



Dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
e-mail: kolenderski@umk.pl
tel. +48 510 459 791

Recenzja pracy doktorskiej

pt. „Information Processing Tasks as a Toolbox for Quantum Information”
Pani mgr Chithry Raj

Praca doktorska pani Chithry Raj pt. „Information Processing Tasks as a Toolbox for Quantum Information” jest napisana w języku angielskim, składa się z sześciu rozdziałów, poprzedzonych częścią wstępną obejmującą streszczenie, wykaz publikacji wchodzących w skład rozprawy oraz listę skrótów, a zakończonych podsumowaniem i perspektywami dalszych badań. Każda z głównych części pracy odpowiada odrębnemu, lecz koncepcyjnie powiązanemu wątkowi badawczemu: (i) monogamii w jednym z wariantów kryptografii kwantowej, (ii) certyfikacji bezpieczeństwa poprzez dualizm falowo-cząsteczkowy oraz (iii) operacyjnej analizie realizmu i struktur przyczynowych. Praca jest spójna, co znajduje odzwierciedlenie zarówno w jej strukturze teoretycznej, jak i w dołączonych publikacjach naukowych.

Doktorantka przedstawia trzy prace, z czego dwie są opublikowane. Trzecia w chwili składania rozprawy była dostępna jako preprint a została opublikowana w 2026. Pierwsza z prac ukazała się w czasopiśmie Physical Review A (IF 2,9), druga została opublikowana w Open Systems & Information Dynamics (IF 1,3, wg dostępnych danych bibliometrycznych), natomiast trzecia w npj Quantum Information, które należy do wysoko notowanych czasopism w obszarze informacji kwantowej i posiada Impact Factor na poziomie około 8,3. Świadczy to o wysokiej jakości uzyskanych wyników. Doktorantka w dwóch z tych prac jest pierwszą autorką, w szczególności w najnowszej publikacji. Świadczy to o jej dużym wkładzie w badania, które doprowadziły do wyników opublikowanych w tych czasopismach.

Już w tym miejscu należy podkreślić, że Autorka w sposób precyzyjny i konsekwentny odwołuje się do literatury przedmiotu, jasno wskazując publikacje, na których opiera swoje badania.

W rozdziale 2 wprowadzone zostały pojęcia niezbędne do zrozumienia treści kolejnych części pracy, takie jak twierdzenia typu no-go, łamanie nierówności Bella, monogamia korelacji oraz podstawowe elementy formalizmu mechaniki kwantowej. Rozdział stanowi spójne i logicznie uporządkowane wprowadzenie teoretyczne, tworzące solidne zaplecze dla dalszych analiz. Mam jednak dwie drobne uwagi do których chciałbym, żeby Doktorantka się odniosła podczas obrony.

W równaniu (2.28) występują macierze gęstości, które nie zostały uprzednio wprowadzone ani jednoznacznie zdefiniowane w tekście.

W komentarzu do równania (2.34), pojawia się stwierdzenie, że lewa strona nierówności ulega nasyceniu dla maksymalnej dopuszczalnej w mechanice kwantowej wartości $CHSH_{AB} = CHSH_{AC} = 2$. Sformułowanie to wydaje się niespójne z obowiązującą w literaturze konwencją, ponieważ

wartość 2 odpowiada klasycznej (lokalnej) granicy nierówności Bella, natomiast maksymalna wartość dopuszczalna w mechanice kwantowej wynosi $2\sqrt{2}$. Można przypuszczać, że jest to przejęzyczenie lub literówka, jednak w obecnej postaci zapis ten może prowadzić do niejednoznaczności interpretacyjnej, zwłaszcza w kontekście wcześniejszej dyskusji dotyczącej teorii niesygnalizujących (no-signalling) oraz monogamii korelacji.

W rozdziale trzecim Doktorantka analizuje uogólnienie zasady „Information Causality” na scenariusze wielostronne (N -podmiotowe) w kontekście kryptografii niezależnej od urządzeń (DIQKD). Celem tej części pracy jest analiza subtelných i głębokich własności korelacji, które mają istotny wpływ na bezpieczeństwo określonej klasy protokołów QKD. Analiza jest przeprowadzona dla kanałów z szumem.

W opisie Fig.~3.1 występuje niespójność indeksowania: sieć obejmuje $N-1$ nadawców, natomiast parametry szumu zapisano w granicach od 1 do N . Wymaga to doprecyzowania i ujednoczenia zakresu indeksów.

Ponadto w podpisie rysunku występuje niespójność dotycząca kolorystyki: dysk oznaczający zbiór indeksów j wydaje się być koloru niebieskiego, a nie zielonego, jak podano w opisie.

W akapicie zawierającym równanie (3.6) występuje błąd polegający na niepoprawnym matematycznie przypisaniu wartości zmiennej M' . Najprawdopodobniej jest to usterka wynikająca z problemu z kompilacją w LaTeXu. Błąd ten nie wpływa jednak na poprawność dalszych wyprowadzeń ani na końcowe wyniki przedstawione w rozdziale. Podobne problemy z formatowaniem pojawiają się też w równaniu 3.9.

W Lemacie 3.1 pojawia się stwierdzenie dotyczące wartości CHSH, którym przypisane zostaje oznaczenie β . Jest to albo skrót myślowy, albo nieprecyzyjne użycie definicji. Wcześniej w pracy symbol β został jednoznacznie zdefiniowany jako „funkcja prawdopodobieństwa wygranej w grze CHSH”, a nie jako standardowa wartość wyrażenia CHSH. Definicja ta została wprowadzona w równaniu (2.36), gdzie $\beta(A,B)$ oznacza znormalizowaną postać funkcjonału CHSH.

W rozdziale czwartym przedstawiona została analiza bezpieczeństwa protokołów „semi-device-independent” w scenariuszu $2 \rightarrow 1$ QRAC typu „prepare-and-measure”. Zastosowano podejście oparte na analizie świadka SDI oraz odpowiadającego mu prawdopodobieństwa sukcesu w grze kwantowej. Dzięki temu udało się uzyskać silniejsze ograniczenie na świadka SDI niż znane dotychczas. Mamy tu interesujący ciąg rozumowania: klasyczne ograniczenie na prawdopodobieństwo sukcesu wynosi 0.75, (wcześniejsze) ograniczenie kwantowe wynosi 0.8415, natomiast próg gwarantujący bezpieczeństwo protokołu SDI typu prepare-and-measure został obniżony do 0.833. Wyniki te są istotne, ponieważ poszerzają zakres niedoskonałości, które mogą być brane pod uwagę przy certyfikacji bezpieczeństwa.

Podczas obrony proszę o doprecyzowanie, co dokładnie Autorka rozumie przez „poszerzony zakres parametrów”. Jakie parametry fizyczne i operacyjne ma na myśli? W szczególności interesujące jest, czy model uwzględnia efekty takie jak wydajność detektorów, a jeśli tak, to w jaki sposób jest ona włączona do analizy.

W rozdziale piątym powraca pytanie o dualizm falowo-cząsteczkowy w kontekście eksperymentów typu „entanglement-assisted delayed-choice” oraz „controlled-reality”. Komplementarność w



mechanice kwantowej jest tu rozumiana nie tylko w kategoriach widzialności interferencji, lecz w odniesieniu do pełnego kontekstu fizycznego obejmującego porządek przyczynowy oraz korelacje między podukładami. Zagadnienia te dotyczą fundamentów mechaniki kwantowej i pokazują, że wciąż istnieją pojęcia wymagające dalszych badań. Istotne w kontekście niniejszej rozprawy jest również to, że przywoływana literatura jest bardzo aktualna, w większości z ostatnich kilku lat, co świadczy o dużej aktualności podejmowanej problematyki.

Podsumowując, stwierdzam że praca stanowi istotny wkład w dziedzinę oraz potwierdza także ogólną wiedzę teoretyczną doktorantki. Dlatego też stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymogi dotyczące tego typu prac naukowych. W związku z tym **wniosuję o dopuszczenie Chitry Raj do kolejnych etapów procesu przewodu doktorskiego**. Ponadto, ze względu na wysoką jakość rezultatów **wnoszę o przyznanie wyróżnienia**.

Piotr Koleenderski