

5 January 2025

Dr. Magdalena Zych

Wallenberg Academy Fellow

Department of Physics

Stockholm University

Recenzja rozprawy doktorskiej

"Common-Cause Structure of Non-Signalling Phenomena in Generalised Theories"

autorstwa Paulo José Cavalcanti de Vasconcelos Filho

Rozprawa bada strukturę zjawisk wyjaśnialnych bez sygnałowo i za pomocą wspólnej przyczyny przez pryzmat Uogólnionych Teorii Probabilistycznych (GPT). W szczególności ma na celu dostarczenie nowych spostrzeżeń na temat tego, w jaki sposób nielokalność, wspólna przyczyna i sterowanie, definiowane w mechanice kwantowej, rozszerzają się na szersze ramy teoretyczne możliwych teorii fizycznych za pomocą GPT. Rozprawa opiera się na trzech publikacjach wymienionych w pracy; Pan Paulo Cavalcanti jest pierwszym autorem każdej z tych prac.

Kluczowe wyniki obejmują:

1. Zdefiniowanie nowej GPT, *Witworld*, zdolnej do modelowania post-kwantowych asamblaży.
2. Ustalenie, że kanały bez sygnałowe w lokalnie tomograficznych teoriach są afinicznymi kombinacjami kanałów produktowych.
3. Wykazanie, że każdy kanał bezsygnałowy w lokalnie tomograficznych GPT może być zrealizowany jako proces wspólnej przyczyny w pewnej GPT oraz konstrukcja takej GPT (która może jednak nie być unikalna ani „najmniejsza” i w szczególności może nie być lokalnie tomograficzna).

Wyniki wypełniają lukę między ograniczeniami na kanały nakładane przez warunek bezsygnałowości a strukturami przyczynowymi w ramach GPT i oferują możliwość wykorzystania zarówno matematycznych, jak i konceptualnych ram tych teorii, w zależności od tego, które mają przewagę praktyczną w danym problemie.

Rozdział I

Ten rozdział wprowadza w tematykę nielokalności Bella, sterowania oraz zasady braku sygnałowania. Podkreśla historyczny i konceptualny rozwój tych idei, od paradoksu Einsteina-Podolsky'ego-Rosena (EPR) po tzw Popescu-Rohrlich boxes (PR boxes). Rozdział omawia, w jaki sposób nielocalne korelacje zostały sformalizowane i przeanalizowane w ramach klasycznych, kwantowych i uogólnionych teorii probabilistycznych (GPT). Pytania badawcze



Stockholms
universitet

poruszone w rozprawie są jasno określone, z naciskiem na rolę GPT w umożliwieniu lepszego zrozumienia kanałów i układów bezsygnałowych.

Rozdział 2

Rozdział przedstawia podstawowe narzędzia matematyczne oraz tło teoretyczne. Obejmuje:

- Zasadę braku sygnalowania oraz lokalne modele ukrytych zmiennych.
- Pojęcia nielokalności Bella i układów sterujących.
- Wprowadzenie do teorii kategorii, w tym symetrycznych kategorii monoidalnych oraz rachunku diagramowego.
- Ramy uogólnionych teorii probabilistycznych (GPT) oraz ich znaczenie dla zachowań bezsygnałowych.

W mojej opinii rozdział ten stanowi odpowiednią podstawę do zrozumienia wyników rozprawy przez fizyków także spoza grona ekspertów w tej dziedzinie.

Rozdział 3

Ten rozdział podsumowuje trzy główne wkłady badawcze, oparte na wspomnianych wcześniej trzech publikacjach i jest niejako rozszerzonym streszczeniem pracy.

Publikacja 1: Realizowalność wspólnej przyczyny układów post-kwantowych w GPT: Wprowadzenie *Witworld*, teorii zdolnej do realizacji sterowania post-kwantowego w scenariuszu wspólnej przyczyny, a także wyjaśnienie, w jaki sposób układy post-kwantowe zdefiniowane w literaturze niezależnie od recenzowanej pracy mogą być zrealizowane w tej nowej GPT. W tym zwięzłym streszczeniu zidentyfikowano również regułę kompozycyjną *Witworld*, czyli maksymalny iloczyn tensorowy, jako kluczowy aspekt pozwalający tej teorii osiągnąć wspomniane wyniki. Podkreślono ponadto, że układ post-kwantowy może zapewnić lepszą wydajność niż kwantowa w zadaniu zdalnego przygotowania stanu. W szczególności wykazano, że kluczowy układ określony w tej pracy (równanie 3.1 w rozprawie doktorskiej) umożliwi deterministyczny sukces w tym zadaniu dla kubitów przy użyciu 1 bitu komunikacji zamiast 2 bitów wymaganych w optymalnej strategii kwantowej.

Publikacja 2: Kanały bezsygnałowe i kombinacje afiniczne: Dowód, że kanały bezsygnałowe w lokalnie tomograficznych GPT są kombinacjami afinicznymi kanałów produktowych. Aby uzyskać ten wynik, zastosowano tzw. „*duotensor framework*”, który pozwala analizować sytuacje gdzie pełne diagramy są ważnymi obiektami GPT, ale można je rozłożyć na obiekty niebędące elementami GPT na etapach pośrednich. To, oraz twierdzenie udowodnione w drugiej publikacji, stwierdzające, że otoczka afiniczna przekształceń typu *zmiierz i przygotuj* oraz zbioru przekształceń zachowujących odrzucenie (*discard-preserving*) pokrywają się, pozwala autorom rozszerzyć wynik z klasycznych GPT na wszystkie lokalnie tomograficzne GPT.

Publikacja 3: Realizowalność kanałów bezsygnałowych jako kanały wspólnej przyczyny: Ustalenie, że każdy kanał bezsygnałowy w przyczynowej, lokalnie tomograficznej GPT może być zrealizowany w innej przyczynowej GPT jako proces wspólnej przyczyny.



Stockholms
universitet

Osiągnięto to poprzez skonstruowanie GPT, która jest „uzupełnieniem wspólnej przyczyny” dla danej lokalnie tomograficznej GPT. To uzupełnienie może nie być „najmniejszą” taką GPT i może nie być lokalnie tomograficzne. Jako szczególny przypadek tej konstrukcji, praca odpowiada twierdząco na otwarty problem postawiony w pierwszym artykule: czy istnieje GPT, która może zrealizować wszystkie asambláže post-kwantowe. Wynik ten ogólnie ukazuje związek między dwoma ważnymi ograniczeniami kanałów: ich rozkładalnością na formę wspólnej przyczyny oraz zasadą braku sygnałowania. Chociaż kanały bezsygnałowe mają wygodną matematyczną charakterystykę, kanały wspólnej przyczyny już nie. Fakt ten sugeruje dodatkowe zastosowanie wyniku w kontekście możliwości wykorzystania matematycznej formy ograniczeń bezsygnałowych w badaniu przyczynowości (kanałów wspólnej przyczyny), co jest szczególnie istotne w podstawach mechaniki kwantowej.

Rozdział 4

Ostatni rozdział, pomimo swojego tytułu, ponownie podsumowuje uzyskane wyniki, choć parafrazuje je w mniej techniczny sposób.

Komentarze i pytania do pracy

Uzyskane wyniki są istotne, szczególnie dla dziedzin związanych z podstawami fizyki oraz informacją kwantową. Wprowadzenie i rozdział dotyczący podstaw są jasno uporządkowane i dobrze napisane, dostarczając podstawowej wiedzy oraz definicji potrzebnych do zrozumienia wyników. Choć poszczególne artykuły również zawierają takie tło, zebranie ich w jednym, uporządkowanym rozdziale pracy jest bardzo pomocne dla czytelnika.

Moja główna krytyka dotyczy rozdziału czwartego (Outlook) – można by oczekiwać, że znajdą się tam nie tylko podsumowania, ale także przynajmniej niektóre z następujących elementów: dalsze kierunki badań zainspirowane wynikami lub technikami zaprezentowanymi w rozprawie, otwarte pytania wynikające z tej pracy lub takie, które mogłyby zostać rozwiązane za pomocą uzyskanych wyników lub technik. Niektóre z tych kwestii są przedstawione w poszczególnych artykułach, jednak umieszczenie rozdziału „Perspektywy” [Outlook] sugeruje czytelnikowi podobnie zebrane i rozszerzone spojrzenie na te indywidualne pytania czy problemy z szerszej perspektywy, całościowo ujętych wyników. Jest to niestety zmarnowana okazja, ponieważ forma rozprawy „na podstawie publikacji” w zasadzie pozwala autorowi skupić się praktycznie wyłącznie na takich właśnie spinających prace aspektach.

Przykładem takiego pytania może być np. następujący problem: wydaje się, że główne wyniki pierwszego artykułu pozostają prawdziwe po usunięciu *Boxworld* z *Witworld*. Naprawdę wartościowa mogłaby zatem być bardziej szczegółowa analiza tekiej GPT (*Witworld* bez *Boxworld*) oraz analiza czy dyskusja, czego brakuje w takiej GPT, co jest szczególnie istotne dla osiągniętych wyników i co wymusza uwzględnienie *Boxworld*.

Powiązany zagadnieniem, które mogłoby zostać poruszone, jest następujące: wydaje się, że teoria klasyczna połączona z kwantową w ramach *Witworld* tworzy z perspektywy GPT niezwykle interesującą teorię w kontekście hybrydowych teorii klasyczno-kwantowych, gdzie grawitacja ma być teorią klasyczną. Czy taka GPT mogłaby reprezentować teorię dynamiczną, w której klasyczny system reprezentuje pewne stopnie swobody a kwantowy – inne stopnie

swobody, które mogą ze sobą oddziaływać w celu modelowania układów kwantowych oddziałujących poprzez klasyczną grawitację? Jak istotny w tym kontekście jest fakt, że wspomniana GPT różni się od teorii kwantowej nawet w swoim sektorze kwantowym ze względu na maksymalną regułę iloczynu tensorowego do definiowania układów złożonych?

Innym zagadnieniem, które mogłoby zostać omówione w tym rozdziale są fundamentalne implikacje uzyskanej przewagi w zadaniu zdalnego przygotowania stanu, np. czy prowadzi to do „załamania” pewnej hierarchii itp.

Powyższe (i poniższe) komentarze nie wpływają na ogólną ocenę pracy – stwierdzam, że rozprawa spełnia formalne wymagania pracy doktorskiej i powinna zostać dopuszczona do publicznej obrony.

Poniżej wymieniam wszystkie moje pytania i komentarze w kolejności ich pojawienia się w pliku PDF rozprawy – wszystkie zostały również zaznaczone w pliku. Pomijam na liście sporadyczne literówki, także w równaniach/formułach matematycznych (które są zaznaczone w pliku PDF) gdyż nie wpływają znacząco na czytelność pracy.

- **Równanie (2.16):** Wygląda na to, że obiekt „ I_{abxy} ” nie został zdefiniowany.
- **6 linijek poniżej równania (2.16):** Symbol $(2,2,2,2)$ w kontekście typów nierówności Bella nie został zdefiniowany.
- **Przedostatnie zdanie sekcji 2.1.3:** *Naturally, no physical system has been found to require such a theory for its proper description, and many radical consequences of their existence have been shown to hold.*” Dla powyższych stwierdzeń nie podano żadnych cytowań.
- **Definicja 8:** Definicja sugeruje, że asambláže różniące się jedynie normalizacją byłyby uznawane za różne – dlaczego jest to dobra/użyteczna definicja?
- **Strona 12, 4-ta linijka od góry:** W zdaniu [moje podkreślenie] *It can be shown that here too not all non-signalling assemblages have local hidden variable models.*” – czy nie powinno być „... have local hidden state models”?
- **Poniżej równania (2.34):** Wydaje się, że pojęcie diagramu przemiennego nie zostało zdefiniowane.
- **Ostatnie zdanie sekcji 3.1:** Jak liczba bitów zależy od wymiaru układu, którego stan ma być przygotowany, tzn ile bitów komunikacji potrzeba dla qutritów, ..., quditów itp.?
- **Ostatnie zdanie pierwszego akapitu Rozdziału 4:** Nie jest dla mnie jasne, dlaczego *Boxworld* ma tak duże znaczenie we wszystkich trzech artykułach, poza byciem przykładem motywacyjnym teorii, która dopełnia klasyczną teorię GPT. W rzeczywistości, jak wspomniano w moich uwagach do sekcji *Perspektywy*, wydaje się, że główne wyniki pierwszego artykułu pozostają prawdziwe po usunięciu *Boxworld* z *Witworld*.



Stockholms
universitet

- **Ostatnie zdanie Rozdziału 4:** Dlaczego wniosek brzmi: “the concepts of non-signalling and common-cause realizability are not as distinct as previously one could suspect.” [moje podkreślenie], a nie po prostu, „are not distinct”? Czy jest to spowodowane faktem, że uzyskana GPT nie jest lokalnie tomograficzna?
- **Sekcja „perspektywy/; artykułu 2:** *An important direction for future study is therefore to see whether this result opens the door to exploring the possibilities of GPT-indefinite causal order*” Dokładnie – i byłoby to kolejne pytanie do rozwinięcia w sekcji *Perspektywy* rozprawy, i np. aktualizacji cytowań, jeśli w międzyczasie pojawiły się prace podejmujące ten temat.
- **Artykuł 3 (np. ostatni akapit przed listą odniesień):** Ciekawe byłoby umieszczenie w pracy dyskusji na temat tego, jak (lub dlaczego) lokalna tomograficzność $C[G]$ może zostać utracona oraz czy potencjalny brak lokalnej tomograficzności jest jedyną przeszkodą dla tego, aby $C[C[G]]$ było dobrze zdefiniowana GPT.

Magdalena Zych

Magdalena Zych

Zych

16.01.2025

Sztokholm

