



Centrum Fizyki Teoretycznej

Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

Email: cft@cft.edu.pl

NIP 525-000-92-81

REGON 000844815

Dr hab. Jarosław Korbicz
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
02-668 Warszawa

Warszawa, 18.03.2025

Recenzja pracy doktorskiej mgr-a Otavio Molitor „Thermodynamics and Indefinite Causal Order”

Przedstawiona rozprawa doktorska to 114-to stronicowa monografia w języku angielskim. Oparta w części na dwóch pierwszoautorskich publikacjach kandydata, z czego jedna jest w piśmie *Communications Physics* o dość wysokim impakt faktorze. Kandydat współtworzył również jeden pre-print z bazy arXiv, który powstał w czasie studiów doktoranckich, i nie jest związany bezpośrednio z tematyką rozprawy. W jego dorobku jest także jedna publikacja w *Phys. Rev. A* z 2020 roku.

Tematyka rozprawy dotyczy styku dwóch aktualnych nurtów badań w teorii kwantowej – kwantowej termodynamiki oraz nieustalonego porządku czasowego. Oba obszary są w ostatnich kilku-kilkunastu latach intensywnie badane oraz dyskutowane, zwłaszcza nieustalony porządek. W przypadku tego ostatniego, o ile oryginalna motywacja, odwołująca się do możliwych superpozycji czasoprzestrzeni czy kierunków upływu czasu, jest raczej naciągana, o tyle możliwość superponowania kolejności wykonywania operacji jest jak najbardziej zasadnym problemem. Kandydat bada wzajemne relacje pomiędzy nieustalonym porządkiem a termodynamiką, co jest bardzo naturalnym i ciekawym kierunkiem badań, biorąc pod uwagę związki termodynamiki, zwłaszcza drugiej zasady termodynamiki (ZTZ), z nieodwracalnością i kierunkiem upływu czasu. Koronny rezultat rozprawy, przedstawiony w rozdz. 6-tym, wiąże właśnie silną formę nieustalonego porządku czasowego w postaci łamania tzw. nierówności kauzalnych (z ang. CI) z drugą zasadą termodynamiki. Autor pokazuje, że druga zasada termodynamiki nie narzuca ograniczeń na dwuciałowe, dwukubitowe procesy z nieustalonym porządkiem, przynajmniej w badanym scenariuszu. Ten negatywny rezultat, stanowiący istotne rozszerzenie wcześniejszych badań innego autora, ma ciekawy pozytywny aspekt – przynajmniej jedna z fundamentalnych zasad fizyki, ZTZ, nie zakazuje nieustalonego porządku czasowego (w silnej postaci łamiącej CI). Może to być argumentem za ich poszukiwaniem w doświadczeniu, o ile, jak słusznie argumentuje Kandydat, nie ma innych przeszkód.

Innym badanym tematem jest sprawa aktywacji tzw. stanów pasywnych przy pomocy najprostszej i najbardziej popularnej formy superpozycji porządku operacji – kwantowego przełącznika (ang. Quantum Switch). Kandydat pokazuje, że sam przełącznik jest niewystarczający i potrzebne jest albo zewnętrzne źródło koherencji albo pomiar kubitów kontrolnego z późniejszą post-selekcją. Wyprowadza również ogólne warunki konieczne aktywacji. Szczegółowo zbadane są jako przykłady układ dwupoziomowy oraz oscylator harmoniczny.

Ostatni badany temat to wpływ termicznego środowiska na kubit kontrolny kwantowego przełącznika. Upraszczając oddziaływanie ze środowiskiem do „stroboskopowego” modelu zderzeniowego, wyprowadzone są warunki zachowania członu z nieustalonym porządkiem w zależności od parametrów modelu takich jak temperatura oraz ilość zderzeń. Naiwnie rozumując, ponieważ nieustalony porządek opiera się na istnieniu

koherencji w stanie kubitu kontrolnego, można się spodziewać, że oddziaływanie z otoczeniem te koherencje zniszczy a zatem i nieustalony porządek. Tak się rzeczywiście dzieje ale nie we wszystkich przypadkach i jest przypadek, w którym nieustalony porządek przeżywa, choć postselekcja na ten przypadek staje się znikomo prawdopodobna. Co ciekawe, kubit kontrolny oddziałuje z otoczeniem już po oddziaływaniu z systemem a nie przed (co chyba wymuszone jest postacią oddziaływania 5.25). Ogólne wyniki są zastosowane do szczegółowego zbadania dwóch znanych z literatury przykładów: kwantowej lodówki i tzw. obserwacji baz MUB.

Większość uzyskanych wyników jest wysoce nietrywialna technicznie i wymaga dość intensywnych i gęstych obliczeń. Autor dość szczegółowo je opisuje, co jest mieczem obusiecznym jak wskazuję poniżej, ale potwierdza świetny warsztat obliczeniowy. Wstęp oraz akapity podsumowujące poszczególne rozdziały wskazują z kolei na bardzo dobre zrozumienie podstaw teoretycznych jak i kontekstu wykonywanych badań. Analiza rozprawy nasuwa szereg pytań i uwag krytycznych, które zamieszczam poniżej:

Brak definicji nierówności kauzalnych (CI) aż do rozdziału 6.1 co utrudnia zrozumienie wstępu.

Nieprecyzyjna definicja stanu pasywnego – można było je ściślej zdefiniować

Czy ogólniejszy proces niż QS (4.5), np. OCB z ref. [25] może aktywować stany pasywne?

Na ile ciężkie byłoby zrezygnowanie z obrazka zderzeniowego w rodz. 5-tym i dołączenie pełnej otwartej dynamiki, np. typu spin-bozon?

Dlaczego to postselekcja na stan minus daje ochronę porządku w 5.2.2? Widać, że wtedy 5.37 i 5.38 stają się równe modulo znak dla wysokiej temperatury ale czy jest głębsze wytłumaczenie?

W wielopoziomowym gąszczu oznaczeń niezbyt jasne jest wyprowadzenie zachowań z tabeli 5.1 ze wzorów 5.41 i 5.44.

Dlaczego w przykładzie MUB porządek kauzalny gra rolę skoro odwzorowania komutują (wzór 5.56)? Co nowego wnosi tutaj nieustalony porządek? Na rys. 5.6b nie widać żeby krzywe dla różnych n zbiegały do krzywej ustalonego porządku, w przeciwieństwie do stwierdzenia w tekście pracy (str. 64).

W przykładzie kwantowej lodówki, podobnie jak w poprzednim przykładzie, nie było dla mnie jasne co jakościowo nowego daje użycie kwantowego przełącznika? Wydajności 5.81 i 5.85 były porównane do przypadku bezkolizyjnego ale nie do ustalonego porządku. Poza tym mała uwaga edycyjna, w 5.68 powinien być chyba indeks S zamiast C.

W rozdziale 6.2.1, opis maszyny jest dość niezrozumiały. W szczególności brakuje jasnego wytłumaczenia roli pomiarów f , g , bazy e , i stanów σ_i i τ_i , czym uwarunkowana jest ich liczba k ?

Macierz procesu W pojawia się nagle w 6.37. Rozumiem, że jest to kluczowy moment wprowadzenia nieustalonego porządku i przydałoby się jasne wytłumaczenie tego kroku.

Co miało zawierać niedokończone zdanie po B.20?

Ogólna uwaga co do narracji– pracę dość ciężko się czyta i mogła być miejscami napisana przejrzysiej. Kandydat dość często zagłębia się w szczegółowe, fenomenologiczne opisy wzorów oraz kolejnych podprzypadków zamiast skupić się raczej na opisie ich sensu.

Pomimo tych krytycznych uwag, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi ciekawy i niebanalny wkład zarówno w dziedzinę termodynamiki kwantowej jak i studiów nieustalonego porządku czasowego. Jest też ważnym głosem w aktualnej dyskusji na temat fizyczności nieustalonego porządku. Praca spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr-a Otavio Molitor do dalszego etapu przewodu doktorskiego.

Dr hab. Jarosław Korbicz