

Chorzów, 28.07.2025

Prof. dr hab. Jerzy Dajka,
Instytut Fizyki,
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych,
Uniwersytet Śląski w Katowicach

Rada Dyscyplin:

Nauki fizyczne, Matematyka,
Informatyka techniczna i telekomunikacja,
Inżynieria materiałowa
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych,
Uniwersytet Rzeszowski

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana Michała Kaczora

The impact of the system parameters in the entanglement in spin chains coupled to the bosonic reservoir

Recenzowana rozprawa dotyczy ważkiego problemu występowania splątania w układach spinowych. Problem jest ważki z dwu zasadniczych powodów: po pierwsze, układy spinowe stanowią powszechnie stosowane przybliżenie w modelowaniu ciał stałych doskonale odzwierciedlając ich własności kluczowe dla zastosowań np. w inżynierii materiałowej; po drugie, splątanie, jako własność układów kwantowych, jest fundamentem szeregu koncepcji kwantowego przetwarzania (kwantowej) informacji. Komunikacja oparta na protokołach teleportacji może tu służyć za najpowszechniej przytaczany przykład, inne przykłady to obliczenia wykorzystujące „teleportację bramek”, pamięci kwantowe czy niektóre zagadnienia raczkującego wciąż kwantowego uczenia maszynowego. Na wstępie możemy zatem stwierdzić, że tematyka poruszana w rozprawie jest ważna dla rozwoju współczesnej nauki i w żadnym razie nie może zostać zaklasyfikowana jako niszowa. Mnogość problemów, przed którymi staje się, gdy podejmuje się próby przekucia teorii w praktykę, jest w przypadku kwantowego przetwarzania informacji i obliczeń kwantowych nieprzebrana. Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczny, jednak uzyskane wyniki, które omówione zostaną w dalszej części recenzji, mogą okazać się niezwykle pomocne w projektowaniu i realizacji modeli bazujących na splątaniu.

Recenzowana rozprawa podejmuje temat dwucząstkowego splątania (bi-partite) w jednowymiarowych łańcuchach spinowych o skończonej, mezoskopowej, długości. Rozprawa została podzielona na dwie zasadnicze części: w pierwszej omówione są modele teoretyczne stosowane w opisie łańcuchów spinowych, wybrane miary splątania, stany stacjonarne (termiczne) oraz, stosowane w pracy modelowanie układów otwartych. Nadto omówiona jest istotność tychże układów dla kwantowej informatyki. Druga część to zestawienia, katalog, uzyskanych wyników opisujących własności splątania dla występujących we wcześniejszych rozdziałach modeli. Praca wyposażona jest w bardzo dobrze dobraną bibliografię, obejmującą najważniejsze pozycje: od klasycznych po współczesne.

Rozprawa zawiera również krótkie przedstawienia innych wyników naukowego współautorstwa Autora opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach jednoznacznie wskazujące na niewątpliwie nowatorski charakter wyników zamieszczonych w recenzowanej rozprawie i brak ewentualnych cech autoplagiatu.

Oprócz wyników nowych, stanowiących o wartości naukowej rozprawy, praca zawiera szczegółowe i właściwie dobrane omówienie podstawowych koncepcji o kluczowym znaczeniu dla omawianych zagadnień. Dotyczy to w szczególności pierwszej części rozprawy, gdzie znajdziemy rozdziały bardzo dobrze wprowadzające w tematykę splątania oraz modelowania układów otwartych. Jakkolwiek tematyka tych rozdziałów może wydać się nieco nadmiarowa w stosunku do potrzeb odzwierciedlonych w wynikach części drugiej, należy podkreślić, że rozprawa doktorska powinna stanowić pomost pomiędzy publikacjami czysto dydaktycznymi a wysokospecjalistycznymi monografiami naukowymi. Takie podejście znacząco rozszerzy grono potencjalnych odbiorców recenzowanej pracy. Przykładami wspomnianych wyżej 'nadmiarowości' mogą być omówione w rozdziale pierwszym inne niż splątanie formy korelacji kwantowych lub mikroskopowe wyprowadzenia równania 'master' dla dynamiki otwartej. Korelacje inne niż splątanie nie są obiektem badań w rozprawie, zaś modelowanie układów otwartych w części drugiej jest fenomenologiczne i nie odwołuje się do mikroskopowych własności otoczenia. Warto zaznaczyć, że nawet bozonowy charakter otoczenia założony w rozprawie nie jest kluczowy dla uzyskanych wyników, które, jak mi się wydaje, staną niezmienniczymi dla każdego otoczenia, którego wpływ można opisać równaniem 'master' typu Lindblada. Warto podkreślić, że wcześniejsze prace Lindblada, Goriniego, Sudarshana i Kossakowskiego opierały się raczej na założeniach własności funkcji autokorelacji otoczenia, które powinno podlegać relaksacji na tyle szybkiej, aby jego mógł być przybliżany stanem równowagi przez cały czas ewolucji. Szczególnie dobrze widać to w

wyprowadzeniu przybliżenia Daviesa, które pozwala wyrazić parametry dysypatorów w równaniu Lindblada za pomocą mikroskopowych parametrów termostatu. Podkreślam jednak, że wspomniana tu 'nadmiarowość' nie jest zarzutem dotyczącym redakcji rozprawy, lecz raczej może stanowić wskazówkę dla kierunków ewentualnych kontynuacji badań. Bardzo ważny dla pierwszej części rozprawy jest rozdział trzeci, w którym przedstawiona jest użyta w rozprawie grupa modeli łańcuchów spinowych. Rozważane modele oddziaływania dwuspinowego są reprezentatywne dla najszerszych klas układów, zaś wspomniane modele cechujące się oddziaływaniami rzędu wyższego pokazują rzecz jasna na niemal nieograniczone bogactwo teoretyczne modeli spinowych. Rozprawa jednak skupia się na badaniu modeli o ugruntowanym potencjale aplikacyjnym, zatem zasadne jest twierdzenie, że uzyskane wyniki, jakkolwiek teoretyczne, odnoszą się do realistycznych i 'aplikacyjnych' obszarów badań kwantowej teorii informacji. Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że pierwsza część rozprawy stanowi bardzo dobrze wyważoną mieszankę informacji o charakterze nowatorsko-badawczym, przeglądowym oraz dydaktycznym i stanowi istotną i wartościową część podlegającej recenzji całości.

Dużo mniej przeglądowy i dydaktyczny charakter ma druga część rozprawy, gdzie przedstawiona są wyniki dla splątania dwucząstkowego w wyszczególnionych wcześniej modeli spinowych. Ta część rozprawy zawiera najważniejsze wyniki badawcze. W rozprawie omawiane są dwie grupy okoliczności, w których badane jest splątanie. W pierwszej rozważa się układ w stanie równowagi z termostatem i, jako główne czynniki, rozważa się wpływ parametrów Hamiltonianu użytego w modelowaniu i temperatury na splątanie stanu dwu spinów powstałego w wyniku 'częściowego śladowania' ze względu na pozostałe komponenty łańcucha spinów. W recenzji przedstawione zostały wyniki w formie graficznej wraz z krótki podsumowaniem głównych wyników. Jakkolwiek jeden obraz wart powinien być tysiąca słów, użyta w wersji drukowanej rozprawy grafika nie jest łatwo czytelna. W szczególności trudno jest wywnioskować z niej jakościowe cechy splątania. Jakkolwiek wpływ temperatury na splątanie w stanie równowagi okazuje się być intuicyjnie jasny, sytuacja w przypadku typu oddziaływań (w rozprawie rozważa się modele Heisenberga, KSEA oraz MD, cf. rozdział 3 rozprawy) zakodowanych w Hamiltonianie oraz długości łańcucha, jest diametralnie odmienna: wyniki rozprawy wskazują na wysoce nietrywialny wpływ tych cech układu na uzyskanie stanów splątanych o pożądanym cechach. Druga grupa okoliczności, w których znajdujemy badane układy, to sytuacja, w której uwzględniony jest wpływ otoczenia na własności dynamiczne splątania. W rozprawie rozważane są łańcuchy spinowe o określonym typie oddziaływania zakodowanym w Hamiltonianie poddane dysypacji (dekoherencji) skutkującej koniecznością modyfikacji opisu. W rozprawie zastosowane jest podstawowe modelowanie w oparciu o równania 'master' w przybliżeniu Markowa gwarantujące zupełną dodatniość dynamiki.

Ewolucja w czasie łańcucha obliczona numerycznie, po ‘częściowym śladowaniu’, pozwoliła na opisanie zachowania splątania. W rozprawie zastosowane zostało autorskie narzędzie numeryczne. Nie poddaję w wątpliwość jakości uzyskanych wyników, jednak dla ich ‘reprodukowalności’ uważam, że użyty kod powinien zostać do rozprawy dołączony lub wybrane wyniki porównane (‘benchmarkowane’) z uzyskanymi przy użyciu powszechnie dostępnych narzędzi otwartych takich jak np. QuTip (<https://qutip.org/>), który podołałby modelom badanym w rozprawie. W tej części rozprawy warto byłoby umieścić nadto nieco więcej technikaliów. W szczególności nieoczywiste jest, czy wszystkie spiny łańcucha podlegają takiej samej dekoherencji. Oczywistym jest, że Hamiltonian i jego stany własne komutują. Nie jest jednak jasne na podstawie dyskusji, dlaczego miałyby tak być w dowolnej chwili nieunitarnej ewolucji łańcucha XXX. W części drugiej wyczerpującej analizie poddane zostały przede wszystkim ilościowe aspekty dynamiki splątania w układach otwartych i to w stopniu istotnie większym niż bardzo ciekawe aspekty jakościowe. W rozprawie, jak wnioskuję z wykresów, występują jakościowo różne typy zachowań splątania: monotoniczny zanik asymptotyczny, monotoniczny zanik w skończonym czasie, oraz przypadki niemonotoniczne opisujące zanik w skończonym czasie lub serie zaników i ‘odrodzeń’ splątania. Uwzględnienie zachowania splątania w asymptotycznie długim czasie byłoby wartościowym uzupełnieniem przedstawionej dyskusji. W podsumowaniu pracy wspomniane jest, że ogólną własnością pozostaje zanik eksponencjalny. Nie jest dla mnie jasne, jak należy rozumieć to stwierdzenie w kontekście wyżej wymienionych typów zachowań. Uzyskane numerycznie wyniki można byłoby dopasować (dofitować) do najlepszej (w jakimś sensie) zależności monotonicznej, a następnie można byłoby sprawdzić jej eksponencjalność prezentując w skali logarytmicznej. Taki typ analizy pozwoliłby zidentyfikować czasy charakterystyczne zaniku splątania i powiązać je z parametrami modelu.

Warto zwrócić uwagę, że miary splątania są w ogólności nieliniowymi funkcjami stanu kwantowego, zatem kwestia ewentualnego sterowania układami kwantowymi celem optymalizacji wybranych własności splątania pozostaje zagadnieniem wysoce nietrywialnym. Wyniki zaprezentowane w rozprawie dotyczące zależności splątania od zewnętrznych pól magnetycznych mogą posłużyć za pierwszy krok w modelowaniu zachowań łańcuchów spinowych w języku sterowań w pętli otwartej. Naturalnym dalszym krokiem w takim podejściu może być rozważanie zależnych od czasu sterowań o różnorodnej charakterystyce: od adiabatycznych, kluczowych dla pewnej grupy obliczeń kwantowych i uczenia maszynowego, po czysto stochastyczne.

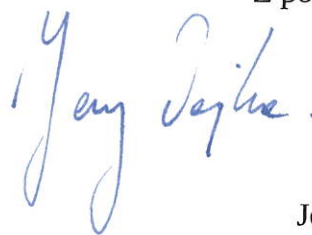
Wskazane powyżej dwie grupy okoliczności, w których badane były własności splątania, z zatem przypadek stacjonarny oraz nierównowagowy, pozwoliły na uzyskanie szeregu bardzo ważnych i

interesujących wyników opisanych w drugiej części rozprawy. Trochę szkoda, że w rozprawie nie podjęto próby powiązania ze sobą obu tych podejść. W szczególności znane z nierównowagowej teorii kwantowych układów otwartych użycie przybliżenia Daviesa dla zredukowanej dynamiki układów spinowych słabo sprzężonych z termostatem pozwoliłoby użyć postaci dysypatorów w równaniu Lindblada, które nie tylko wyrażają się przez mikroskopowe własności termostatu, ale dla długich czasów ewolucji pozwalają na odtworzenie wyników równowagowej mechaniki statystycznej. Takie podejście stanowić mogłoby pomost między pozornie odmiennymi okolicznościami, w których znajdują się łańcuchy spinowe rozważane w rozdziale drugim rozprawy. Kolejnym zagadnieniem pominiętym w rozprawie są *konstruktywne* efekty indukowane szumem. Warto zauważyć, że ograniczenie się w rozprawie do dysypacji działającej lokalnie, a zatem takiej, której podlegają pojedyncze spiny łańcucha, wyklucza ewentualność występowania splątania indukowanego szumem, gdy informacja (korelacja) między spinami wynika z zanurzenia części lub całości łańcucha spinowego we wspólnym otoczeniu (termostacie). Można zapytać, czy uwzględnienie takiej sytuacji, którą modeluje się z użyciem dysypatorów wyrażonych przez operatory nielokalne, mogłoby doprowadzić do stabilizacji splątania również dla długich czasów ewolucji.

W podsumowaniu mojej recenzji pragnę zaznaczyć, że rozprawa Pana Michała Kaczora jest niezwykle ciekawa i wartościowa z punktu widzenia jej wagi naukowej. Uwagi, które zamieszczam powyżej, mają przede wszystkim wskazać możliwe kierunki jej dalszego wykorzystania, tym bardziej, że z redakcyjnego punktu widzenia, na który składa się ocena doboru treści, bibliografii i prezentacji wyników, recenzowana rozprawa nie budzi moich zastrzeżeń, a zatem może i powinna służyć pomocą w badaniach innych.

Rozprawa, którą recenzuję, spełnia w mojej ocenie standardy stawiana rozprawom doktorskim, zarówno ustawowe jak i zwyczajowe. Bez zastrzeżeń zatem wnoszę o dopuszczenie Pana Michała Kaczora do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie nauk fizycznych.

Z poważaniem,



Jerzy Dajka