

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Arijita Dutty  
pt. „Quantumness of states and their transfer”**

Rozprawa doktorska mgr. Arijita Dutty poświęcona jest zasadniczo badaniu kwantowego charakteru stanów oraz - w pewnym zakresie – transferu przy zachowaniu owego kwantowego charakteru. Praca liczy 102 strony i obejmuje m. in. 118 pozycji bibliograficznych, 7 tabel oraz 21 ilustracjami, a także listę prac autora, które stanowią podstawę rozprawy. Na liście tej mieszczą się cztery publikacje na łamach renomowanego pisma *Physical Review A* autora rozprawy wspólnie z promotorem prof. Markiem Żukowskim i współpracownikami, w tym jedna także z promotorem pomocniczym dr. Marcinem Pawłowskim, a także jedna publikacja opublikowana na łamach *Acta Physica Polonica* wraz ze współpracownikami oraz jeden manuskrypt niepublikowany. Praca liczy sobie siedem rozdziałów, włączając w to dodatek rachunkowy.

Zasadniczo uzyskane wyniki sytuują się wokół dwóch centralnych zagadnień – testowania kwantowego charakteru badanych stanów oraz – w mniejszym stopniu – problemowi transferu stanów z dwóch możliwych perspektyw – dynamiki modelowanej przez odwzorowanie kompletnie dodatnie oraz dynamiki na łańcuchu spinów. Każdy z rozdziałów prezentujących oryginalne wyniki rozpoczyna się wstępem przybliżającym centralne zagadnienie oraz krótkim podsumowaniem.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wstęp, w przystępny i zwięzły sposób przybliżono kolejne uzyskane wyniki na tle stanu dziedziny, do której przynależą. W rozdziale drugim wyprowadzono nowe nierówności Bella dla układów dwóch cząstek o tych samych, dowolnych spinach. Zastosowano tu dwa podejścia. Pierwsze opiera się o metodę – nazywaną w pracy metodą geometryczną - stanowiącą rozwinięcie techniki ze znanego artykułu prof. Marka Żukowskiego z roku 1993. W metodzie tej ściśle szacowanie abstrakcyjnego iloczynu skalarnego wielkości kwantowej z wielkością klasyczną poprzez kwadrat normy wielkości kwantowej prowadzi do niemożności wyrażenia wielkości kwantowej jako kombinacji wypukłej wielkości klasycznych. Autor pokazuje jak poprzez wybór wspomnianych wielkości jako funkcji korelacji doprowadzić do nierówności Bella łamanej przez maksymalnie splątane cząstki o spinie 1 w sposób eksponencjalny, a następnie wyprowadza szacowania na krytyczne widzialności dla wybranych przypadków spinów oraz liczby ustawień. Drugie podejście, bazujące na wprowadzonej w pracy Jarosława Pykacza i Emilio Santosa metodzie z użyciem więzów kołmogorowskich, wywodzi z tych ostatnich nierówności Bella typu łańcuchowego, a następnie pokazuje, jak złamać tę nierówność dla przypadku dowolnego spinu poprzez kombinację sumy prostej obrotów dwu- i trójwymiarowych operacji unitarnych definiujących odpowiednie pomiary. Wyprowadzone nierówności są łamane w sposób wyjątkowo jaskrawy w granicy nieskończonej liczby ustawień w tym sensie, że klasyczna wartość większa od jedności kwantowo jest zastąpiona przez zero. W końcowej części rozdziału autor prezentuje finezyjne

wyprowadzenie łamania nierówności łańcucha z pomocą ustawień z asymptotycznie nieskończenie małego zakresu i trafnie argumentuje, że wyprowadzenie to może zastępować heurystyczną analizę podaną przez Lesliego Ballentine'a dla małej wielkości kąta definiującego ustawienie aparatury pomiarowej. Ostatnia analiza robi bodaj największe wrażenie i, jak się wydaje, może w przyszłości stać się przykładem podręcznikowym. Być może trochę szkoda, że autor rozprawy nie pokusił się o przybliżenie czytelnikowi choćby konkluzji rozważań cytowanego autora.

Rozdział trzeci prezentuje pionierskie zastosowanie metody geometrycznej do zagadnienia kwantowego sterowania, któremu formalny charakter matematyczny nadała analiza Wisemana i współpracowników z 2007 roku. Autor rozprawy przedstawia ogólną nierówność na kwantowe sterowanie – stanowiącą odpowiednik nierówności Bella – w oparciu o metodę geometryczną, a następnie wyprowadza jawne ograniczenia klasyczne w terminach macierzy korelacji T, co stanowi silne narzędzie praktyczne z punktu widzenia eksperymentu oraz ilustruje jej działanie na przykładzie dwukubitowych stanów Wernera.

Rozdział trzeci zawiera krytyczną analizę głośnego twierdzenia Pusseya-Baretta-Rudolfa (PRB) z 2012 roku. Artykuł wspomnianych autorów jest pięknym przykładem poszukiwania głębszego zrozumienia istoty kwantowego opisu przyrody. Autorzy pokazują w nim, że przyjęcie, iż przyroda jest opisana przez ontyczne (tj. mówiące o naturze fizycznej rzeczywistości) ukryte zmienne, przy dodatkowym założeniu niezależności przygotowania stanów kwantowych, prowadzi do wniosku, że informacje niesione przez te zmienne muszą być w pewnym sensie „równoliczne” z różnymi nieortogonalnymi stanami kwantowymi, co oznacza, że i same stany kwantowe w jakimś stopniu muszą mieć charakter ontyczny, w przeciwieństwie do epistemicznego, czysto użytkowego odnoszącego się wyłącznie do naszej wiedzy predykcyjnej na temat wyników pomiarów. W omawianym rozdziale autor przedstawia krytyczną analizę stosowalności twierdzenia PRB w kontekście problemu efektywności detektorów. Mianowicie, okazuje się, że – przynajmniej w obecnej wersji – twierdzenie to wymaga dowolnie dobrej efektywności detektorów, a dla każdej skończonej wartości tej efektywności można mówić jedynie o odrzuceniu teorii o ustalonym epistemicznym wkładzie (tj. maksymalnym przekrywaniu się rozkładów ukrytej zmiennej odpowiadającym różnym nieortogonalnym stanom kwantowym) większym niż pewna ustalona wartość progowa. W rozdziale wyprowadzono wielkości liczbowe wydajności detektorów wymaganych do odrzucenia teorii o danym przyczynku epistemiczności przy ustalonej liczbie układów fizycznych. Nie mam wątpliwości co do fundamentalnego charakteru przedstawionych rezultatów. Uzupełniają bardzo ważną, brakującą lukę w badaniach dotyczących filozoficznych i matematycznych podstaw mechaniki kwantowej. Trzeba tu jednak wspomnieć, że odnośny rozdział pozostawia nieco do życzenia w sferze prezentacji wyników oryginalnych - np. podrozdział 4.7 jest zbyt zdawkowy, między innymi funkcja przedstawiona na wykresach nigdzie nie jest podana, a wzór (4.10) domagałby się, z punktu widzenia czytelników niespecjalistów, dodatkowego zdania (czy może dwóch) przed jego wyprowadzeniem.

Rozdział 5 stanowi systematyczną, czy wręcz drobiazgową, analizę odporności splątania stanów kwantowych przy przesyłaniu ich podukładów przez kanały kwantowe. Za indykatory kwantowości obrano tu geometrycznych, dwu-kopiowych świadków splątania na gruncie reprezentacji Hilberta-

Schmidta, a także szczególną nierówność Bella tzw. nierówność CGLMP. W rozdziale wyliczono wartości krytyczne dla wybranej rodziny stanów czystych w przypadku wypukłej domieszki jednorodnego szumu, lokalnego działania kanałów depolaryzujących, lokalnego działania kanału tłumiącego amplitudę, kombinacji wypukłej z odwzorowaniem ściśle dekorelującym oraz domieszki szumu „kolorowego”. W zaprezentowanym na końcu pracy dodatku przytoczono asymptotyczną analizę nierówności CLGMP, odtwarzając ścisłą wartość ograniczenia Tsirelsona pomniejszoną o czynnik odpowiadający szumowi. Wyniki omawianego rozdziału mają charakter czysto użytkowy i przypuszczalnie będą w przyszłości stanowiły swoiste praktyczne kompendium dla doświadczalników przygotowujących źródła stanów splątanych w przyszłości.

W ostatnim rozdziale przedstawiono krótką analizę możliwości idealnego przesyłania stanu o spinie 1 przez łańcuch spinowy przy pomocy swoistego, sztucznego oddziaływania będącego odwzorowaniem struktury hamiltonianu dla spinów połówkowych. Poprzez odpowiednią konstrukcję elementów macierzowych oddziaływań lokalnych z pomocą macierzy Gell-Manna uzyskano strukturę zdolną do idealnego transferu stanów 1-kubitowych. Omawiane w rozdziale podejście ma charakter dość heurystyczny, a jego prezentacja sprawia chwilami wrażenie zbyt powierzchownej, jednak wedle wiedzy recenzenta odnośne wyniki (w swojej pierwotnej wersji ogłoszone w formie manuskryptu napisanego wspólnie ze współpracownikami w roku 2014) są pierwszą próbą uzyskania ścisłego transferu stanu bezpośrednio tj. poprzez łańcuchy spinowe o spinie większym niż połówkowy zamiast sprzęgania większej liczby łańcuchów cząstek o spinie połówkowym (por. praca Giovannettiego i współpracowników, Phys. Rev. A (2005)) i jako takie stanowią oryginalną wartość naukową.

Podsumowując pracę z punktu widzenia jej wartości merytorycznej za najważniejsze osiągnięcia uważam pionierskie zastosowanie metody geometrycznej dla kwantowego sterowania, infinitezymalny wariant nierówności łańcucha oraz praktyczną krytykę twierdzenia PRB z punktu widzenia wydajności detektorów. Model transferu stanu spinu 1 poprzez łańcuch spinowy można uznać za wartościowy poznawczo jeśli idzie o wgląd w samą problematykę transferu stanu. Podkreślę raz jeszcze, że bardzo cieszę obecnym w pracy rys badawczy o charakterze podstawowym, który nawiązuje do długiej tradycji filozofii nauk przyrodniczych nie z pozycji heurystyki, ale z perspektywy możliwego, falsyfikującego dane hipotezy, doświadczenia.

Odnosząc się do formalnej strony dysertacji, wypada uznać, że posiada ona prawidłową strukturę, a tabele i ilustracje trafnie dobrano. Co prawda mnogość wątków stanowiła tu pewną trudność i niektóre zagadnienia mogłyby być uzupełnione o dodatkowe wyjaśnienia, o czym poniżej. Warto jednak równocześnie zaznaczyć, że mnogość ta dobrze świadczy o wszechstronności autora. Co więcej, czytając tekst trafia się na jego znakomite partie dydaktyczne, znamionujące głębokie rozumienie podstaw fizyki kwantowej. Przystępne omówienie analitycznego dowodu twierdzenia PRB, wyjaśnienie, dlaczego i w jakim sensie nierówność CHSH nie jest użyteczna w odniesieniu do problemu kwantowego sterowania, czy wreszcie wnikliwy przypis na stronie 13 mogłyby z powodzeniem znaleźć się w nowoczesnej monografii na temat mechaniki kwantowej. Ponadto znaczna część wyników wymagała biegłości analitycznej, co do której autor dowiódł, że ją posiada.

Przed sformułowaniem ostatecznej oceny pracy trzeba dodać kilka uwag krytycznych mniejszej

wagi. Jak już wspomniano w odniesieniu do prezentacji własnych wyników wypadłoby czasem podać więcej szczegółów. Na stronie 61 (wiersz 9) autor wręcz pisze, że w rozdziale poda szkic rozumowania z pracy oryginalnej, podczas gdy czytelnik oczekiwałby w rozprawie - zgodnie z powszechnym obyczajem - pogłębionej analizy. Pojawiają się pewne drobne niedoskonałości, np. oryginalny argument EPR (por. strona 15) był bardziej złożony, a definicja częstościowa nierówności Bella na stronie 17 (wzór 2.3) powinna być uzupełniona o definicję statystyczną w sensie teoretycznych wartości średnich (warto tu też wspomnieć, że w swoim wariancie częstościowym nierówność może być łamana, ale w ramach statystycznie nieznaczących fluktuacji). Dodatkowo w odniesieniu do nierówności Bella w rozdziale 2 brakuje np. informacji jaką metodą wyliczono wartości iloczynu funkcji korelacji klasycznej i kwantowej (akapit pod wzorem (2.32)). Brak też jest jawnej informacji jak interpretować mniejsze od jedności wartości ilorazu  $1/V$  na stronie 26 i następną (wydaje się na przykład, że w przypadku ściśle wysycanych nierówności wartości te powinny wynosić jeden dla wartości szumu odpowiadającego stanowi separowalnemu, bo model ukrytej zmiennej ściśle reprodukujełby wtedy wartość kwantową, jednak omawiane tu przypadki do tej klasy nie należą). W rozdziale 4.7 oprócz wspomnianego braku w opisie funkcji nie zdefiniowano np. maksymalnego kąta  $\theta_{\max}$ , choć oczywiście czytelnik może się tej formuły domyślić.

Praca zawiera pewną liczbę niezręczności językowych, w tym nadmiernych powtórzeń, oraz usterek typograficznych. Z recenzenckiego obowiązku wspomnę tu przykładowo, że na stronie 27 zabrakło wielkości modulo  $\pi$  w definicji wielkości  $R_a(b)$ , na rysunkach w rozdziale 2 należało podkreślić obecność wielkości otrzymanych analitycznie. Ponadto nierówność (2.39) byłoby chyba wygodniej zapisać w kolejnym wersie po prostu jako  $S_N \leq 0$ . Wydaje się też, że przy wyprowadzeniach nierówności, co do których wiadomo, że zostaną w toku analizy złamane (por. rozdział 2) warto stawiać nad znakiem nierówności pytajnik, ale być może ten pogląd stanowi tylko subiektywne przekonanie recenzenta. Natomiast z pewnością na stronie 81 wypadło podać informacje na temat metody jaką liczono wartość progową prawdopodobieństwa krytycznego dla modelu lokalnie realistycznego.

Powyższe uwagi w żadnej mierze nie umniejszają naukowej i ogólnej wartości pracy, którą oceniam wysoko. Autor wykazał się biegłością i dojrzałością naukową oraz zmysłem dydaktycznym i głębią badawczego spojrzenia. Przede wszystkim zaś - co do tego nie mam wątpliwości - niektóre z analitycznych rezultatów jego pracy badawczej wejdą na trwałe do obiegu literatury przedmiotu. Pośród nich infinitezymalny wariant łamania nierówności łańcucha czy eleganckie wyprowadzenie nierówności dla kwantowego sterowania niosą ze sobą swoisty dodatkowy walor estetyczny, który sprawia, że czyta się o nich ze szczególną przyjemnością.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona przez mgr. Arijita Duttę rozprawa doktorska spełnia wszelkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim - przy czym niektóre z nich nawet z pewnym nadmiarem - i stawiam wniosek o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

