

### **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Tanmoya Biswasa „Finite size effects in quantum thermodynamics”**

Przedmiotowa praca doktorska dotyczy własności termodynamicznych małych układów kwantowych. W odróżnieniu od dużych, makroskopowych układów, gdzie wiele własności opiera się na przejściu do granicy termodynamicznej, małe, np. kilkupoziomowe układy trzeba opisywać inaczej, przede wszystkim odwołując się do referencyjnych stanów termicznych. Trzeba także dostosować pojęcie pracy, relacji fluktuacji i dyssypacji i opisu silników cieplnych, do skończonej przestrzeni układu.

W swojej pracy doktorskiej mgr Tanmoy Biswas podjął się trudnego zadania kwantyfikacji wymienionych pojęć, identyfikacji ich relacji i własności oraz zastosowania na konkretnych przykładach. W pracy zostały wyprowadzone ograniczenia na maksymalną pracę możliwą do uzyskania w procesach termodynamicznych małych układów, nierówności fluktuacyjno dyssypacyjne, limity na wymazywanie informacji i asymptotyczną destylację wyróżnionego stanu kwantowego, i sprawność mikroskopowego silnika cieplnego.

Na wstępie chcę podkreślić, że termodynamika mikroskopowa jest zagadnieniem trudnym, ze względu na niemożność korzystania z makroskopowej granicy termodynamicznej. Przykładem jest użyta w rozdziale 1. entropia Renyi, która nie jest subaddytywna w przeciwieństwie do Shannona. Również założenie stanu Gibbsa oznacza, że mikroskopowy układ jest w rzeczywistości w kontakcie z nieskończonym rezerwuarem o ustalonej temperaturze. Autor uczciwie wyjaśnia założenia twierdzeń i przyjęte własności układów fizycznych, co jest nieuniknione w każdej próbie modelowania matematycznego zjawisk fizycznych. Rozdział 1. wprowadza podstawowe pojęcia dla klasycznych rozkładów prawdopodobieństwa, ich słabe uporządkowanie i tzw. katalizator, czyli układ pomocniczy rozszerzający słaby porządek. Rozdział 2. wprowadza stany i operacje swobodne albo termiczne, czyli stany Gibbsa i operacje unitarne zakładające otoczenie Gibbsa i pojęcie pracy. Dwa pierwsze rozdziały porządkują i podsumowują istniejącą wiedzę w tematyce pracy doktorskiej. Kolejne rozdziały są oryginalnymi wynikami Autora. W Rozdziale 3. wprowadzono pojęcie destylacji, wymazywania informacji i ergotropii. Destylacja oznacza dążenie do osiągnięcia żądanego stanu za pomocą operacji wykorzystujących dodatkowe zasoby kwantowe. Ponieważ przeważnie jest ona dokładna tylko asymptotycznie, miarą destylacji jest zdefiniowana odległość od celu. Wymazywanie informacji polega na transformacji układów pomocniczych do stanów podstawowych. Głównymi wynikami rozdziału są twierdzenia 26A,B i 27A,B, które, wykorzystując istniejące w literaturze pomocnicze twierdzenie 28, pozwalają oszacować efekty destylacji w granicy nieskończonej liczby niezależnych układów pomocniczych. Twierdzenia te zostały zastosowane do wyznaczenia maksymalnej pracy możliwej do uzyskania i odwrotnie minimalnej pracy potrzebnej do wymazania informacji. Znaczną część rozdziału zajmują dowody wymienionych twierdzeń. W Rozdziale 4 przedyskutowano ergotropię czyli ilość energii, którą można zabrać z układu za pomocą operacji unitarnej. Maksymalną ergotropię jako różnicę energii swobodnych można uzyskać w granicy termodynamicznej, inaczej nie zawsze się da, bo układ może być w stanie o rozkładzie prawdopodobieństwa różnym od Gibbsa. Autor postawił pytanie o maksymalną ergotropię stanu otrzymanego przez operację termiczną na zadanym stanie, zakładającą ustaloną temperaturę otoczenia i pokazał, że jest ograniczona przez entropię względną, twierdzenie 36. Następnie zilustrował na przykładzie drabinki oscylatora wysycenie tego

ograniczenia. W Rozdziale 5 przedstawiono koncepcję mikroskopowych silników cieplnych. W silniku otwartym ciało robocze jest początkowo zimne. Protokół silnika zaczyna się od pobrania energii (interakcji) przez ciało robocze z ciepłego rezerwuarem poprzez operację termiczną, a potem ładowana jest bateria. Sprawność silnika to stosunek pracy przekazanej baterii do energii pobranej od ciepłego rezerwuaru. Pracę wylicza się jako ergotropię i maksymalizuje sprawność po wszystkich możliwych operacjach termicznych na ciele roboczym. Przykłady silników otwartych na qubitach i qutritach pokazują zależność sprawności od temperatury rezerwuarów. Silnik zamknięty składa się z dwóch stanów początkowo termicznych, lub dodatkowo z katalizatorem, i szuka się największej możliwej pracy do uzyskania w stosunku do energii pobranej od ciała cieplejszego. Sprawność jest ograniczona przez sprawność silnika Carnota. Wprowadzenie dodatkowego elementu katalizatora poprawia ograniczenie na sprawność. Rozprawę kończy Dodatek, zawierający dowody kilku twierdzeń, i obszerna Bibliografia.

Rozprawa doktorska jest ciekawa, szczególnie przykład maksymalnej ergotropii 4.6.1 i silniki cieplne w rozdziale 5. Zawiera konkretne oryginalne wyniki w postaci nierówności z dyskusją równości i zachowań asymptotycznych w rozdziałach 3,4,5. Praca zasługuje więc na ocenę pozytywną. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych niedociągnięć. Najbardziej niepokoi mnie, że choć pokazano, że sprawność jest ograniczona przez Carnota (5.59), to sprawności (5.85), (5.173) i poniżej (5.177) są zupełnie niezależne od temperatur. Nawet jeśli to kwestia innej definicji, wypada to jednak skomentować. Poza tym nie wiem czy odległość oparta na nieufności (3.10) spełnia nierówność trójkąta, a jeśli nie to jakie względy zdecydowały o użyciu mimo to tej wielkości. Czy wyniki rozprawy pozostaną słuszne, jeśli stosować wyłącznie entropię Shannona, a nie Renyi, która nie jest subaddytywna? Mam też uwagi redakcyjne. Czym jest „koszt” na początku Rozdziału 2? Czym jest gamma w (2.49)? Skrót GKSL powinien zostać rozwinięty (prawdopodobnie Gorini, Kossakowski, Sudarshan, Lindblad). W (2.6) powinno być chyba B zamiast E. Autor powinien zastanowić się nad prostszym zapisem Tabeli 2.1, (5.37-42), (5.140-141) a tym bardziej (5.156). Natomiast dobrze, że wyniki zostały przedstawione graficznie na rys. 5.3 i 5.4. Brakuje mi też jakiejś propozycji doświadczalnej zastosowania wyników, choćby w zarysie, co przy obecnym postępie technologii kwantowych wydaje się być zasadniczo możliwe. W Bibliografii są niepełne dane: [10] (brak wydawcy), [33] (brak numeru artykułu), [123] (brak nazwy czasopisma/książki/zbioru).

W mojej ocenie omawiana tu rozprawa doktorska pana mgr Tanmoya Biswasa „Finite size effects in quantum thermodynamics” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 ze zm.).

Uważam, że rozprawa zawiera oryginalne rozwiązania nietrywialnych problemów fizycznych. Po zaznajomieniu się z rozprawą jestem też przekonany, że jej Autor opanował wiedzę teoretyczną i metody badawcze niezbędne do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Pracę oceniam pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie mgr Tanmoya Biswasa do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie fizyka.

Adam Bednarek