania na dowolny stan kubitowy. Mając tak wypracowane narzędzia, w kolejnym podrozdziale, autor przechodzi do analizy zachowywania korelacji w układach dwukubitowych, gdy zrezygnujemy ze spełniania warunku CP-podzielności, tzn. zaczniemy rozważać odwzorowania niemarkowskie w rozważanej klasie odwzorowań. Przy wykorzystaniu warunku PPT oraz CP doktorant wyprowadza warunki na parametry definiujące odwzorowanie w równaniu (3.34), dla

których odwzorowanie zachowuje kwantowe korelacje, będąc jednocześnie odwzorowaniem niemarkowskim. Otrzymane rezultaty są także zilustrowane w przypadku, gdy pewne parametry opisujące odwzorowanie nie zależą od czasu. W tym szczególnym przypadku autor wyprowadza wyrażenie na optymalną wartość własną macierzy dekoherencji, pokazując m.in., że jest ona zawsze ujemna (wyrażenie (3.51)), a zatem proces jest zawsze niemarkowski. Ten szczególny przypadek jest wykorzystany do badania jak otrzymana dynamika niemarkowska zachowuje koherencje kubitów, a następnie wykorzystuje otrzymane związki do analizy zagadnień związanych z metrologią kwantową. Mianowicie autor przedstawia krótką obserwację, że przy zadanej dynamice precyzja pomiaru częstotliwości wirowania spinu wokół osi z , określona przez słynne ograniczenie dolne Cramera-Rao zadane poprzez informacje Fischera, jest proporcjonalna do wyliczonej wcześniej miary koherencji. Ponieważ owa miara jest zachowywana przy ewolucji niemarkowskiej stąd wniosek, że dotyczy to także informacji Fischera i precyzji pomiaru. Zatem wynika stąd konkluzja, że badany model szumu jest najlepszy z punktu widzenia postawionego zadania. Na zakończenie części teoretycznej w tym rozdziale doktorant wyprowadza także wzory na korelacje pomiędzy zaszumionym kubitami a środowiskiem, uwzględniając takie m.in. jak negatywność, informację wzajemną czy quantum discord pokazując, że miary te nie znikają nawet przy bardzo długiej ewolucji układu. Oznacza to zachowywanie odpowiednich korelacji podczas ewolucji niemarkowskiej. Na zakończenie rozdziału 3 doktorant przedstawia eksperymentalną realizację dynamiki niemarkowskiej, która jest generowana dzięki oddziaływaniu fotonu pary splątanej z kryształem kwarcu. Wedle mojego rozumienia, wyniki eksperymentu pokrywają się z teoretycznymi przewidywaniami autora.

Rozdział 4 stanowi studium przypadków protokołu destylacji maksymalnie użytecznego zasobu z punktu widzenia danego zadania (np. destylacji par maksymalnie splątanych) z zasobu poddanego działaniu lokalnego szumu. W odróżnieniu od standardowego podejścia do problemu, autor przed zastosowaniem docelowej procedury destylacji użytecznego zasobu poddaje stan wejściowy tzw. procedurze rozcieńczania (ang. dilution), a następnie tak zmodyfikowany stan podlega działaniu lokalnego szumu. W rezultacie doktorant pokazuje, że zastosowanie rozcieńczania może pomóc w ochronie zasobu przed niszczącym oddziaływaniem z otoczeniem. Mianowicie, w granicy dużej ilości zasobu wejściowego możemy wydestylować więcej użytecznego zasobu przy użyciu rozcieńczania niż bez zastosowania tej procedury. W kolejnej części rozdziału doktorant stosuje zaproponowaną metodę w kontekście teorii zasobów w kwantowej termodynamice oraz czystości (ang. purity). Autor zaczyna od badania przypadku kubitowego oraz szumu w postaci kanału depolaryzującego, wykazując przewagę zastosowania metody rozcieńczania nad protokołem nie wykorzystującym tego typu pre-processingu. W dalszej części podrozdziału znajdujemy także uogólnienie na przypadek wyżej wymiarowy wraz ze stosownymi wyrażeniami analitycznymi na stosunek ochrony (ang. protection rate). Dodatkowo, autor obserwuje, że nie można uzyskać żadnej

przewagi z metody rozmycia, gdy naszym stanem docelowym jest skorelowany stan czysty wymiaru 2^k w stosunku do produktu k kubitowych stanów czystych. Druga część rozdziału 4 składa się z oryginalnych nieopublikowanych jeszcze rezultatów doktoranta. W pierwszej części autor bada zachowanie swojej metody w przypadku, gdy mamy dostęp jedynie do skończonej ilości rozmytych stanów, a nie jak to miało miejsce wcześniej badamy granicę asymptotyczną. Niestety, wyniki tych podrozdziałów są raczej rozczarowujące. Wedle mojego zrozumienia głównym wynikiem jest pokazanie, że metoda rozcieńczania nie daje żadnej przewagi, gdy startujemy z jednego początkowego stanu czystego i rozcieńczamy go do dwóch kubitów. W kolejnej części rozdziału doktorant bada jak rozcieńczenie wpływa na ochronę zasobu jaką jest n par maksymalnie splątanych współdzielonych pomiędzy laboratoriami. Okazuje się, że dużo lepsze efekty osiąga się, gdy najpierw każdą z par maksymalnie splątanych zaburzymy, czyniąc ją mniej splątaną, a dopiero w kolejnym kroku pozwolimy na destrukcyjne oddziaływanie z otoczeniem. Autor podaje analityczne wyrażenie na destylowalne splątanie E_D dla kubitów (wynik innych autorów), a następnie bada numerycznie jak zależy protection rate od parametru α określającego 'siłę' splątania. Wynik takiej symulacji jest zilustrowany na wykresie 4.4, z którego wynika, że najlepszą ochronę uzyskuje się dla stanów separowalnych, czyli jak się domyślam bezużytecznych dla praktycznych zastosowań kwantowo-informatycznych. Niemniej jednak zachowanie jest monotoniczną funkcją malejącą parametru α , zatem im mniej stan jest splątany tym większą ochronę uzyskujemy. Niestety zaproponowana metoda jest wyraźnie mniej efektywna w porównaniu do 3-kubitowego kwantowego kodu korekcji błędów zaproponowanego w referencji [Rof19, Joschka Rofe], gdy porównujemy tzw. distillation rates. Metoda jest też niewiele wydajniejsza od braku jakiegokolwiek pre-processingu. W ostatnim podrozdziale autor bada efektywność swojej metody w przypadku, gdy mamy do dyspozycji n stanów maksymalnie koherentnych $|+\rangle$, a szum jest w postaci kanału tłumienia amplitudy (ang. amplitude damping channel). Tutaj również uzyskane wyniki potwierdzają słuszność tezy postawionej na początku rozdziału.

Rozdział 5 pracy doktorskiej stanowi komplementarne studium do tez weryfikowanych w rozdziałach poprzednich. Autor bada tutaj generowanie zasobów w skończonym czasie t , przy użyciu kwantowych półgrup dynamicznych, mając dostęp do nieskończonego zasobu stanów wejściowych. W swoim modelu doktorant zakłada, że odwzorowanie potencjalnie generujące zasób stosowane jest lokalnie do każdego z identycznych stanów wejściowych. Po wprowadzeniu podstawowej idei oraz pojęć wstępnych, w kolejnych dwóch podrozdziałach autor zaznajamia nas z aparatem matematycznym do ilościowego badania postawionego zagadnienia generacji zasobów. Zostaje wprowadzone takie pojęcie jak moc generująca zasób oraz problem jej maksymalizacji (wyrażenie (5.8)). Pojęcie to jest inspirowane mocą generującą koherencje wprowadzoną wcześniej przez innych autorów, w tym promotora doktoranta. Kolejno jest także przedstawiona operacyjna interpretacja mocy generującej zasób jako optymalna szybkość ładowania tzw. akumulatora

(baterii) zasobów w tym zadaniu. Po części teoretycznej ogólnej, doktorant przechodzi do badania odwzorowań generujących dla trzech rodzajów zasobów: koherencji, czystości oraz splątania. W pierwszym przypadku (koherencje) operacje wytwarzającymi zasób są operatorami unitarnymi generowanymi przez hamiltonian, który trzeba zoptymalizować. W tej części rozdziału na uznanie zasługuje fakt udowodnienia szeregu różnych własności entropii względem pochodnej czasowej oraz operacji defazowania. Pozwoliło to przetłumaczyć problem optymalizacyjny zawarty w równaniu (5.32) do problemu optymalizacji po dyskretnym rozkładzie prawdopodobieństwa, a następnie dalszej redukcji problemu optymalizacyjnego do tezy zawartej i udowodnionej w lemacie 5.1. Dzięki temu podejściu można było już wykorzystać znane rezultaty. Mianowicie, z pracy innych autorów (pozycja [RW15]), znana jest struktura rozkładu prawdopodobieństwa maksymalizująca wielkość $\Delta^2 S$ – binarne spektrum z określonymi krotnościami. Dla tak określonego rozwiązania autor podaje rozwiązanie problemu optymalizacyjnego numerycznie\graficznie – drugi podpunkt na str. 89 oraz grafika 5.2 na stronie 90. Dodatkowo, autor podaje także optymalny stan czysty maksymalizujący produkcję koherencji zakładając, że jeden z jego parametrów pochodzi z numerycznej symulacji. Ostatecznym wnioskiem jest, że optymalny stan do produkcji koherencji nie jest stanem maksymalnie koherentnym i może on zostać określony za pomocą narzędzi numerycznych wypracowanych przez autora. Te same argumenty dotyczą także rekonstrukcji optymalnego hamiltonianu z równania (5.47). Oczywiście znajomość optymalnego stanu pozwala także na wyliczenie mocy generacji zasobu. Na zakończenie tego podrozdziału doktorant ilustruje swoje wyniki w szczególnym przypadku, gdy badany układ jest dwuwymiarowy. Pozwala to chociażby na dość ładną wizualizację na sferze Blocha hiperpowierzchni, na której znajduje się optymalny stan i jego orientacji w stosunku do optymalnego hamiltonianu. W przypadku badania czystości za operację generującą autor wybrał nieunitarne operatory Lindblada. W swoich studiach ograniczył się też jedynie do przypadku kubitowego. Pozwoliło to na zgrabne zapisanie mocy generującej destylowalną czystość w języku sfery Blocha oraz dość przejrzystego sformułowania problemu optymalizacyjnego. W wyniku zastosowania standardowych metod (mnożniki Lagrange’a) doktorant znajduje optymalny stan do generacji czystości. Podobnie jak to miało miejsce w przypadku koherencji, tutaj optymalny stan także zależy od parametru, który musi zostać wyznaczony graficznie/numerycznie. Wyniki tego podrozdziału są opatrzone dodatkowym uzasadnieniem, że dodanie układów pomocniczych nie zwiększa wydajności procedury produkcji zasobu. Bardzo podobną analizę autor przeprowadza również dla zasobu jakim jest splątanie pomiędzy dwoma laboratoriami reprodukcją wcześniej znane wyniki.

Swój doktorat autor krótko podsumowuje wyniki swoich badań zawarte w pracy oraz przedstawia dalsze możliwe kierunki badań. Doktorant zaznacza możliwość uogólnienia swoich badań na układy wyżej wymiarowe, inne modele szumu czy wreszcie dalszej analizy zasadności używania układów pomocniczych w celu polepszenia generacji splątania.

Uwagi merytoryczne i edytorskie

- Operator śladu raz jest pisany jako $\text{operatorname{Tr}}$, a raz zwykłą czcionką; operator $\text{diag}()$ jest także prezentowany jako zwykły tekst (str. 28). Uwaga ta dotyczy także innych operatorów występujących w rozprawie (Re, max, ślad częściowy, card itd.).
- Jako czytelnika może razić fakt niechlujnych, odręcznych rysunków zamieszczonych w rozprawie. W moim odczuciu, przy wsparciu współczesnych technologii mogły one zostać wykonane dużo bardziej starannie. Sugeruję ich poprawę przed ewentualnym zamieszczeniem doktoratu w bazie arXiv. Podobnie ma się sprawa z wykresami. W każdym z wykresów mamy inny motyw osi, współrzędnych lub kolorystykę. Rysunki ilustrujące wyniki na sferze Blocha mogłyby być bardziej przejrzyste.
- Uważam, że tekst w całej rozprawie został nieprawidłowo sformatowany. W szczególności mam tutaj na myśli, że zadruk strony jest za mały w stosunku do rozmiaru kartki. To w połączeniu z czcionką 11pkt, powoduje szybkie zmęczenie czytelnika. Jest to jednak krytyka wynikająca czystko z subiektywnej oceny i inni czytelnicy mogą się z nią nie zgodzić.
- W moim odczuciu autor mógł się pokusić o lepszy przegląd literatury w całej rozprawie, pozycjonując swoje osiągnięcia względem nowych wyników. Mam tutaj na myśli przede wszystkim brak cytowań nowych opracowań. Brak jakichkolwiek odniesień do prac dr hab. Katarzyny Siudzińskiej (UMK Toruń) czy Prof. Marka Wilde (The Cornell University). Uważam, że przegląd literatury nie został wykonany z należytą starannością. Bardzo chciałbym się dowiedzieć czym jest to spowodowane.
- Literówka pod równaniem (2.8). Jest 'off-diaonal', powinno być 'off-diagonal'.
- Literówka pod równaniem (2.10). Jest 'off diagonal', powinno być 'off-diagonal'.
- Równanie (2.8) mogło zostać lepiej wyedytowane. Podobnie ma się to miejsce z innymi dłuższymi wyrażeniami matematycznymi.
- W równaniu (3.44) powinno być $l_z^2(t)$ a nie $l_z^2(2)$.
- Operatory Krausa powinny spełniać relację typu $K_j^\dagger K_j = I$, a nie $K_j K_j^\dagger = I$ jak to jest napisane pod równaniem (1.3), (2.4). Doktorant zechce się ustosunkować do tego komentarza.
- Rysunek 1.1 – czym są $\Psi_C, \Phi_{AB}^\dagger$? Są to kety czy macierze gęstości? Obiekty te nie zostały nigdzie wcześniej zdefiniowane.
- Brak definicji stanów Bella w równaniach (1.8) -(1.11).
- Brak precyzyjnej definicji POVMów lub przynajmniej referencji.
- Brak wytłumaczenia czym są współczynniki Schmidta i jakie więzy spełniają (są wartościami własnymi, unikalne, nieujemne).
- Brak definicji zbioru F_s na str. 19.
- Stwierdzenie pomiędzy (1.26) a (1.27) mogłoby być zaprezentowane jako lemat.

- Brak indeksu n przy epsilon w równaniu (1.38).
- Brak referencji do data processing inequality.
- Pod równaniem (1.78), zamiast 'Kraus rank' powinno być r , które zostało zdefiniowane pod równaniem (1.28).
- Pojęcie śladu częściowego, jak i samego śladu nie jest zdefiniowane. Można uznać, że czytelnik sięgający po tego typu lekturę posiada odpowiedni zasób wiedzy technicznej, ale po co wtedy definiować inne podstawowe obiekty teorii (np. stany kwantowe)?
- Czym są górne wskaźniki w mieszance nad równaniem (2.2)?
- Brak definicji antykomutatora, komutatora.
- Dlaczego ślad w równaniu (2.49) musi być równy 0?
- Brak cytowania artykułu Horodeckich w kontekście kryterium PPT na stronie 54.
- Na jakiej podstawie autor wiąże optymalne zachowywanie kwantowych korelacji ze spełnieniem warunku CP z równością (komentarz pod równaniem (3.45))? Jaką miarę korelacji autor ma tutaj na myśli? Czy istnieje związek z tym jak 'daleko' jesteśmy od kryterium PPT dla badanego stanu a ilością zachowanych kwantowych korelacji (relacja monotoniczności)?
- Dlaczego autor wybiera do analizy quantum discrod w podrozdziale 3.4? Czego się możemy nauczyć analizując akurat tą miarę?
- Jaki był udział doktoranta w części eksperymentalnej pracy dyskutowanej w podrozdziale 3.5? Rozdział ten jest potraktowany bardzo pobieżnie, zarówno od strony teoretycznej jak i opisu samego eksperymentu. W mojej ocenie jego rozbudowa mogłaby znacząco podnieść jakość rozprawy. Brakuje porządnego wstępu dla niedoświadczonego czytelnika.
- Warto by było zilustrować podrozdział 4.1 dla większej ilości różnych możliwych parametrów.
- Czy autor może obronić zasadność użycia protokołu rozmycia w podrozdziale 4.2.1? Jest on wyraźnie gorszy od kwantowej korekcji błędów. Jest też niewiele wydajniejszy od braku jakiegokolwiek działania w zakresie ochrony przed szumem. Oczywiście jest to cenny wynik naukowy sam w sobie – znamy możliwości zaproponowanej procedury w przypadku studium konkretnego problemu.
- Brak definicji stanu μ w równaniu (4.61).
- Wyniki z rozdziałów 4.1.2 oraz 4.1.3 znacznie lepiej prezentowałyby się w formie lemat + dowód. Jest to również uwaga ogólna do pracy. Często, aby dowiedzieć się co jest wynikiem danego podrozdziału trzeba go w całości prześledzić, co może skutkować małą praktycznością napisanej rozprawy dla szerokiego grona czytelników. Autor ogólnie ma problem z wyborem swojego stylu pisanie pracy doktorskiej. Czasami widzimy strukturę twierdzenie + dowód, po czym musimy ścierpieć nierzadko długie rachunkowe wywody nie znając ich celu (nie dotyczy to całości rozprawy).
- Czy jest możliwe rozszerzenie wyników z podrozdziału 4.1.3 do szerszego zakresu parametrów? Jeśli nie, to dlaczego. Jeśli tak, to dlaczego taka analiza nie została przeprowadzona.
- Pierwszy akapit na stronie 80: Jest 'a t', powinno być 'at'.

- Na zakończenie podrozdziału 5.2 autor pisze, że następnie będzie rozważał moc generującą zasób dla koherencji, splątania i czystości. W rzeczywistości porządek jest inny: koherencje, czystość i splątanie.
- Myślę, że odwołania do równań w tekście powinny być w formie (xx.xx) – powinny być w nawiasach. W tym celu należy używać komendy `\eqref{}`, a nie `\ref{}`.
- Drugie zdanie w opisie rysunku 5.3 rozpoczyna się małą literą.
- W podrozdziale 5.4 brakuje wyjaśnienia czym są nieunitarne operatory Lindblada prowadzących do optymalnej produkcji zasobu.
- Jak autor rozumie hamiltonian oddziaływania pomiędzy dwoma laboratoriami? W przypadku, gdy Alicja i Bob są rozdzieleni przestrzennie oddziaływanie pomiędzy nimi potrzebuje skończonego czasu, aby dać mierzalny efekt. Z kolei prezentowana metoda zdaje się nie czuć ograniczeń związanych ze skończoną prędkością światła.
- Aby generować Nielokalną operację unitarną pomiędzy dwoma laboratoriami, Alicja i Bob powinni posiadać jakiś dostęp do dodatkowych zasobów (choćby klasyczna komunikacja). Czy autor może wyjaśnić w jaki sposób laboratoria generują Nielokalną dynamikę?
- Słabo zaznaczone jest rozgraniczenie, które części rozdziału są oryginalnymi osiągnięciami doktoranta, a które jedynie niezbędnym podsumowaniem aktualnego stanu wiedzy do dalszych studiów. Przykładem mogą być tutaj podrozdziały 3.1, 3.2 oraz początek podrozdziału 3.3.

Uwagi końcowe

Jako recenzent nie jestem w stanie stwierdzić, które wyniki prezentowane przez doktoranta są jego autorskimi osiągnięciami, a które zostały wypracowane przez współautorów. Na doktorat składają się dwie prace i jeden preprint umieszczony w bazie arXiv. W dwóch pierwszych pracach ([MWS⁺], [MSFAS24]) doktorant nie jest autorem wiodącym. Nie jest też na ostatniej pozycji, co mogłoby świadczyć o ewentualnym postawieniu hipotezy badawczej. Autor niestety ginie w gęszczy 7 współautorów, co może świadczyć o przyczynkowym wkładzie w wyniki naukowe zawarte w części dysertacji. Dopiero w trzeciej pracy ([SNS24]) mogę uznać, że wkład doktoranta jest wiodący. Oczywiście doktorat zawiera też nieopublikowane (także w bazie ArXiv) wyniki naukowe, jednak są one w znacznej mniejszości w stosunku do części napisanych na podstawie artykułów. Mam tutaj na myśli podrozdziały 4.1.2 oraz 4.1.3. Z tego co się orientuję doktorant nie jest autorem/współautorem żadnych innych prac naukowych, które nie wchodzą w zakres tematyczny rozprawy doktorskiej. Biorąc pod uwagę fakt możliwości prowadzenia badań w bardzo dobrej grupie badawczej na najlepszym uniwersytecie w kraju można odczuć pewien niedosyt. Niemniej jednak jestem świadom braku wymogu formalnego dotyczącego określenia wkładu doktoranta w powstanie konkretnych wyników naukowych i oceniania jest praca doktorska jako

całość. Jednak chciałbym tutaj zwrócić uwagę na ten fakt, który stanowi ogólny problem dość znacznej części prac doktorskich, gdzie często wyniki osiągnane są w dużych grupach badawczych.

Doktorat z pewnością stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Teza, którą doktorant dowodzi w swojej pracy jest wyraźnie wyartykułowana i czytelnik od razu jest w stanie stwierdzić ogólny kierunek badań autora (poza małymi wyjątkami opisanymi wyżej). Pomimo pewnych uwag krytycznych co do samej pracy, ogólne wrażenie jest jak najbardziej pozytywne. Uważam, że uzyskane wyniki pokazują odpowiednie przygotowanie teoretyczne kandydata do stopnia doktora oraz dowodzą umiejętności samodzielnego prowadzenia badań (praca [SNS24]), gdzie mgr Scalici jest wiodącym autorem).

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra Manfredi Scalici spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. Wnioskuje o przyjęcie rozprawy pt. *Protecting quantum resources from noise* przez Radę Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego oraz o dopuszczenie mgra Manfredi Scalici do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Dr hab. Michał Studziński, prof. UG