

Warszawa 19.08.2016

*dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański*

Instytut Fizyki Teoretycznej

Wydział Fizyki UW

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

[demko@fuw.edu.pl](mailto:demko@fuw.edu.pl)

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Piotra Ćwiklińskiego p.t. „New approach to thermodynamics: single shot quantum thermodynamics and equilibration of quantum states”**

Rozprawa doktorska mgra Piotra Ćwiklińskiego dotyczy szerokiego spektrum tematów z dziedziny zwyczajowo określanej mianem termodynamiki kwantowej. Praca składa się z dwóch części dotyczących zagadnień, które poza tym że należą do wspólnej dziedziny, nie mają bezpośrednich powiązań między sobą.

Pierwsza część dotyczy zagadnień osiągania przez układy kwantowe stanu równowagi oraz modelowania procesów dekoherencji prowadzących do wyłaniania się „klasycznego realizmu” w teorii kwantowej. Autor korzysta tu z metod opartych o teorię macierzy losowych.

Autor rozważa ewolucję podukładu, w sytuacji gdy dynamika pełnego układu rządzona jest losowym Hamiltonianem którego rozkład zadany jest przez tzw. GUE (gaussian unitary ensemble). Osiąganie stanu równowagi jest tu rozumiane jako przebywanie podukładu przez większość czasu w stanie bliskim stanowi jaki uzyskujemy uśredniając jego stan po długim czasie ewolucji. Wyprowadzone zostało niezwykle interesujące wyrażenie pozwalające określić czas konieczny do osiągnięcia stanu równowagi w funkcji uśrednionego wyrażenia odwrotności przerw energetycznych w Hamiltonianie oraz różnic tych przerw.

Analizując model pomiaru von-Neumana, gdzie układ oddziałuje z wieloma układami reprezentującymi niezależne fragmenty otoczenia, Autor pokazuje naturalne pojawianie się struktur SBS (spectrum broadcast structures) reprezentujących sytuacje, gdy wielu obserwatorów ma dostęp do informacji o stanie układu bez zaburzania go, co tym samym odpowiada wymaganiom „klasycznego realizmu”. Do uzyskania tego wyniku autor ponownie wykorzystuje teorię macierzy losowych, zakładając że hamiltoniany reprezentujące oddziaływanie różnych fragmentów otoczenia z układem mają rozkłady niezależne rządzone znów przez GUE. Uśredniając dodatkowo po stanach początkowych otoczenia z naturalnymi miarami autor uzyskuje dość zaskakujący wynik, że koherencje w układzie będą typowo zanikać jak  $1/t^3$ .

Część pierwsza pracy kończy się analizą praktycznej realizacji uśrednienia wielocząstkowych stanów kwantowych po grupie unitarnej z miarą Haara, poprzez wielokrotne działanie przypadkowych operacji unitarnych na przypadkowo wybrane pary cząstek. Pokazany został związek tego problemu z problemem obliczenia przerwy energetycznej w modelu z lokalnymi Hamiltonianami i w efekcie wyprowadzone zostały wyrażenia na złożoność obwodów kwantowych pozwalających symulować uśrednianie z miarą Haara do pewnej dokładności w zależności od liczby obecnych w układzie cząstek i potęgi występujących operacji unitarnych.

Część druga pracy dotyczy zagadnień termodynamicznych w sytuacji, gdy układ kwantowy może oddziaływać z kąpielą termiczną i znane z termodynamiki pytania o możliwą do uzyskania pracę są stawiane w sytuacji gdy nie jest brana standardowa granica termodynamiczna, a układ kwantowy pozostaje na poziomie mikroskopowym. Problemy te są formułowane w ramach tzw. teorii zasobów,

gdzie występuje klasa darmowych stanów (w tym przypadku stanów termicznych) i klasa dopuszczalnych operacji (w tym przypadku operacji termicznych zachowujących całkowitą energię układ + kąpiel). Ważnym pytaniem jest jakie stany mogą być przekształcone w jakie w ramach klasy operacji termicznych i jaką potencjalnie pracę można uzyskać z takich transformacji.

Oryginalnym wkładem autora jest uogólnienie znanych wyników dotyczących przekształcania stanów diagonalnych w bazie własnej hamiltonianu na stany niediagonalne uwzględniając obecność koherencji. Autor w szczególności pokazał konieczne i dostateczne warunki na przekształcanie ogólnych stanów w przypadku qubitów oraz warunki konieczne w ogólnym przypadku. Ponadto w pracy poruszono bardzo ważny z praktycznego punktu widzenia problem realizacji operacji termicznych bez konieczności pełnej kontroli nad układem kąpeli termicznej. Pokazano, że istotnie wystarczy ograniczony zasób elementarnych operacji do których konieczne jest użycie jedynie jednego qubitu kąpeli termicznej aby zrealizować te same przekształcenia stanów diagonalnych co w przypadku pełnej klasy operacji termicznych. Wyniki te znakomicie przybliży ogólne i teoretyczne rozważania z zakresu termodynamiki kwantowej do eksperymentalnych realiów i w mojej ocenie są najistotniejszym osiągnięciem naukowym doktoranta.

### **Ocena i uwagi**

Jeśli oceniać zawartość merytoryczną rozprawy należy ocenić ją jako wybitną. Nie dość, że zawiera bardzo znaczącą liczbę oryginalnych wyników to pozwala jednocześnie uzyskać bardzo dobry ogłód najświeższych osiągnięć z całej dziedziny kwantowej termodynamiki. Fakt, że rozprawa składa się z dwóch w zasadzie rozłącznych części powoduje pewne uczucie braku spójności całości. Nie mniej każda z części z osobna zawiera wystarczający materiał by być samodzielną rozprawą doktorską. Trudno więc robić zarzut autorowi, że zamiast jednej złożył dwie rozprawy doktorskie. Zagadnienia poruszone w rozprawie należą do najbardziej gorących zagadnień z kwantowej termodynamiki czy szerzej podstaw fizyki kwantowej, a wyniki przedstawione w rozprawie już są albo z pewnością staną się jednymi z kluczowych kroków dla dalszego rozwoju tych dziedzin.

Tak jak strona merytoryczna pozostawia uczucie pełnej satysfakcji (kilka drobnych merytorycznych uwag poniżej) tak strona formalna pracy pozostawia wiele do życzenia. Praca sprawia wrażenie kończącej w pośpiechu co miejscami utrudnia czytelnikowi odbiór. Faktem jest, że praca jest bardzo obszerna (225 stron) i wybaczone są pewne niespójności notacyjne literówki itp. Nie mniej poważnym uchybieniem jest bibliografia. Kolejność pozycji w bibliografii jest zgodna z kolejnością pojawiania się w tekście, co jest dopuszczalne pod warunkiem, że pozycje są numerowane! W tym przypadku tak nie jest i pozycje są jedynie zapisane w formacie Nazwisko + Czasopismo + Rok. Oznacza to, że czytając prace i natrafiając na referencje np. Gour et al. Musimy przejrzeć całą bibliografię w poszukiwaniu pozycji, co sprowadza się do poszukiwania elementu w nieposortowanej bazie danych co jaki autor wie zajmuje czas proporcjonalny do liczby pozycji w bazie. Utrudniło to znacznie recenzentowi lekturę pracy. W wielu miejscach w tekście gdy autor odwoływał się do danej pracy pisał jawnie nazwiska autorów po czym dawał referencję, która pojawiała się jako Nazwisko [rok] powodowało to małą czytelność tekstu jak np. tu: str 71 „In 2009, Harrow and Low Harrow and Low [2009a] stated...”. Równania w apendiksach mogłyby być oznaczone dodatkowym literowym przedrostkiem np. A8 gdyż chwilę czytelnikowi zajęło gdy spotykając w tekście odnośnik do równania (63) uświadomił sobie, że odnosi się ono do apendiksu. Recenzent nie jest też przekonany co do konwencji numeracji sekcji w apendiksie jako .1, .2, .3 Czytelniejsze byłoby A1 itp... W tekście było też sporo literówek i pewnych ciekawostek gramatycznych, z których najciekawsza pojawiająca się chyba 5 razy to „heat the bath” zamiast „heat bath”. Podejrzanie pada tu na automatyczne dostawianie „the” przed wszystkimi

rzeczownikami „bath” w tekście. Czytając Sekcje 2.4.3.3 miałem wrażenie, że powinna ona się znaleźć w apendiksie gdyż nijak się miała z ostatnim zdaniem poprzedniej sekcji „We next perform the full average including the system observable”. Podpis pod rysunkiem 3.3 ma dość oryginalne formatowanie będące połączeniem center i alignleft.

Jeśli chodzi o stronę merytoryczną, mam kilka uwag/pytań:

Fakt 2 na stronie 13 wydaje mi się nieprawdziwy bez dodatkowych założeń. Biorąc operator A i B jako rzut na ten sam stan czysty oczywiście  $\text{Tr}(AB) = 1$  natomiast dokonując operacji rozsmarowania unitarnego operatora B będziemy mieli  $\text{Tr}(A \tau(B)) = 1/2$ , przecząc faktowi który twierdzi, że operacja rozsmarowania nie zmienia tego śladu. Jeśli dokładnie przeczytałem pracę wydaje mi się, że Autor nie korzysta z tego lematu nigdzie w pełnej ogólności, dlatego nie ma on w mojej ocenie wpływu na końcowe wyniki. Warto jednak by autor upewnił się o tym.

Poniżej Definicji 3 gdy podawane są własności losowych macierzy opisujących Hamiltonian, pierwsza własność wynika z drugiej mimo, że zapisane jest to tak jakby to były osobne założenia.

Równanie (2.15) jest podane bez żadnych założeń co do początkowego stanu. Jeśli wezmę stan własny hamiltonianu jako stan początkowy, to oczywiście będę cały czas miał stan czysty a nie „maximum entropy state”.

Na stronie 101, gdzie pojawia się przykład na to, że dodatkowy układ może pozwolić na przeprowadzenie stanów w siebie pod wpływem operacji szumiących, prawdopodobieństwa podane w równaniu 3.8 nie zgadzają się z wnioskiem że  $p_1 + p_2 > q_1 + q_2$ .

W twierdzeniu 40 jest założone, że  $\rho_S$  jest blokowo diagonalne w bazie energetycznej po czym jest liczona wielkość A która mierzy koherencje w tej bazie. Czy w związku z tym nie powinna ona wynosić zero? Czy w takim razie twierdzenie ma sens?

W związku z uzyskanym przez autora wynikiem w części pierwszej rozprawy mówiącym, że koherencje w rozważanym przez Autora modelu będą typowo zanikać jak  $1/t^3$ , czy Autor ma intuicję w jakich potencjalnie układach fizycznych można by szukać potwierdzenia tego wniosku?

#### **Podsumowanie.**

Rozprawa doktorska Pana magistra Piotra Ćwiklińskiego dowodzi ogromnej wiedzy i osiągnięć badawczych w dziedzinie termodynamiki kwantowej i kwantowej teorii informacji. Nie mam najmniejszych wątpliwości, że rozprawa spełnia z ogromną nawiązką wymogi stawiane przed rozprawami doktorskimi a Pan Piotr jest zdecydowanie ponad przeciętnym (żeby nie powiedzieć wybitnym) doktorantem, który już wniósł, a z pewnością wniesie jeszcze większy, wkład do naszego zrozumienia podstaw fizyki kwantowej w kontekście praw termodynamiki. Mimo szeregu zastrzeżeń co do formalnej strony pracy, uważam że strona merytoryczna pracy nadrabia je z nawiązką. Z uwagi na ponadprzeciętnie dużą liczbę oryginalnych wyników, w tym chyba najistotniejsze pokazanie, że operacje termiczne konieczne do przekształcania stanów kwantowych w siebie nie wymagają pełnej kontroli nad kąpielą cieplną, jak również zawarte w rozprawie bardzo szerokie spojrzenie na całą dziedzinę wnioskuje o wyróżnienie rozprawy.

dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański