

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Vitalija Yunko

*pt. Investigation of the elastic enhancement factor
and $1/f^\alpha$ noise in low-dimensional wave structures*

Praca doktorska pana Vitalija Yunko, ukończona w Warszawie w październiku 2018, dotyczy numerycznej i doświadczalnej analizy struktur mikrofalowych, które symulują układy kwantowe. Takie podejście możliwe jest dzięki formalnemu podobieństwu pomiędzy równaniem falowym, przedstawiającym propagację fal w układach mikrofalowych, a równaniem Schrödingera, opisującym dynamikę cząstki w układach kwantowych. Autor analizował widmo mocy oraz współczynniki wzmocnienia wnek mikrofalowych i interpretował otrzymane wyniki w świetle rezultatów teorii macierzy przypadkowych. Wybrana tematyka badań z jednej strony powiązana jest z teorią kwantowych układów dynamicznych i kwantowego chaosu, a z drugiej należy do doświadczalnej fizyki mikrofal.

Recenzowana rozprawa doktorska bazuje na ośmiu artykułach naukowych, z których jeden został opublikowany w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters*, a cztery inne ukazały się na łamach *Physical Review E*. Inna artykuł, którego mgr Yunko jest pierwszym autorem, ukaze się niebawem w materiałach konferencji CHAOS 2018. Rozprawa napisana w języku angielskim liczy 80 stron tekstu łącznie z obszernym spisem literatury i składa się z rozdziału wstępnego, ośmiu zasadniczych rozdziałów pracy oraz uwag końcowych. Rozprawa zawiera też zwięzłe streszczenie w języku polskim.

W krótkim wprowadzeniu autor szkicuje motywację do podjęcia tematu rozprawy, a następnie przedstawia zarys historyczny teorii chaosu i układów nieliniowych. Wprowadza pojęcie wykładnika Lapunowa oraz tłumaczy, na czym polegają trudności z analizą układów chaotycznych w przypadku kwantowych, dla którego pojęcie trajektorii cząstki nie jest dobrze zdefiniowane.

Rozdział drugi pracy stanowi omówienie zagadnienia symetrii odbicia w czasie naświetlonego w kontekście teorii macierzy przypadkowych. W zależności, czy rozpatrywany układ fizyczny posiada taką symetrię, do opisu własności statystycznych jego widma stosować można zespoły macierzy losowych należące do różnych klas symetrii. W tym rozdziale autor przedstawia podstawowe narzędzia tej teorii oraz statystyki, wykorzystywane w praktyce w dalszych rozdziałach rozprawy.

Zagadnienie chaosu falowego oraz powiązanego ściśle problemu chaosu w układach kwantowych, stanowi przedmiot rozdziału trzeciego. Autor wprowadza pojęcia bilardów i grafów kwantowych oraz opisuje odpowiadające im płaskie wnęki mikrofalowe oraz sieci mikrofalowe.

W rozdziale czwartym rozprawy znaleźć można krótki przegląd metod badania korelacji dalekiego zasięgu w widmach układów kwantowych. Autor podaje wyrażenia na dwupunktową funkcję korelacji, sztywność spektralną oraz wariancję liczby poziomów wynikającą z teorii macierzy losowych. Następnie przedstawia własności szumu $1/f^a$, często używanego do opisu układów dynamicznych modelujących zjawiska z różnych dziedzin nauk przyrodniczych, a także omawia układy otwarte opisywane w formalizmie macierzy rozpraszania. W kolejnym krótkim rozdziale przeglądowym rozpatrywano techniki analizy własności widm, przy w pełni realistycznym założeniu, że nie wszystkie poziomy energetyczne układu udało się zarejestrować.

Zasadnicza rozprawa doktorska, w której przedstawiono oryginalne wyniki badawcze doktoranta, rozpoczyna się w rozdziale szóstym. Autor przedstawia stosowany układ doświadczalny, pozwalający na wyznaczanie częstości własnych płaskiej wnęki mikrofalowej oraz na analizę rozpraszania fal w takim układzie. Statystyka zbioru częstości własnych płaskiej wnęki powiązana jest własnościami dynamiki klasycznego bilardu: modelom całkowalnym odpowiada efekt przyciągania poziomów i statystyka Poissona, podczas gdy dla wnęki w kształcie generującym układ typowym modelom klasycznie chaotyczny obserwuje się odpychanie poziomów zgodnie z przewidywaniami Wignera.

Ciekawym wynikiem autora jest obserwacja pozornego odstępstwa od tej reguły: statystyki najbliższych poziomów otrzymane w przypadku wnęki prostokątnej zgodne są z przewidywaniami ortogonalnego gaussowskiego zespołu macierzy losowych, jeśli brzeg wnęki jest szorstki, co powoduje iż dynamika układu klasycznego staje się chaotyczna. Podobne wnioski wyciągnąć można z analizy współczynnika elastycznego wzmocnienia, którego wartość, zależąca od charakteru brzegu wnęki rezonansowej, pozwala określić, czy dynamika odpowiadającego układu klasycznego jest chaotyczna.

Interesujące rezultaty rozprawy przedstawiono w rozdziale siódmym, w którym badany jest wpływ niezarejestrowanych częstości własnych na statystyki widmowe. W pracy analizowane są układy fizyczne z zaburzoną symetrią odbicia w czasie, których widma opisywane są przez unitarny gaussowski zespół macierzy losowych. Pomiar przeprowadzono na sieci mikrofalowej przedstawiającej graf z sześcioma wierzchołkami,

w której złamanie symetrii odbicia w czasie uzyskuje się za pomocą cyrkulatora. Bezpośrednio mierzona jest zależność współczynnika odbicia fali od jej częstości, której ekstrema odpowiadają częstościom własnym układu. Ponieważ obserwowane rezonanse częściowo przekrywają się, niektóre częstości własne układu nie mogą zostać poprawnie zidentyfikowane, a liczba pominiętych częstości szacowana jest na podstawie prawa Weyla opisującego średnią gęstość poziomów.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów mgr Yunko szacuje, że jego doświadczenie pozwala na rejestrację około 92-96% częstości własnych badanego układu, a także prezentuje numeryczną analizę wpływu ułamka ϕ zarejestrowanych poziomów na obserwowane statystyki widmowe, w tym sztywność spektralną, widmo mocy i rozkład odległości sąsiednich poziomów. W szczególności wariancja liczby poziomów oraz widmo mocy okazują się być bardzo czułe na odsetek niezarejestrowanych poziomów $1 - \phi$, więc analiza tych wielkości pozwala na niezależne wyznaczenie ułamka ϕ , kluczowego dla całego doświadczenia. Z drugiej strony w pracy nie przedstawiono jasnego wytłumaczenia, z jaką dokładnością wartość ϕ została oszacowana.

Wyniki numerycznych symulacji zgadzają się dość dobrze z danymi doświadczalnymi zarówno dla układów z zachowaną, jak i ze złamana symetrią odbicia w czasie. Z drugiej strony wykorzystywane modele teoretyczne służące do opracowania wyników numerycznych nie są dokładnie opisane: można domyślać się, że zakłada się w nich, iż dany poziom rejestrowany jest z prawdopodobieństwem ϕ , bez względu na odległość sąsiednich poziomów. Tymczasem bardziej realistyczne założenie, że prawdopodobieństwo zagubienia danego poziomu zwiększa się, gdy poprzedni rejestrowany poziom znajduje się w niewielkiej odległości, tak że oba rezonanse mocno się przekrywają, powinno dać wyniki lepsze i bardziej zgodne z danymi eksperymentalnymi. Lektura kolejnego rozdziału pracy sugeruje, że podobne postępowanie przeprowadzono w przypadku analizy danych uzyskanych dla bilardów trójwymiarowych.

Ponadto zamiast pisać: „*Both statistics seem to coincide well with the GOE theoretical curve.*” warto by się pokusić o bardziej precyzyjne testy statystyczne, pozwalające oszacować poziom ufności, z jakim można przyjąć, że dana próbka statystyczna wylosowana jest z zadanego rozkładu prawdopodobieństwa.

Rozdział ósmy pracy dotyczy analizy trójwymiarowych wnęk mikrofalowych, dla których analogia do bilardów kwantowych w trzech wymiarach przestaje być dokładna. Tym niemniej wyniki doświadczalne wskazują, iż także dla takich układów statystyczne własności widma opisywać można przy pomocy macierzy losowych. Autor mierzy

doświadczalnie zależność współczynnika odbicia fali wprowadzanej do wnęki od jej częstości, a z rejestrowanego sygnału wyodrębnia częstości rezonansowe i bada ich statystyki. Analiza danych pozwala oszacować odsetek niezarejestrowanych poziomów, który w tym przypadku jest większy niż dla wnęk dwuwymiarowych. Porównanie rozkładu odległości pomiędzy sąsiednimi poziomami, sztywności spektralnej oraz widma mocy uzyskanych z danych eksperymentalnych z wielkościami wyliczonymi z modelu macierzy przypadkowych pokazuje, że ta teoria może poprawnie opisywać statystyki rozkładu częstości własnych układów trójwymiarowych.

Cała rozprawa została napisana dość przejrzysto i została dobrze zredagowana. Zamieszczone staranne rysunki, które dobrze ilustrują uzyskane wyniki. Recenzentowi trudno było dopatrzeć się jakiegokolwiek usterek redakcyjnych, a jedyna uwaga dotyczy wyłącznie braku umlautu w nazwisku H.A. Wiedenmüller w referencji [11]. Przygotowując rozprawę autor wykazał się należytym warszatem fizyka eksperymentatora, a także pokazał, że zna aktualną literaturę przedmiotu i umie stosować metody numeryczne do rzetelnej analizy danych pomiarowych.

W podsumowaniu stwierdzam, że wyniki uzyskane przez autora rozprawy stanowią ciekawy wkład w doświadczalną fizykę mikrofal i mogą być interesujące także dla fizyków teoretyków. Jasno sformułowany cel pracy – eksperymentalne zbadanie widm wnęk i sieci mikrofalowych z zaburzoną symetrią odbicia w czasie oraz ich numeryczna analiza – został osiągnięty, a praca zasługuje na ocenę **bardzo dobrą**. W moim przekonaniu recenzowana praca **mgr Vitalija Yunko** spełnia wszelkie wymogi stawiane dysertacjom doktorskim. Dlatego wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, 28 listopada 2018



Prof. dr hab. Karol Życzkowski