

Warszawa, 28 maja 2024 r.

dr hab. Piotr Deuar, prof. IF PAN
Oddział Fizyki Teoretycznej
Instytut Fizyki PAN
Al Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
deuar@ifpan.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr. **Manfredi Scalici**

p.t.:

Protecting quantum resources from noise

złożonej do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne
na Uniwersytecie Warszawskim

1. Ogólny opis

Rozprawa doktorska mgr Manfredi Scalici dotyczy, w swojej części badawczej, wyprowadzenia kilku ciekawych wyników dotyczących teorii zasobów kwantowych, w szczególności koherencji, czystości stanów kwantowych i splątania. Są to:

- Rozdział 3 -- dotyczy relacji między tym czy środowisko oddziałuje na układ jak proces Markowa lub nie - a możliwością długotrwałego przetrwania zasobu. Na koniec podany jest przykład, oraz przytoczone są wyniki eksperymentu który wykazał praktyczne zastosowanie przedstawionych wyników teoretycznych.
- Rozdział 4 -- dotyczy tzw. rozcieńczania stanów kwantowych, a w szczególności ciekawego i nowatorskiego w mojej opinii pytania czy można w ten sposób lepiej zachować zasoby przed dekoherencją.
- Rozdział 5 -- analizuje kwestię możliwości rozmnożenia zasobów kwantowych zawartych we wstępnym zestawie kilku kopii stanu. W szczególności daje pewne odpowiedzi na pytanie o optymalne stany do takiego rozmnażania zasobów.

Każdy z powyższych rozdziałów skorelowany jest silnie z pracami opublikowanymi w dobrych czasopismach naukowych (*New Journal of Physics*, *Physical Review A*) lub (na razie) arXiv w przypadku rozdziału 5.

Ogólnie mówiąc każdy z badawczych rozdziałów zawiera część bardzo matematyczną, gdzie pewne twierdzenia są wyprowadzane (lub ich wyprowadzenie opisane), ale w każdym z ważniejszych przypadków Autor podaje potem szczegółowy opis konkretnego przypadku. Te konkretne przykłady są bardzo ważnym i pozytywnym elementem pracy, bez którego łatwo byłoby się zagubić czytelnikom którzy nie są mistrzami analizy matematycznej.

Rozprawa zawiera też dwa rozdziały ogólnego wstępu teoretycznego który wprowadza czytelnika w zagadnienia, notację, i podstawowe operacje w dziedzinie. Na końcu rozprawy znajdujemy też krótkie podsumowanie oraz materię końcową z kilkoma stronami wyprowadzenia niektórych matematycznych elementów użytych w głównych rozdziałach. Przedstawiona praca liczy 118 stron, z czego 34 strony ogólnego wstępu oraz 54 stron rozdziałów badawczych. Nie jest to bardzo długa rozprawa ale jest też dość silnie matematyczna, a ta cecha naturalnie jest zazwyczaj skorelowana z krótszymi rozprawami. Bilans między wstępem a częścią badawczą uważam za dobry.

2. Badania i wyniki naukowe -- rozdziały 3-6

Badawcza część rozprawy napisana jest dość matematycznie (co jest normalne w tym temacie), ale ogólnie przystępnie jak na temat. Jak już pisałem, wysoce oceniam dążenie do zawsze podania

konkretnego dokładnie przepracowanego przykładu obrazującego bardziej ogólne stwierdzenia wyprowadzone w pierwszych częściach rozdziałów.

Główne wyniki przedstawione w rozprawie uważam za naukowo ciekawe. Między innymi:

- Wskazanie warunków w których (nie Markowskie) sprzężenie ze środowiskiem może pozwolić na zachowanie części zasobów kwantowych (koherencji, splątania) nawet w nieskończonym czasie (Rozdział 3).
- Udowodnienie, że rozcieńczenie zasobów kwantowych może skutkować tym, że lepiej opierają się degradacji przez dekoherencję. Kilka rodzajów zasobów - koherencja, czystość kwantowa, splątanie - zachowuje się też nieco inaczej. Ciekawym wynikiem pasującym dobrze do powyższego też jest to, że mniej czyste stany zyskują więcej z takiej procedury. Ważnym wynikiem wydaje się też wskazanie w podrozdziałach 4.1.2-4.1.3, że rozcieńczenie na dwa qubity jest niewystarczające do uzyskania efektu (Rozdział 4).
- Analiza procedury rozmnażania zasobów kwantowych, w szczególności wykazanie, że najsprawniej to działa na stanach które nie maksymalizują ilości zasobu na qubita, oraz pokazanie konstruktywnego sposobu wyprowadzenia optymalnych stanów i procesów (Rozdział 5).

Duże wrażenie robi fakt już istniejącego eksperymentalnego dowodu korzystnej dynamiki nie-Markowskiej o której mowa w rozdziale.

Trudno mi ocenić jak szerokie echo w środowisku będą miały przedstawione wyniki. Nie są to może wyniki na poziomie burzącym paradygmaty lub siejące poruszenie w środowisku, ale wydają się ciekawe, solidne, i użyteczne dla przyszłych badań. Publikacja związana z rozdziałem 3 ma na razie 5 cytowań w Web o Science, a rozdział 4, opublikowany w lutym b.r. ma jedno.

Rozdziały badawcze czyta się całkiem dobrze, cały opis wskazuje na to, że Autor dobrze i dogłębnie rozumie zagadnienia. Liczba drobnych usterek jest bardzo mała - zaraz wyliczę je w kilku zdaniach poniżej: mogę wspomnieć o nagłym pojawieniu się nieznannej funkcji lub czynnika h na str 73-74 (może to jakiś branżowy żargon?); błędnej nazwie tabeli 4.2.1 na str 75, czy niezbyt łatwym do czytania podrozdziale 5.3. (Tu trochę czytelnik gubi się w kwestii jakie znaczenie mają różne wartości przytaczane po kolei. Jest ich dużo, można by po drodze lepiej tłumaczyć znaczenie wyników kolejnych etapów w tym wyprowadzeniu.) Należałoby też zacytować artykuły naukowe w podpisach wykresów które z nich pochodzą (3.5, 3.6, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6), nie tylko na początku rozdziału. Można by też zamienić kolokwializm "gonna" na str 103.

Natomiast -- poważną słabością rozprawy jest brak jasnego określenia które elementy pracy badawczej były wykonane przez Kandydata a które przez współpracowników, współautorów publikacji stowarzyszonych z rozdziałami 3-4. Jak szeroki i głęboki był jego wkład? Autor rozprawy był środkowym autorem w publikacjach związanych z rozdziałami 3 i 4 (co zwyczajowo związane jest z mniejszościowym wkładem do danego artykułu). Natomiast treść artykułów pokrywa się dość dobrze z treścią rozdziałów obecnej pracy doktorskiej, większość wykresów też jest wspólna. Nasuwa się więc pytanie -- co robiła cała reszta współautorów artykułów jak większość jest opisana w pracy doktorskiej? W przypadku rozdziału 3 było 8 współautorów a Kandydat jest na 3 miejscu listy. Możliwe, że większość współautorów zajmowała się eksperymentalną częścią badań, ale słuszne byłoby to opisać. W przypadku rozdziału czwartego, mamy 4 współautorów w stowarzyszonej pracy, Kandydat jako drugi, i wyniki się też w znacznej części pokrywają między rozprawą a artykułem. Więc tu również słuszne byłoby opisać jaki wkład w wyniki miał Kandydat a jaki inni współautorzy. Zresztą ten brak rozróżnienia pracy doktorskiej od artykułów i wyników wspólnych od wyników doktoranta jest nagminnym problemem w ostatnich latach w pracach doktorskich. Trudno mi zrozumieć czemu promotorzy nie zwracają na to

uwagi i nie korygują. Przez taką niefrasobliwość w wyrażaniu się w pracy nasuwa się pytanie ile z tego co jest opisane w pracy jest faktycznie pracą kandydata.

Kandydat był pierwszym autorem pracy związanej z rozdziałem 5, zresztą znaczna część tego rozdziału nie jest w artykule na arXiv. Stąd nie mam podobnego rodzaju wątpliwości co do badań przedstawionych w rozdziale 5.

W sprawie lekko podobnej dodam jeszcze, że trudno mi było zrozumieć czy wyniki opisane w podrozdziale 3.1 są nowym wynikiem badawczym czy dalszą częścią wprowadzenia która opisuje sprawy znane już wcześniej. Przydało by się jasne stwierdzenie na ten temat. Rzecz w tym, że podobna forma przedstawiania i wykazywania propozycji matematycznych stosowana jest zarówno w rozdziałach opisowych (1-2) jak i tu. Stąd trudność w stwierdzeniu czy dowód *Proposition 1* z rozdziału 3.1 jest wynikiem nowym i oryginalnym czy ma formę wstępu do zagadnienia. Wynik wydaje się dość naturalny i nie dziwiłbym się jeśli już został dawno udowodniony.

Podsumowując tą część recenzji -- badania są dobre naukowo i są nowatorskie z tego co widzę, lecz nie określono zbyt jasno jaki był wkład Kandydata a jaki współautorów artykułów w rozdziały 3-4. Powoduje to, że trochę jest trudno jasno określić stopień w którym rozdziały te wykazują umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. Dobrze że jest rozdział 5 co do którego nie mam takich wątpliwości. Byłoby wskazane aby Kandydat odniósł się do tej kwestii na obronie, lub w trakcie poprawy pracy jeśli taka zostanie wskazana przez komisję.

3. Część wstępna rozprawy -- rozdziały 1-2

Rozdziały wstępne mają na celu wprowadzenie czytelnika oraz zaprezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie. Jako wprowadzenie do tematu i opisanie głównych pojęć oraz notacji używanych w części badawczej, rozdziały te sprawdzają się bardzo dobrze. Jeśli chodzi o zaprezentowanie ogólnej wiedzy kandydata w dziedzinie robią to dobrze jeśli chodzi o teorię zasobów kwantowych i procesy Markowa (lub nie Markowa). Natomiast czuję tu niedosyt szerszego omówienia dziedziny z autorskiej oryginalnej perspektywy Kandydata.

Styl opisu jest dobry, tu też jest mało usterek. Właściwie mógłbym wspomnieć tylko o str 26 -- co to są $H_{\min}$, $H_{\max}$, i "divergencies"? oraz że na str. 45 jest niejasne w (2.55) co to jest $\gamma_j(t)$? Czy chodzi tu o γ z wyrażenia (2.35) z przeskoczeniem tekstu pomiędzy? Maksymalizacja $-\gamma$ i 0 w (2.55) jest też niezbyt zgodna z twierdzeniem tuż za (2.52), że $\gamma_m \geq 0$.

Chciałbym wspomnieć, że ręcznie rysowane figury (których jest wiele) są pozytywnym i fantazyjnym elementem, który miło widzieć. Popieram. Pasują dobrze do silnie matematycznej natury całej pracy.

4. Podsumowanie i część końcowa.

Rozdział 6 - "Podsumowanie i wgląd w przyszłość" właściwie jest głównie podsumowaniem, choć sprawnym. Trochę brakowało mi jakiejś szerszej syntezy wyników, szczególnie że niektóre elementy powtarzają się -- na przykład fakt, że właściwie wszystkie procedury i optymalizacje omawiane w pracy najlepiej sprawują się dla mieszanych i zaszumionych stanów. Przydałoby się też jakieś omówienie, chociażby jakościowe, czułości wyników na imperfekcję układu. Większość wyników dotyczy przypadku asymptotycznie dużej liczby kopii stanu (podczas gdy w praktyce typowo mamy najwyżej kilka kopii jednocześnie), a niektóre są bardzo blisko granicy użyteczności (na przykład drobna różnica w Fig. 4.5) więc zapewne efekt jest czuły na obecność niedoskonałości wykonania procesów, Hamiltonianu, i preparacji stanu początkowego.

5. Pytania dla Kandydata

Jest kilka pytań i spraw na które chętnie usłyszałbym odpowiedzi Kandydata podczas obrony, aby głębiej rozpoznać uwarunkowania wyników naukowych przedstawionych w rozprawie a zarazem jego wiedzę o temacie.

- O pierwszej sprawie już wspomniałem - prosiłbym o określenie jaki wkład w wyniki miał Kandydat a jaki współautorzy prac które odpowiadają rozdziałom 3 i 4.
- Także - jest pytanie czy *Proposition 1* z podrozdziału 3.1 jest wynikiem nowym, czy przedtem znanym? Odpowiedź nie wpływa na moją ocenę nowatorskości całokształtu, jest wiele innych nowych wyników, ale dobrze by było to zrozumieć.
- Ciekawym wynikiem jest, że na str 67 i w wykresie 4.3 granica $q \rightarrow 1/2$ jest optymalna. To oznacza, z tego co rozumiem, rozcieńczenie na prawie nieskończoną liczbę podukładów z prawie znikającą koherencją. Faktyczne zastosowanie tej granicy wydaje się wymagać też nieskończenie dobrej precyzji w sterowaniu procesami aby tą koherencję odzyskać. Czy Kandydat ma może przemyślenia wokół tego tematu?
- W podrozdziałach 4.1.2-3 mamy dość ważny wynik, że $N=2$ nie wystarcza by uzyskać użytecznych rzeczy z rozcieńczenia. Wiemy z drugiej strony, że w granicy $N \gg 1$ pożytek musi się pojawiać. Co się zatem odbywa inaczej w ciągu rozumowania z rozdziału 4.1.3 kiedy mamy więcej qubitów niż dwa ($N > 2$).
- Warto byłoby zrozumieć z jakiego powodu rozcieńczenie jest pomocne. Oraz czemu jak w konkluzji "wydaje się, że im mniej zasobu w rozcieńczanym stanie, tym lepszy efekt ochrony, a w dodatku dla koherencji efekt jest lepszy dla stanów mieszanych niż dla stanów czystych". Czy są jakieś pomysły co do tego jaki jest mechanizm? Szczególnie, że pozytywny efekt potrafi być bardzo mały jak na przykład widać na wykresie 4.5.
- Rozdział 5 -- wygląda na to, że dyskusja toczy się wokół pomnożenia istniejących zasobów. A jak z wykreowaniem zasobu z niczego? Czy to po prostu jest to mniej optymalne dlatego nie występuje w dyskursie?
- Taka sama optymalna funkcja F wychodzi zarówno dla generacji koherencji jaki i splątania. Czy Autor ma może jakieś spostrzeżenia wokół tej zbieżności?

6. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana magistra Manfredi Scalici zawiera ciekawe wyniki w tematyce kwantowej informacji, a bardziej szczegółowo w tematyce teorii zasobów kwantowych. Wyniki te tworzą pewien wspólny powiązany temat. Wchodzą one do kilku publikacji jako jako znaczące elementy (dwie z tych publikacji jest już opublikowanych, trzecia jest na razie na etapie arXiv. Ostatnia z arXiv ma kandydata jako pierwszego autora. Nie wątpię, że zostanie ona opublikowana w dobrym czasopiśmie naukowym).

W podsumowaniu stwierdzam że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia w wystarczającym stopniu warunki określone w Ustawie oraz w §5 ust. 1-2 Zasad postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Warszawskim. Ogólna konkluzja jest pozytywna. Rozprawa prezentuje wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr-a Manfredi Scalici do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

dr hab. Piotr Deuar