

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Viniciusa Pretti Rossi „Mathematical tools for characterising contextual quantum advantage”

Problem badawczy:

Rozprawa przedstawiona przez Kandydata ma na celu opracowanie nowych metod badania nieklasyczności. W szczególności, skupia się na uogólnionej kontekstualności oraz jej różnych aspektach w scenariuszach typu „przygotuj i zmierz” oraz w protokołach kwantowych, w których pełni ona rolę zasobu. W skład rozprawy wchodzi trzy opublikowane artykuły (Journal of Physics A, Physical Review Letters, Physical Review A), jeden artykuł będący obecnie w recenzji oraz program zamieszczony w repozytorium GitHub. Konkretnie poruszane problemy badawcze to:

1. Określanie zbiorów zredukowanych stanów (tzw. asembłaży) w scenariuszach Einsteina-Podolskiego-Rosena, przy uwzględnieniu ograniczeń narzucanych przez zasadę makroskopowej niekontekstualności.
2. Stworzenie programu umożliwiającego oszacowanie ilości kontekstualności w scenariuszach „przygotuj i zmierz,” opartego na uogólnionych teoriach prawdopodobieństwa (Generalised Probabilistic Theories).
3. Zastosowanie powyższego programu do zbadania relacji pomiędzy kontekstualnością a koherencją.
4. Zastosowanie powyższego programu do analizy, jak obecność szumu wpływa na stosowalność kontekstualności jako zasobu w protokołach parity-oblivious multiplexing.

Uważam, że powyższe problemy badawcze są bardzo ambitne, aktualne i wysoce nietrywialne, a ich rozwiązanie stanowi znaczący wkład w badania nad podstawami fizyki kwantowej oraz teorią informacji i obliczeń kwantowych. W związku z tym uważam, że przedstawiona rozprawa może stanowić podstawę do nadania Kandydatowi stopnia doktora w dyscyplinie nauk fizycznych.

Rezultaty:

Pierwsza praca [J. Phys. A: Math. Theor. 55, 264002 (2022)] dotyczy scenariusza Einsteina-Podolskiego-Rosena (EPR), w którym wieloczęściowy układ jest podzielony między obserwatorów. Tylko jeden z nich wie, że jego podukład jest opisywany kwantową macierzą gęstości, a stany tego podukładu, określane przez asembłaż, zależą od pomiarów pozostałych obserwatorów. Elementy asembłażu muszą spełniać kryteria, takie jak zasada braku sygnalizacji. Ważnym zagadnieniem jest ustalenie, czy cały układ ma kwantową realizację, mimo że niektóre układy przestrzegają zasady braku sygnalizacji bez

kwantowej realizacji. Kandydat, wraz z współautorami, skupił się na korelacjach z pomiarów zamiast na macierzach gęstości, wykazując, że zbiory prawie kwantowych realizacji spełniają zasadę makroskopowej niekontekstualności. Argumentuje, że osiągnięcie ściśle kwantowych realizacji wymaga zachowania pewnych założeń o kwantowym charakterze układu. Wyniki z tej pracy są kluczowe dla badań nad teorią kwantów i nieklasycznymi zasobami zapewniającymi kwantową przewagę.

Druga praca [Phys. Rev. Lett. 132, 050202 (2024)] i powiązany z nią program komputerowy (dostępny w repozytorium GitHub) dotyczą wykrywania nieklasyczności w scenariuszach „przygotuj i zmierz”. Kandydat wraz z współautorami rozważa w niej stan kwantowy oraz zbiór operatorów pomiarowych, opracowując numeryczną metodę opartą na programowaniu liniowym i metodzie zanurzenia w sympleksie (simplex embedding), która pozwala ustalić, czy statystyka pomiarów tych operatorów na danym stanie posiada klasyczny, niekontekstualny model. Co istotne, jeśli taki model istnieje, program go generuje. Jeśli natomiast taki model nie istnieje, program wskazuje, ile białego szumu należy dodać do stanu, aby taki model zaistniał. Kandydat dodatkowo rozszerza stosowalność programu na uogólnione modele probabilistyczne. Uważam, że wynik tej pracy jest bardzo ważny dla społeczności naukowców zajmujących się podstawami fizyki kwantowej. Ze względu na dostępność i względną prostotę, program stworzony przez Kandydata i jego współautorów z pewnością zostanie wykorzystany w innych badaniach nad nieklasycznością układów kwantowych oraz uogólnionych teorii prawdopodobieństwa.

W trzeciej pracy [Phys. Rev. A 108, 032213 (2023)] zastosowano wspomniany program do badania zależności pomiędzy kontekstualnością a koherencją. Jest to niezwykle interesujący problem, ponieważ przez długi czas uważano, że kontekstualność wymaga niekompatybilności pomiarów i stanów, a co za tym idzie, koherencji. Kandydat i jego współautorzy rozważyli specjalny zbiór stanów i pomiarów na pojedynczym kubicie, opisany pojedynczym parametrem θ . Dla θ równego zero wszystkie stany i pomiary były diagonalne w bazie Z-Pauliego, natomiast wraz ze wzrostem θ rosły również pozadiagonalne elementy stanów i operatorów pomiarowych (tzw. koherencje). Kandydat badał możliwość istnienia klasycznego, niekontekstualnego modelu dla takich stanów w zależności od parametru szumu. Pokazał, że kontekstualność może istnieć nawet w granicy znikającej koherencji. Choć mam pewne uwagi dotyczące tego wyniku (patrz: Inne uwagi), uważam, że wnosi on istotny wkład do debaty na temat roli koherencji w testach kontekstualności.

Czwarta praca [arXiv:2406.12773] dotyczy zależności pomiędzy kontekstualnością a wydajnością w zadaniach typu parity-oblivious multiplexing. W tej pracy ponownie zastosowano wcześniej opracowany program. Wiadomo, że kontekstualność jest zasobem w tego typu zadaniach — jej obecność pozwala na zakodowanie większej liczby bitów w kubicie, niż jest to możliwe w modelu klasycznym. Kandydat wraz z współautorami zbadał, jak ilość szumu depolaryzacyjnego, który mierzy „odporność” kontekstualności, obniża prawdopodobieństwo sukcesu w tym zadaniu. Pokazał, że krytyczna ilość szumu, po której układ staje się niekontekstualny, skaluje się monotonicznie z prawdopodobieństwem sukcesu. Ponadto Kandydat zastosował swoją metodę, aby pokazać, że w pojedynczym kubicie nie można zakodować więcej niż 3 bity, co wcześniej udowodniono innymi metodami. Przypadek kodowania 3 bitów został dokładnie zbadany pod kątem wpływu zarówno szumu

depolaryzacyjnego, jak i defazującego. Mam tutaj podobne uwagi (patrz: Inne uwagi) jak w przypadku poprzedniej pracy. Niemniej jednak uważam, że wyniki z tej pracy są ważne z punktu widzenia kwantowej teorii informacji, ponieważ pogłębiają nasze zrozumienie nieklasycznej komunikacji.

Podsumowując, powyższe prace, opublikowane w prestiżowych czasopismach fizycznych, wnoszą oryginalne i wartościowe rozwiązania ciekawych problemów badawczych oraz znacząco przyczyniają się do pogłębienia naszej wiedzy na temat uogólnionej kontekstualności. Stworzone narzędzia numeryczne, w postaci ogólnodostępnego programu komputerowego, z pewnością będą wykorzystywane przez innych naukowców w ich własnych badaniach.

Wkład Kandydata:

Wszystkie przedstawione prace są wieloautorskie. Kandydat jest pierwszym autorem dwóch z nich, a z oświadczeń wynika jasno, że jego wkład w powstanie tych prac był wiodący. Ponadto oświadczenia potwierdzają, że Kandydat miał również znaczący wkład w powstanie pozostałych dwóch prac oraz programu umieszczonego w repozytorium. Powyższe ponownie dowodzi, że przedstawione wyniki mogą stanowić podstawę do nadania Kandydatowi stopnia doktora.

Inne uwagi:

Rozprawa została napisana w języku angielskim i składa się ze streszczenia (w języku polskim i angielskim), obszernego wstępu wprowadzającego do tematyki, przeglądu literatury oraz wspomnianych prac. Wstęp został opracowany bardzo starannie. Kandydat wyjaśnia wszystkie niezbędne pojęcia w sposób przejrzysty i przystępny. Wykazał się również dogłębną znajomością dziedziny, co potwierdzają trafne i liczne odniesienia do literatury. Każdej pracy poświęcono osobny podrozdział, w którym omówiono motywację, główne narzędzia oraz wyniki, a także ich znaczenie w szerszym kontekście badawczym. Podsumowując, prezentację wyników oceniam bardzo wysoko.

Mam kilka pytań i uwag:

1. Co skłoniło Kandydata do rozważenia zasady makroskopowej niekontekstualności w scenariuszach EPR? Czy permutacyjna niezmienniczość pomiarów w prawie kwantowych realizacjach odegrała tu jakąkolwiek rolę? Pod koniec pracy [J. Phys. A: Math. Theor. 55, 264002 (2022)] (w rozdziale 4.3) Kandydat proponuje bardziej restrykcyjną wersję zasady makroskopowej niekontekstualności, jednak jestem ciekaw, czy rozważał on również inne zasady fizyczne, które mogłyby zostać zastosowane w tym kontekście?
2. Powszechnie wiadomo, że kontekstualność może występować w dwóch odmianach — zależnej i niezależnej od stanu. Kontekstualność niezależna od stanu pojawia się, gdy dysponujemy wystarczającą liczbą odpowiednio dobranych operatorów pomiarowych (efektów). Zastanawiam się, czy program stworzony przez Kandydata i jego współautorów można wykorzystać do zaobserwowania przejścia od kontekstualności zależnej od stanu do kontekstualności niezależnej od

stanu. Czy Kandydatowi udało się zaobserwować zjawisko, w którym dla ustalonego zbioru stanów, wraz ze wzrostem liczby efektów, rośnie parametr r (opisujący ilość szumu potrzebną do zaistnienia klasycznego modelu)? Czy zaobserwowano, że dla odpowiednio dużej, lecz skończonej liczby efektów parametr r rośnie do jedności? Być może dzięki temu możliwe będzie wypracowanie nowych dowodów kontekstualności niezależnej od stanu.

3. W pracy [Phys. Rev. A 108, 032213 (2023)] Kandydat bada wpływ szumu defazującego na istnienie niekontekstualnego modelu. Otrzymuje relację pomiędzy ilością szumu potrzebnego, aby taki model zaistniał, a koherencją mierzoną kątem θ . Biorąc pod uwagę specyficzny zbiór stanów parametryzowanych kątem θ , odnoszę wrażenie, że otrzymany wynik bardziej opisuje zależność pomiędzy stopniem zmieszania układu a kontekstualnością, niż pomiędzy koherencją a kontekstualnością. W tym szczególnym przypadku krytyczny parametr szumu maleje wraz ze wzrostem kąta θ . Domyślnie jest to interpretowane jako: krytyczny parametr szumu maleje wraz ze wzrostem koherencji. Jednak im większy kąt θ (im większa koherencja), tym bardziej zmieszany będzie stan po zastosowaniu kanału defazującego. Czy Kandydat jest w stanie podać jakiś argument wskazujący na to, że faktycznie koherencja jest tutaj bardziej istotna niż stopień zmieszania układu? Na przykład, czy można znaleźć zbiór pomiarów i zbiór stanów, w którym kontekstualność pewnego stanu mieszanego jest większa, niż kontekstualność innego stanu, bardziej czystego?
4. Podobnie jak w poprzednim punkcie, mam wrażenie, że w efekcie badanym w pracy [arXiv:2406.12773] chodzi bardziej o stopień zmieszania układu niż o jego kontekstualność. Czy Kandydat jest w stanie podać jakiś argument lub przykład, który by temu zaprzeczał?

Wniosek końcowy:

Przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania, dlatego wnoszę o jej dopuszczenie do dalszej części postępowania. Otrzymane wyniki są niezwykle interesujące i stanowią istotny wkład w badania nad kontekstualnością oraz jej rolą w kwantowej teorii informacji. Publikacje składające się na rozprawę zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach. Dodatkowo pragnę podkreślić, że Kandydat wykazał się wyjątkową skrupulatnością podczas przygotowywania rozprawy, która może posłużyć jako znakomite wprowadzenie do omawianej tematyki. Jestem również przekonany, że program komputerowy, którego współtwórcą jest Kandydat, okaże się cennym narzędziem dla innych naukowców w ich badaniach. Ze względu na powyższe, wnoszę o wyróżnienie rozprawy.



Paweł Kurzyński