



prof. dr hab. Sylwia Zielińska-Raczyńska
Instytut Matematyki i Fizyki, Zakład Fizyki

Bydgoszcz, 24 września 2023

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Reduced state of the field and classicality of symplectic time evolution”

autorstwa mgr. Tomasza Linowskiego

Rozprawa doktorska mgr. Tomasza Linowskiego zastała przygotowana pod kierunkiem promotora dr. hab. Łukasza Rudnickiego prof. UG i dotyczy problemów związanych z opisem przejścia pewnych klas układów kwantowych w układy klasyczne. Mgr Tomasz Linowski uzyskał tytuł zawodowy magistra fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Warszawskim w roku 2019. Od 2021 roku był związany z Międzynarodowym Centrum Teorii Technologii Kwantowych UG, będąc zatrudniony w ramach grantu swojego promotora dr. hab. Łukasza Rudnickiego. Jest współautorem 10 publikacji. Trzy z nich, opublikowane w Physical Review A (prace 1 i 2) oraz Acta Physica Polonica (praca 3), razem z autorskim komentarzem o długości ok. 30 stron, nie licząc obszernej bibliografii, stanowią rozprawę doktorską. W przypadku dwóch prac jedynym współautorem jest promotor, w przypadku trzeciej jest jeszcze trzeci współautor. Do dokumentacji doktorant dołączył własne oświadczenia, z których wynika, że to właśnie on wykonał większość wyprowadzeń i obliczeń, zinterpretował większość wyników i współredagował prace. Natomiast z oświadczenia promotora wynika, że w pracy 1 wysunął on dwie sugestie dotyczące części pracy i nadzorował redakcję całości, zaś trzeci współautor pracy 3 potwierdził, że mgr Linowski jest głównym autorem tegoż artykułu.

Komentarz autorski napisany jest w języku angielskim poprawnie i jasno. Jego struktura jest logiczna. Zawiera abstrakt, wstęp, rozdział drugi, charakteryzujący aparat teoretyczny użyty w trzech pracach, oraz rozdział trzeci złożony w trzech podrozdziałów, streszczających trzy publikacje wchodzące w skład rozprawy. Niezwykle krótki czwarty rozdział zawiera na jednej stronie podsumowanie i sugestie kierunków dalszych badań. Bibliografia jest obszerna: zawiera 125 pozycji.

Tematyka pracy należy do mechaniki kwantowej w jej obszarze na pograniczu mechaniki klasycznej. Równania von Neumanna, a dla układów otwartych równania Goriniego-Kossakowskiego-Lindblada-Sudershana, właściwie opisują ewolucję kwantową, lecz na ogół są bardzo trudne w praktycznym stosowaniu. Interesujące są wobec tego badania modeli opartych na hamiltonianach i/lub operatorach Lindblada w specjalnych, uproszczonych postaciach, tak aby równania ewolucji upraszczały się, możliwie tworząc zamknięty układ. To może mieć miejsce w szczególności dla stanów gaussowskich, pozostających w analogii do stanów klasycznych, ważnych w szczególności w optyce kwantowej. Pojawia się wtedy szansa śledzenia przejścia od opisu kwantowego do klasycznego i opisu układów mezoskopowych. W swej pracy doktorant zastosował i porównał teorię ewolucji symplektycznej oraz teorię zredukowanego stanu pola (RSF). W szczególności dokonał pewnych uogólnień, w opisie ewolucji symplektycznej i zbadał, w jakich warunkach ewolucja odpowiada klasycznej.

We wstępie do komentarza autorskiego doktorant wskazuje na znaczenie badań fizyki układów mezoskopowych i przejścia od układów kwantowych do klasycznych i wskazuje, jakich metod będzie używał. W trzech kolejnych, dość obszernych akapitach awizuje zawartość trzech prac wchodzących w skład rozprawy. W szczególności w pracy 1 chodzi o uogólnienie operatorów Lindblada, tak aby móc opisać symplektyczną ewolucję kwantowych stanów gaussowskich. W pracy 2 chodzi o wskazanie półklasyczności metod RSF oraz warunków, w jakich ewolucja symplektyczna odpowiada klasycznej. W pracy 3 bada się warunki półklasyczności transformacji Bogolubowa.

W pierwszym podrozdziale rozdziału *Preliminaries*, należącym do komentarza autorskiego, doktorant najpierw przedstawił podstawowe pojęcia formalizmu symplektycznego, jego przydatność przy poszukiwaniu destylowalnego splątania oraz równania ewolucji czasowej w sytuacji, gdy hamiltonian jest formą drugiego stopnia względem kwadratur. Dalej przypomniał definicję i kilka własności transformacji Bogolubowa i istotę dynamicznego efektu Casimira, polegającego na produkcji cząstek w ośrodku z powodu zależności od czasu warunków brzegowych lub relacji materiałowych. W ostatnim podrozdziale przedstawił podstawy formalizmu RSF, w szczególności równania ewolucji w czasie, dla trzech wariantów tworzących dyssypator operatorów skoku (jump). Rozdział ten jest dobrze napisany i dobrze spełnia swoją rolę jako przygotowania do opisu wyników trzech prac.

Pierwszy podrozdział rozdziału trzeciego charakteryzuje wyniki pracy 1. Porównując operatory dyssypacji w formalizmie ewolucji symplektycznej oraz w formalizmie RSF, zauważono, że ten pierwszy powinien zostać uzupełniony o przypadek operatorów Lindblada proporcjonalnych do operatorów unitarnych, w których wykładniku znajdują się operatory hermitowskie drugiego stopnia względem operatorów kwadratur. Pokazano, że ewolucja z takimi dyssypatorami nie wyprowadza poza zbiór kwantowych stanów gaussowskich, tzn. wypukłych kombinacji stanów gaussowskich. Dalej zbadano ewolucję operatora gęstości z unitarnymi operatorami Lindblada w ramach pewnej klasy modeli zderzeniowych. Układ kwantowy oddziałuje kolejno z identycznymi

układami pomocniczymi reprezentującymi otoczenie. Prosty model oddziaływania odpowiada modelowi uderzanego bąka (kicked top). Dla dużej liczby operatorów Lindblada ewolucja opisuje zderzenia o losowym charakterze. Doktorant zbadał też warunek stacjonarności rozwiązań w przypadku pojedynczego operatora Lindblada. Stany stacjonarne istnieją, gdy macierz K obecna w równaniu ewolucji dla macierzy kowariancji jest dodatkowo ortogonalna i opisuje transformację pasywną. W tym podrozdziale zbadano też, jak ewoluuje splątanie, gdy stan początkowy jest dwumodową próżnią, będącą stanem separowalnym, a operator Lindblada jest dwumodowym operatorem ściskania. Używając formalizmu ewolucji symplektycznej, otrzymano macierz kowariancji i badając jej symplektyczne wartości własne po uprzedniej częściowej transpozycji pokazano, że nie jest dodatnio określonym operatorem, co świadczy o pojawieniu się splątania i jego ewolucji w czasie. Wykonano też pewne oszacowania dotyczące miary splątania.

Drugi podrozdział rozdziału trzeciego streszcza zawartość pracy 2 i zawiera moim zdaniem najważniejsze wyniki doktoratu. Porównuje się tam metody opisu ewolucji symplektycznej i RSF, interpretuje tę ostatnią jako półklasyczną i analizuje, w jakich warunkach ewolucja symplektyczna staje się półklasyczna. Przejście pomiędzy tymi dwoma opisami zachodzi za pośrednictwem macierzy redukcji. Aby zbadać możliwość destylowalnego splątania autor znów stosuje kryterium częściowej transpozycji. Pokazuje, że dla ustalonej macierzy korelacji z metody RSF, wśród odpowiadających jej macierzy kowariancji istnieje taka, której wszystkie częściowe transpozycje spełniają nierówność wynikająca z nierówności Heisenberga. Z tego wynika, że w opisie RSF nie ma informacji o destylowalnym dwudzielnym (bipartite) splątaniu. Autor formułuje też kilka warunków koniecznych i dostatecznych na to, aby kwantowa ewolucja gaussowska:

1) hamiltonowska, 2) dyssypatywna z operatorami Lindblada liniowymi w kwadraturach, 3) dyssypatywna z unitarnymi operatorami Lindblada, odpowiadała klasycznej.

W podrozdziale trzecim autor przedstawia warunki klasyczności transformacji Bogolubowa. Klasyczność jest rozumiana jako zgodność z formalizmem RSF. Sformułowany zostały konieczny i dostateczny warunek klasyczności dla układu izolowanego oraz warunek klasyczności konieczny dla układu otwartego; ten ostatni staje się koniecznym i dostatecznym, gdy otoczenie jest początkowo w stanie próżni. Zastosowano tę analizę do dynamicznego efekty Casimira, gdy ośrodki porusza się niejednostajnie. Dla układu zamkniętego obejmującego fotony prawo- i lewoskrętne spełnienie warunku klasyczności oznacza brak efektu; jawi się on więc jako koniecznie nieklasyczny. Kryterium klasyczności zostaje natomiast spełnione, gdy potraktuje się fotony lewoskrętne jako układ, a prawoskrętne jako otoczenie. Doktorant zastanawia się nad interpretacją tego faktu i w publikacji, i w komentarzu autorskim, ale warto byłoby, gdyby zechciał to dodatkowo wyjaśnić podczas obrony.

Praca doktorska mgr. Tomasza Linowskiego zawiera szereg interesujących wyników, z których nie wszystkie wymieniono w niniejszej recenzji. Ich znaczenie i poprawność były zresztą pozytywnie zweryfikowane przez recenzentów czasopism, gdzie je publikowano (w dwu przypadkach był to Physical Review A). Oryginalny wkład autora w prace, na których opiera się dysertacja, został

potwierdzony przez współautorów. Do obowiązków recenzenta należy wskazanie niedociągnięć rozprawy. Mam zastrzeżenia do streszczenia napisanego w języku polskim; widać, że autor, posługując się biegle językiem angielskim, wykazuje pewien brak doświadczenia w opisie omawianych zagadnień w języku polskim i stosuje, niezbyt fortuną czasami, „kalkę angielską”, poza tym zwracam uwagę, iż w polskiej części pracy należy stosować polską formę pisowni nazwiska Bogolubow. Komentarz autorski jest napisany dość dobrze, choć miejscami zbyt skrótowo. Zawiera spore fragmenty przepisane dosłownie z prac oryginalnych. Ponieważ chodzi o teksty tego samego autora, nie jest to specjalnie naganne, choć zapewne jest trochę nieeleganckie. Nieco mylące jest używanie wymiennie określeń „classical” i „semi-classical”.

W konkluzji stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Janie Michalski - Paucynski