

Paweł Horodecki
Międzynarodowe Centrum Teorii Technologii Kwantowych
Uniwersytet Gdański
ul. Wita Stwosza 63
80-233 Gdańsk
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 29.11.2021

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Giergiela pt. „Time Cristal Phenomena”

Tematyka przedstawionej przez magistra Krzysztofa Giergiela dysertacji doktorskiej dotyczy dziedziny dyskretnych kryształów czasowych. Oryginalna idea kryształów czasowych w domenie ciągłej pochodzi od Franka Wilczka. W wersji klasycznej istotą tego zjawiska jest występowanie podstawowego stanu energii ewoluującego w czasie, co może wystąpić w przypadku niestandardowej zależności hamiltonianu od pędu, która powoduje, że równania Hamiltona w pewnych punktach nie są dobrze określone. Hipoteza w odniesieniu do występowania analogii kwantowej, w której układ mógłby spontanicznie łamać ciągłą symetrię w czasie nie potwierdziła się dla przypadków stanu podstawowego i równowagi termicznej, natomiast pokazano, że pewien jego wariant jest możliwy dla stanów wzbudzonych. Promotor niniejszej rozprawy, profesor Krzysztof Sacha wykazał w pionierskiej pracy z roku 2015 na łamach Physical Review A możliwość łamania dyskretnej symetrii czasowej w układach z zewnętrzną siłą periodyczną. Istotą tego odkrycia jest obserwacja, że w układach takich mogą występować stany własne Floqueta, które stanowią superpozycję pakietów ewoluujących z częstością będącą wielokrotnością częstości wymuszenia. W takim wypadku odpowiedni pomiar von Neumanna skutkuje kolapsem funkcji falowej do jednego z pakietów, który będzie ewoluował z częstością pierwotną. O ile w przypadku pojedynczej cząstki końcowa sytuacja nie jest stabilna, o tyle w odpowiednio dobranej granicy czas stabilności długookresowej ewolucji końcowego, wielocząstkowego pakietu może być dowolnie długi.

Rozprawa Krzysztofa Giergiela dotyczy właśnie układów, w których łamana jest dyskretna symetria w czasie w określonych sytuacjach fizycznych. Wszystkie składające się na doktorat prace ukazały się w periodykach naukowych o uznanej międzynarodowej renomie (jedna w Physical Review Letters, dwie w Physical Review A, jedna w dziale szybkich powiadomień pisma Physical Review B oraz dwie w New Journal of Physics). Kandydat jest pierwszym autorem wszystkich tych publikacji, a załączone oświadczenia potwierdzają zasadność tej pozycji na liście autorów. Cztery artykuły [1,2,4,5] dotyczą strukturalnych analogii dynamiki w czasie do znanych fenomenów z dziedziny fizyki ciała stałego, dwa [3,6] skoncentrowane są wokół zagadnienia możliwych realizacji doświadczalnych badanych zjawisk.

Zasadniczy metodologiczny element przedstawionego cyklu prac stanowi opis układu dynamicznego przy pomocy pary zmiennych kanonicznych kąt-działanie. W obecności periodycznego zaburzenia i sytuacji bliskiej rezonansu (tj. gdy częstość zaburzenia równa się wielokrotności okresu ruchu układu niezaburzonego) zmienna kątowa zależy w przybliżeniu liniowo od czasu. Jeżeli działanie jest bliskie wartości rezonansowej, to po przejściu do układu rotującego pozostałe wielkości są wolno zmienne, co pozwala na uśrednienie funkcji Hamiltona po okresie zaburzenia. Taki hamiltonian

skwantowany kanonicznie z jednej strony opisuje układ porównywalnie dobrze do otrzymanego w kwantowym przybliżeniu sekularnym, które jest użytecznie obliczeniowo, z drugiej zaś w ramach półklasycznej kwantyzacji pozwala – dzięki wspomnianej liniowej zależności zmiennej kątowej – jakościowo dobrze przewidywać czasową ewolucję prawdopodobieństwa detekcji cząstki w określonym położeniu. Zmiana struktury tego ostatniego decyduje o pojawianiu się kryształu czasowego i zjawisk z nim stowarzyszonych.

Omówmy pokrótce kolejne artykuły wchodzące w skład rozprawy. W pracy [1] wyprowadzono zjawisko lokalizacji Andersona w czasie. Zasadniczą różnicą w porównaniu z poprzednimi wynikami [K. Sacha, Sci. Rep. (2015); K. Sacha, D. Delande, Phys. Rev. A (2015)] jest nie tylko nowy układ fizyczny tj. atomy rydbergowskie, ale też brak typowej struktury kryształu czasowego. Mianowicie w pracy analizuje się przypadki jedno i trójwymiarowe atomu Rydberga w podstawowym rezonansie gdy częstość hamiltonianu niezaburzonego jest równa częstości periodycznego zaburzenia w czasie. Przedstawiono analizę przewidującą pojawienie się lokalizacji Andersona w czasie w oparciu o kwantyzację efektywnego hamiltonianu klasycznego w granicy słabego nieporządku, przy założeniu, że w związku z periodycznością ruchu długość korelacji musi być mniejsza od 2π , a następnie potwierdzono rzecz numerycznie dokonując obliczeń z użyciem kwantowego hamiltonianu w przybliżeniu sekularnym. Zwraca uwagę rzetelna ilustracja wyników: załączono nie tylko ilustrację w przypadku mikrofalowym, gdy losowość można wprowadzić z pomocą 500 współczynników w rozwinięciu harmonicznym potencjału sekularnego, ale także dla quasi-energii o kilka rzędów wielkości mniejszej (Rys. 3), w warunkach typowych dla eksperymentu, gdzie prawdopodobieństwo pomiaru w czasie zaledwie sygnalizuje obecność pożądanego zjawiska. W dalszej części wyprowadzono analogiczne zjawisko w przypadku trójwymiarowym. Pojawiają się tu dwie zmienne kanoniczne, przy czym druga odpowiada za precesję orbity Keplerowskiej. Przeprowadzono analizę problemu w duchu kwantyzacji półklasycznej uwzględniając przybliżenie Borna-Oppenheimera dla zmiennych samej orbity. Używając silnego stałego pola elektrostatycznego sprowadzono rzecz do poprzedniego przypadku liniowego, natomiast dla mniejszej wartości pola uzyskano zlokalizowany pakiet poruszający się po orbicie Keplera. Oba przypadki zilustrowano wykonując obliczenia bazujące na kwantowym Hamiltonianie sekularnym. Z punktu widzenia czytelnika szkoda, że w oryginalnej publikacji rysunek 8.b nie jest tak przejrzysty, jak w załączonym przez doktoranta streszczeniu.

Artykuł [2] jest swego rodzaju panoramą możliwości, jakie oferują ramy badawcze, które w tytule opatrzone nazwą „time cristal platform”. Na wstępie przypominano narzędzie uniwersalne w przedstawionym cyklu prac, czyli klasyczny Hamiltonian ze zmiennym w czasie członem periodycznym w obrazie zmiennych kąt-działanie, w rezonansie $s : 1$ (tj. gdy częstość zaburzenia jest s razy większa od częstości związanej z ruchem niezaburzonym), uśredniony po czasie. Zwrócono uwagę, że w takim obrazie i przy dużym s odpowiednio manipulując członami rozwinięcia fourierowskiego potencjału efektywnego można zaproponować czasowy analogon jednowymiarowego modelu ciała stałego oraz przypomniano zasady formalizmu Floqueta. Następnie zaprezentowano zręczny sposób generowania struktury quasi-kryształicznej w czasie pokazując jak w strukturę potencjału efektywnego można wpisać sekwencję skończonego ciągu Fibonacciego w przypadku, gdy chmura atomów odbija się od dwóch luster ustawionych pod kątem 45 stopni. Następnie, zakładając $s \gg 1$ oraz –ograniczając się do pierwszego pasma i używając języka funkcji Wanniera zbudowano wielociałowy Hamiltonian Bosego-Hubbarda. Kluczowe jest to, że można uzmiennić w czasie długość rozpraszania, która pojawia się pod całą po okresie ruchu wraz z punktowym przekryciem różnych funkcji Wanniera. Sposób w jaki w kolejnym kroku wykorzystano rozkład na wartości singularne, aby wytworzyć długozasięgowe oddziaływania egzotyczne jest bardzo elegancki, a sam efekt został dobrze zilustrowany na rysunku 2. Zauważmy, że odpowiednia macierz przeciwdziałania w zmiennej dyskretnej, a dziedzinę – w ciągłej zmiennej czasu. Nasuwa się techniczne pytanie: co można powiedzieć o przeciwdziałaniu jako matematycznej przestrzeni funkcyjnej? W dalszej części autorzy dowodzą oraz ilustrują z pomocą

konkretnego przykładu jak można wytworzyć dwuwymiarową strukturę kryształu czasowego z pomocą specyficznego układu atomów odbijających się od dwóch luster. Finał artykułu przynosi prostą i zarazem błyskotliwą ideę molekuly, która powstaje z dwóch atomów o przeciwnych pędach kanonicznych na okręgu. W takim wypadku potencjał efektywny zawiera różnicę zmiennych kątowych i zabieg wprowadzenia losowości w jego rozkład Fourierowski generuje strukturę związaną, zlokalizowaną w czasie.

Artykuł [3] zawiera szczegółową i praktyczną analizę możliwości eksperymentalnego wytworzenia dyskretnych kryształów czasowych w oparciu o grupę ultra-zimnych atomów odbijanych od oscylującego lustra w polu grawitacyjnym. Analiza bierze pod uwagę m. in. zależność parametru λ opisującego związek amplitudy z częstotliwością drgań lustra – nie może on być zbyt duży dla ustalonego s , aby klasyczny Hamiltonian, stanowiący punkt odniesienia dla analizy jakościowej, nie prowadził do dynamiki chaotycznej. W pracy analizowany jest układ wielocząstkowy. Idea kryształu czasowego, w którym w wyniku zwiększenia siły oddziaływań stan Floqueta o podstawowej quasi-energii zmienia się z iloczynu tensorowego sum na sumę iloczynów tensorowych (w języku funkcji Wanniera) jest opisana w innej pracy (m. in. w dodatku do artykułu [4]) – tutaj autorzy skupiają się na wyprowadzeniu obserwowalnej sygnatury, która rozróżniałaby oba przypadki. Wyprowadzony Hamiltonian efektywny typu Grossa-Pitajewskiego w przybliżeniu ciasnego wiązania prowadzi do funkcjonału energetycznego. Najpierw dobrano parametry dla przypadku jednocząstkowego, a później zminimalizowano funkcjonał wielocząstkowy w zależności od efektywnego parametru oddziaływania proporcjonalnego do iloczynu długości rozpraszania oraz częstotliwości opisującej pułapkę poprzeczną. Widać wyraźnie, że istnieje pewien obszar graniczny modułu tego parametru – powyżej tunelowanie zdecydowanie zwycięża i minimum energii jest osiągane przez superpozycję wszystkich funkcji Wanniera, poniżej zaś dominuje jedna z nich. W analizie wskazano jak uniknąć kolapsu spowodowanego potencjalnym wzbudzeniem modów poprzecznych pułapki, a następnie obserwacje zilustrowano wykresami. Jeden z nich, Rys. (3.a) pokazuje stabilność w czasie (lub jej brak) wielkości będącej rzutem stanu na wybraną funkcję Wanniera zlokalizowaną wokół punktu powrotu, pozostałe (3.b-d) ilustrują stabilność i odpowiednio jej brak dla rozkładu przestrzennego. Podano też skutki przesunięcia funkcji początkowej o połowę odchylenia standardowego. Ponieważ odnośne rysunki (3) i (5) są ze sobą powiązane, nieco niefortunne jest powtórzenie kolorystyki w odniesieniu do krzywych, bowiem kolor niebieski na obu wykresach oznacza co innego. Ponadto – jeżeli wziąć pod uwagę wartość 2000 zmiennej poziomej, to wydaje się, że na rysunku 5.a nastąpiło nieznaczne „rozrzedzenie” kształtu. Czy tak jest w istocie, a jeśli to prawda, to czy zwiększyłoby się ono wraz ze wzrostem niedokładności początkowej? W artykule dodatkowo proponuje się wariant eksperymentu, w którym wyłącza się oddziaływanie i śledzi - nieanalityczną - zmianę statystyki w terminach logarytmów prawdopodobieństw na podobieństwo przejścia fazowego. W ostatnim rozdziale artykułu szczegółowo poddano analizie możliwość eksperymentalnej realizacji lokalizacji Andersona w czasie, ale - w przeciwieństwie do artykułu [1] - w obecności struktury krystalicznej w czasie.

Praca [4] poświęcona jest koncepcji wytworzenia topologicznego kryształu czasowego. Zasadnicza idea polega na wytworzeniu periodycznej struktury ze zmiennym periodycznie potencjałem prowadzącej w układzie rotującym do takiego hamiltonianu efektywnego, który po skwantowaniu, w reżimie ciasnego wiązania pozwalałby na stany chronione topologicznie. W pracy pokazano, jak odpowiednio dobrane drgania lustra - z ogólną „mieszką” rezonansów $1:1$, $s:1$, $s/2 : 1$ - pozwalają wyprowadzić, po skwantowaniu (i) hamiltonian Su-Schreifera-Heegera oraz (ii) hamiltonian Bosego-Hubbarda z fazą Haldane’a. Szczególnie interesujące jest, że uzyskano trzy różne fazy z pomocą jakościowo tej samej czasoprzestrzennej zależności parametru długości rozpraszania, jedynie z koniecznością przeskalowania (Rys. 3). Podobnie jak w pracy [2] użyto tu rozkładu na wartości singularne, ale dodatkowe uzmiennienie przestrzenne odnośnej wielkości wprowadziło dodatkową jakość.

Artykuł [5] przynosi widowiskową realizację struktury quasi-kryształu w czasie. W porównaniu z układem luster w pracy [2], mamy tutaj Hamiltonian wzbogacony o wystąpienie dwóch różnych parametrów λ i różnych parametrów s . Podobnie jak w pracy [2] otrzymano tu hamiltonian Bosego-Hubbarda. Parametry λ dobierano tak, aby mieć te same współczynniki tunelowania dla najbliższych sąsiadów - dla porządku wypadałoby w tym momencie jawnie zdefiniować pojęcie najbliższego sąsiada w przypadku wieloindeksu. Odpowiedni dobór parametrów s prowadzi do dwuwymiarowej realizacji struktury quasi-kryształu czasowego w oparciu o skończony podciąg ciągu Fibonacciego. Mamy tu do czynienia z efektem fizycznym o dużej estetyce koncepcyjnej i wizualnej. Artykuł jest napisany nieco skrótowo. Przykładowo, dobrze byłoby wiedzieć czy i – ewentualnie - dlaczego konieczny był wybór innej pary wielkości λ oraz przesunięcia fazowego w przypadku prawej części rysunku 3, ponadto ogólna rola przesunięcia fazowego nie jest wzmiankowana w tekście.

Ostatni artykuł [6] stanowi drobiazgową analizę możliwości wytworzenia kryształów czasowych o względnie wysokich parametrach s (20-100), wszechstronnie wykraczającą poza badania z pracy [3]. W szczególności w pracy [6] (i) wyznaczono praktyczną odległość między pierwszymi dwoma pasmami dla wybranej wielkości $s=30$ oraz częstotści, (ii) pokazano, że dla lustra stanowiącego nieskończoną barierę dla dużych wielkości s parametr $\lambda=0.2$ wystarcza do uzyskania struktury kryształu (iii) oszacowano minimalną liczbę odbić, aby zaobserwować tunelowanie w przypadku braku oddziaływań między atomami (iv) zbadano zależność międzypasmowej przerwy od uniwersalnego parametru przeskalowania (v) zbadano wpływ gaussowsko modelowanego potencjału lustra, pokazując, że znacząco zmienia się fourierowski obraz niezaburzonych trajektorii periodycznych (vi) podano więzy na maksimum atomów. Kolejnym ważnym momentem była analiza porównawcza trzech kondensatów: ^{85}Rb , ^7Li , ^{39}K . Po uważnej analizie wybór padł na ostatni pierwiastek, dla którego zaproponowano szczegółowy protokół doświadczalny.

Przedstawiony w ramach rozprawy doktorskiej cykl prac należy ocenić wysoko. O ile pierwotna idea dyskretnych kryształów czasowych oraz lokalizacji Andersona w czasie została zaprezentowana przez profesora Krzysztofa Sachę w 2015 i 2016 roku, to zaproponowany bogaty wachlarz nowych zastosowań stanowi jakościową zmianę w rozpoznaniu i zrozumieniu możliwości jakie dają układy z periodycznym zaburzeniem w modelowaniu struktur kwantowych kryształów czasowych oraz struktur z nimi stowarzyszonych. Przedstawione prace były już cytowane blisko 100 razy m. in. na łamach tak prestiżowych pism jak Nature, Science, Physical Review Letters, Science Advances czy Nature Communications.

Zwraca uwagę konsekwentne wykorzystanie, na zasadzie swoistej symbiozy, zalet kwantowania klasycznego hamiltonianu efektywnego – co prowadzi do dobrych intuicji zachodzących procesów oraz kwantowego przybliżenia sekularnego, które w ramach przyjętego paradygmatu można przyjąć za bardziej ścisłe, choć mniej intuicyjne. Pośród uzyskanych wyników na szczególne podkreślenie zasługują: głęboka analiza lokalizacji Andersona w czasie dla atomów Rydbergowskich, idea struktur quasi-kryształicznych oraz stabilizacja wiązania przy pomocy lokalizacji Andersona, zaskakująco prosty przykład brzegowych stanów topologicznych oraz szczególna dbałość o powiązanie idei teoretycznych ze sferą doświadczalną. Na marginesie można postawić pytanie, czy jakościowo można znaleźć jakieś analogie obecnych wyników z pracy [1] dla rydbergowskich atomów helu (por. A. Deller, S.D. Hogan, Phys. Rev. A (2018), Phys. Rev. Lett. (2019)) lub rydbergowskich molekuł. Podobnie wydaje się, że byłoby interesujące zbadanie możliwości uogólnienia lub – co bardziej prawdopodobne - modyfikacji wspomnianych badań dla ciężkiego jonu wodoropodobnego, którego opis wymaga już efektów relatywistycznych.

Rozprawa powstała w światowej klasy ośrodku z dziedziny kryształów czasowych, pod kierunkiem samego odkrywcy zjawiska, które poddano badaniom – w tym sensie doktorant znajdował się w pozycji uprzywilejowanej. Wszelako z przedstawionych oświadczeń wynika, że magister Krzysztof Giergiel przeprowadził przytłaczającą część obliczeń analitycznych i numerycznych (wyjątki stanowią: rozdział

VI artykułu [3] oraz w artykule [4], w której doktorant wykonał część obliczeń). Świadczy to nie tylko o dużej biegłości warsztatowej, ale i o świetnym zrozumieniu tematu badawczego. W przypadku dwuautorskiej pracy na temat atomów Rydbergowskich [1], ze względu na wkład badawczy oraz zaawansowanie problemu można zaryzykować stwierdzenie, że doktorant wykonywał zadania, których nie powstydziliby się uzdolniony pracownik na stażu podoktorskim. Szkoda, że magister Krzysztof Giergiel nie zechciał napisać bardziej obszernego wprowadzenia. Mogłoby ono stanowić coś na kształt wstępu dla początkujących badaczy, a w przedstawionej formie - choć precyzyjne - sprawia wrażenie bardzo skrótowego, na granicy nonszalancji. Niezależnie doktorant jest autorem kilku innych prac z dziedziny. W pracy [M. Mierzejewski, K. Giergiel, K. Sacha, Phys. Rev. B (2017)], brał udział w badaniu lokalizacji w układzie wielu cząstek, w publikacji [P. Matus, P. Giergiel, P. Sacha, Phys. Rev. A (2021)] uczestniczył w rozwinięciu idei wiązania atomów przez lokalizację Andersona (por. [2]). Jest także współautorem często cytowanej publikacji przeglądowej [K. Amini *et al.*, Rep. Prog. Phys. (2019)], a także artykułu [A. Kuroś *et al.*, New J. Phys. (2020)] o diagramach fazowych i optymalnej kontroli kryształów czasowych. Pan magister Krzysztof Giergiel posiada ponadprzeciętny dorobek na bieżącym etapie kariery naukowej (cytowany już niemal 180 razy) i nie mam wątpliwości, że mógłby zostać cenionym pracownikiem najlepszych ośrodków zagranicznych zajmujących się tematyką kryształów czasowych. W podsumowaniu pragnę stwierdzić, że przedstawiona praca z nadmiarem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i tym samym wnioskuję o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a w przypadku pozytywnego zakończenia tegoż przewodu – o wyróżnienie pracy.