

Prof. dr hab. Jerzy Dajka,
Instytut Fizyki,
Uniwersytet Śląski

Chorzów, 15.05.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej (tłumaczenie wersji napisanej w języku angielskim):

Different levels of approximations in Open Quantum Systems and their applications

Ricard Ravell Rodríguez

Biorąc pod uwagę otaczające środowisko, żaden realistyczny system nie może pozostać w pełni odizolowany. Zamiast tego systemy wymieniają zarówno energię, jak i informacje z otoczeniem, co czyni je zasadniczo otwartymi. Opracowano różne metody badania ewolucji systemów otwartych w czasie, zwykle poprzez zredukowanie całkowitego zachowania systemu + środowiska do zachowania podsystemu będącego przedmiotem zainteresowania. Systemy klasyczne, opisane przez fizykę klasyczną, mają swoje dobrze ugruntowane modele, które z kolei mają szerokie zastosowanie zarówno w równowadze, jak i poza nią. Jednak sytuacja jest bardziej skomplikowana w przypadku układów kwantowych. Znane przybliżenia i modele układów kwantowych są zwykle ograniczone do określonych warunków i specyficznych środowisk. Dlatego znalezienie odpowiedniego opisu dla interesujących otwartych układów kwantowych ma zatem kluczowe znaczenie. Znane przybliżenia i modele są zwykle ograniczone do stosunkowo wąskiej klasy i operują w specyficznych warunkach. To sprawia, że problem znalezienia odpowiedniego opisu interesujących układów kwantowych otwartych jest tak ważny. To, czy system otwarty jest

interesujący, zależy od perspektywy. Inaczej jest w przypadku systemów w skali nano lub mezo, inaczej w przypadku modeli optycznych czy kwantowego przetwarzania informacji.

Celem recenzowanej pracy jest przedstawienie różnych poziomów przybliżeń, począwszy od najstarszego i najprostszego, znanego jako przybliżenie Markowa, po nowsze podejścia, które uwzględniają ważne efekty niemarkowskie, które znacząco wpływają na dynamikę kwantową układów realistycznych. Istnieje wiele podejść do kluczowego tematu otwartej dynamiki kwantowej, począwszy od ścisłych metod matematycznych, a skończywszy na metodach fenomenologicznych, które są skuteczne w określonych reżimach i dla niektórych układów fizycznych. Dostępna jest szeroka gama narzędzi matematycznych do badania otwartej dynamiki kwantowej, w tym metody algebraiczne, równania master i całki po trajektoriach. Każde podejście ma swoje zalety i wady. Wybierając narzędzie, należy starannie wyważyć wiarygodność modelu i możliwość obliczenia obserwowalnych wielkości. Bardziej realistyczne opisywanie systemów ogólnych staje się coraz większym wyzwaniem obliczeniowym.

W niniejszej pracy autor skupia się na najpopularniejszym podejściu do badania systemów otwartych opartym na równaniach master. Ten wybór jest ze wszech miar właściwy, ponieważ równania master są często podstawowym wyborem, gdy chce się określić stan zredukowany systemu otwartego. W przeciwieństwie do całek po trajektoriach i innych modyfikacji metody funkcjonału wpływu, równania master, szczególnie w reżimie słabego sprzężenia, pozwalają na łatwiejsze modyfikacje hamiltonianu układu i działanie poza reżimem semi-klasycznym. Ponadto stosowanie równań master do problemów związanych z transportem lub sterowaniem w stanie braku równowagi ma wiele zalet jako alternatywa dla podejść takich jak metoda Keldysha dla zależnych od czasu układów wielociałowych. Wreszcie, znajomość macierzy gęstości układu kwantowego pozwala na wykorzystanie go jako nośnika informacji, dlatego równania master są podstawowym narzędziem do badania efektów dyssypacyjnych i dekoherencji w kwantowym przetwarzaniu informacji.

Praca doktorska ma następującą strukturę: rozpoczyna się od wstępnej, ale ścisłej prezentacji modeli Markowa, w której autor bada zarówno ich mocne strony, jak i ograniczenia. Większość wyników uzyskano w sposób szczegółowy, dzięki czemu praca jest kompletna i dostępna nawet dla czytelników, którzy początkowo nie są zaznajomieni z tematem. Ta cecha wnosi wartość dodaną pracy, ponieważ miejscowi ją pomiędzy ogólną książką dydaktyczną a specjalistyczną monografią badawczą. Szczególnie interesującym i ważnym aspektem dla dalszej dyskusji jest porównanie podejścia „lokalnego” i „globalnego” oraz ich odniesienie do charakterystycznych skal czasowych. Jako egzemplifikację przedstawiono zastosowanie modelowania Markowa do badania problemu ładowania baterii kwantowych. Zastosowanie to jest bardzo interesujące, ponieważ bezpośrednio odnosi się do technicznych aspektów magazynowania energii w układach wymagających opisu kwantowego. Autor wprowadza również systemowe podejście do optymalnego ładowania w obecności dyssypacji za pomocą metody Krotowa, która jest dobrze znana w kwantowej teorii sterowania i ma swój własny pakiet Pythona wymieniony w bibliografii pracy. Jednak wyraźne włączenie zależności czasowej do równań master w przybliżeniu Markowa jest trudnym zadaniem. Bezpośrednia modyfikacja hamiltonowskiej części Liouvilleanu często nie ma matematycznie ścisłego i fizycznie wiarygodnego uzasadnienia, co czyni ją nieco fenomenologiczną. To wyzwanie inspirowało badania adiabatywności w systemach otwartych i różnych form dyssypatywnego podejścia Floqueta, o których omówienie autor mógłby poszerzyć swoją pracę.

Po omówieniu zasadniczych zagadnień związanych z aproksymacją Markowa, autor przechodzi do badania poprawek niemarkowskich na dynamikę systemu. Ważnym celem osiągniętym w pracy jest porównanie modeli markowskich z niemarkowskimi. Chociaż w pracy wydzielono osobną sekcję poświęconą wyłącznie temu problemowi, w całym tekście pracy znajdują się liczne i cenne uwagi porównawcze. Możliwość dokonywania wiarygodnych porównań dotyczących efektów niemarkowskich na stosunkowo prostych, ale realistycznych modelach znacznie zwiększa nasze zrozumienie właściwości otwartych układów kwantowych i różnych metod modelowania. Znaczenie testów porównawczych jest oczywiste nie tylko w szczegółowym omówieniu „próżni Markowa” dla modelu Friedrichsa-Lee, ale także w eleganckiej części końcowej rozprawy, która dotyczy właściwości modelu resonant-level. Chociaż model ten jest dokładnie rozwiązywalny i

wysoce symetryczny, nie jest on czysto teoretycznym konstruktem, ponieważ jego właściwości mogą skutecznie odpowiadać właściwościom realistycznych systemów działających w określonych warunkach i w określonej skali czasowej.

Z tej perspektywy rozprawa wyczerpuje badany temat, chociaż wskazane byłoby zamieszczenie przynajmniej krótkiej części dotyczącej różnych podejść do otwartej dynamiki kwantowej, zdolnych do uwzględnienia efektów niemarkowskich, takich jak podejście oparte na całkach po trajektoriach.

Autor rozprawy jest także współautorem kilku ciekawych i wartościowych prac opublikowanych w prestiżowych czasopismach. Część wyników przedstawionych w rozprawie została częściowo opublikowana w artykułach wymienionych przez autora we wstępie, inne ze względu na ich nowość i wartość mają ukazać się wkrótce. Warto zauważyć, że recenzowana rozprawa znacznie różni się od już opublikowanych lub planowanych prac pod względem formy i nowatorskiej szczegółowej zawartości.

Podsumowując, rozprawa doktorska zatytułowana „*Different levels of approximations in Open Quantum Systems and their applications*” jest dobrze napisana i zawiera nowe wyniki, które poszerzają naszą wiedzę na temat fizyki otwartych układów kwantowych. Wyniki te mogą służyć jako podstawa nie tylko do badań teoretycznych, ale także do lepszego zrozumienia wyników zaawansowanych eksperymentów przeprowadzanych na poziomie mikro, nano i mezoskali.

Zdecydowanie rekomenduję nadanie Ricardowi Ravellowi Rodríguezowi stopnia doktora fizyki



Jerzy Dajka