

Warszawa, dnia 28 listopada 2018 r.

Recenzja pracy doktorskiej magistra **Vitalija Yunko**
pod tytułem:
“Investigation of the elastic enhancement factor and $1/f^\alpha$ noise in low-dimensional wave structures”

...otóż, mimo kilku publikacji zwiastujących ostateczne rozstrzygnięcie ”sprawy chaosu kwantowego” :

Equation reveals the characteristics of quantum chaos

September 4, 2017, [*Lund University*](#)

*Researchers have now succeeded in formulating a mathematical **result that provides an exact answer to the question of how chaos actually behaves**. The researchers have analysed chaotic states at the atomic level,*

Power Spectrum of Long Eigenlevel Sequences in Quantum Chaotic Systems

Roman Riser, Vladimir Al. Osipov, and Eugene Kanzieper

Phys. Rev. Lett. 118, 204101 – Published 16 May 2017

"Yes, we now have an exact equation. Personally, I am actually surprised that it was possible at all," says Vladimir Osipov.

Quantum chaos in ultracold gas discovered. *A team of University of Innsbruck researchers discovered that even simple systems, such as neutral atoms, can possess chaotic behavior, which can be revealed using the tools of quantum mechanics. The ground-breaking research, published in the journal Nature, opens up new avenues to observe the interaction between quantum particles.*

*The team of Francesca Ferlaino, Institute for Experimental Physics of the University of Innsbruck, Austria, has **experimentally shown chaotic behavior of particles in a quantum gas.***

"For the first time we have been able to observe quantum chaos in the scattering behavior of ultracold atoms," says an excited Ferlaino.

- trwające od niemal 40 lat zainteresowanie chaosem kwantowym –trwa nadal, jest bowiem stymulowane nie tylko wagą i atrakcyjnością pytania o związek między nieliniową, nieregularną klasyczną dynamiką układów zachowawczych a dynamiką kwantową układów klasycznie chaotycznych, różnorodnością stosowanych metod matematycznych - od symbolicznej dynamiki po najnowsze metody fizyki statystycznej wywodzące się ze statystyki matematycznej, lecz również, a zwłaszcza w ostatnich latach, burzliwym rozwojem nanotechnologii, mikroelektroniki, informatyki, robotyki, biologii czy fizyki i chemii kwantowej- zainteresowanie

spowodowane rodzącymi się oczekiwaniami, tymi już sformułowanymi i tymi jeszcze z pogranicza fantazji.

Już od momentu postawienia pytania o istotę chaosu kwantowego”, prócz badań teoretycznych, istniał wyraźny trend zmierzający do głębszego zrozumienia zjawiska poprzez obliczenia modelowe, co wymagało dysponowania wiarygodnymi danymi eksperymentalnymi, a w szczególności możliwie precyzyjnie określonymi warunkami samego eksperymentu, bez których prawidłowa parametryzacja modelu byłaby pozbawiona sensu.

Jednak, póki naukowcy z Lund stwierdzają w wywiadzie prasowym, że *The theory of quantum chaos is **about explaining** the irregular movements of both electrons and nuclei, as well as the irregular movements of, for example, rays of light in optical instruments with complex geometries, or sound waves in a furnished room.*

- uważam, że temat podjęty przez mgr Vitalija Yunko jest naukowo wartościowy, ciekawy i bardzo aktualny.

Rozprawa doktorska, napisana w języku angielskim, składa się z 9 rozdziałów i obejmuje 64 strony, nie licząc stron tytułowych, streszczeń w dwóch językach, listy publikacji powstałych z udziałem autora, spisu treści oraz bibliografii zawierającej 107 pozycji literaturowych. Z cytowanej literatury wynika, że istotna część wyników została już opublikowana w 7 pracach oraz w artykule wysłanym do publikacji w materiałach 11th CHAOS2018 International Conference, (Rome). Łącznie, Pan Vitalii Yunko jest współautorem 7 artykułów zamieszczonych w czasopiśmie z tzw. Listy Filadelfijskiej, w tym, co należ podkreślić, czterech w Physical Review E oraz jednego w Phys. Rev. Letters.

We wstępie, następnie w rozdziale 2, Autor przytacza klasyczną definicję chaosu deterministycznego, wskazując podstawowe trudności z identyfikacją zachowań chaotycznych na poziomie opisu kwantowego. Dalej, wprowadza ważne dla opisu i charakterystyki badanych układów pojęcia powszechnie stosowane w badaniu klasycznych układów chaotycznych, rozkłady gęstości tzw. najbliższych sąsiadów, NNSD, tu, w zagadnieniach kwantowych, dotyczy to rozkładu poziomów energetycznych. Następnie, przyjmując za udowodnione założenie o statystycznym podobieństwie widm poziomów energetycznych w układach chaotycznych do ich hamiltonianów w postaci zespołu macierzy przypadkowych, ogranicza rozważania do trzech klas zespołów macierzy przypadkowych, GOE, GSE i GUE odpowiadających odpowiednio, hamiltonianom z symetrią ze względu na odwrócenie czasu, z symetrią ze względu na odwrócenie czasu lecz bez symetrii rotacyjnej oraz hamiltonianom układów łamiących tę

symetrię, Autor zadaje istotne pytanie, czy w kwantowych układach chaotycznych istnieją uniwersalne rozkłady najbliższych sąsiadów.

Rozdział 3, *Wave chaos*, rozpoczyna zwięzłe wprowadzenie grafów kwantowych oraz podobnych im strukturalnie sieci mikrofalowych, poparte matematycznym podobieństwem jednowymiarowych równań Schroedingera oraz równania Telegrafistów. Autor pokazuje że grafy mikrofalowe zrealizowane przez sieć przewodów koncentrycznych, gdzie propagacja fali elektromagnetycznej opisywana jest równaniem Telegrafistów, równoważne są matematycznie grafom kwantowym z symetrią względem odwrócenia czasu opisanym jednowymiarowym równaniem Schrodingera. Z kolei podobieństwo opisu matematycznego płaskiej wnęki mikrofalowej równaniem Helmholtza do dwuwymiarowego równania Schroedingera na bilardzie kwantowym przekonuje czytelnika o wzajemnej odpowiedniości, przy właściwych warunkach brzegowych dla wnęki mikrofalowej i dwuwymiarowej studni potencjału.

Rozdział 4, to opis metod zastosowanych do badania statystycznych właściwości krótko- oraz długozasięgowych korelacji widmowych, widm mocy układów mikrofalowych, jako kwantowych odpowiedników regularnych albo chaotycznych układów klasycznych. Znajdujemy więc zwięzły, choć szczegółowy opis układu doświadczalnego: sieci mikrofalowej, wnęk mikrofalowych, zastosowanych materiałów, tłumików, złącz, cyrkulatorów, generatorów i analizatorów sieci.

Tytułowe: szum $1/f^\alpha$ oraz elastyczny współczynnik wzmocnienia, są treścią części 2 rozdziału 4. Elastyczny współczynnik wzmocnienia, w odróżnieniu do poprzednich miar chaosu, może być używany do charakteryzowania otwartych układów kwantowych lub falowych z bardzo silną dyssypacją, symulujących chaotyczne układy kwantowe z absorpcją. Z kolei, badanie gęstości widmowej typu $1/f^\alpha$, właściwej fluktuacjom wielu układów fizycznych, pozwala oczekiwać zachowań chaotycznych dla $\alpha=1$, zaś całkowalności układu dla $\alpha=2$.

W rozdziale 5 poznajemy powody dla których identyfikacja wszystkich „poziomów energetycznych” wnęki mikrofalowej nie jest praktycznie możliwa oraz procedury umożliwiające analizę takich niekompletnych widm, czyli wprowadzenie do spektralnych funkcji korelacji układów chaotycznych, które uwzględniają zgubione stany. Analiza obejmuje krótko- i długozasięgowe funkcje korelacji, rozkład NNSD odległości najbliższych sąsiadów, wariacje liczby stanów, sztywność spektralna oraz widmo mocy związane z szumem $1/f^\alpha$.

Postępowanie takie, zmierzające do określenia liczby brakujących poziomów jest niezmiernie ważne, jak zauważa Autor, gdyż wspomniane miary chaotyczności są niezwykle czułe na liczbę zgubionych poziomów.

W rozdziale 6 Autor przedstawia metodykę oraz realizację doświadczalną symulacji chropowatego oraz prostokątnego bilardu kwantowego oraz przytacza wyniki pomiarów elastycznego współczynnika wzmocnienia $W_{s,\beta}$ uzyskane dla chropowatych oraz prostokątnych wnęk mikrofalowych. Szczegółowa analiza rozkładów odległości najbliższych sąsiadów dla obu wnęk prowadzi Autora do wniosku, iż rozkłady dla wnęki prostokątnej mają charakter pośredni między rozkładem Wignera a rozkładem Poissona, co odpowiada układom jeszcze niechaotycznym ale już klasycznie niecałkowalnym. Do podobnego wniosku, na drodze obliczeń numerycznych, dochodzi Autor posługując się modelem Portera-Rozenzweiga. Zastosowaną miarą odejścia układu od zachowania regularnego był współczynnik chaotyczności k , którego wartość jest funkcją zgodności rozkładu teoretycznego z rozkładem doświadczalnym. Wyniki te wykazały, że wnęka prostokątna charakteryzuje się zachowaniem przejściowym pomiędzy zachowaniem układu całkowalnego i chaotycznego. Także wyniki uzyskane dla elastycznego współczynnika wzmocnienia $W_{s,\beta}$ wykazały duże odejście tej miary od wartości przewidywanej dla układu całkowalnego. Takie właściwości układu można wytłumaczyć obecnością anten używanych do wprowadzenia oraz detekcji fal mikrofalowych, które zachowują się tak jak punktowe rozpraszacze. Niniejsze badania pozwoliły na wykazanie, że elastyczny współczynnik wzmocnienia może być z powodzeniem wykorzystywany do analizy stopnia chaotyczności układów o znacznym stopniu otwartości lub znacznej absorpcji. Warto dodać, iż tego typu pomiary, w obszarze przejściowym między regularną a chaotyczną dynamiką nie były dotąd publikowane.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki analizy statystyki zgubionych poziomów sieci mikrofalowej symulującej grafy kwantowe ze złamaną jak również z zachowaną symetrią ze względu na odwrócenie czasu. Wykorzystano krótko- i dalekozasięgowe funkcje korelacji ze zgubionymi stanami analizując rozkłady odległości najbliższych sąsiadów, sztywność spektralną oraz widmo mocy. Wyniki doświadczalne wykazały dużą czułość funkcji korelacji długozasięgowych, w tym widma mocy, na liczbę zgubionych poziomów. Wyznaczono współczynnik φ będący miarą obserwowanych stanów dopasowując wyniki numeryczne dla funkcji korelacji długozasięgowych do wyników doświadczalnych. Otrzymane wyniki mogą mieć dość szerokie zastosowanie w różnych badaniach doświadczalnych ponieważ spektralne

funkcje korelacji, wykorzystujące informacje o zgubionych stanach mogą być z powodzeniem służyć do wyznaczenia liczby stanów, których identyfikacja z różnych powodów nie była możliwa.

Rozszerzenie badań z rozdziału 7 na przypadek wnęki trójwymiarowej, czyli analizy funkcji korelacji krótko- i długozasięgowych, w tym widma mocy, przedstawia Autor w rozdziale 8. Pomimo mającego tu miejsce braku analogii między opisem kwantowym i klasycznym, eksperymenty z trójwymiarową wnęką mogą być bardzo interesujące, jako że częstości własne nieregularnej wnęki 3D mają cechy charakterystyczne dla klasycznie chaotycznego układu kwantowego. Wyniki badań pokazują że również w tym przypadku funkcje korelacji krótko- i długozasięgowych mogą być z powodzeniem wykorzystywane do znalezienia liczby zgubionych stanów. Stwierdzenie to jest o tyle istotne, że gęstość stanów w trójwymiarowych wnękach mikrofalowych jest proporcjonalna do kwadratu częstotliwości (co pozwala na efektywne regulowanie strat poprzez zmianę częstotliwości), a zatem prawdopodobieństwo gubienia częstotliwości rezonansowych w badaniach doświadczalnych tych wnęk jest szczególnie duże.

Rozdział 9. Podsumowanie, zawiera ważniejsze idee i pomysły Autora oraz ich ocenę popartą doświadczalną i numeryczną weryfikacją.

Kilka uwag krytycznych:

-wstęp zbyt lapidarny. Zważywszy źródła tej tematyki, ciekaw byłbym stanowiska Autora na temat aktualnego stanu wiedzy/przekonań na temat klasycznie chaotycznych układów kwantowych

-'definicje' zachowań chaotycznych, czy też ich charakterystyka zbyt cząstkowe

-wstęp nie oddaje wystarczająco wagi zagadnienia, nie dość uzasadnia powody, choćby aplikacyjne, dla których badane problemy powinny zainteresować czytelnika.

Przystępując do końcowej oceny stwierdzam, jak wspomniałem wcześniej, że problematyka pracy jest nowoczesna, a wybrany temat pracy interesujący. Autor, oprócz części teoretycznej oraz znaczącej pracy numerycznej rzetelnie wykonał eksperymenty według logicznie zaplanowanego programu. Przeprowadzona dyskusja wyników wykazała, że Autor potrafił umiejętnie skorelować wyniki pomiarów parametrycznych z badaniami numerycznymi oraz teoretycznymi. Pozytywnie również oceniam edytorską stronę przedstawionej pracy.

Pracę doktorską Pana mgr Vitalija Yunko przeczytałem z zainteresowaniem, zaś to co prócz jej wartości naukowej uważam za szczególnie cenne, to połączenie wymagającej techniki eksperymentalnej z zaawansowaną teorią i niebanalnymi obliczeniami numerycznymi.

Podsumowując, uważam że przedstawiona do oceny praca doktorska spełnia wszystkie ustawowe wymogi i wnioskuję o dopuszczenie Pana Vitalija Yunko do dalszych etapów postępowania kwalifikacyjnego w celu nadania mu stopnia doktora nauk fizycznych.

Zważywszy fakt, iż znacząca część wyników zawartych w rozprawie została opublikowana w wysoko cenionych czasopismach, wnioskuję o jej wyróżnienie.



Prof. dr hab. Wojciech Gadomski