



Prof. dr hab. Tomasz Sowiński
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
tomasz.sowinski@ifpan.edu.pl

Warszawa, 6 listopada 2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgra Tomasza Szoldry pt.
„Ergodicity breaking in quantum systems: from exact time evolution to machine learning”**

Rozprawa doktorska pana mgra Tomasza Szoldry została przygotowana pod kierunkiem prof. dra hab. Jakuba Zakrzewskiego na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Dysertacja ma formę tzw. *zszywki*, czyli połączonego tematycznie cyklu publikacji naukowych opatrzonego dodatkowym komentarzem zanurzającym wskazane osiągnięcia doktorskie w szerszym kontekście naukowym. Z technicznego punktu widzenia, rozprawa mgra Szoldry jest przygotowana w całości w języku angielskim, opatrzona jest streszczeniem zarówno w języku angielskim jak i polskim, jest podzielona na cztery rozdziały uzupełnione o załącznik i publikacje stanowiące jej podstawę. Merytoryczna część opiera się na czterech artykułach naukowych opublikowanych w latach 2021–2024 w niezwykle renomowanym czasopiśmie *Physical Review B* wydawanym przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne. Prace te wpisują się w bardzo długą i niezwykle owocną współpracę pomiędzy grupą profesora Zakrzewskiego z Uniwersytetu Jagiellońskiego i profesora Lewensteina z ICFO w Barcelonie. W tym miejscu należy podkreślić, że we wszystkich pracach pan mgr Szoldra jest pierwszym autorem.

Rozdział 1. rozprawy doktorskiej pana mgra Tomasza Szoldry jest dość elementarnym, ale bardzo dobrze skomponowanym wprowadzeniem w problematykę jednego z najbardziej nieintuicyjnych i do dziś nie w pełni zrozumianych zagadnień fizyki kwantowej jakim jest chaotyczność i idąca z nią w parze ergodyczność wielociałowych układów kwantowych. W rozdziale tym bardzo dobrze utrzymany jest balans pomiędzy fenomenologicznym rozumowaniem, a matematyczną precyzją. Znalazłem jedynie jedną drobną nieścisłość we wzorze (1.10), która zapewne jest zwykłą pomyłką pisarską. W końcowym fragmencie tego rozdziału autor, nakreślając problem łamania ergodyczności i przywołując kilka znanych w literaturze efektów mogących potencjalnie do takiego łamania prowadzić, wskazuje główną oś swojej dysertacji, o którą oparte są tezy doktorskie.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest badaniu problemu łamania ergodyczności przy użyciu zaawansowanych technik numerycznych w wybranych modelach sieciowych. Rozdział 2., który opiera się na trzech publikacjach stanowiących podstawę rozprawy, poświęcony jest skończonemu, jednowymiarowemu spinowemu modelowi Heisenberga z nieporządkiem. Jest to model bardzo często stosowany w literaturze przy badaniu

generycznych własności układów wielociałowych. Może on bowiem być traktowany jako bardzo dobre teoretyczne przybliżenie wielu różnych rzeczywistych układów fizycznych. Z jednej strony abstrahuje on od konkretnych doświadczalnych realizacji, a z drugiej dość dobrze uwzględnia wpływ najważniejszych elementów, które determinują ich mierzalne własności (struktura przestrzenna, oddziaływania, zewnętrzne pola, itp.). Jest to też model, w którym w zależności od jego parametrów (siły oddziaływań i natężenia nieporządku) układ może być w fazie ergodycznej lub w tzw. fazie wielociałowej lokalizacji. Przejście pomiędzy tymi fazami stanowi zatem kluczowy element przy badaniu zagadnienia naruszenia ergodyczności.

Rozważane przejście pomiędzy fazami może być oczywiście analizowane na wiele różnych sposobów, a jednym z nich jest badanie jak wygląda czasowa ewolucja tzw. bąbli ergodyczności, czyli istniejących w pewnym obszarze układu specyficznych korelacji świadczących o lokalnej ergodyczności. Temu zagadnieniu poświęcona jest pierwsza praca cyklu [Phys. Rev. B 104, L140202 (2021)], a jej centralnym punktem jest zastosowanie nowatorskich technik numerycznych opartych o uczenie maszynowe do dokładnego wykrywania korelacji dwuciałowych i badania ich ewentualnego zaniku w czasie. Opracowany algorytm okazał się bardzo precyzyjnym narzędziem pozwalającym postawić dość mocne tezy na temat funkcyjnej zależności od czasu takich korelacji z nadzieją, że mogą one być przydatne przy doświadczalnej weryfikacji.

Druga praca tego rozdziału [Phys. Rev. B 109, 134202 (2024)] poświęcona jest zagadnieniu wymuszania termalizacji układu znajdującego się w fazie wielociałowej lokalizacji poprzez utworzenie kontaktu z układem, który jest w stanie termicznym. Zaproponowany jest tutaj bardzo jasny schemat badania takiego wymuszenia poprzez podzielenie łańcucha spinowego na dwie części. W pierwszej (układ zlokalizowany) zakładamy bardzo dużą amplitudę nieporządku, a jako stan początkowy wybieramy stan Néela. W drugiej części natomiast nieporządek jest niewielki (układ termiczny). W trakcie ewolucji pomiędzy obiema częściami pojawiają się nietrywialne korelacje wymuszone oddziaływaniami na ich połączeniu. Korelacje te propagują się włąb każdego z podukładów, a czasowa charakterystyka przebiegu tego zjawiska jest właśnie przedmiotem badań tej publikacji.

Trzecia praca [Phys. Rev. B 107, 054204 (2023)] wychodzi z ciekawą propozycją stosowania nowego typu (przestrzennie lokalnej) obserwacji, która pozwala (przynajmniej teoretycznie) uchwycić jak w układzie propagują się lokalne korelacje. Tym samym może być przesłanką do rozróżnienia faz, w których znajduje się układ. Upraszczając dość skomplikowaną precyzyjną definicję tej wielkości, można ją rozumieć jako różnicę dwuczasowych lokalnych korelacji wybranego węzła sieci wyznaczonych przy dwóch różnych wielkościach układu. Jeśli tak zdefiniowana wielkość utrzymuje się w czasie w okolicach zera to możemy powiedzieć, że lokalna korelacja jest nieczuła na te węzły sieci, które zostały pominięte, tzn. informacja o stanie tych węzłów „nie dociera” do interesującego nas węzła. Jeśli natomiast narasta ona w czasie, albo wysyca się na istotnie niezerowej wartości to znaczy, że pominięcie węzłów dalekich nie jest



uprawnione. Autorzy publikacji szczegółowo zbadali zachowanie tak zdefiniowanej różnicy w różnych zakresach parametrów łańcucha spinowego i numerycznie wykazali, że jej charakter istotnie zależy od tego czy układ znajduje się w fazie ergodycznej, czy w fazie zlokalizowanej wielociałowo.

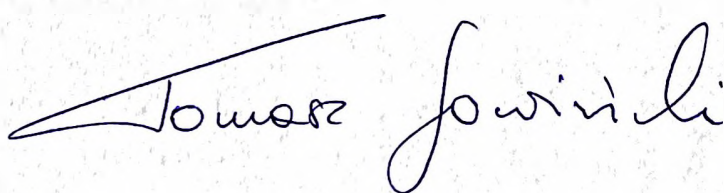
Podejście do problemu naruszenia ergodyczności w układach wielociałowych zaprezentowane w rozdziale 3. opartego o publikację [Phys. Rev. B 105, 224205 (2022)] jest nieco inne. Tutaj rozważany jest bowiem inny model jednowymiarowego łańcucha, tzw. model PXP, który narzuca bardzo mocne więzy na dopuszczalne stany, w których może znajdować się układ. W modelu tym *a priori* zakłada się, że zabronione jest, aby dowolne dwa sąsiednie węzły miały spiny ustawione dokładnie w tym samym kierunku. Choć takie ograniczenie może wydawać się dość specyficzne, to jest ono modelowo najprostszą implementacją mechanizmu blokady rydbergowskiej w układach atomowych, tzn. mocnego tłumienia amplitudy przejścia do wysoko wzbudzonego stanu na skutek przesunięcia poziomów energetycznych wymuszonego istnieniem w pobliżu innego atomu, który już w tym stanie się znajduje. Zatem zaproponowany tutaj model należy rozumieć jako teoretyczną idealizację łańcucha oddziałujących atomów, które mogą znajdować się w wysoko wzbudzonym stanie rydbergowskim. Z teoretycznego punktu widzenia model ten jest ciekawy w kontekście ergodyczności, bo wiadomo, że w jego spektrum znajdują się dość równomiernie rozłożone stany (tzw. blizny), dla których nie zachodzi termalizacja rozumiana jako zbieganie w czasie wartości oczekiwanych lokalnych obserwabli do wartości zgodnych z rozkładem mikrokanonicznym. Znalezienie takich wielociałowych stanów i ich klasyfikacja, nawet w tak uproszczonym modelu, nie jest jednak prosta i właśnie w tym miejscu przychodzi z pomocą czwarta publikacja stanowiąca rozprawę doktorską. Jest ona w istocie propozycją algorytmu wspomaganego technikami uczenia maszynowego pozwalającego na identyfikację całych rodzin takich specyficznych stanów.

Cała rozprawa jest podsumowana w rozdziale 4., w którym mgr Szoldra jeszcze raz przypomina najważniejsze wyniki naukowe będące podstawą jego rozprawy doktorskiej. Osobiście uważam je wszystkie za bardzo wartościowe i stanowiące kolejny krok w kierunku lepszego zrozumienia chaosu kwantowego i zjawisk z nim stowarzyszonych. Moja ocena nie jest przy tym odosobniona, bo przecież wszystkie prezentowane wyniki zostały już dogłębnie ocenione i docenione na etapie recenzji przez edytorów i wybranych przez nich anonimowych specjalistów bardzo renomowanego czasopisma naukowego jakim bez wątpienia jest Physical Review B. Warto może w tym miejscu podkreślić, że pierwsza z prac cyklu doktorskiego została dodatkowo wyróżniona przez redakcję, która dopuściła ją do publikacji w formie tzw. listu (*Letter*).

Jak zawsze w przypadku rozpraw doktorskich mających formę cyklu publikacji, jednym z najtrudniejszych zadań recenzenta jest ocena czy rozprawa doktorska spełnia warunki określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.), tzn. czy rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata

w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (ust. 1) oraz czy przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (ust. 2). W przypadku bowiem takich rozpraw zasadniczą część ich treści stanowią publikacje naukowe, które mają wielu autorów. W przypadku rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Szoldry nie ulega jednak żadnej wątpliwości, że obie przesłanki ustawowe są ewidentnie spełnione i to w zakresie znacznie przekraczającym zwyczajowo przyjmowane progi. Z oświadczeń doktoranta zawartych w rozprawie wynika bowiem, że pełnił on funkcję autora merytorycznie najważniejszego na każdym etapie powstawania publikacji. Szczegółowość oświadczeń jest wystarczająca, aby jednoznacznie wskazać nietrywialne i oryginalne problemy badawcze, które doktorant pod nadzorem swojego promotora oraz innych autorów rozwiązał samodzielnie. Przeprowadzone przez doktoranta rachunki numeryczne (niekiedy uzupełniane dodatkowymi rachunkami przeprowadzanymi przez innych autorów), ich wstępna analiza, kompilacja i weryfikacja prowadziła za każdym razem do przygotowania pierwszych szkiców publikacji naukowych. Wykonanie tych elementów nie byłoby możliwe, gdyby mgr Szoldra nie posiadał dobrze ugruntowanej i szerokiej wiedzy w zakresie fizyki teoretycznej silnie skorelowanych układów kwantowych. Tę naukową elokwencję i swobodę w formułowaniu naukowych wywodów widać wyraźnie w bardzo dobrze przygotowanym rozdziale wprowadzającym.

Podsumowując swoją recenzję z przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgra Tomasza Szoldry spełnia wszelkie warunki (zarówno formalne jak i zwyczajowe) jakie stawiane są przed kandydatami do pierwszego stopnia naukowego w zakresie fizyki teoretycznej. Dlatego bez żadnych wątpliwości wnioskuję o dopuszczenie pana mgra Szoldry do dalszych etapów postępowania prowadzonego na Uniwersytecie Jagiellońskim w celu uzyskania przez niego stopnia naukowego doktora w zakresie nauk ścisłych i przyrodniczych w zakresie fizyki.



Podpisano przez/ Signed by:
Tomasz
Sowiński
Data/ Date: 06.11.2024 18:49
mSzafir