

Toruń, 6.07.2021

Prof. dr hab. Dariusz Chruściński  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

### **Recenzja dorobku naukowego dra Alexandra Streltsova w postępowaniu habilitacyjnym**

Pan dr Alexander Streltsov uzyskał stopień doktora w roku 2013 na podstawie rozprawy „*The role of quantum correlations beyond entanglement in quantum information theory*” napisanej pod kierunkiem prof. dr Dagmar Bruss (Uniwersytet Heinego w Dueseldorfie). Na rozprawę habilitacyjną dra Streltsova składa się cykl 10 prac oryginalnych [H1-H10] opublikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych w latach 2015-2020 pt. „**Teorie zasobów kwantowych i ich zastosowania w komunikacji kwantowej**”. Prace wchodzące w skład rozprawy są wieloautorskie (wyjątkiem jest praca [H9]). Dołączona dokumentacja zawiera oświadczenia wszystkich współautorów określające ich rolę w procesie tworzenia artykułów. Oświadczenia te nie pozostawiają wątpliwości, że rola habilitanta w powstaniu powyższych prac była istotna. Należy podkreślić, że prace habilitanta zostały opublikowane w najlepszych czasopismach z fizyki teoretycznej:

- [H1,H2,H3,H6,H10] Physical Review Letters
- [H4] Journal of Physics A
- [H5] Physical Review X
- [H9] New Journal of Physics
- [H8] npj Quantum Information
- [H7] Reviews of Modern Physics

Również lista współautorów zawiera czołowych badaczy w dziedzinie kwantowej teorii informacji (m. in. Martin Plenio, Gerardo Adesso, czy też Jens Eisert). Zarówno lista współautorów jak i lista znakomitych czasopism dowodzą, że habilitant uważany jest za eksperta w dziedzinie kwantowej teorii informacji.

Dr Streltsov dołączył również do dokumentacji zgrabnie napisany autoreferat (w języku polskim). Pisanie w języku polskim nie jest proste, ponieważ duża część używanych terminów istnieje jedynie w języku angielskim i tłumaczenie często jest problematyczne. Dodatkowo nie jest to jego język ojczysty. Autoreferat jest profesjonalnie przygotowany, chociaż habilitant nie ustrzegł się kilku drobnych usterek w posługiwaniu się językiem polskim (np. „oddzielone od siebie strony Alice i Bob”).

### **Ocena osiągnięcia naukowego**

Przedstawione prace dotyczą fundamentalnych aspektów teorii kwantowej takich jak kwantowe splątanie czy też kwantowa koherencja, oraz analizie ich praktycznych zastosowań w teorii kwantowej informacji. Tym samym rozprawa dra Streltsova wpisuje się w bardzo

ważny i aktualny nurt badań. Co więcej, uzyskane wyniki oprócz fundamentalnego aspektu poznawczego posiadają nietrywialny potencjał aplikacyjny. Motywem przewodnim rozprawy jest tzw. teoria zasobów (resource theory). W kontekście teorii kwantowej zasobem jest pewna klasa stanów kwantowych, które mogą być użyteczne w pewnych protokołach kwantowo-informatycznych. Stany, które nie zawierają danego zasobu (np. stany separowalne w teorii splątania) są w takim protokole bezużyteczne i w teorii zasobu są tzw. stanami „darmowymi”. Kluczowym elementem teorii jest zdefiniowanie klasy operacji (przekształceń), które nie generują zasobu. W teorii splątania to znana klasa operacji lokalnych (na podukładach) + klasyczna komunikacja między laboratoriami (tzw. operacje LOCC). Następnym krokiem jest próba ilościowej charakteryzacji zasobu (np. miary splątania w teorii splątania). Teoria zasobów stała się bardzo owocnym podejściem do wielu problemów kwantowej teorii informacji. W ostatnich kilku latach rozwinięta została teoria, w której zasobem jest kwantowa koherencja. Koherencja kwantowa odgrywa istotną rolę w wielu zagadnieniach, np. w metrologii kwantowej czy też kwantowej termodynamice, gdzie w naturalny sposób wyróżniona jest baza własna Hamiltonianu układu. Co ciekawe, kwantowa teoria zasobów w odniesieniu do koherencji została zaproponowana stosunkowo niedawno w pracy Baumgratz i Plenio (PRL 2014). Dr Streltsov znakomicie przyczynił się do jej rozwoju. W teorii tej zbiór stanów darmowych jest jednoznacznie zdefiniowany jako stany diagonalne w wyróżnionej bazie. Natomiast, w literaturze istnieje wiele propozycji darmowych transformacji, tzn. takich, które darmowe stany przekształcają w darmowe. Praca [H7] zawiera pełen przegląd zagadnień związanych z tym podejściem.

Do najważniejszych wyników rozprawy zaliczam:

1. zbadanie związków między kwantowym splątaniem a koherencją. W pracy [H1] wykazano, że dwu-częściowe (tzn. działające na dwóch podukładach) operacje niekoherentne mogą wygenerować splątanie ze stanu produktowego tylko wtedy gdy jeden ze składników jest stanem z koherencją. (Wynik ten jest błędnie przedstawiony w autoreferacie, gdzie Autor zamienił operacje niekoherentne przez koherentne). Ten elegancki wynik pokazuje na ścisły związek między splątaniem i koherencją. Co ciekawe, wprowadzenie odpowiedniej odległości w przestrzeni stanów pozwala na zdefiniowanie miar splątania i koherencji. Pokazano, że tak zdefiniowana miara splątania jest ograniczona z góry przez odpowiednią miarę koherencji. W przypadku, gdy odległość zdefiniowana jest przez entropię względną, znaleziono związek między entropową miarą splątania a entropową miarą koherencji.
2. Wprowadzenie i analiza nowych klas operacji w zasobowej teorii koherencji: *genuinely incoherent operations* (GIO) oraz *fully incoherent operations* (FIO). W pracy [H4] dokonano szczegółowej analizy powyższych klas i ich związku z innymi klasami operacji rozważanymi w literaturze. Ważną własnością powyższych klas jest brak tzw. „złotej jedyńki” (golden unit), tzn. stanu, z którego można wygenerować wszystkie pozostałe. Pokazano, że warunkiem koniecznym istnienia takiego stanu jest istnienie darmowych operacji, które generują koherencję w pewnym rozkładzie Krausa.
3. analizę konwersji stanów przez niekoherentne operacje zarówno w przypadku deterministycznym jak i stochastycznym. W pracy [H6] znaleziono górne ograniczenie na liczbę niekoherentnych operatorów Krausa w reprezentacji niekoherentnej operacji (Twierdzenie 1 w [H6]). Wynik ten został zastosowany do

wyznaczenia prawdopodobieństwa konwersji stanów w scenariuszu stochastycznej operacji niekoherentnej. Praca [H8] zawiera dokładną analizę dla qubitów.

4. opracowanie zasobowej teorii koherencji w układach wielo-cząstkowych. W analogii do znanej klasy operacji LOCC (Local Operations and Classical Communication) wprowadzono w pracy [H5] operację LICC (Local Incoherent operations and Classical Communication) oraz LQICC (Local Quantum-Incoherent operations and Classical Communication). Podobnie jak klasa LOCC obie nowe klasy LICC oraz LQICC są trudne do analizy. W przypadku LOCC często stosuje się szerszą klasę operacji separowalnych. W pracy [H5] zastosowano ten sam wybieg do operacji LICC oraz LQICC zastępując je przez odpowiednie operacje separowalne, które następnie zostały zastosowane w pewnych zagadnieniach komunikacji kwantowej.
5. Niekoherentne łączenie stanów. W pracy [H3] dokonano analizy protokołu niekoherentnego łączenia stanów kwantowych. W teorii splątania odpowiedni protokół był analizowany w słynnej pracy (Horodecki, Oppenheim, Winter, Nature 2005) – wykazano wtedy, że łączenie stanów wymaga użycia kwantowego splątania, które charakteryzowane jest kwantową entropią warunkową. Ponieważ wielkość ta w teorii kwantowej może być ujemna wynik takiej operacji oprócz oczekiwanego łączenia stanów może dostarczyć dodatkowego źródła splątania. Analogiczny problem analizowano w pracy [H3] w kontekście operacji niekoherentnych. Wykazano, że istnieje dolne ograniczenie na sumę splątania i koherencji, co oznacza, że żadna procedura niekoherentnego łączenia stanów nie może prowadzić do jednoczesnego uzyskania splątania i koherencji. Jest bez wątpliwości jeden z ważnych wyników kwantowej teorii informacji, który wejdzie do kanonu tej teorii.

### **Ocena pozostałego dorobku naukowego**

Pozostały dorobek naukowy dra Streltsova jest również bardzo wartościowy i dowodzi bardzo wysokiej aktywności naukowej. Składa się na niego 18 publikacji z listy filadelfijskiej. Prace dra Streltsova były cytowane ponad 2000 razy (wg. Web of Science) a index  $h=17$  (wg. Web of Science). Praca [H7] (Rev. Mod. Phys. Colloquium) była cytowana ponad 450 razy i należy obecnie do kanonu literatury na temat kwantowej koherencji.

Prace [O1-O20] zawierają szereg ciekawych wyników dotyczących korelacji kwantowych i kwantowej koherencji. Zainteresowała mnie szczególnie praca [O19], w której habilitant uzyskał bardzo ciekawy wynik łączący własność podzielności odwzorowania dynamicznego oraz splątania w układzie trzy-częściowym. Wynik ten ma istotne znaczenie dla charakterystyki kwantowej ewolucji Markowskiej. Jest to tylko jeden z przykładów ważnych wyników habilitanta, które nie weszły do rozprawy habilitacyjnej.

Dr Streltsov wygłaszał referaty na wielu konferencjach międzynarodowych (w tym 10 wystąpień na zaproszenie). Sam miałem okazję kilka razy słuchać wystąpień habilitanta, które oceniam jako bardzo profesjonalne.

### **Ocena działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej**

Dr Alexander Streltsov opracował i prowadził wykład na Wydziale Fizyki UW (2019/2020) „Zaawansowana informacja kwantowa: splątanie i nielokalność”. Opracował również odpowiednie materiały dydaktyczne. Prowadził również następujące zajęcia dydaktyczne:

- Mechanika teoretyczna
- Metody matematyczne
- Teoretyczna optyka kwantowa i informacja kwantowa.

Sprawował opiekę naukową nad studentami studiów magisterskich oraz doktorantami.

### **Pozyskiwanie środków na badania naukowe**

Dr Streltsov kierował następującymi projektami naukowymi:

- First Team (FNP) „*Kwantowa koherencja i splątanie dla technologii kwantowej*” (2019-2022)
- Polonez 2 (NCN „Horyzont 2020”) „*Rola koherencji kwantowej w technologii kwantowej*” (2017-2018)
- Stypendium Feodor Lynen Return (Fundacja Alexandra von Humboldta) „*Łączenie stanów kwantowych LOCC*” (2016-2017); realizacja Wolny Uniwersytet Berliński
- Stypendium Feodor Lynen Return (Fundacja Alexandra von Humboldta) „*Kwantowa kontra klasyczna transmisja korelacji*” (2016-2017); realizacja Instytut Fotoniczny Barcelona (2013-2015)

Obecnie bierze udział w projekcie „Kwantowe technologie optyczne” (dyr. prof. dr hab. Konrad Banaszek) na Uniwersytecie Warszawskim (jest kierownikiem Laboratorium kwantowych zasobów i informacji).

### **Nagrody i wyróżnienia**

Habilitant był kilkakrotnie nagradzany

- Nagroda Uniwersytety Heinricha Heinego za najlepszą pracę doktorską (2013)
- Nagroda Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego za pracę doktorską (2014)
- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa wyższego dla wybitnych młodych naukowców (2020)

**Podsumowanie:** uważam, że dorobek naukowy dra Alexandra Streltsova jest wybitny, a przedstawiony cykl 10 prac, składający się na rozprawę habilitacyjną, stanowi znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej zgodnie z wymogami ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dlatego wniosek o nadanie panu dr. A. Streltsovowi stopnia doktora habilitowanego uważam za całkowicie uzasadniony i z pełnym przekonaniem wnoszę o jego przyjęcie przez Radę Dyscypliny Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Uważam, że rozprawa habilitacyjna dra Streltsova zasługuje na wyróżnienie.

Dariusz Chruściński