

dr hab. Łukasz Rudnicki, prof. UG

Kierownik Zespołu Kwantowych Układów Otwartych

Międzynarodowe Centrum

Teorii Technologii Kwantowych (ICTQT)

13.01.2025 r. Gdańsk

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Moeina Naseriego
pt. „Quantum Resources in Quantum Technologies”**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana w Centrum Optycznych Technologii Kwantowych UW. Promotorem rozprawy jest dr hab. Alexander Streltsov. Praca liczy 140 stron właściwych (154 wraz ze stronami tytułowymi) i podzielona jest na wstęp i 5 rozdziałów merytorycznych, opisujących poszczególne wyniki. Bibliografia zawiera 146 pozycji.

Tematyka pracy jest ciekawa, gdyż w pracy zgłębione zostały precyzyjnie postawione problemy badawcze dotyczące ewolucji unitarnej, algorytmów kwantowych i kwantowych zasobów. Trochę nietrafiony jest tytuł rozprawy, gdyż jest zbyt ogólny. Tytuł ani nie informuje o konkretnych celach pracy, ani sama praca nie pokrywa tego co obiecuje tytuł, bo do tego chyba potrzebna byłaby monografia licząca kilka tysięcy stron.

Zgodnie z moim zrozumieniem, deklarowanym celem pracy było badanie zasobów kwantowych w warstwie podstawowej teorii (np. określenie minimalnego czasu potrzebnego do wykonywania operacji kwantowych) i przeniesienie tych odkryć w obszar praktycznych algorytmów kwantowych. Uważam, że udało się zarówno zrealizować cel badań podstawowych (rozdziały 2, 3 i 4), jak i skutecznie prowadzić badania bardziej praktyczne (rozdziały 4, 5 i 6). Z drugiej strony uważam, że zabrakło czytelnego połączenia pomiędzy oboma obszarami, tzn. trudno było mi dojść do wniosku, iż np. ciekawe wyniki z rozdziałów 2 lub 3 miały istotne znaczenie w rozdziałach 4, 5 i 6. Dla przykładu, rozdział 4 w dużym stopniu bazuje na pojęciu „*robustness of coherence*”, oznaczonym literą „R”, podczas gdy symbol oznaczony tą samą literą i występujący jako temat rozdziału 3 jest zupełnie inną wielkością opisującą transformację kwantowej koherencji.

Na tym wciąż ogólnym etapie recenzji chciałbym pochwalić doktoranta także za szczerość w kwestii jego wkładu w powstanie poszczególnych rozdziałów. Pomimo tego, że zdecydowanie bardziej cenię sobie klarowność wywodów w rozdziałach, co do których autor deklaruje, iż nie był wiodącym edytorem (w szczególności mam na myśli rozdział 3), jasne postawienie sprawy przez doktoranta jest dużo lepsze, niż pozostawianie domysłów. Rozumiem, że doktorant uczy się od bardziej doświadczonych kolegów i korzysta na tym, że jest współautorem prac o bardzo dobrej jakości prezentowania informacji.

W telegraficznym skrócie, rozdział 2 ciekawie uogólnia pojęcie „*quantum speed limit*” na transformacje całych baz w przestrzeni skończonej wymiarowej, co z kolei łączy się z tworzeniem/niszczeniem kwantowej koherencji (nie mylić z optyczną koherencją, o której autor mógł we wstępie wspomnieć). Rozdział 3 pogłębia zagadnienie tworzenia koherencji w trakcie ewolucji unitarnej, podczas gdy rozdziały 4-6 badają algorytmy kwantowe z wykorzystaniem koherencji, lub bez wyraźnego odniesienia się do tego pojęcia. Merytoryczną treść każdego z rozdziałów oceniam wysoko. Na szczególną uwagę zasługuje także wstęp do rozdziału 5 z celnie opisaną motywacją (choć mało związaną z resztą pracy) i starannie zaznaczonymi ograniczeniami własnych rezultatów. Zabrakło jedynie precyzji w opisie „*speedup*” deklarowanego przez algorytm wyznaczania śladu.

Słabością pracy jest jej podsumowanie zawarte w rozdziale „Conclusion”, które dosłownie brzmi jak streszczenie wszystkich rozdziałów, jeden po drugim. Brak jest autorskiej syntezy, spojrzenia holistycznego i analizy krytycznej całości „projektu”. Totalny brak kierunków kontynuacji badań. Ostatni paragraf absolutnie nie wypełnia tej luki.

Praca jest ogólnie rzecz ujmując dobra pod względem edycyjnym. Podoba mi się forma prowadzenia wywodu, która z reguły jest całkiem precyzyjna i prowadzi do celu. Są oczywiście rozdziały lepsze i gorsze pod tym względem, o czym już wspominałem. Jedynym zastrzeżeniem edycyjnym o charakterze ogólnym jest nadużywanie twierdzeń. Na miejscu autora jako twierdzenia przedstawiałbym jedynie najważniejsze (zdaniem autora) wyniki, a pozostałe rezultaty nazywał skromniej.

Mam też dodatkową edycyjną uwagę do autora, która nie stanowi krytyki formalnej (jak rozumiem nie ma ku temu prawnego powodu). Niemniej jednak to na co zwrócę uwagę, zasłużenie bądź nie (tego nie da się stwierdzić), może zmniejszać subiektywną ocenę wkładu autora w rozprawę. W związku z powyższym, sugeruję autorowi uważanie na tego typu kwestie w przyszłości. Tylko, bądź aż, 6 razy występuje w pracy dawniej praktycznie niespotykana konstrukcja „*delve into*”. Choć chyba nie ma jeszcze w oficjalnej literaturze lingwistycznej ostatecznie opublikowanych danych, w formie obiegowej (np. arXiv:2406.07016) konstrukcja ta jest wyraźnym sygnałem stosowania chata GPT w procesie pisania tekstu. Lektura „*Conclusion*” wzmacnia to uczucie.

W dalszej części pozwolę sobie przejść do bardziej szczegółowych uwag krytycznych z dodatkiem pozytywnych komentarzy:

- Autor przedstawia Twierdzenie 1.5 bez żadnych szczegółów, podczas gdy wynik nie wydaje się trywialny. Jak powyżej pozostaje też wątpliwość, czy cytowany wynik należy w rozprawie nazywać twierdzeniem.
- Powyżej 1.34 autor cytuje Campaioliego. Szkoda, że nie została wspomniana jego pełna rozprawa doktorska [arXiv:2004.08384].
- Podrozdział 1.6.3 czyta się tak, jakby brakowało w nim myśli przewodniej i morału. Formą przypomina streszczenia tworzone przez sztuczną inteligencję.
- Twierdzenie 2.1 w obecnej formie powinno pojawić się po równaniu 2.6. Chyba, że zachodzi ono dla dowolnego „*notion of energy*” zdefiniowanego powyżej twierdzenia 2.1.
- Twierdzenie 2.2 nie jest trywialne, podczas gdy jego dowód jest bardzo lakoniczny. W zasadzie dowód jest mocno niepełny co najlepiej oddaje fraza „*it is straightforward to see*”. Autor jest proszony o przedstawienie **pełnego i klarownego dowodu podczas obrony**. Czy dowód wymaga założenia E_0 większe bądź równe 0?
- Wyniki rozdziału 2 czasami co linijkę odwołują się do pracy [NMB+24]. Odnoszę wrażenie, że to za często.
- W twierdzeniu 2.4 Hamiltonian, który wysyca ograniczenie jest stanem czystym. U Campaioliego o ile pamiętam wysycający Hamiltonian był rzędu 2. Proszę o wyjaśnienie skąd taka różnica. Ponieważ cały rozdział 2 mocno kuleje w kontekście prezentacji wyników i ich dowodów, trudno jest samodzielnie (na bazie lektury rozprawy) znaleźć odpowiedź na pytania typu powyższego. Dla kontrastu, jak już wspominałem chcę podkreślić, iż problem rozważany w rozdziale 2.3 uważam za bardzo ciekawy.
- Mam wątpliwości odnośnie prawdziwości równania 2.20 biorąc pod uwagę zdanie, które je wprowadza. Czy nie powinny pojawić się dwie dodatkowe dowolne macierze permutacji po obu stronach obecnego wyrażenia?
- W sformułowaniu lematu 2.2 powinno zostać sprecyzowane, że startujemy z bazy obliczeniowej. Do tego słowo „*class*” powinno występować w liczbie mnogiej.

- Co ważniejsze, nie rozumiem dlaczego podano dwie bazy 2.37 i 2.38. Przecież to jest jedna i ta sama baza, w której wektory „0” i „2” zostały zamienione miejscami. Nie rozumiem też dowodu. Równanie 2.39 zależy od 6 faz, podczas gdy 2.40 zadaje 3 więzy. Powinno to prowadzić do rozwiązań zależnych od 3 faz. Dlaczego więc rozwiązania 2.41 i 2.42 zależą tylko od 2 faz?
Proszę o wyjaśnienie podczas obrony czy otrzymane rozwiązanie jest ogólne.
- Autor często zakłada rzeczy „*without loss of generality*”. Np. dzieje się tak poniżej 2.48. Czy położenie ujemnego E_0 t na pewno nie zatracą ogólności? Także powyżej 2.90 i w kilku innych miejscach. Prośba o sprawdzenie wszystkich wystąpień tej frazy i argumenty dlaczego założenia nie osłabiają ogólności.
- Czy w 2.48 nie powinno być „*and*” zamiast „*or*”? A jeśli tak, to po co rozważać drugi przypadek w 2.51? Wydaje się, że 2.49 już wynika z założenia obu przypadków w 2.48.
- Pytanie do twierdzenia 2.7: skoro jak widać obie omawiane bazy różni jedynie permutacja, to dlaczego otrzymujemy wynik, że dla jednej bazy nierówność się wysyca, a dla drugiej nie?
- Jest dość mylące, aby nazywać „E” energią średnią z uwagi na odjęcie E_0 . To prowadzi do potencjalnych nieporozumień jak w przypadku poniżej równania 2.73, gdzie $E=1$, podczas gdy średnia energia to 0. Czytelnik musi pamiętać o nieoczywistym odjęciu $E_0=-1$.
- Czy wyniki nt. koherencji mają zdaniem autora związek z wynikami z rozdziału III pracy [PRA 92, 032109 (2015)]?
- Rozdział 3 jest napisany bardzo klarownie w porównaniu z rozdziałem 2. Przykładem jest bardzo przejrzysty dowód lematu 3.2. To samo dotyczy się dalszych rozdziałów rozprawy.

Uwagi edycyjne:

- W streszczeniu po polsku pojawiają się „systemy” zamiast układów, czy też „ustalamy” zamiast „wyprowadzamy”.
- Na pierwszej stronie wstępu publikacja [HHHH09a] wystaje poza obszar tekstu, tworząc wrażenie niestaranności.
- Zdanie w paragrafie powyżej równania 1.33 nie brzmi gramatycznie.
- W podrozdziale 1.6.2 słowo „quantum” bez powodu napisane jest z dużej litery.
- Powyżej 2.2 zamiast „*non-interacting Hamiltonian*” mamy „*non-interactive*”.
- Autor używa fraz typu „*let’s*” nie pasujących do pisanego języka akademickiego.
- Występują błędy typograficzne w równaniu 2.49.
- W równaniu 3.2 brakuje pochodnej „d” w liczniku.
- W dowodzie proposition 3.1 „*let*” rozpoczynające zdanie jest z małej litery. Warto też przypomnieć czytelnikowi co oznacza delta.
- Co oznacza ρ w lemacie 3.2?
- Występują omyłki językowe we wstępie do rozdziału 5, np.: „*coherently control unitary operation are applied*”, „*apart when*”, „*is the only measured*”.
- W bibliografii powtarzają się niektóre pozycje, np. po dwa razy występuje [BCP14] i [HHHH09]. Występuje też niekonsekwencja odnośnie podawania pełnych imion autorów (swoją drogą czy potrzebnie?), np. w [BL01]. Przy długiej liście autorów warto też było sięgnąć po „et al.”
- Szczególnie doceniam rozpoczęcie bibliografii od pracy Johanna Abergala!

Podsumowanie

Do najmocniejszych stron pracy zaliczam jej przekrojowość i ciekawą tematykę, a także solidność zarówno wyników jak i ich prezentacji (mowa o rozdziałach 3-6). Do tego, na korzyść pracy przemawia ujmująca szczerłość doktoranta odnośnie pozytywnego wkładu jego współpracowników w otrzymane wyniki i prezentację.

Za trochę słabe w rozprawie uważam to, że zabrakło głębszej dyskusji otrzymanych wyników w podsumowaniu, które jest najsłabszym rozdziałem ogólnym pracy. Najsłabszy pod względem prezentacyjnym jest rozdział 2. Liczne skróty w dowodach powodują szereg wątpliwości, opisanych powyżej. Niemniej jednak wątpliwości nie mają charakteru kluczowego i wierzę, że mogą zostać rozwiązane podczas obrony.

Rozprawa doktorska pokazuje dogłębną wiedzę autora w tematyce informacji kwantowej. Uchwała Senatu UW z dnia 29 czerwca 2022 r. w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim dopomina się jednak odniesienia do dyscypliny, którą są nauki fizyczne. Słowo „fizyka” występuje jedynie w części tytułowej, w bibliografii, podziękowaniach i pierwszych paragrafach rozdziału 1.1. Całość pracy nie odnosi się zauważalnie do innych działów fizyki, niż matematyczna informacja kwantowa. Mimo to na bazie lektury żywię przekonanie, że autor posiada ogólną wiedzę z fizyki. Rozprawa potwierdza umiejętność kandydata do samodzielnego prowadzenia badań, z zastrzeżeniem uwag samego autora odnośnie czasem istotnego udziału innych współautorów w otrzymane wyniki. W mojej ocenie samoświadomość co do faktycznego wkładu pozostałych współpracowników w proces pracy badawczej świadczy na korzyść kandydata i dowodzi jego umiejętności do samodzielnej pracy badawczej. Wreszcie, przedmiotem rozprawy doktorskiej niewątpliwie jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Podsumowując powyższe, pomimo drobnych uwag krytycznych wyrażonych w recenzji stwierdzam, iż całość spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Art. 187. Ustawy (**konkluzja pozytywna**).

Z wyrazami szacunku