



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Toruń, 14 grudnia 2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Weroniki Golletz
pt. "Discrete Time Crystals in Ultra-Cold Atoms"**

Przedłożona rozprawa doktorska mgr Weroniki Golletz została przygotowana na Uniwersytecie Jagiellońskim pod kierunkiem prof. dr. hab. Krzysztofa Sachy. Jej głównym celem jest charakteryzacja właściwości modelowych dyskretnych kryształów czasowych odpowiadających chmurom silnie oddziałujących atomów w polu grawitacyjnym odbijanym od oscylującego lustra.

Praca ma formę monografii przygotowanej w języku angielskim i liczącej 106 stron. Składają się na nią półtora stronicowy wstęp, cztery rozdziały, krótkie podsumowanie oraz obszerna bibliografia zawierająca ponad 150 pozycji. Wstęp definiuje problem i zapowiada zawartość kolejnych rozdziałów pracy, a także wskazuje dwa artykuły na podstawie których została przygotowana opublikowane w uznanym czasopiśmie New Journal of Physics. Autorka rozprawy, pani mgr Golletz, jest pierwszą autorką jednego z nich. W drugim została wymieniona na trzecim miejscu listy autorów. W artykułach niestety nie podano indywidualnego wkładu autorów. Pani Weronika Golletz jest też autorką kilku innych artykułów, których zawartość nie ma bezpośredniego związku z tematyką rozprawy.

Rozdział pierwszy rozprawy doktorskiej wprowadza koncepcję kryształów czasowych oraz podstawowe narzędzia teoretyczne wykorzystywane do ich opisu. Pokazano w jaki sposób formują się kryształy w mechanizmie spontanicznego łamania symetrii translacji. Zdefiniowano dyskretne kryształy czasowe, które są przedmiotem rozprawy. Wprowadzono czytelnika w podstawy teorii Floqueta wykorzystywanej do opisu układów periodycznych w czasie. Podobała mi się elegancko przeprowadzona klasyczna analiza ruchu prototypowego układu: pojedynczej cząstki w polu grawitacyjnym odbijającej się od oscylującego lustra, dla której wyprowadzono efektywny hamiltonian w przybliżeniu sekularnym. Omówiono reprezentację ruchu cząstki w przestrzeni fazowej. Wreszcie, przeprowadzono dyskusję analogicznego układu kwantowego, której ważnymi elementami są identyfikacja stanów Wanniera i Floqueta a także podejście w ramach przybliżenia uśrednionego pola. Zaciekał mnie efektywny kwantowy hamiltonian układu dany równaniem (1.37), stanowiący szczególną postać modelu Su-Schrieffer-Heeger, do tej



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

pory realizowanego w jednowymiarowych strukturach przestrzennych. W tym wstępnym rozdziale zabrakło mi wskazania analogii i różnic między tradycyjnymi kryształami czasowymi a przestrzennymi. Na przykład dyskusja czasowych stanów Wanniera byłaby bardziej przystępna gdyby przeprowadzić ją w oparciu o definicje ich prototypów - stanów znanych z teorii ciała stałego. **Proszę doktorantkę o krótkie omówienie przykładowych analogii i różnic między kryształami przestrzennymi a czasowymi przy okazji obrony.**

Przedmiotem drugiego rozdziału jest stabilność dyskretnych kryształów czasowych względem niedoskonałości realizacji eksperymentalnych i fluktuacji kwantowych. Zanalizowano wpływ przygotowania chmur atomów w dostępnym laboratoryjnie kształcie gaussowskim, stanowiącym przybliżenie stanów własnych układu. Zbadano to zagadnienie w reżimach słabych i silnych oddziaływań. Krótko wprowadzono czytelnika w zagadnienie wydajnej czasowo optymalizacji bayesowskiej, którą wykorzystano jako element badania stabilności układów. W rezultacie wskazano zakresy stałych oddziaływania oraz odchyłeń położenia początkowego od klasycznego punktu zwrotu, w których tworzą się dyskretne kryształy czasowe w mechanizmie spontanicznego łamania symetrii. Mam tutaj pytanie techniczne: Stała oddziaływania jest zazwyczaj wielkością mianowaną, podczas gdy na rys. 2.4 i dalej podana jest jako wielkość bezwymiarowa. Domyślałem się że jej wartość podana jest w stosunku do innej charakterystycznej wielkości w badanym układzie. **Proszę doktorantkę o komentarz na ten temat.** Dalszy ciąg rozdziału drugiego poświęcony jest optymalizacji częstości oscylacji lustra oraz stabilności względem fluktuacji kwantowych w układach wielociałowych. Analiza stabilności dotyczy realizacji kryształu w formie kondensatu, a jej przedmiotem jest wyznaczenie liczby atomów opuszczających kondensat w czasie trwania eksperymentu. Obliczeń dokonano przy pomocy dwóch modeli: w podejściu Bogoliubowa oraz w modelu dwumodowym, uzyskując jakościowo zgodne rezultaty. Rozdział drugi imponuje bogactwem aparatu matematycznego jakim posługuje się sprawnie autorka. W morzu przytaczanych modeli może być jednak trudno się odnaleźć czytelnikowi mniej zaznajomionemu z tematem. Ma się wrażenie że każdemu zagadnieniu towarzyszy odrębny model. Ich przejrzysta systematyzacja mogłaby ułatwić szersze spojrzenie na teorię dyskretnych kryształów czasowych. Z obowiązku recenzenta wymienię jeszcze drobne uchybienie: stany superpozycji N cząstek w dwóch możliwych modach dane równaniem (2.2) nazywane są w literaturze przedmiotu stanami NOON (czyt. "nun"), w odróżnieniu od stanów kota Schrödingera - superpozycji dwóch stanów koherentnych. Nazwanie stanów danych równaniem (2.2) stanami koto-podobnymi jest pomyłką. Nie ma ona oczywiście żadnego wpływu na poprawność prezentowanych wyników.



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Trzeci rozdział zawiera klasyczny opis zagadnienia złożonych dyskretnych kryształów czasowych. Stanowi je układ N cząstek nieprzenikalnych poruszających się jedna nad drugą i odbijających od siebie lub poruszających się niezależnie. Celem jest wyznaczenie orbit i rozmaitości po których poruszają się cząstki, co pani mgr Golletz z powodzeniem czyni w układach dwóch i trzech cząstek. Wykorzystuje niekiedy do tego celu sprytne triki, jak przenieumerowanie cząstek w przypadku z takimi samymi energiami. Imponuje złożoność otrzymanych trajektorii w wielowymiarowych przestrzeniach: Wyrażam uznanie dla wyobraźni przestrzennej doktorantki. W tym rozdziale zaciekał mnie szczegół, mianowicie interpretacja ujemnej masy efektywnej cząstek pod równaniem (3.33). **Jakie jest znaczenie fizyczne ujemnej masy w tym przypadku?**

Ostatni, czwarty rozdział stanowi rozszerzenie tej analizy na przypadek, w którym układ dwóch cząstek klasycznych zostaje zastąpiony przez zespół dwóch chmur atomowych, każda złożona z różnych atomów. Założono oddziaływanie przyciągające między atomami danej chmury. Porównano dynamikę chmur niezależnych oraz chmur oddziałujących kontaktowo. Pouczający jest trik reprezentujący nieskończenie odpychające oddziaływanie między chmurami poprzez wybór antysymetrycznej funkcji falowej. Po wykonaniu obliczeń wybiera się spośród rozwiązań te, które spełniają warunek umiejscawiający jedną z chmur zawsze ponad drugą. W procedurze minimalizacji funkcjonalu energii identyfikuje się współczynniki rozwinięcia funkcji falowej układu w zależności od energii oddziaływania między cząstkami tego samego rodzaju. Wyraźnie widoczne jest przejście fazowe ze spontanicznym łamaniem symetrii gdy oddziaływania są wystarczająco silne. Na przykład, jako wartość graniczną podano $g_A = 400$ w układzie analizowanym na rys. 4.4, przy czym częstotliwość oscylacji lustra jest rzędu jedności. Zastanawia więc co jest szczególnego w wartości 400, dla której zachodzi łamanie symetrii. Niestety, autorka pozostawia ten wynik bez komentarza. **O brakujący komentarz poproszę na obronie.**

Podsumowując, w swojej rozprawie doktorskiej pani mgr Weronika Golletz szczegółowo scharakteryzowała i opisała mechanizm tworzenia się dyskretnych kryształów czasowych w procesie spontanicznego łamania symetrii z wykorzystaniem klasycznych i kwantowych metod opisu. Autorka skoncentrowała się w szczególności na modelowaniu realizacji kryształów jako chmur atomowych lub cząstek klasycznych w polu grawitacyjnym podbijanych przez oscylujące lustro. Rozwiązała przy tym szereg problemów fizycznych, w tym problem identyfikacji zakresów parametrów w których spontanicznie tworzą się dyskretne kryształy czasowe dla wielu przypadków i poziomów złożoności. Wskazała rozmaitości w których odbywa się ruch. Scharakteryzowała też problem stabilności tych układów w kontekście realizacji eksperymentalnych. Imponuje sprawność autorki w



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

posługiwaniu się bogatym aparatem matematycznym, wykorzystującym szereg metod teoretycznych, zarówno klasycznych jak i kwantowych, oraz bogactwo modeli. Ponadto, zwraca uwagę staranna oprawa graficzna i redakcja rozprawy. Jednolity styl i prostota rysunków uwypuklających kluczowe elementy dyskusji ułatwiają czytelnikowi jej rozumienie i śledzenie. Nie mam wątpliwości odnośnie **wiodącego wkładu pani mgr Golletz w powstanie rozprawy doktorskiej i wyników w niej opisanych**. Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr Weroniki Golletz pt. "Discrete Time Crystals in Ultra-Cold Atoms" **spełnia wszelkie wymagania zwyczajowe i formalne stawiane kandydatom w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (t.j. Dz. U. z 2020 r. Poz. 85 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego**. Ponadto, ze względu na rozwiązanie zbioru problemów fizycznych o unikalnym charakterze, wymagających kombinacji szeregu narzędzi teoretycznych i numerycznych, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pani mgr Weroniki Golletz**.

Karoline Stojak



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl