



Prof. zw. dr hab. Adam Miranowicz
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań, Poland
fax: +48 61 8257 758; phone: +48 731 742 369
e-mail: miran@amu.edu.pl; <http://zon8.physd.amu.edu.pl/~miran>

RIKEN, Wako, Japonia, 22 lipca 2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Tanmoya Biswasa
pt. „Finite size effects in quantum thermodynamics” przygotowanej
pod kierunkiem prof. dr. hab. Michała Horodeckiego i dr. Kamila Korzekwy**

1 Wstęp formalny

Przedstawiam niniejszym recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr. Tanmoya Biswasa (zwanego dalej Kandydatem) pt. „Finite size effects in quantum thermodynamics” w postępowaniu w sprawie nadania Kandydatowi stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. Zostałem powołany na recenzenta w tym postępowaniu uchwałą Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Gdańskiego na podstawie art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) na posiedzeniu w dniu 11 maja 2023 roku. Oficjalna informacja o tej decyzji została mi przekazana przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Gdańskiego – prof. UG dr. hab. Marka Józefowicza.

Oceniana przeze mnie rozprawa doktorska została napisana przez Kandydata pod opieką naukową promotora – prof. dr. hab. Michała Horodeckiego i promotora pomocniczego – dr. Kamila Korzekwy w Międzynarodowym Centrum Teorii Technologii Kwantowych na Uniwersytecie Gdańskim.

Praca Kandydata dotyczy termodynamiki kwantowej, która szczególnie w ostatnich latach jest intensywnie rozwijaną dziedziną fizyki z pogranicza termodynamiki i informatyki kwantowej. Najistotniejsze wyniki tej rozprawy zostały opublikowane w 2022 roku w dwóch artykułach, w których pierwszym autorem jest Kandydat. Mianowicie, artykuł pt. „Fluctuation-dissipation relations for thermodynamic distillation processes”, który ukazał się w *Physical Review E* (o wskaźniku cytowań 2,707) oraz praca pt. „Extraction of ergotropy: free energy bound and application to open cycle engines” opublikowana w prestiżowym czasopiśmie *Quantum* (o wskaźniku cytowań 6,22). Kandydat w swojej dysertacji odwołuje się też do trzech prac będących w przygotowaniu pt.: 1) „Catalytic advantage in the performance of quantum heat engine”, 2) „Discrete vs continuous heat engine” oraz 3) „Beating Otto efficiency with an engine assisted by a catalyst”. Artykuły te do dnia, w którym piszę

tę recenzję, nie zostały umieszczone w bazie preprintów arXiv.org ani na innych publicznie dostępnych serwerach, więc można wnosić, że prace te nie zostały jeszcze ukończone. Warto też wspomnieć o czterech innych artykułach, których współautorem jest Kandydat i które zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach. Mam na myśli dwie prace opublikowane w *Quantum* (w latach 2019 i 2021) oraz w *New Journal of Physics* (2021) i *Proceedings of the Royal Society A* (2017). Wyniki tych ciekawych prac nie zostały jednak uwzględnione w niniejszej dysertacji, gdyż choć dotyczą one kwantowej teorii zasobów, to jednak nie bezpośrednio w kontekście termodynamiki kwantowej. Niemniej prace te świadczą o stosunkowo dużej aktywności naukowej Kandydata.

Rozprawa została napisana w języku angielskim z dołączonym krótkim streszczeniem w języku polskim. Praca liczy 222 strony i składa się z pięciu głównych rozdziałów, w których Autor opisał najważniejsze swoje wyniki, oraz z ośmiu aneksów m.in. z dowodami najważniejszych twierdzeń.

2 Opis i ocena najważniejszych wyników dysertacji

W ostatnich latach intensywnie rozwijane jest nowe podejście do termodynamiki kwantowej opierające się na formalizmie kwantowej teorii informacji. Szczególnie intensywne badania dotyczą termodynamiki nierównowagowych układów kwantowych w ujęciu podstawowych koncepcji, zasobów, algorytmów i metod teorii informacji, takich jak ergotropia (co odpowiada maksymalnej ilości pracy, którą można uzyskać z układu kwantowego), entropia kwantowa, czy też splątanie kwantowe traktowane jako zasób fizyczny i informatyczny. W wyniku tych badań opracowano nowy formalizm termodynamiki kwantowej w ujęciu kwantowo-informatycznej teorii zasobów. W recenzowanej rozprawie Kandydat zastosował ten formalizm opisując przejścia między kwantowymi stanami nierównowagowymi uwzględniając ograniczenia termodynamiczne.

Do głównych wyników dysertacji zaliczyłbym: I. wyprowadzenie przez Kandydata kwantowych twierdzeń fluktuacyjno-dyssypacyjnych opisujących m.in. termodynamiczne procesy destylacji; II. opis procesów uzyskiwania ergotropii (ang. ergotropy extraction) z rezerwuaru termicznego (tzw. kąpieli) oraz III. propozycje konstrukcji nowych typów kwantowych silników cieplnych, m.in. a) opracowanie silników typu self-contained (co pozwolę sobie przetłumaczyć jako silniki samowystarczalne w znaczeniu, że działają bez zewnętrznych źródeł pracy); b) pokazanie możliwości katalitycznego zwiększenia wydajności samowystarczalnych silników cieplnych; a także c) zaproponowanie modelu samowystarczalnego silnika cieplnego z wykorzystaniem katalizatora kubitowego. Omówię poniżej znaczenie niektórych tych wyników.

We wstępie do opisu osiągnięcia I, chciałbym podkreślić, że klasyczne twierdzenie fluktuacyjno-dyssypacyjne jest kluczowym twierdzeniem nierównowagowej mechaniki statystycznej. W uproszczeniu można powiedzieć, że twierdzenie to określa związek między odpowiedzią układu na zewnętrzne zakłócenie a spontanicznymi fluktuacjami wewnątrz tego układu. Przełomowa praca Ryogo Kubo z r. 1966 [Rep. Prog. Phys. 29, 255] formułuje kwantową wersję tego twierdzenia fluktuacyjno-dyssypacyjnego, jako uogólnienie równania Langevina.

O ile mi wiadomo, praca Kandydata i współpracowników opublikowana w *Physical Review E* jest pierwszą, która formułuje kwantowe wersje twierdzenia fluktuacyjno-dyssypacyjnego w ramach teorii zasobów termodynamicznych. Dzięki temu udało się opracować w pełni kwantowe podejście

charakteryzujące optymalne przekształcenia stanów termodynamicznych oraz pokazać, że fluktuacje są powiązane z dyssypacją energii swobodnej. Praca ta otwiera szereg możliwości badania różnych fluktuacyjno-dyssypacyjnych procesów termodynamicznych. Kandydat badał niektóre z nich, ale istnieje wiele innych procesów wartych zbadania.

Wyprowadzone twierdzenia Kandydat zastosował w opisie kilku procesów termodynamicznych związanych z teorią informacji, takich jak procesy uzyskiwania pracy (ang. work extraction), koszt wymazywania informacji (ang. cost of erasure), czy też koszt swobodnej komunikacji termodynamicznej. Są to ważne problemy w termodynamice i teorii informacji, które były dobrze zbadane tylko w granicy asymptotycznej, gdzie fluktuacje w obserwablach termodynamicznych zanikają, a wartość średnia wielkości termodynamicznych określa te koszty.

O ile mi wiadomo, artykuły i dysertacja Kandydata są jednymi z pierwszych analiz tych problemów bez stosowania granicy asymptotycznej, tj. gdy praca (w sensie wielkości fizycznej) nie zawsze jest określona przez zmianę średniej energii swobodnej między stanem początkowym a końcowym układu. Kandydat pokazał, że fluktuacje energii swobodnej odgrywają kluczową rolę w określaniu pracy poza tą granicą. W szczególności, ten wynik Kandydata pokazuje, że dla ustalonej różnicy energii swobodnej, więcej pracy można wydobyć, jeśli początkowy stan ma mniejsze fluktuacje energii swobodnej, co zgadza się z intuicyjnym rozumieniem klasycznych twierdzeń fluktuacyjno-dyssypacyjnych w stanach nierównowagowych.

Wyniki Kandydata można zastosować do badania innych procesów termodynamicznych związanych z teorią informacji poza znanym przypadkiem asymptotycznym, czego przykładem jest artykuł Toshio Crouchera i Joan Vaccaro pt. „Memory erasure with finite-sized spin reservoir” [arXiv:2111.10930 (2021)] oraz praca Kamila Korzekwy i grupy Karola Życzkowskiego pt. „Encoding classical information into quantum resources” [IEEE Trans. Inf. Theory 68, 4518 (2022)]. Ponadto w pracy Chung-Yun Hsieha pt. „Thermodynamic criterion of transmitting classical information” [arXiv:2201.12110 (2022)], wyniki Kandydata zostały wykorzystane w analizie termodynamicznych ograniczeń górnych i dolnych na jednorazową pojemność klasyczną z udziałem dowolnie określonej klasy superkanałów.

Warto podkreślić, że kwantowe twierdzenia fluktuacyjno-dyssypacyjne wyprowadzone przez Kandydata także umożliwiają analizę problemów wykraczających poza procesy opisane niezależnymi i identycznie rozłożonymi wektorami losowymi. Taki właśnie uproszczony opis był do tej pory najczęściej stosowany w analizie destylacji stanów w ujęciu teorii zasobów.

Choć Kandydat wyprowadził kwantowe twierdzenia fluktuacyjno-dyssypacyjne w ramach teorii zasobów termodynamicznych, to jednak narzędzia i metody, których użył, mogą zostać uogólnione na inne teorie zasobów kwantowych. Dlatego też, narzędzia związane z teorią informacji mogą potencjalnie zostać wykorzystane do badania związków fluktuacyjno-dyssypacyjnych w opisie splątania kwantowego, sterowania EPR, nielokalności Bella, czy też koherencji kwantowej.

Można powiedzieć, że wyniki Kandydata dotyczące osiągnięcia I otwierają drogę do dalszych badań nad metodami wykorzystania efektów kwantowych celem zminimalizowania dyssypacji w procesach termodynamicznych.

Oceniając wagę i potencjalne zastosowania wyników Kandydata dotyczące uzyskiwania ergotropii (tj. osiągnięcie II) i nowych fundamentalnych aspektów działania silników cieplnych (osiągnięcia

III) podkreślę, że wyniki te umożliwiają m.in.: 1) ocenę optymalnej wydajności maszyn ciepłych za pomocą zaproponowanego formalizmu; 2) zastosowanie metod uzyskiwania ergotropii w procesach opisanych łańcuchami Markova; 3) opracowanie jednolitego opisu silników ciepłych pracujących w układach dyskretnych i ciągłych; 4) zastosowanie efektywnych modeli baterii kwantowych oraz 5) opracowanie implementacji maszyn ciepłych w oparciu o komputery kwantowe.

W odniesieniu do osiągnięcia 4) dotyczącego efektywnego projektowania baterii kwantowych, chciałbym zaznaczyć, że ergotropia odgrywa kluczową rolę w określeniu pojemności ładowania baterii kwantowych. Wybór stanu początkowego baterii zwykle wpływa na ilość pracy, którą można później uzyskać. Zatem bateria powinna być przygotowana w stanie, który umożliwia uzyskanie dużej ergotropii. Po zainicjowaniu baterii w określonym stanie, energia jest dostarczana do baterii za pomocą zewnętrznych operacji kwantowych i klasycznych. Te operacje mogą obejmować oddziaływanie z innymi układami kwantowymi lub zewnętrznymi polami. Celem takich badań jest opracowanie efektywnych metod przenoszenia energii do baterii i uzyskanie jej największego naładowania. Podczas procesu dostarczania energii do baterii istotne jest zoptymalizowanie zewnętrznych operacji, aby zmaksymalizować ergotropię. Wyprowadzone przez Kandydata ograniczenie uzyskiwania ergotropii może być wykorzystane do określenia ilości energii, która może być przeniesiona do baterii ze środowiska termicznego. Dlatego te wyniki badań Kandydata mogą być przydatne w projektowaniu efektywnych baterii kwantowych.

Jeśli chodzi o implementację maszyn ciepłych w układach komputerów kwantowych (w nawiązaniu do osiągnięcia 5), chciałbym wspomnieć, że Kandydat zastosował model opisujący dyskretną wersję samowystarczalnej maszyny ciepłej w układzie składającym się z czterech wielopoziomowych podukładów: baterii, gorącego i zimnego rezerwuaru oraz katalizatora zakładając, że wszystkie te układy transformują się za pomocą wspólnego unitarnego operatora. Katalizator jest komponentem roboczym wspomagającym pracę samodzielnego silnika w taki sposób, że marginalny stan katalizatora zostaje zachowany na końcu cyklu, zakładając globalne operacje zachowujące energię. W najprostszych wersjach tej maszyny ciepłej można przyjąć, że katalizator jest układem trójpoziomowym (tj. kutritem), dwupoziomowym (tj. kubitom), lub nawet można go pominąć. Kandydat pokazał jak działanie takiego samowystarczalnego silnika z katalizatorem kubitowym można sprowadzić do analizy konkretnych protokołów obliczeń kwantowych. Wyniki Kandydata można rozszerzyć na ogólniejszy formalizm wykorzystując wzmocnione uczenie maszynowe (ang. reinforced learning) celem znalezienia optymalnych cykli termodynamicznych, które maksymalizują moc nierównowagowych kwantowych maszyn ciepłych i lodówek.

Na zakończenie tej części recenzji chciałbym wspomnieć, że choć dostrzegłem w rozprawie pewne literówki i nieistotne drobne nieścisłości, to nie widzę powodu, aby je tu wymieniać. Wydaje się oczywiste, że w 200-stronicowej rozprawie niezwykle trudno jest całkowicie uniknąć takich drobnych błędów.

Mam jednak pewne wątpliwości, czy wszystkie terminy wprowadzone i używane przez Kandydata w jego artykułach i dysertacji będą zrozumiałe dla czytelników. Np. termin „self-contained” (co tłumaczy się zwykle jako „samowystarczalny”, czy też „zamknięty w sobie”) ma podobne znaczenie jak słowo „autonomous” (autonomiczny), choć oczywiście w odniesieniu do badanych silników terminy te oznaczają zupełnie coś innego. Nazwa „self-contained” ma prawdopodobnie sugerować, że

silnik nie wymaga zewnętrznego sterowania. Ponadto, silnik typu self-contained różni się od silników cieplnych opartych na suwach tym, że podlega pojedynczej globalnej unitarnej operacji, co oznacza, że silnik raczej nie działa w dyskretnych krokach (tj. suwach). Być może zatem termin „stroke-free” byłby bardziej intuicyjny niż „self-contained” w odniesieniu do tego silnika.

Ponadto Kandydat odwołuje się do pojęcia katalizatora w silniku, choć ten termin też może być mylący dla niektórych czytelników. Autor napisał np., że „performance [of a heat engine] can be improved by exploitation of correlation with an additional auxiliary system, serving as a catalyst.” Tradycyjnie katalizator oznacza układ (lub czynnik) umożliwiający proces (lub reakcję) lub zmieniający jego szybkość, który jednak pozostaje nienaruszony po zakończeniu procesu. W tym sensie w tradycyjnych silnikach cieplnych ciało robocze też jest katalizatorem, bo umożliwia pracę silnika i pracuje cyklicznie. Autor używa tego terminu jednak w innym znaczeniu. Mam nadzieję, że Kandydat wyjaśni bardziej szczegółowo zaproponowane przez niego terminy termodynamiczne podczas publicznej obrony swojej dysertacji.

3 Podsumowanie i końcowa ocena

Jestem przekonany, że dzięki pełniejszemu zrozumieniu kwantowych związków fluktuacyjno-dyssypacyjnych w ujęciu teorii zasobów, co jest istotnym osiągnięciem tej dysertacji, uzyskaliśmy pełniejszy wgląd w dynamikę, stabilność i wzajemne przekształcenia stanów kwantowych układów otwartych. Te związki są istotne dla zapewnienia spójności opisu termodynamicznego, kontroli i inżynierii zaszumionych stanów kwantowych oraz w dłuższej perspektywie mogą przyczynić się do rozwoju technologii kwantowych, takich jak kwantowe komputery, czujniki i metrologia. Natomiast w odniesieniu do osiągnięć Kandydata dotyczących kwantowych silników cieplnych uważam, że te wyniki umożliwiają pełniejsze zrozumienie procesów konwersji energii (na poziomie fundamentalnym). Tym samym mogą doprowadzić do konstrukcji sprawniejszych silników i lodówek kwantowych, znalezienia efektywniejszych metod pozyskiwania energii (nie tylko celem ładowania baterii kwantowych) oraz do opracowania innych efektywnych metod nanotechnologii i technologii kwantowych. Myślę też, że wymienione wyniki Kandydata mogą przyczynić się do pełniejszego zrozumienia pewnych kwantowych aspektów termodynamiki systemów biologicznych.

Uważam, że naukowcy prowadzący badania w zakresie termodynamiki kwantowej docenią wysoką wartość merytoryczną tej rozprawy, a jej najważniejsze wyniki (szczególnie dotyczące kwantowych twierdzeń fluktuacyjno-dyssypacyjnych) być może okażą się przydatne w ich dalszych badaniach.

W podsumowaniu pragnę zaznaczyć, że cele tej rozprawy doktorskiej zostały wyraźnie sprecyzowane w jej streszczeniu i konsekwentnie zrealizowane. Rozwiązane zostały interesujące i aktualne problemy badawcze, a osiągnięte wyniki Kandydata stały się już inspiracją dla innych badaczy.

Przedstawiona praca doktorska stanowi nowatorskie spojrzenie na aktualne zagadnienia związane z termodynamiką kwantową. Moim zdaniem jest to wartościowa i stojąca na wysokim poziomie naukowym praca badawcza, w której uzyskano interesujące wyniki o charakterze fundamentalnym. Rozprawa jak i wymienione publikacje jednoznacznie świadczą o tym, że Kandydat jest dojrzałym naukowcem.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia, w mojej opinii, wszelkie wymogi stawiane ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668). Tym samym stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie przez jej Autora problemu naukowego z dziedziny termodynamiki kwantowej, a także świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w zakresie nowoczesnych metod termodynamiki, informatyki kwantowej i fizyki statystycznej oraz świadczy o Jego umiejętności prowadzenia badań na wysokim poziomie naukowym.

Dlatego też w przyjemnością wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Tanmoya Biswasa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Adam Miranowicz