

*dr. hab Alexander Streltsov, prof. IPPT PAN*  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
ul. Pawińskiego 5B  
02-106 Warszawa

Warszawa, 13 marca 2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pana mgr. **Otavio Augusto Dantasa Molitora**  
p.t.:  
Thermodynamics and Indefinite Causal Order  
złożonej do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne  
na Uniwersytecie Gdańskim

## Uwagi wstępne

Praca doktorska zatytułowana „Thermodynamics and Indefinite Causal Order” autorstwa Otavio Augusto Dantasa Molitora koncentruje się na badaniu związku między nieokreślonym porządkiem przyczynowym a termodynamiką, w szczególności przez pryzmat drugiej zasady termodynamiki.

Praca liczy 114 stron i składa się z siedmiu rozdziałów. Pierwsze trzy rozdziały przedstawiają niezbędne tło teoretyczne, zaczynając od wprowadzenia (rozdział 1), które nakreśla zakres badań. Rozdział 2 definiuje nieokreślony porządek przyczynowy (ICO) i jego kluczowe właściwości, podczas gdy rozdział 3 bada koncepcję superpozycji porządków przyczynowych.

Wyniki pracy przedstawiono głównie w rozdziałach 4-6. Rozdział 4 analizuje potencjalną aktywację stanów pasywnych za pomocą przełącznika kwantowego, a następnie rozdział 5, który bada przełącznik kwantowy w warunkach otwartej dynamiki sterowania. W rozdziale 6 zbadano związek między termodynamiką a nierównościami przyczynowymi, a w rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie. Autor dołącza również załączniki, które zawierają dalsze szczegóły techniczne dotyczące macierzy Choi-Jamiołkowskiego, charakteryzacji macierzy procesu i relacji niepewności.

Rozprawa została bardzo starannie przygotowana, a dodatkowe elementy, takie jak listy symboli, rysunki, są pomocne w poruszaniu się po rozprawie.

## Przedmiot rozprawy doktorskiej

Główne wyniki badań przedstawione zostały w rozdziałach 4, 5 i 6. Rozdziały 4 i 5 opierają się na następujących artykułach, które zostały już opublikowane:

- O. A. D. Molitor and Ł. Rudnicki, *Entropy* 26, 153 (2024).
- O. A. D. Molitor, A. H. A. Malavazi, R. D. Baldijão, A. C. Orthey, I. L. Paiva, and P. R. Dieguez, *Communications Physics* 7, 373 (2024).

Pierwszy artykuł, który został również szczegółowo opisany w rozdziale 4 rozprawy, bada rolę przełącznika kwantowego w termodynamice kwantowej, a konkretnie jego zdolność do aktywacji stanów pasywnych. Badanie wykazało, że sam przełącznik kwantowy nie może aktywować stanu pasywnego, ale może ułatwić ekstrakcję pracy w połączeniu z zasobami zewnętrznymi, takimi jak aktywny stan kontroli lub dodatkowe operacje. Aby potwierdzić te ustalenia, autorzy analizują przykłady obejmujące system kubitów poddawany określonym transformacjom jednostkowym oraz kwantowy oscylator harmoniczny z operatorami przemieszczania i ściskania. Wyniki sugerują, że chociaż przełącznik kwantowy sam w sobie nie jest zasobem termodynamicznym, może on usprawnić procesy termodynamiczne, gdy zostanie uzupełniony zewnętrznymi danymi wejściowymi.

Drugi artykuł, opisany szczegółowo w rozdziale 5, bada wpływ interakcji środowiskowych na superpozycję porządków przyczynowych. Wykorzystując model kolizyjny, zbadano, w jaki sposób otwarty system sterowania wpływa na interferencję między dwoma porządkami przyczynowymi. Badanie analizuje niestabilności środowiskowe w przełączniku kwantowym, w szczególności wpływ temperatury na wyniki kontroli po selekcji. Ponadto zbadano, w jaki sposób te niestabilności wpływają na kluczowe zastosowania, takie jak przełączanie między wzajemnie nieobiektywnymi pomiarami i chłodzenie napędzane superpozycją porządku przyczynowego.

Rozdział 6 zawiera wyniki, które nie zostały opublikowane. W rozdziale tym zbadano, czy druga zasada termodynamiki ogranicza procesy o nieokreślonym porządku przyczynowym, które naruszają nierówności przyczynowe. Aby to zbadać, autor rozwija i analizuje zabawkowy model obejmujący grę „lazy-guess your neighbour’s input (LGYNI) game”. Analiza sugeruje, że w konkretnym rozważanym układzie termodynamika nie nakłada ograniczeń na nieokreślone porządki przyczynowe.

## Ogólna ocena i uwagi

Podsumowując, przedstawione wyniki przyczyniają się do głębszego zrozumienia nieokreślonego porządku przyczynowego i przełącznika kwantowego. Praca jest bardzo dobrze napisana, a wszystkie wyniki i dowody są szczegółowo wyjaśnione. Kluczowymi wynikami pracy są następujące ustalenia:

1. Sam przełącznik kwantowy nie może aktywować stanów pasywnych w termodynamice kwantowej, ale aktywacja jest możliwa, jeśli weźmie się pod uwagę dodatkowe cechy
2. Stopień swobody sterowania przełącznika kwantowego podczas interakcji z otoczeniem wpływa na odporność przełącznika kwantowego na dekoherencję
3. Wskazanie, że druga zasada termodynamiki nie ogranicza dwudzielnych, dwuwymiarowych macierzy procesów

Większość wyników pracy doktorskiej została zawarta w dwóch opublikowanych artykułach wspomnianych powyżej. Pan Molitor jest pierwszym autorem obu artykułów. W pierwszym artykule wyraźnie stwierdzono, że pan Molitor przyczynił się do zbadania i napisania oryginalnego projektu. W przypadku drugiego artykułu pan Molitor przyczynił się do konceptualizacji, analizy formalnej, pisania i edycji oraz przeprowadził modelowanie otwartej kontroli.

Mam następujące uwagi:

1. Na stronie iii autor wspomina preprint Ł. Rudnicki, W. Kłobus, O. A. D. Molitor, and W. Laskowski, Salient signatures of entanglement in the surrounding environment, 2022. arXiv:2209.05197. Jednak ten preprint nigdy nie jest wspomniany w dalszej części pracy.
2. W kilku miejscach cytaty nie są podane w odpowiednim formacie. Na przykład w rozdziale 3.2. autor omawia przełącznik kwantowy, który został wprowadzony przez innych autorów. Pierwsza połowa rozdziału nie zawiera żadnych cytatów, więc można odnieść wrażenie, że przełącznik kwantowy jest wprowadzany w pracy po raz pierwszy (że tak nie jest, wynika z innych części pracy, ale moim zdaniem należałoby również tutaj zacytować literaturę).
3. Prezentacja byłaby nieco lepsza, gdyby główne wyniki zostały przedstawione jako twierdzenia.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa stanowi istotny wkład w obszar fizyki kwantowej i spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie Otavio Augusto Dantasa Molitora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.