

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Beaty Zjawin

EPR Assemblages as Common-Cause Resources of Nonclassicality

Uwagi wstępne

Podstawą przedłożonej dysertacji są trzy ściśle powiązane tematycznie artykuły, do których dołączone zostało ich omówienie. Dwa artykuły zostały opublikowane w renomowanym specjalistycznym czasopiśmie *Quantum*, natomiast jeden znajduje się jeszcze w bazie arXiv. Do rozprawy załączone zostały także oświadczenia Doktorantki oraz czterech współautorów (w tym opiekuna naukowego) dotyczące ich wkładu w poszczególnych publikacjach. Wedle tych oświadczeń wkład Doktorantki był we wszystkich trzech artykułach bardzo znaczący.

Recenzowana rozprawa napisana została w języku angielskim (przetłumaczone na j. polski zostało jedynie streszczenie). Omówienie publikacji, nie wliczając spisu treści, listy publikacji, streszczeń, spisu literatur oraz pustych stron, liczy 40 stron. Formalne omówienie głównych wyników pracy (Rozdział 3) zajmuje przy tym 19 stron. Pomimo pewnych krytycznych uwag zamieszczonych w dalszej części recenzji wysoko oceniam stronę redakcyjną rozprawy. Praca została przygotowana starannie. Napisana jest bardzo dobrym, czytelnym językiem. Ma przy tym logiczną i klarowną strukturę.

Zawartość pracy i ocena merytoryczna

Przedmiotem badań Doktorantki jest nieklasyczość asamblaży powstałych w różnych scenariuszach EPR (standardowym oraz uogólnieniach) traktowanych jako zasób wywołany wspólną przyczyną (*common-cause resource*). W szczególności, problem został sformalizowany w ujęciu teorii zasobów, w której zbiór darmowych operacji stanowią lokalne operacje i dzielona losowość (*local operations and shared randomness, LOSR*) (prace [1] i [2]). Rozważona została także relacja między postkwantowością w uogólnionych scenariuszach EPR i bellowskich (praca [3]). Jednym z najważniejszych narzędzi stosowanych przez Doktorantkę jest programowanie półokreślone (*semidefinite programming, SDP*).

Prezentowane badania są dobrze umotywowane i poprawnie osadzone w literaturze przedmiotu oraz zostały dogłębnie zrealizowane. Uzyskane wyniki mają dużą wartość naukową. Nakreślona została także przekonująca wizja dalszego rozwoju uzyskanych wyników.

W pracy [1] rozwinięta została teoria zasobów nieklasycznych asymblaży w standardowych scenariuszach EPR, w której darmowymi operacjami są LOSR. Pokazano, że przy użyciu jednego SDP (sformułowanego jako *feasibility problem*) można stwierdzić, czy transformacja pomiędzy zasobami (asamblażami) jest możliwa. Ważnym wynikiem pracy jest analityczny dowód istnienia nieskończonej licznej rodziny nieporównywalnych asymblaży. Skonstruowano w tym celu odpowiednie monotony. Bardzo istotny jest fakt, że analogiczne rezultaty uzyskano zarówno w przypadku układów z dwoma podukładami (*bipartite*), jak i w ogólnym przypadku układów z dowolną liczbą podukładów (*multipartite*). Przedstawione badania motywowane były zidentyfikowaną luką w literaturze. Wcześniejsze ujęcie EPR w teorii zasobów przyjmowało jako darmowe operacje stochastyczne lokalne operacje i klasyczna komunikację w jedną stronę (*stochastic local operations and one-way classical communication, S-1W-LOCC*) [13] i motywowane było zastosowaniami w niezależnej od urządzeń z jednej strony kwantowej dystrybucji klucza (*one-sided device-independent QKD*). W pracy [1] przedyskutowano relację między rozwiniętymi teoriami zasobów. Pokazano między innymi, jakie zalety niesie ze sobą nowe spojrzenie na scenariusze EPR i wskazano, że porządek wstępny (praporządek, *pre-order*) zasobów w obu teoriach jest inny. Zauważono także, że jedno z twierdzeń pracy [13] jest niekompletne. W samym omówieniu powyższa dyskusja jest bardzo ograniczona i poświęcono jej jedynie krótki podrozdział 3.1.4, co uważam za niedociągnięcie.

Praca [2] bada kanałowe scenariusze EPR (*channel EPR scenarios*), uogólniające standardowe schematy poprzez umożliwienie Bobowi wykonanie dodatkowych operacji na swoich podukładach. Szczególnymi rozważanymi przypadkami są tutaj schematy *Bob-with-input (Bwl)* oraz *measurement-device-independent (MDI)*, które mogą wykazywać tzw. postkwantowość (*postquantumness*). Podobnie do pracy [1], w publikacji [2] rozwinięta została odpowiednia teoria zasobów asymblaży ze względu na darmowe operacje LOSR. Podane zostały także SDP, które sprawdzają możliwość transformacji pomiędzy asymblażami. W każdym z rozważanych scenariuszy ukazano efekt istnienia nieporównywalnych postkwantowych asymblaży. W przypadku MDI zabrakło mi trochę bardziej szczegółowego omówienia uzyskanych wyników (a dodatkowo choćby krótkiego wyjaśnienia nazwy schematu). W przypadku Bwl ten opis jest już szerszy i zawiera ponadto dyskusję wyniku w kontekście możliwej transformowalności asymblaży przy użyciu lokalnych operacji i dzielonego splątania (*local operations and shared entanglement, LOSE*). W ogólnym przypadku uogólnionego scenariusza EPR, oprócz postkwantowych asymblaży przeanalizowano także transformacje między asymblażami mającymi kwantowe realizacje i - zgodnie z omówieniem - znaleziono w tym przypadku *infinite number of equivalence classes* (podrozdział 3.2.1, strona 29). Stwierdzenie to zadaje się nie znajdować pełnego oparcia w samej publikacji. W odpowiednim jej podrozdziale 2.3.1 wyniki na ten temat sformułowane są bowiem jedynie jako przypuszczenia (*conjecture*). W omówieniu pracy [2] brak jest ogólnej dyskusji na temat relacji prezentowanego podejścia i podejść znanych z literatury. Dyskusja taka znalazła się w omawianej publikacji (rozdział 5), jednak jej zupełne pominięcie w referacie uważam za niewłaściwe.

W pracy [3] zbadano efekty aktywacji postkwantowości w uogólnionych scenariuszach EPR. W rozważanych schematach postkwantowe dwupodukładowe asymbláže, które mają kwantowe realizacje w odpowiednich scenariuszach bellowskich (należą do zbioru \sum^{QC}), zanurzane są w schematach trzycząstkowych i prowadzą do trzycząstkowych korelacji nie

mających kwantowego wyjaśnienia. Certyfikacja postkwantowości powstałych korelacji odbywa się przy pomocy odpowiednio skonstruowanego funkcjonatu bellowskiego. Wyniki pracy pozostawiają wciąż otwartym ważne pytanie, czy istnieją postkwantowe asamblaże, które nie mogą być aktywowane w rozważanym sensie. Jest to jeden z głównych wniosków badań, który nie został jednak wystarczająco precyzyjnie sformułowany ani w referacie, ani w samej pracy [3]. Nie jest bowiem jasne, czy chodzi o możliwość aktywacji w konkretnych protokołach rozważanych w [3], czy może o istnienie nawet bardziej ogólnego schematu. Praca [3] inspirowana jest wynikami uzyskanymi w [18]. W referacie zabrakło bliższego omówienia związków pomiędzy tymi pracami i jednoznacznego pokazania, w jakim stopniu bieżące rezultaty i protokoły wykraczają poza te zaprezentowane w pracy [18].

W powyższych uwagach wskazałem na miejscami zbyt dużą zwięzłość omówienia publikacji. Można ją także zauważyć przy okazji wprowadzenia kluczowego dla dysertacji pojęcia scenariusza EPR (rozdział 2.2.1), gdzie czytelnik odsyłany jest po więcej szczegółów do publikacji [1]. Wydaje mi się, że jest to niewskazane i całość dyskusji powinna znaleźć się w referacie. Omówienie nie wyjaśnia także wystarczająco niektórych ważnych, niekiedy wręcz kluczowych pojęć. Najważniejszym przykładem tutaj jest postkwantowość (*postquantumness*) i związane z nią pojęcia, np. zasoby postkwantowe (*postquantum resources*), układ postkwantowy (*postquantum system*), czy korelacje postkwantowe (*postquantum correlations*). Zabrakło ponadto precyzyjnego określenia, czym jest grzebień (*comb*), kanał pomiarowy (*measurement channel*), instrument (*instrument*), czy też *POVM* (warto było także przywołać termin „pomiar uogólniony”).

Inne uwagi i komentarze

W tej części recenzji przedstawię w formie listy swoje pozostałe uwagi i komentarze. Część z nich dotyczy czysto redakcyjnej strony pracy, natomiast część ma charakter merytoryczny. Należy podkreślić, że tych ostatnich nie jest dużo.

(1) Brak jest wyjaśnienia dlaczego zmienna λ została przyjęta jako dyskretna [np. wzory (2.2) lub (2.4)],

(2) niekonsekwentnie lub nieściśle używane są pojęcia *system* oraz *state*: czytamy np. *system AB* (strona 16), *quantum system* ρ_B (strona 22), *system on* $\mathcal{H}_B \otimes \mathcal{H}_{B'}$ (strona 35), *system* $\mathcal{H}_{B'}$ (strona 35), lub *system defined on* $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ (praca [2], strona 5); mamy ponadto *state* ρ *in* $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ (praca [1], Definition 1, strona 6), które po prostu nie jest poprawne oraz *where Bob's output state is a qubit system* (strona 34),

(3) brak pewnej konsekwencji w używaniu pojęć *quantum channel* i *CPTP map*; choć są tożsame (zgodnie z określeniem na stronie 10 i ogólnie przyjętej w dziedzinie terminologii) ich używanie zamiennie w opisie jednego protokołu [strona 16, pod wzorami (2.6) i (2.8)] jest mylące i czytelnik może zacząć wątpić, czy faktycznie oznaczają one ciągle to samo, zwłaszcza, że w referacie pojawiają się ponadto pojęcia takie jak *process*, *processing* (oba na stronie 16), wspomniany już wcześniej *measurement channel* (strona 16), *state preparation channel* (strona 17), czy po prostu *channel* (strona 17),

(4) zamiast $\mathcal{E}: \mathcal{H}_B \rightarrow \mathcal{H}_{B'}$ (strona 22; praca [1], strona 9) powinno być $\mathcal{E}: \mathcal{L}(\mathcal{H}_B) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_{B'})$,

(5) we frazie *where the conversion must not happen with probability 1* (strona 8) powinno raczej być *need not* albo *does not have to*,

(6) czy nie powinno jednak być *special relativity* zamiast *general relativity* na stronie 14?

(7) w rozdziale 2.3 czytamy o programach półokreślonych: *They also have a nice characterization, useful properties, and can often be efficiently solved*; nie jest jasne, które konkretnie cechy SDP pozwalają użyć w tym kontekście słów *nice* oraz *useful*,

(8) uwagi dotyczące Abstractu/Streszczenia:

(i) *analize* zamiast *analizę* oraz *procedure* zamiast *procedurę* w Streszczeniu,

(ii) zachodzi pewna rozbieżność między wersjami angielską i polską w przedostatnim zdaniu pierwszego akapitu i ostatnim zdaniu drugiego akapitu,

(9) w dokumencie stosowane jest to samo oznaczenie dla macierzy jednostkowej i kanału identycznościowego; ich rozróżnienie dodałoby czytelności niektórym wzorom, np. (2.7) oraz (2.11),

(10) korzystne byłoby zaprezentowanie wszystkich SDP w analogicznym formacie; aktualna prezentacja SDP 6 (strona 30) nieznacznie odbiega od tej dla SDP 5 (strona 28) i SDP 8 (strona 33),

(11) *incompatibility* zamiast *incomparability* (strony 24-25, 30); *unordered* zamiast *incomparable* (Corollary 7, strona 31),

(12) raczej nieformalne *it's* zamiast *it is* w kilku miejscach (strony 8-10),

(13) *the the* w czwartej linii od dołu na stronie 18,

(14) *hermitian* zamiast *Hermitian* w linii przed wzorem (2.19),

(15) we wzorze (2.1) brak jest indeksu AB przy macierzy gęstości,

(16) $p(a|x\lambda)$ zamiast $p(a|x, \lambda)$ we wzorze (2.17) i w linii pod wzorem,

(17) podrozdział 3.3.1 (strona 35) omówienia odsyła czytelnika do podrozdziału 2.2 publikacji [3] – taki podrozdział w [3] nie istnieje, stosowana tam jest inna numeracja,

(18) spis literatury – w tej części usterek jest niestety dużo i wynikają one z niekonsekwentnego stosowania przyjętego formatowania wpisów (w dużej mierze powielone zostały analogiczne usterki z publikacji); dla potwierdzenia tej oceny wymienię poniżej błędy, które zauważyłem:

(i) różne podejście to zapisu imion autorów, np. „Matty J. Hoban” zamiast „Matty J Hoban” w [2] i [63], „Robert W. Spekkens” zamiast „Robert W Spekkens” w [41], podobnie w [40] oraz [66]; „Eric Gama Cavalcanti” zamiast „Eric G Cavalcanti” w [14], podobnie w [29] i [47]; brak pierwszych imion autorów w [61], podobnie w [26] dla ostatniego autora,

(ii) różny zapis nazw czasopism: „Rev. Mod. Phys.” zamiast „Reviews of Modern Physics” w [11], „Phys. Rev. A” zamiast „Physical Review A” w [41], „Physical review letters” zamiast „Physical Review Letters” w [15], [19], [22], [24], [38], [42], [52], [68]; podobny błąd w [36], [56],

(iii) brak numerów w [55],

(iv) „,81 (2 2009)” zamiast „,81.2 (2009)” w [11], „,100 (2 2019)” zamiast „,100.2 (2019)” w [41] (w tej pozycji są aż trzy błędy, p. wyżej).

Podsumowanie

Doktorantka przedstawiła w swojej dysertacji rezultaty otrzymane podczas realizacji precyzyjnie sformułowanego programu badawczego. Tematyka podjętych badań jest ważna i aktualna. Wysoko oceniam wartość naukową otrzymanych przez Doktorantkę i jej współpracowników wyników. Doktorantka udowodniła, że sprawnie postępuje się odpowiednimi narzędziami specjalistycznymi i porusza w bieżącej literaturze oraz ma odpowiednią wiedzę ogólną. Deklarowany wkład w publikacje wskazuje na jej umiejętność samodzielnego prowadzenia badań na wysokim poziomie.

Niezależnie od przedstawionych w tej recenzji krytycznych uwag i komentarzy uważam, że przedłożona dysertacja spełnia odpowiednie wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję niniejszym o dopuszczenie Pani mgr Beaty Zjawin do dalszych etapów przewodu doktorskiego.