

Toruń 2025.III.9

dr hab. inż. Gniewomir Sarbicki, prof. UMK
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5,
87-100 Toruń
e-mail: gniewko@fizyka.umk.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Otavio Augusto Dantasa Molitora “Thermodynamics and Indefinite Causal Order”

Praca doktorska pana Otavio Augusto Dantasa Molitora została napisana pod kierunkiem dr hab. Łukasza Rudnickiego, prof. UG. Składa się ona z siedmiu rozdziałów (wśród których pierwszy to wprowadzenie, a ostatni to konkluzje) oraz trzech Appendixów. Pracę kończy bibliografia.

Rozdział 2

Centralnym obiektem analizowanym w pracy jest macierz procesu. Jest to obiekt pozwalający uogólnić dynamikę kwantową - najbardziej ogólne odwzorowanie liniowe, które przypisze sekwencji pomiarów uogólnionych rozkład łączny prawdopodobieństw ich wyników. Graficznie reprezentujemy je jako prostokąty z wcięciami, w których możemy umieścić pomiary. Praca ogranicza się do analizy macierzy procesów o dwóch wejściach reprezentujących pomiary po stronie Alicji i po stronie Boba i skupia się na macierzach procesu, dla których porządek przyczynowy pomiędzy pomiarami jest nieokreślony. Rozdział 2 charakteryzuje takie macierze procesu poprzez ich macierze Choi uzyskane z macierzy procesów w izomorfizmie Jamiolkowskiego. Ogólna charakteryzacja macierzy Choi macierzy procesu (2.20) - (2.23) jest dobrze opisana poniżej, ale wyprowadzenie w Appendixie B urywa się w połowie zdania, gdzie powinna pojawić się charakteryzacja zakresów parametrów $a_{ij}, b_{ij}, \dots, g_{ij}$.

Macierz procesu o nieokreślonym porządku przyczynowym może być kombinacją wypukłą macierzy o określonym porządku czasowym (nazwiemy ją wtedy przyczynowo-separowalną), ale może też zawierać składniki którym nie da się przypisać żadnego porządku przyczynowego i wtedy nazywamy

Rozdział 4

Rozdział 4 rozważa możliwość aktywacji stanów pasywnych za pomocą Kwantowego Przełącznika. Autor wprowadza definicję pracy wykonanej poprzez cykliczną zmianę parametrów Hamiltonianu oraz pojęcie energotropii. W definicji ergotropii autor pisze *for all possible unitaries U existing in the linear space formed from the Hilbert space of the system $\mathcal{L}(\mathcal{H}_S)$* - zdanie to nie jest precyzyjne i wymaga korekty. Nie jest właściwe również sformułowanie *measurement state* (nad wzorem (4.23)) wobec czystego efektu. W skończone wymiarowych przestrzeniach Hilberta stany i obserwable żyją w tej samej przestrzeni, ale należałoby zadbać o ich rozgraniczenie językowe. Problem nazywania efektów pomiarowych stanami pojawia się potem jeszcze w kilku miejscach w pracy.

W dalszej części Rozdziału 4 autor pokazuje że użycie Kwantowego Przełącznika nie jest w stanie aktywować iloczynu tensorowego stanów pasywnych układu i przełącznika. Nie jest to stan pasywny całego układu (różne temperatury), ale nie ma to znaczenia wobec braku oddziaływania pomiędzy podukładami. Wśród przyczyn braku aktywacji autor wymienia:

This is so, because the QS is a linear combination of quantum channels acting only on the side of the system S , and then no superadditivity or exotic feature is possible.

Co jest prawdą, gdy układ kontrolujący jest mierzony w bazie obliczeniowej. Czy pomiar kontroli w innej bazie, wprowadzający człony o niestalonym porządku przyczynowym, mógłby pomóc w aktywacji? Uwolnienie bazy pomiarowej następuje dopiero w dalszej części rozdziału.

Następnie pokazano, że aktywacja stanu jest możliwa, gdy Hamiltonian układu kontrolującego jest odpowiednio mocno niediagonalny w bazie obliczeniowej (bazie, która wyznacza porządek przyczynowy kanałów kwantowych w macierzy procesu). Z kolei podrozdział 4.3.2 rozważa możliwość aktywacji poprzez post-selekcję.

W dalszej części rozdziału autor przechodzi do analizy dwóch przypadków. W pierwszym układem kontrolowanym jest qubit, a kanałami są dwa obroty kuli Blocha. W drugim przypadku autor rozważa kwantowy oscylator harmoniczny i parę kanałów unitarnych: najpierw operatorów przesunięcia, a potem przesunięcia i ściśnięcia. Podrozdział ten pokazuje biegłość autora w wykorzystywaniu relacji algebraicznych pomiędzy operatorami przesunięcia, ściśnięcia oraz rozkładu stanu Gibbsa poprzez stany koherentne.

Najwięcej uwag miałbym do sposobu prezentacji wyników tego rozdziału.

1. Brakuje odpowiednika wzoru (4.38), gdzie stan początkowy qubit kontrolującego i projektor postselekcji byłyby usuwane ze zbioru parametrów przez optymalizację. *omega* może być ustalona na 1 (wybór jednostki czasu). Pozostają α_x , α_y , β oraz t (5 parametrów). Dalej parametry operacji $SU(2) \times SU(2)$ też można usunąć poprzez optymalizację,

od pochodnej czasową stanu - ciepło i pochodzący od pochodnej czasowej Hamiltonianu (praca sił zewnętrznych - związana z nieautonomicznością układu). Oznaczenie on-off sugeruje, że w Hamiltonianie układ-cząstka otoczenia jesteśmy w stanie włączać i wyłączać oddziaływanie.

Problem, gdzie przypisać energię oddziaływania w granicy silnego sprzężenia występuje już w przypadku klasycznym i prowadzi do pojęcia entalpii. W przypadku kwantowym problem ten również jest badany (np. Ángel Rivas, Phys. Rev. Lett. 124, 160601). W modelu kolizyjnym unikamy tego problemu przechodząc do granicy nieskończenie wielu cząstek otoczenia oddziałujących z układem w jednostce czasu. Czas oddziaływania zmierza do zera, a stała oddziaływania skaluje się jak jego pierwiastek kwadratowy. Przechodzimy wtedy do granicy słabego oddziaływania i problem znika, bez potrzeby dokonywania założeń (5.13), (5.14).

Pytanie o to przejście graniczne powraca przy wzorze (5.33) - czy w przejściu granicznym $n \rightarrow \infty$ nie skalujemy czasu oddziaływania? W przeciwnym wypadku będzie to stan osiągnąony po nieskończenie długim czasie.

W komentarzu pod zbiorem

all correlations, quantum or classical, between S and C disappear, since they are in a separable state

korelacje Q i C znikają, bo jest to stan produktowy - stan separowalny ciągle umożliwia korelacje klasyczne.

Wzory (5.10) i (5.11) w podrozdziale 5.1.2 zawierają pewne niejasności. Wyrażenie $S(\rho_{SE}^n || \rho_S^{n-1} \otimes \Theta_E)$ w drugiej linijce wzoru (5.10) jest z definicji produkcją entropii. Skąd wynika jego równość z sumą w pierwszej linijce? Dalej, pierwsza równość we wzorze (5.11) zakłada, że $S(\Theta_E^n || \Theta_E)$ jest równa zero. Dlaczego? Jeżeli jest to wynikiem założenia, że otoczenie pozostaje w równowadze termodynamicznej, jak to założenie utrzymuje się w sytuacji silnego sprzężenia i oddziaływania ze skończoną liczbą cząstek otoczenia w jednostce czasu? Niejasna jest również ostatnia równość w (5.11). Zgodnie z definicją entropii von Neumanna, wyrażenie to powinno być równe 0.

Na stronie 56 mamy zdanie:

Moreover, these SCO effects have no dependence on the inverse temperature $\beta E = 1/TE$ and the energy gap ω . Eq. (5.39) means that no non-Markovian effects are involved

- dlaczego zależność zanikania członów interferencyjnych od temperatury miałyby być oznaką niemarkowowskości?

Następnie autor przechodzi do analizy wpływu otwartej dynamiki qubitu kontrolującego w dwóch przykładach: Przełącznika Kwantowego pomiędzy mapami dekoherującymi w dwóch wzajemnie nieobciążonych bazach oraz chłodziarki zbudowanej przy użyciu Kwantowego Przełącznika. Miałbym tutaj następujące pytania:

1. Rysunek 5.6: Czy zwiększanie β jest równoważne skalowaniu ε ?

Appendixy

Oprócz wspomnianego już problemu urywania się Appendixu B, z obowiązku odnotowuję drobne błędy we wzorach:

1. (A.3) - brakuje primów
2. (B.3) - brakuje: $\forall i > 0$, zerowy element bazy jest równy identyczności.

Oprócz wskazanych powyżej niedociągnięć, w kilku miejscach daje się zauważyć błędy gramatyczne konstrukcji zdań w języku angielskim. Uznanie natomiast budzi swoboda, z jaką autor wiąże problemy rozważane w pracy z unifikacją mechaniki kwantowej i teorii względności. Na odbiór pracy bardzo dobrze wpływają cytaty rozpoczynające rozdziały. Bibliografia kończąca pracę jest bogata i wyczerpująca.

Wyniki badań zaprezentowanych w pracy zostały opublikowane w dwóch artykułach w czasopismach Communications Physics oraz Entropy. Autor jest też współautorem jednego preprintu.

Podsumowując, stwierdzam że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr Otavio Augusto Dantasa Molitora spełnia wszelkie, tak ustawowe (określone w art. 187 ust. 1-3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 ze zm.), jak i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora.

Gniewomir Sarbicki

Gniewomir Sarbicki