

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr **Pawła Mazurka**  
pt. *On chosen applications of quantum correlations  
in the presence of external noise*

Praca doktorska pana mgr Pawła Mazurka, złożona w roku 2015 na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego, dotyczy teorii przetwarzania informacji kwantowej oraz układów fizycznych użytecznych w realizacji protokołów kwantowych. Autor bada układy stosowane w procesach komunikacji kwantowej, analizuje kody kwantowej korekcji błędów oraz studiuje zagadnienia dekoherencji w realistycznych modelach kropek kwantowych oddziałujących z otoczeniem spinowym. Wybrana tematyka należy do popularnego obecnie kierunku badań mechaniki kwantowej pod kątem praktycznych zastosowań w teorii informacji kwantowej.

Recenzowana praca doktorska bazuje na czterech artykułach opublikowanych już w wiodących czasopismach międzynarodowych (dwie prace w *Physical Review A*, jedna w *Scientific Reports* i jedna w *EuroPhysics Letters*). W trzech przypadkach doktorant jest pierwszym autorem publikacji, co pozwala przypuszczać, że jego rola w przygotowaniu pracy była decydująca.

Na rozprawę doktorską składa się jej 18 stronicowe streszczenie, powtórzone następnie w języku angielskim oraz spis literatury przedmiotu. Zasadniczą część rozprawy stanowią kopie czterech publikacji, których współautorem jest pan Paweł Mazurek. W pierwszej części streszczenia rozprawy autor przedstawia krótki wstęp do uprawianej tematyki badawczej oraz formułuje jasno cel pracy. Następnie szkicuje pokrótce uzyskane wyniki omawiając dość szczegółowo każdą publikację.

Pierwsza część rozprawy dotyczy teorii komunikacji kwantowej przy wykorzystaniu technik kwantowej korekcji błędów. Kluczowym wynikiem rozprawy jest wykazanie możliwości komunikacji kwantowej w dwuwymiarowych sieciach kwantowych. Ponadto zasygnalizowana jest możliwość komunikacji w sieci trójwymiarowej. Istotnym wykorzystywanym narzędziem jest izomorfizm pomiędzy przechowaniem informacji kwantowej w sieci o wymiarze  $d$ , a jej przesyłaniem w sieci o wymiarze podwyższonym,  $d+1$ . Poprawność zaproponowanego schematu komunikacji jest wykazana poprzez uzyskanie dolnego oszacowania na wierność (ang. *fidelity*) pamięci kwantowych przy założeniu obecności lokalnego szumu - realistycznego oddziaływania pamięci z otoczeniem podczas

przechowywania informacji kwantowej - oraz ograniczonej wierności opisującej procedury kodowania i odkodowywania stanu kwantowego.

Bardzo ciekawe wyniki rozprawy dotyczą techniki kwantowej korekcji błędów opartej na kodach stabilizatorowych. Przedstawiono także algorytm korekcji błędów fazowych. Wykorzystując analogię pomiędzy przestrzennym oraz czasowym wymiarem przestrzeni, w której rozpatrywane są protokoły kwantowe, wykazano na związek pomiędzy zagadnieniem perkolacji splątania kwantowego w sieciach przestrzennych a komunikacją kwantową, czyli przesyłaniem informacji kwantowej w kierunku czasowym i przestrzennym. Autorzy pracy opublikowanej w *Scientific Reports* w roku 2015 uogólniają procedury zakodowania nieznanego stanu kwantowego w kod Kitajewa na wszystkie kody topologiczne klasy Calderbank-Steane-Shor. Wykorzystanie procedur korekcji błędów ograniczających negatywne efekty oddziaływania z otoczeniem pozwala na bardziej optymistyczne prognozowanie przyszłych zastosowań praktycznych kwantowej komunikacji.

Druga część rozprawy, bazowana na kolejnych dwóch publikacjach, dotyczy dynamiki układu dwóch kubitów oddziałujących z otoczeniem spinowym. Układy takie można badać doświadczalnie w oparciu o spinowe kropki kwantowe zrealizowane w arsenku galu. Autor analizuje wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na splątanie kwantowe w takim układzie. Wykorzystując miarę splątania zwaną zbieżnością (ang. *concurrence*), łatwo wyliczalną dla dowolnego stanu mieszanego układu dwóch kubitów, pan Mazurek bada ewolucję splątania w czasie pod wpływem dekoherencji związanej z oddziaływaniem nadsubtelnym. Przyjmując realistyczne parametry modelowego układu, odpowiadające własnościom konkretnego doświadczenia z kropkami kwantowymi realizowanymi w arsenku galu, wykazuje istnienie efektu „nagłej śmierci kwantowego splątania” i bada zależność czasu całkowitego zaniku splątania od natężenia pola magnetycznego. Warto podkreślić, że ta zależność nie ma charakteru monotonicznego, a czas zaniku splątania w funkcji pola wykazuje charakterystyczne oscylacje. Wydaje się, że okres obserwowanych oscylacji może być powiązany z parametrami badanego układu i jego energiami własnymi, lecz w rozprawie nie znalazłem dyskusji tego zagadnienia.

W kolejnej publikacji studiowane jest pokrewne zagadnienie ewolucji w układzie dwóch kubitów korelacji pomiędzy oboma podukładami mierzonych dysonansem geometrycznym (ang. *geometric discord*). Autorzy artykułu pokazują, że zanik dysonansu charakteryzuje się brakiem oscylacji, lecz wykazuje odrodzenie korelacji obserwowane dla dostatecznie długiego czasu ewolucji. Inna ciekawą obserwacją poczynioną w tej pracy jest

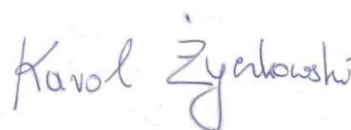
stwierdzenie przypadków ewolucji, dla których zależność dysonansu od czasu nie jest różniczkowalna.

Tekst streszczenia rozprawy zakończony jest jednostronicowym przedstawieniem otwartych problemów i nakreśleniem kierunków dalszych badań. Jednakże ta część rozprawy potraktowana jest dość zdawkowo, a czytelnik nie otrzymuje pełniejszej dyskusji uzyskanych wyników oraz otwartych problemów badawczych.

Streszczenie pracy przygotowano dość starannie, a redakcja tego krótkiego tekstu nie budzi wielu zastrzeżeń. Tekst napisany zarówno w języku polskim jak i angielskim jest w pełni zrozumiały, a do nielicznych niedociągnięć edytorskich można zaliczyć jedynie drobne usterki stylistyczne. Przykładowo wyrażenie „ilość elementów”  $|G(S)|$  - patrz str. 14 - winno brzmieć „liczba elementów”. Wybór odnośników cytowanych w streszczeniu liczy 42 pozycje i pokazuje, że autor poznał co najmniej część bardzo bogatej literatury przedmiotu. Oczywiście literatura cytowana w czterech załączonych publikacjach jest znacznie bogatsza, więc szkoda, że przegląd literatury uwzględniony w streszczeniu rozprawy nie jest pełniejszy.

Recenzowana rozprawa doktorska oparta jest o cztery interesujące publikacje, których wartość merytoryczną można ocenić wysoko. Jednakże średnia liczba współautorów publikacji składających się na rozprawę przekracza cztery, a recenzentowi rozprawy nie jest łatwo zorientować się, które wyniki zostały bezpośrednio otrzymane przez doktoranta. Żadna wersja językowa streszczenia rozprawy nie dostarcza czytelnikowi istotnych wskazówek na ten temat. Zamiast pochylać się nad trudnościami potencjalnego czytelnika nie władającego biegle językiem polskim i dołączać tłumaczenie streszczenia rozprawy na język angielski, można było istotnie poszerzyć polską wersję tekstu, szczegółowo przedstawiając osiągnięcia własne doktoranta oraz zamieszczając te jego oryginalne wyniki, które nie zmieściły się w żadnym opublikowanym już artykule.

W podsumowaniu stwierdzam, że wyniki przedstawione w rozprawie stanowią wkład w teorię układów kwantowych oddziałujących z otoczeniem oraz jej zastosowania w przetwarzaniu informacji kwantowej. Sformułowany cel pracy – analiza zastosowań korelacji kwantowych w kwantowej komunikacji – został osiągnięty. Moim zdaniem recenzowana praca **mgr Pawła Mazurka** spełnia wymogi stawiane dysertacjom doktorskim, więc wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Kraków, 1 grudnia 2015

Prof. dr hab. Karol Życzkowski