

Dr hab. inż. Katarzyna Roszak
Department of Condensed Matter Theory
Institute of Physics (FZU)
Czech Academy of Sciences
Na Slovance 2
182 21 Praga
Czechy

Recenzja

Rozprawy Doktorskiej pana mgr. Tanmoya Biswasa pt. „Finite size effects in quantum thermodynamics”

Rozprawa doktorska pt. „Finite size effects in quantum thermodynamics” zawiera bardzo dogłębny i szczegółowy opis wybranych zagadnień z dziedziny kwantowej termodynamiki, w tym zarówno podstawowe pojęcia, których zrozumienie jest konieczne aby zrozumieć przedstawione oryginalne wyniki, jak i zaawansowane idee, które stanowiły tematykę badań pana mgr. Biswasa podczas studiów doktoranckich. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów. Pierwsze dwa rozdziały stanowią wstęp teoretyczny i zawierają opis użytych metod i wielkości matematycznych, oraz wprowadzają wariant teorii zasobów, który można stosować do termodynamiki kwantowej. Dalsze trzy rozdziały zawierają dokładny opis wyników uzyskanych przez pana mgr. Biswasa i odnoszą się do termodynamicznych procesów destylacji, ekstrakcji ergotropii, oraz mikroskopowego silnika cieplnego. Ta część pracy jest oparta na dwóch publikacjach naukowych oraz zawierają również wyniki, które nie zostały jeszcze opublikowane. Szósty rozdział to aneks, który zawiera serię dowodów i obliczeń, które nie zostały zawarte w głównym tekście.

Rozdział pierwszy stanowi część wstępu do pracy i zajmuje się głównie opisem elementów termodynamiki kwantowej dla stanów klasycznych (rozumianych jako stany, które nie posiadają koherencji – pozadiagonalnych elementów macierzy gęstości – w pewnej wybranej bazie, więc mogą być zdefiniowane przy pomocy samych prawdopodobieństw w klasycznych mieszaninach stanów), takich jak transformacje stanów klasycznych oraz ich majoryzacja. Rozdział ten wprowadza również różne rodzaje entropii (i metody ich obliczania w języku stanów klasycznych) oraz zajmuje się relacjami między nimi. Rozdział zawiera szereg definicji i twierdzeń (z dowodami) i jest bardzo użyteczny podczas lektury części rozprawy zawierających oryginalne wyniki.

Rozdział drugi również jest rozdziałem wstępnym i zajmuje się podstawowymi pojęciami w teorii zasobów, szczególnie w kontekście zasobów termodynamicznych. Wprowadzone jest pojęcie operacji termodynamicznie swobodnej i porównane z operacjami swobodnymi dla innych zasobów, takich jak splątanie, koherencja, i czystość. Porównanie to jest bardzo pomocne dla czytelnika,

który nie jest ekspertem w dziedzinie i nie zajmuje się termodynamiką kwantową zawodowo. W rozdziale tym jest również wprowadzone pojęcie operacji termalnych. Przedstawione są również wyniki dla modelu Jaynesa-Cummingsa. Hamiltonian Jaynesa-Cummingsa może prowadzić do zachodzenia nietrywialnych operacji termalnych pod warunkiem wykonania pewnych przybliżeń w przypadku, gdy spełnione są pewne założenia. Ponadto rozdział ten wprowadza pojęcie pracy w kontekście termodynamiki kwantowej.

Oba wstępne rozdziały zostały napisane w taki sposób, że poziom trudności tekstu oraz wiedza potrzebna do zrozumienia przedstawianych idei oraz wielkości matematycznych bardzo się wahają. W ramach przykładu: podczas dyskusji modelu Jaynesa-Cummingsa, hamiltonian zostaje bardzo szczegółowo i powoli wyprowadzony i omówiony (do tego stopnia, że konkretne kroki wykonywane przy przejściu do obrazu oddziaływania są wyszczególnione we wzorach (2.45) i (2.46)), po czym nagle podane jest równanie fundamentalne GKSL bez wprowadzenia i tylko z cytowaniem. Brak jest uzasadnienia, skąd bierze się dane równanie, jakie zostały wykonane przybliżenia, kiedy można stosować to równanie, ani nawet, co oznacza skrót GKSL. Przy okazji, w równaniu (2.50) jest literówka (brakuje nawiasów).

Duża część pracy jest napisana w taki sposób, że podstawowe i dobrze znane rzeczy są opisane szeroko i bardzo szczegółowo, natomiast skomplikowane idee i metody, które są specyficzne dla termodynamiki kwantowej są wprowadzone zbyt krótko i z niewystarczającą dokładnością. Byłabym wdzięczna gdyby podczas obrony została przedstawiona dużo dogłębsza analiza protokołu ekstrakcji pracy, który jest pobieżnie opisany w skrzynce 2.1. Wiedza tam zawarta jest istotna z punktu widzenia zrozumienia podrozdziałów 2.4.2 i 2.4.3, a jest opisana zdecydowanie zbyt pobieżnie.

Nota bene, stan Gibbisa jest zdefiniowany sześć razy w rozdziale drugim [w równaniach (2.5), (2.7), i (2.8), potem w twierdzeniu 22, w równaniu (2.77), i w pierwszej linijce akapitu, który zawiera równanie (2.85)], mimo że już został zdefiniowany w rozdziale pierwszym w równaniu (1.90). Tego typu powtórzenia są częste w pracy i wielkości wcześniej zdefiniowane są wykorzystywane w małym stopniu. To nie jest znaczący problem, ale do pewnego stopnia wpływa na czytelność rozprawy.

Rozdział trzeci jest oparty na wynikach artykułu T. Biswas, et al. "Fluctuation-dissipation relations for thermodynamic distillation processes", opublikowanej w czasopiśmie Phys. Rev. E **105**, 054127 (2022) i zawiera wyprowadzenie wariantu twierdzenia fluktuacyjno-dyssypacyjnego przy użyciu metodologii teorii zasobów. Prezentowane wyniki dotyczą znalezienia optymalnego błędu przy destylacji, optymalizacji ekstrakcji pracy, optymalnego kosztu utraty informacji (cost of erasure), oraz szybkości termodynamicznie swobodnej komunikacji. Rozdział zawiera dużą liczbę dokładnie opisanych dowodów oraz wyprowadzeń wyników, oraz jest uzupełniony przez

szczegółowy wstęp. Rozdział jest dobrze napisany i przedstawione wyniki są interesujące. Niektóre wielkości, które zostały już wprowadzone we wstępie są tu niepotrzebnie zdefiniowane ponownie, np. stan Gibbsa jest zdefiniowany w równaniu (3.8).

Rozdział czwarty zawiera wyniki wcześniej opublikowane w artykule “Extraction of ergotropy: free energy bound and application to open cycle engines”, T. Biswas, et al., opublikowanym w czasopiśmie *Quantum* **6**, 841 (2022). Ergotropia to maksymalna ilość energii, która może zostać uzyskana z układu poprzez operacje unitarne. Tutaj zostały przedstawione badania ergotropii związanej z oddziaływaniem układu z kąpielą w równowadze termodynamicznej. Rozdział przedstawia interesujące i częściowo znane związki pomiędzy ergotropią i energią swobodną, jak również jej powiązania z drugą zasadą termodynamiki. Wyprowadzone i przedyskutowane zostało fundamentalne ograniczenie na ergotropie, która może być uzyskana przy badanym modelu, jak również warunki, w jakich granica ta zostaje osiągnięta (jest to związane z rozmiarami układu).

W rozdziale piątym zostają opisane i omówione mikroskopowe silniki cieplne. Część o silnikach cieplnych z otwartym cyklem (open-cycle heat engines) jest oparta na tym samym artykule co rozdział czwarty, natomiast podrozdział 5.3, w którym są omówione zamknięte silniki cieplne (self-contained heat engines), zawiera całkowicie nowe, nieopublikowane wyniki. Podrozdział zatytułowany „interluda matematyczna” (5.2) zawiera wiele powtórzeń z rozdziałów wstępnych, do dużego stopnia niepotrzebnych. Późniejsze części przedstawiają ciekawe wyprowadzenia analityczne, gdzie część pracującą silnika (working body) z otwartym cyklem stanowi odpowiednio kubit a potem kutrit. Dodatkowo, wyniki są zilustrowane na diagramach przedstawiających zoptymalizowane protokoły ze względu na ekstrakcję ergotropii oraz diagramy przedstawiające produkcję pracy na cykl. Dla zamkniętych silników przeprowadzona została dużo bardziej matematyczna analiza, podczas której wyprowadzona została optymalizowana sprawność silnika. Wprowadzona została także nomenklatura matematyczna potrzebna do opisu silników tego typu z katalizatorem oraz bez katalizatora. Przy okazji: Zarówno podrozdział 5.2 jak i podrozdział 5.3 zawierają definicję stanu Gibbsa.

Podsumowując, rozprawa stanowi zamkniętą całość, jako że zawiera z rozbudowany wstęp, który pozwala czytelnikowi lepiej zrozumieć oraz docenić oryginalne wyniki, które są zaprezentowane w późniejszych rozdziałach. Wyniki te, oparte zarówno na już opublikowanych pracach, jak i zawierające zupełnie nowe, nieopublikowane wyniki, są zdecydowanie interesujące. Jediną istotną wadą pracy jest jej długość, co przynajmniej częściowo jest wynikiem częstego pojawiania się powtórzeń w pracy pomiędzy pierwszymi dwoma rozdziałami a resztą. Liczba wielkości fizycznych, które są wprowadzane i omawiane wielokrotnie jest dość duża, i dotyczy takich pojęć jak operacje termalne oraz ekstrakcja pracy.

Rozprawa jest oparta na dwóch artykułach opublikowanych przez pana mgr. Biswasa, mimo że opublikował on znacznie większą liczbę artykułów w czasie trwania studiów doktoranckich (wnioskuję z dat publikacji; artykuły wymienione jako nie wchodzące w skład rozprawy, nie zostały podzielone na te sprzed uzyskania stopnia magistra i pozostałe). Dwie z tych prac zostały opublikowane w czasopiśmie Quantum, jedna w New Journal of Physics, oraz nieopublikowany preprint dostępny na archiwum internetowym arXiv. W skład tematyki omówionej w rozprawie wchodzi zamiast tego jeden artykuł opublikowany w Quantum i jeden w Physical Review E (oba z 2022 roku). Poza tym wymienione są trzy prace określone jako część projektu, który jest właśnie realizowany (ongoing project), ale żadna z tych prac do dnia obecnego nie ukazała się nawet na archiwum internetowym. Nie ma również odniesień do tych prac w samej rozprawie. W związku z tym, nie powinny być one wymienione jako prace, na których podstawie była napisana rozprawa.

Rozprawa niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną pana magistra Tanmoya Biswasa w dyscyplinie fizyki. Praca osiąga swój cel, którym było zbadanie jak ograniczone rozmiary badanych układów wpływają na wybrane zagadnienia z termodynamiki kwantowej, oraz przedstawia nietrywialne wyniki. **Praca spełnia więc wszystkie ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i powinna być dopuszczona do publicznej obrony. Biorąc pod uwagę jakość wyników przedstawionych w pracy, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pana mgra Tanmoya Biswasa.**

K. Roszak

Katarzyna Roszak