

Recenzja rozprawy doktorskiej  
„Podstawowe własności, które pozwalają  
na kwantową przewagę w komunikacji.”  
autor: Anubhav Chaturvedi

Praca doktorska pana Chaturvediego składa się z czterech artykułów oraz streszczenia opisującego uzyskane wyniki. Wszystkie cztery artykuły zostały opublikowane w uznanych czasopismach, dwa z nich w Physical Review A, a dwa w Quantum. Pan Chaturvedi jest pierwszym autorem dwóch artykułów i ostatnim autorem pozostałych dwóch.

Wszystkie artykuły (cytowane jako A-D) znajdują się w obszarze informatyki kwantowej. Kontynuują pomysły przedstawione początkowo przez Johna Bella, mające na celu dostarczenie narzędzi do rozróżniania fizyki klasycznej i kwantowej. Wstępna propozycja Bella (znana również jako twierdzenie Bella) opiera się na lokalnych pomiarach układów splątanych. Bell wykazał, że pewne rodzaje kwantowych statystyk pomiarowych nie są zgodne z klasycznym opisem przyrody. Jednym z powodów jest to, że mechanika kwantowa pozwala nam zmieniać ustawienia pomiarowe w sposób, który nie jest możliwy w fizyce klasycznej. W ostatnich latach włożono wiele pracy w udoskonalenie tych pojęć. Ważnym kierunkiem badawczym jest pojęcie kontekstualności, które można zdefiniować na poziomie stanów kwantowych i pomiarów kwantowych. Oprócz wykazania rozbieżności pomiędzy fizyką kwantową a klasyczną, badania te torują również drogę do technologicznego wykorzystania mechaniki kwantowej pokazując, że układy splątane mogą przewyżczać ograniczenia systemów klasycznych w zadaniach komunikacyjnych.

Treść prezentowanych artykułów przedstawia się następująco:

Artykuł A bada rolę kontekstualności przygotowania w komunikacji kwantowej. Autorzy konstruują zadania komunikacji kwantowej, aby pokazać związek między kontekstualnością przygotowania a złożonością komunikacji. W tym celu artykuł analizuje niektóre rodzaje zadań znane jako „nieświadoma komunikacja” (oblivious

communication). Autorzy podają nierówność, która łączy kontekstualność przygotowania z wykonywaniem tych zadań komunikacyjnych. Pan Chaturvedi i jego współautor dalej demonstrują elegancką równowagę między nierównościami Bella a zadaniami nieświadomej komunikacji: złamanie jakiegokolwiek nierówności Bella może zostać przekształcone w przewagę komunikacji kwantowej w odpowiednich zadaniach tego typu.

Artykuł B wprowadza i bada pojęcie „ograniczonej odrębności ontologicznej”. Celem tej koncepcji jest sformalizowanie pojęcia rozróżniania obiektów fizycznych za pomocą narzędzi z teorii informacji kwantowej. Jako motywację do tej pracy, pan Chaturvedi wymienia filozoficzną zasadę nazwaną „tożsamością nieodróżnialnych”, sformułowaną przez Gottfrieda Wilhelma Leibniza. Zasada ta głosi, że nie mogą istnieć oddzielne obiekty lub byty, których wszystkie właściwości są wspólne. Artykuł B można postrzegać jako próbę sformalizowania tej zasady za pomocą narzędzi teorii informacji kwantowej. Po podaniu formalnej definicji ograniczonej odrębności ontologicznej, artykuł bada jej właściwości i zastosowania w mechanice kwantowej, pokazując, że niekontekstualność i przyczynowość Bella są konsekwencjami ograniczonej odrębności ontologicznej.

Artykuł C bada kontekstualność w mechanice kwantowej. W szczególności autorzy badają kontekstualność w eksperymentach typu „przygotuj i zmierz” i charakteryzują je za pomocą programowania półokreślonego. W tym celu autorzy wprowadzają hierarchię półokreślonych programów, wykorzystując i modyfikując dobrze znaną hierarchię Navascués-Pironio-Acín (NPA) do charakteryzowania kwantowych nielokalnych korelacji, jak zaproponował Bell. Artykuł C rozwija te metody dalej, pozwalając scharakteryzować zestaw zachowań kwantowych, które naruszają uogólnioną niekontekstualność. Co ciekawe, wyniki te pozwalają również wykazać monogamię niekontekstualności w konfiguracjach trójcząstkowych.

Artykuł D wprowadza i bada uogólnione pojęcie kodów losowego dostępu. W tym zadaniu jedna strona (Alice) koduje ciąg bitów w układzie kwantowym i wysyła go do drugiej strony (Bob). Zadaniem Boba jest odgadnięcie pewnego fragmentu danych Alicji poprzez wykonanie pomiarów na otrzymanym układzie kwantowym. Autorzy badają zachowanie takich protokołów komunikacyjnych dla pewnych typów strategii kodowania, odwołując się do wzajemnie bezstronnych, zrównoważonych funkcji. Autorzy określają granice wydajności swoich protokołów dla konfiguracji klasycznej, kwantowej i wspomagananej splątaniem.

Oprócz czterech artykułów wspomnianych powyżej, pan Chaturvedi wykazał się niezwykle aktywnością naukową, przyczyniając się do powstania siedmiu dodatkowych artykułów, z których sześć zostało już opublikowanych w uznanych czasopismach (jeden z nich to preprint na arXiv). Wśród tych artykułów pan Chaturvedi jest pierwszym autorem pięciu z nich. Na marginesie, wydaje się, że jest problem z formatowaniem w kilku miejscach pracy. W szczególności wydaje się, że w różnych równaniach brakuje znaku równości (np. w równaniach na stronie 13).

### **Ostateczna ocena**

Wszystkie prezentowane artykuły mają duże znaczenie dla informatyki kwantowej i fizyki kwantowej, a ich wkład jest na tyle znaczący, że uprawnia do uzyskania stopnia doktora. Rozważane problemy są bardzo trudne i wykorzystują najnowocześniejsze techniki analityczne i numeryczne w informatyce kwantowej. Wyniki Chaturvediego wyposażają społeczność zajmującą się informacją kwantową w nowatorskie narzędzia, które z jednej strony prowadzą do lepszego zrozumienia różnicy między fizyką kwantową a klasyczną, a z drugiej strony ujawniają nowe sposoby wykorzystania cech systemów kwantowych do zastosowań technologicznych. Należy również podkreślić, że artykuł A, który przedstawia wysoce nietrywialny związek między nierównościami Bella a zadaniami komunikacji kwantowej, otrzymał już 8 cytowań w Web of Science i 20 cytowań w Google Scholar. Taka liczba cytowań nie jest standardowa w wysoce wyspecjalizowanym obszarze badań i pokazuje, że wyniki pana Chaturvediego zostały już przyjęte przez społeczność ekspertów pracujących w tej dziedzinie. Inną godną uwagi cechą rozprawy doktorskiej jest to, że wszystkie cztery artykuły, na których opiera się praca, zostały opublikowane bez promotora. To pokazuje, że pan Chaturvedi jest w stanie rozwijać niezależne pomysły, które można opublikować i które są uznawane przez innych badaczy. Z przyjemnością rekomenduję Pana Chaturvediego do kolejnego etapu przewodu doktorskiego. Proponuję ponadto wyróżnienie tezy pana Chaturvediego wyróżnieniem *summa cum laude*.