

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Kamili Trzcińskiej pt. „Superaktywacja łamania
nierówności Svetlichnego w układach wielocząstkowych”**

Rozprawa mgr Kamili Trzcińskiej liczy sobie 68 stron i składa się z siedmiu rozdziałów oraz czterech dodatków tematycznych i jednego stanowiącego uzupełnienie opisu osiągniętych wyników. Rozprawę opatrzone 46 wykresami oraz załącznikiem – dyskiem CD ze znalezionymi numerycznie parametrami ilustrującymi osiągnięcie celu badawczego. Rozprawę oparto w dużej mierze na dwóch artykułach opublikowanych przez autorkę wraz z promotorem profesorem Pawłem Cabanem oraz współpracownikiem Andrzejem Molendą w pismach *Physical Review A* oraz *Open Systems and Information Dynamics*.

Badania przedstawione w pracy dotyczą superaddytywności pewnego specyficznego typu braku klasycznego realizmu, mianowicie takiego, gdy układy trójcząstkowe nie pozwalają na opis z pomocą ukrytej zmiennej oraz funkcji odpowiedzi będącej iloczynem jedynie dwóch czynników. Nierówności implikowane przez tego typu model ukrytej zmiennej zaproponował George Svetlichny w roku 1987. Drugim elementem jest wykrywanie braku lokalnego realizmu z pomocą tzw. superaddytywności. Otóż z pracy R. Wernera (*Phys. Rev. A*, 1989) wiemy, że zachodzą w mechanice kwantowej sytuacje, gdy dany stan nie łamie nierówności danego typu, ale posiada dobrze zdefiniowane matematycznie kwantowe korelacje. Intuicja podpowiada, że stany tego typu powinny w jakiś sposób manifestować brak kwantowej nielokalności. W odpowiedzi dwóch fizyków zaproponowało dwie niezależnie ścieżki badawcze. W roku 1994 Sandu Popescu odkrył, że brak nielokalności można wykrywać przy pomocy pomiarów sekwencyjnych na jednej kopii stanu, natomiast Asher Peres w 1996 roku podał alternatywne rozwiązanie wykrywając łamanie nierówności z pomocą kolektywnych pomiarów na kilku kopiach tego samego stanu kwantowego. Drugie z podejść z czasem zaczęto nazywać superaktywacją kwantowej nielokalności m. in. w analogii do pewnego efektu z teorii kwantowej komunikacji. Opisuując rzecz w skrócie, z superaktywacją mamy do czynienia wtedy, gdy brak pewnej własności każdego ze składników idzie w parze z obecnością tej własności w układzie obejmującym oba składniki jako elementy pewnej całości. W omawianym przypadku superaktywacja wymaga, aby owo całościowe podejście zawierało łączne pomiary angażujące więcej niż jedną kopię stanu kwantowego. Do czasu podjęcia badań przez autorkę istniały wyłącznie przykłady superaktywacji kwantowej nielokalności w powyższym sensie odpowiadające scenariuszowi z oryginalnej pracy Ashera Peresa tj. dla przypadku dwóch obserwatorów. W rozprawie podano pionierskie przykłady aktywacji kwantowej nielokalności dla przypadku trzech obserwatorów.

Po przejrzystym wstępie oraz pierwszym z rozdziałów, który przystępnie omawia pojęcie nielokalności w drugim rozdziale rozprawy autorka przedstawia pojęcie prawdziwych trójcząstkowych kwantowych korelacji, które lepiej byłoby nazwać rzeczywistymi korelacjami kwantowymi. Są to, upraszczając nieco, te korelacje między trzema kwantowymi bitami (kubitami), które nie dają się zasymulować z pomocą modelu ukrytych zmiennych zaproponowanych przez Svetlichnego. Rozdział trzeci krótko przedstawia istotę pojęcia aktywacji kwantowej nielokalności przywołując pojawiające się do tej pory wyniki dotyczące tego pojęcia. Centralne miejsce w pracy zajmują rozdziały 4, 5 i 6. W pierwszym z nich autorka rysuje punkt wyjścia dla przeprowadzonych

badan. Jest nim znalezienie maksimum nierówności Svetlichnego dla uogólnionego stanu GHZ (będącego w istocie dowolnym stanem trójkubitowym w najbardziej dogodnym przedstawieniu) wyprowadzonym w pracy Ajoy'a i Rungty z 2010 roku. Dwie kopie takiego stanu zostają poddane lokalnym pomiarom binarnych, bezśladowych obserwacji, które przedstawia się za pomocą odpowiedniej rotacji iloczynu tensorowego dwóch macierzy Pauliego, przy czym - zgodnie z oryginalną nierównością Svetlichnego - każdy z obserwatorów ma do dyspozycji dwie obserwacje tego typu. Autorka dokonuje optymalizacji przy uwzględnieniu niejednoznaczności formuły maksimum, w której obowiązują dwa przypadki zależne od sumy miar dwu- i trójcząstkowych korelacji zawartych w stanie. W kolejnym rozdziale na 30 rysunkach połączonych w pary autorka prezentuje wyniki obliczeń numerycznych dla przypadku stanów czystych. Pierwszy z wykresów jest ważniejszy, to na nim widać efekt superaddytywności. Drugi ma charakter pomocniczy i pokazuje zależność wartości w obu przypadkach (optymalnym jednocząstkowym oraz numerycznie uzyskanym dwucząstkowym) od splątania trójcząstkowego w pojedynczym stanie trójkubitowym. Wybór prezentacji wyników w powyższy sposób należy uznać za bardzo trafny - drugi z rysunków stanowi cenne uzupełnienie, bo nierówność dotyczy wykrywania korelacji *stricte* trójcząstkowych.

Niestety parametry odpowiadające optymalnym wartościom na wykresach, zaanonsovane w opisach nie są w bezpośredni sposób odniesione do rysunku. Czytelnik może się tylko domyślać, które wartości z wykresów dopowiadają tym z dodatku. Ponadto wydaje się, że parametry jednej z dwóch gałęzi są częściowo lub całkowicie pominięte w dodatku E, bowiem żadna z podanych tam wartości superaddytywnych nie przekracza 4.5, o liczbie 5 już nie wspominając (co sugerowałby rysunek 5.1).

Na podstawie tekstu nie sposób zatem odtworzyć, które wartości ustawień i maksimum są odpowiednie, trzeba sięgać do danych na dysku, a i to nie jest szczególnie pomocne jeśli idzie o opis rysunków, bo wartości są na nich zaznaczone z dokładnością do szerokości znaku graficznego (kropki lub krzyżyki). Zatem już w tym aspekcie - kompletności rysunków - rozprawa pozostawia sporo do życzenia.

W rozdziale kolejnym przedstawiono analizę wrażliwości efektu superaddytywności na obecność jednorodnego szumu. Wybór tej jednoparametrowej rodziny szumów podyktowany był prawdopodobnie tym, iż odpowiada ona w uproszczeniu parametrowi widzialności w eksperymentach kwantowo-optycznych. W serii wykresów zademonstrowano, że centralny wynik - tj. łamanie nierówności przez dwie kopie stanu, przy spełnianiu jej przez jedną - jest względnie odporne na zakłócenia w obrónej formie. Niestety znów nie odniesiono konkretnych wartości obserwacji do wykresów w dodatku. Na uwagę zasługuje natomiast fakt, że na tym etapie unika się dodatkowej analizy numerycznej. Podsumowując wyniki numeryczne, należy stwierdzić, że o ile bardzo wartościowe jest systematyczne przeszukanie podczas badania przestrzeni parametrów zadanych przez grupę $SU(4)$, o tyle brakuje bezpośredniego związku wybranych, najbardziej korzystnych dla superaddytywności parametrów z rysunkami.

Niestety rozprawa obarczona jest też dużo poważniejszą ułomnością metodologiczną, mianowicie jest w zasadzie pozbawiona głębszej analizy uzyskanych wyników. Tego rodzaju brak trudno tolerować w przypadku magisterium, a wszak mowa tu o rozprawie doktorskiej. Końcowa część tekstu głównego - podsumowanie - zawiera pokreślenie głównego wyniku (superaddytywność) okraszone kilkoma trafnymi uwagami. Brakuje jakiegokolwiek próby opisanie kilku rysujących się na przedstawionych wykresach własności (choćby monotoniczność w pierwszym i częściowa - należałoby zapytać dlaczego - monotoniczność w drugim przypadku, jeśli idzie o wykresy z rozdziału piątego). Doprawdy, przy tak dużej liczbie pomieszczonych wykresów oraz wyników numerycznych czytelnicy mają prawo poczytać ten brak pogłębionej analizy za objaw pewnego lekceważenia. Powstaje na przykład pytanie: czy istnieje jakakolwiek korelacja kąta ϑ_3 z monotonicznością w drugim przypadku? Czy można stwierdzić kiedy i dlaczego zależność łamania addytywności od trójcząstkowego splątania τ raz przyjmuje charakter wypukły, a raz quasi-wklęsły. Podkreślmy, że w

tekście nawet nie ma żadnej wzmianki, że takie zmiany mają miejsce w uzyskanych wykresach (por. np. 5.16 i 5.18). Na pierwszej serii rysunków też rysują się pewne tendencje, jeżeli chodzi o zachowanie dwóch gałęzi – wypadaloby je omówić, nawet jeżeli w danym momencie trudno jest wyrokować jakie są ich przyczyny. Podobnie – uzyskane numerycznie obserwowalne mają pewną szczególną strukturę, na którą wypadaloby zwrócić uwagę. Wydaje się nawet, że na gruncie tej struktury można było podjąć próbę wypracowania pojedynczego, w pełni analitycznego przykładu wykrytego zjawiska.

Nie znajdujemy, powtórzmy, próby uzasadnienia wyboru modelu szumu, ani próby sprawdzenia jak efekt superaddytywności „przeżywa” w obecności dwóch innych powszechnie analizowanych rodzajów zakłóceń: lokalnego pomiaru von Neumanna oraz kanału dyssypatywnego (ang. „dumping”, *notabene* kanał ten w przeciwieństwie do dwóch pozostałych nie jest bistochastyczny). Stany typu GHZ nie posiadają pełnej symetrii rotacyjnej i pilotażowe badania w tym zakresie lub choćby nawet sensowne jakościowe uzasadnienie ich braku byłyby na miejscu. Brak też zarysowania możliwej perspektywy dalszych badań, które rozprawa mogłaby zainspirować – wydaje się, że można tu zarówno wskazać na możliwe przyszłe uogólnienia nierówności Svetlichnego i ich analogiczne opracowanie, a także niezależne perspektywy poszukiwania superaddytywności innych znanych wielocząstkowych nierówności Bella – żadna z nich nie została choćby przywołana w podsumowaniu.

W tym momencie należy też podkreślić, że także we wstępie nie podjęto próby pokazania nierówności badanej na tle innej wybranej trójcząstkowej nierówności (np. tzw. nierówności Mermin), pozbawiając czytelnika szerszego kontekstu, w którym kluczową nierówności Svetlichnego wypadaloby – na zasadzie pewnego kontrastu – osadzić. Co więcej, szkoda, że w ramach wstępu autorka nie omówiła bardziej szczegółowo (tj. z uwzględnieniem pomiarów) żadnego z wymienionych przykładów superaddytywności nielokalności kwantowej, co pokazałoby uzyskany wynik w perspektywie historycznej i pozwoliłoby czytelnikowi na uzyskanie lepszej intuicji na temat omawianego zjawiska.

Ogólnie rzecz biorąc odnosi się wrażenie, jakby uzyskanie bardzo wartościowego, wręcz pionierskiego zasadniczego wyniku zostało poczytane za zwolnienie ze zwyczajowego dochowania staranności podczas przygotowania rozprawy doktorskiej, która jest napisana bardzo skrótowo (niespełna 30 stron tekstu, resztę stanowią wykresy oraz szczegółowe wyniki numeryczne) i powierzchownie. Warto zadać pytanie, czy nie zachodzi tu jeden z tych przypadków, w których komisja doktorska miałaby prawo do odesłania rozprawy do uzupełnienia i korekty, niezależnie od wartości wyników prezentowanych badań. Rozważając *pro* i *contra*, wypada podkreślić, że mamy do czynienia z wykryciem po raz pierwszy superaddytywności braku lokalnego realizmu (potocznie nazywanego kwantową nielokalnością) w przypadku wielocząstkowym. Jest zaskakujące, że uzyskana superaktywacja zachodzi dla tak szerokiej klasy parametrów stanu, co stanowi dobry prognostyk dla doświadczenia. Wynik trafia na dobry moment, ponieważ współczesna doświadczalna fizyka kwantowa po zamknięciu liczącego sobie kilkadziesiąt lat problemu eksperymentalnego łamania nierówności Bella jest obecnie w fazie poszukującej testowania nowych źródeł korelacji kwantowych i nowych efektów. Poza tym pojawiły się w dziedzinie kwantowej informacji kolejne badania nad przewagami kwantowego przetwarzania informacji nad klasycznym m. in. z uwzględnieniem możliwych symulacji oraz potrzebnych zasobów pamięci. W tym kontekście bardziej subtelne podejście do ukrytych zmiennych reprezentowane właśnie przez nierówności Svetlichnego może stanowić jeden z wartościowych tropów badawczych. Podanie w rozprawie dużej liczby parametrów stanu i ustawień prowadzących do efektu superaddytywności ułatwia zadanie ewentualnym eksperymentatorom, a także teoretykom szukającym uogólnień i nowych inspiracji.

Warto wspomnieć, że za wyjątkiem zbyt hermetycznego dodatku E pozostałe uzupełnienia (A-D) są napisane w sposób przejrzysty i mogą być pomocne dla czytelnika nieobeznanego z podejmowaną w

rozprawie tematyką. Należy też podkreślić, że praca została przygotowana starannie od strony estetycznej i stanowi spójną, logiczną całość.

Z recenzenckiego obowiązku dodajmy, że tekst pracy jest obciążony pewną liczbą drobnych usterek i błędów typograficznych, które wszak nie wpływają na ocenę ogólną. Przykładowo w rozdziale drugim przed wzorem (2.8) brakuje parametryzacji kątowej stanu, która pojawia się dopiero w rozdziale czwartym, we wzorze (C.5) zamiast symbolu Z powinna stać λ , podobnie we wzorze (C.14) symbol σ nie powinien być indeksem. Przed wzorem (4.15) zamiast formuły „najbardziej ogólna postać” wypadłoby raczej napisać „najbardziej ogólna postać w obranym paradygmacie”, bowiem w zasadzie obserwatorzy mogliby mieć do dyspozycji także obserwabla binarne o niezerowym śladzie. *Notabene* – o ile wybór takich obserwabli najprawdopodobniej pogorszyłby wyniki, o tyle można w przyszłości zastanowić się nad formalnym sprawdzeniem, czy - i ewentualnie dlaczego - tak by się stało. Otóż binarne obserwabla z niezerowym śladem są w intuicyjnym sensie bliższe operatorowi identyfikacji i jako takie prawdopodobnie łatwiej między sobą komutują.

Zachodzi ciekawe pytanie, czy można tego typu intuicje sformalizować przy pomocy odległości od operatora identyfikacyjnego. Oczywiście jest to temat na inne badania. Autorka nie była tu zobowiązana do takiej analizy, bo cel miała inny – znaleźć (najlepiej jak najbardziej jaskrawe) przykłady superaddytywności nierówności Svetlichnego i taki cel osiągnęła. Na pewno warto było natomiast przywołać w bibliografii wszystkie trzy publikacje, w których ogłoszono doświadczalne łamanie nierówności Bella przy wymaganych założeniach (tzw. doświadczenia typu „loophole-free”), bo chronologicznie pierwsza publikacja [36] budzi największe kontrowersje (m. in. ze względu na niewielką liczbę punktów pomiarowych, por. [„Analysis of assumptions of recent tests of local realism”, A. Bednorz, Phys. Rev. A 95, 042118 (2017)]). Ostatni, czwarty artykuł pochodzący z ośrodka monachijskiego, ogłaszający najlepsze dotąd wyniki [W. Rosenfeld *et al.*, Phys. Rev. Lett. 119, 010402 (2017)] ukazała się prawdopodobnie zbyt późno, aby autorka rozprawy miała szansę go zacytować.

W podsumowaniu pragnę stwierdzić, że w mojej opinii, pomimo eleganckiej strony estetycznej, bardzo wartościowego zasadniczego wyniku badawczego i jego – zarówno teoretycznie jak i eksperymentalnie – potencjalnie inspirującego charakteru, omawiana rozprawa nie reprezentuje właściwego poziomu w świetle zwyczajowych wymogów stawianych dysertacjom doktorskim i jako taka w stopniu jedynie minimalnym uprawnia recenzenta do końcowego wniosku o dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

