

Dr hab. Michał Oszmaniec

Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Ocena rozprawy doktorskiej mgr Beaty Zjawin pt.

„EPR Assemblages as Common-Cause Resources of Nonclassicality”

## 1. Wstęp

Rozprawa doktorska Pani mgr. Beaty Zjawin podejmuje temat korelacji kwantowych w scenariuszach Einsteina-Podolsky’ego-Rosena (EPR), które stanowią jedno z ważnych zagadnień w teorii informacji kwantowej. W szczególności rozprawa skupia się na badaniu tzw. *asamblaży* EPR, które opisują korelacje generowane w scenariuszu Bellowskim, między dwoma przestrzennie oddzianymi laboratoriami współdzielącymi splątany stan kwantowy, w których jedna ze stron (zwyczajowo określana jako Alicją) ma dostęp wyłącznie do wyników i statystyk pomiarów, a druga (nazywana Bobem) ufa swoim urządzeniom pomiarowym, przez co ma dostęp do tomograficznej informacji o kwantowych obiektach będącej w jej posiadaniu. Kluczową ideą w scenariuszach EPR jest to, że korelacje te nie wynikają z bezpośredniej komunikacji między stronami, ale z *wspólnej przyczyny* — stanu kwantowego, który dzielą. W recenzowanej rozprawie Autorka rozwija teorię zasobów tych nieklasycznych korelacji i bada ich własności w kontekście operacji lokalnych i dzielonej zmienności losowej (LOSR).

Tematyka rozprawy wpisuje się w aktualne trendy badawcze. Jest tak dlatego, że korelacje w scenariuszach EPR są fundamentem wielu zastosowań w teorii informacji kwantowej, w tym w kryptografii kwantowej oraz testach nielokalności. Ponadto, zrozumienie zasobów, które pozwalają na generowanie tych korelacji może mieć znaczenie dla dalszego rozwoju kwantowych technologii, szczególnie w kontekście protokołów *device-independent* lub *semi device-independant*, czyli takich, które nie zależą od zaufania do urządzeń pomiarowych. Praca Pani Zjawin dostarcza nowego spojrzenia na teoretyczne aspekty kwantowych korelacji, rozwijając formalizm teorii zasobów dla asamblaży EPR i ich uogólnień.

Rozprawa mgr Beaty Zjawin składa się z czterech głównych rozdziałów. Pierwszy z nich, zatytułowany *Introduction*, wprowadza czytelnika w tematykę korelacji kwantowych, szczególnie w kontekście scenariuszy Einsteina-Podolsky’ego-Rosena (EPR). Autorka omawia podstawowe zagadnienia związane z teorią zasobów i uzasadnia wybór asamblaży EPR jako centralnego obiektu badawczego w pracy. Kolejny rozdział, *Preliminaries*, dostarcza szczegółowego opisu niezbędnych podstaw teoretycznych, w tym kluczowych pojęć związanych z programowaniem półokreślonym (SDP), LOSR (operacje lokalne i losowo dzielone) oraz teorią zasobów w scenariuszach EPR. W trzecim rozdziale, *Summary of the Dissertation*, autorka streszcza główne wyniki osiągnięte w trzech publikacjach naukowych, które stanowią podstawę rozprawy. Ostatni rozdział zawiera dyskusję wyników pracy, oraz wskazuje kierunki przyszłych badań które z nich wynikają.

Główną częścią rozprawy są trzy artykuły naukowe, w których Pani Zjawin pełniła rolę wiodącego autora. W pierwszym z nich, opublikowanym w prestiżowym czasopiśmie *Quantum* ("Quantifying EPR: The Resource Theory of Nonclassicality of Common-Cause Assemblages", *Quantum* 7, 926 (2023)), autorka przedstawiła teorię zasobów dla asamblaży EPR, wprowadzając operacje LOSR jako kluczowy mechanizm umożliwiający analizę i kwantyfikację tych zasobów. Drugi artykuł, również opublikowany w *Quantum* ("The Resource Theory of Nonclassicality of Channel Assemblages", *Quantum* 7, 1134 (2023)), rozszerza te badania na bardziej ogólne scenariusze, w których Bob zamiast

stanu kwantowego posiada kanał kwantowy, może mieć dodatkowe klasyczne wejście, czy też dysponować scharakteryzowanym pomiarem kwantowym. Trzeci artykuł, jeszcze nie opublikowany ("Activation of Post-Quantumness in Bipartite Generalised EPR Scenarios", arXiv:2406.10697 (2024)) dotyczy aktywacji postkwantowości w scenariuszach EPR oraz ich zastosowania w testach typu Bella.

## 2. Opis najważniejszych wyników

Rozprawa składa się z trzech głównych prac badawczych, z których każda wnosi istotne wyniki do zrozumienia nieklasyczności asymblażu EPR i ich relacji do szerszej teorii zasobów kwantowych. Najważniejsze wyniki pracy można podzielić na trzy obszary:

**Teoria zasobów dla asymblażu EPR (pierwszy artykuł):** W pierwszej części rozprawy autorka rozwija formalną teorię zasobów dla asymblażu EPR w scenariuszach kwantowych. Kluczowym elementem tej teorii jest zdefiniowanie dla tego aspektu teorii kwantów operacji *LOSR* (local operations and shared randomness), czyli operacji lokalnych, zachowujących "darmowe" asymblaży, które mogą być skorelowane przez dzieloną zmienną losową. Ważnym wynikiem jest tutaj opis warunków wystarczających i koniecznych na konwersję między zasobami (asymblażami) za pomocą operacji *LOSR* za pomocą programowania półokreślonego, co umożliwia badanie tych konwersji w sposób numeryczny. Autorka pokazuje ponadto, że nawet w najprostszym przypadku układu dwóch qubitów można skonstruować asymblaży, które mają kwantową realizację, a są między sobą nieporównywalne (tj. nie można ich między sobą przetransformować za pomocą operacji *LOSR*). Ponadto, wprowadzone zostały również warunki (w terminach programowania półokreślonego) na konwersję między asymblażami EPR w scenariuszu wielocząstkowym - tj. takim w którym mamy więcej niż jeden niescharakteryzowany układ uczestniczący w scenariuszu Bella.

**Uogólnienia scenariusza EPR i zasoby postkwantowe (drugi artykuł):** W drugiej części rozprawy Pani Zjawin rozszerza analizę na bardziej ogólne scenariusze. Konkretnie, wprowadza formalizm teorii zasobów dla uogólnionych scenariuszy EPR, w tym takich, w których Bob (jeden z uczestników eksperymentu EPR) ma możliwość manipulacji swoim systemem kwantowym za pomocą kanału kwantowego (ogólnego, Classical-quantum, lub Quantum - classical, opisującego destruktywny proces pomiaru). dla każdego z tych scenariuszy sformułowano warunki na transformację asymblażu poprzez operacje *LOSR* w terminach programowania półokreślonego. Ponadto, w scenariuszu "Bob with input" (tj. takim, w którym Bob ma dostęp do kanału QC) wskazano dwa post-quantowe (tj. nie mające realizacji w ramach teorii kwantów) asymblaży, które są nieporównywalne w ramach teorii zasobów opartej o *LOSR*. Co ciekawe, te konkretne asymblaży mogą być na siebie zmapowane, jeśli aktorzy uczestniczący w scenariuszu odpowiednim EPR dysponują poza lokalnymi operacjami również splątaniem.

**Relacja między postkwantowością a nielokalnością Bella (trzeci artykuł):** W trzeciej części pracy autorka bada związek między korelacjami postkwantowymi w scenariuszach EPR a nielokalnością w scenariuszach typu Bella. Proponuje protokół, który pozwala na aktywację zasobów postkwantowych w scenariuszach EPR w taki sposób, aby mogły one generować nielocalne korelacje w układach typu Bell. Wyniki te są istotne, ponieważ pokazują, że niektóre zasoby, które nie wykazują postkwantowych właściwości w typowych scenariuszach EPR, mogą zostać przekształcone w zasoby wykazujące nielokalność w bardziej złożonych układach. Ta część pracy otwiera nowe możliwości badania nielokalności i testowania granic teorii kwantowej, z potencjalnymi zastosowaniami w protokołach kryptograficznych i innych kwantowych technologiach.

### 3. Uwagi krytyczne i pytania

Rozprawa mgr Beaty Zjawin jest starannie przygotowana zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim. Jednakże, pojawia się kilka kwestii, które zasługują na uwagę:

**Wprowadzenie do rozprawy:** Wprowadzenie do pracy jest bardzo techniczne, co może sprawić, że dla czytelnika niezaznajomionego z tematyką korelacji EPR i teorii zasobów kwantowych, będzie trudne do zrozumienia. Autorka używa skomplikowanych pojęć bez dostatecznego wyjaśnienia ich fizycznej istoty (na przykład post-quantum, assamblage, common-cause resource, EPR correlations) co utrudnia pełne zrozumienie treści rozprawy dla niespecjalistów.

**Programy SDP:** W różnych częściach rozprawy pojawiają się programy SDP (Semidefinite Programming), które opisują konieczne i wystarczające warunki na możliwość przekształcania asamblaży EPR poprzez operacje LOSR. W programach tych deterministyczne przetwarzanie postprocessingowe jest wpisane jako dane wejściowe, co nie jest w pełni adekwatne w kontekście omawianej teorii.

**Pomyłki** Znalazłem trzy drobne pomyłki w pierwszej części rozprawy. Po pierwsze, przy dyskusji programowania półokreslonego na stronie 19 autorka stwierdza, że program dualny określa "najlepsze możliwe ograniczenie górne" na optymalna wartość problemu pierotnego. Nie jest to prawdą. Po drugie, notacja i szczegóły techniczne przy wprowadzaniu map CPTP na stronie 22 są niepoprawne. Po trzecie, równanie 3.10 jest niepoprawne ponieważ powinny w nim występować wyłącznie stany Choia-Jamiołkowskiego odpowiednich kanałów, a nie one same.

#### Pytania dotyczące rozprawy:

- Czy wykorzystanie struktury wypukłej asamblaży w różnych scenariuszach mogłoby poprawić złożoność obliczeniową programów SDP rozważanych w rozprawie?
- W drugim artykule Pani Zjawin przedstawiła uogólnienie teorii zasobów asamblaży EPR na scenariusze "Bob z wejściem", "Measurement-device-independence" oraz asamblaży kanałów kwantowych. Czy istnieje sens pytania o dalsze uogólnienia tych obiektów, na przykład na asamblaże składające się z kwantowych supermap (grzebieni kwantowych)?
- W treści rozprawy używane jest sformułowanie "zasoby" do określenia badanych obiektów kwantowych. Jednak, dla jakich zadań mogą być użyteczne nieklasyczne asamblaże pojawiające się w różnych scenariuszach? Jakie konkretne zastosowania mogłyby mieć omawiane zasoby?

### 4. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pani Beaty Zjawin wnosi istotny wkład w rozwój teorii zasobów kwantowych i nieklasycznych korelacji w scenariuszach EPR. Autorka przedstawia nowatorskie podejście do badania korelacji EPR, zarówno w standardowych scenariuszu (w którym Bob dysponuje stanem kwantowym), oraz jego uogólnieniach. W mojej ocenie praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, a jej wyniki w pełni uzasadniają przyznanie stopnia doktora. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Michał Oszumaniec

Warszawa 14.10.2024