

dr hab. Tomasz Karpiuk, prof. UwB
Wydział Fizyki
Uniwersytet w Białymstoku
ul. Ciołkowskiego 1L
15-245 Białystok

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Weroniki Golletz
pt. „Discrete Time Crystals in Ultra-Cold Atoms”
wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. Krzysztofa Sachy
w Grupie Kryształów Czasowych
na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie

Rozprawa doktorska mgr. Weroniki Golletz składa się z abstraktu, rozdziału wprowadzającego, czterech głównych rozdziałów, podsumowania i bibliografii zawierającej 172 pozycje. Główną treść pracy można podzielić na dwie części. Pierwsza będąca rozdziałem pierwszym wprowadza czytelnika w domenę kryształów czasowych. Druga część to kolejne trzy rozdziały, które zawierają opis oryginalnych badań przeprowadzonych przez doktorantkę oraz prezentację i dyskusję wyników. W dalszej części recenzji bardzo krótko scharakteryzuję kolejne rozdziały i przedstawię moje uwagi i pytania.

Pierwszy z głównych rozdziałów stanowi obszernie wprowadzenie do nowego zjawiska fizycznego jakim są kryształy czasowe. Omówiono zjawisko spontanicznego łamania symetrii, które leży u podstaw powstawania struktury krystalicznej. Następnie wprowadzono ideę ciągłych kryształów czasowych zaproponowaną w 2012 przez Franka Wilczka. Późniejsze prace pokazały jednak, że takie kryształy czasowe nie mogą istnieć. W kolejnym wprowadzono dyskretne kryształy czasowe, które stanowią temat rozprawy doktorskiej. Zostały one zaproponowane przez promotora niniejszej rozprawy prof. dr. hab. Krzysztofa Sachę w 2015. W kolejnych podrozdziałach zaprezentowano formalizm niezbędny do zrozumienia dalszych rozdziałów pracy, a obejmujący między innymi stany Floqueta, klasyczny opis periodycznie wzbudzonej cząstki, zmienne kątdziałanie, przybliżenie sekularne, kwantowy opis periodycznie wzbudzonej cząstki, stany Wanniera i w końcu opis zimnych atomów odbijających się od periodycznie poruszającego się lustra. Mam tu tylko trzy drobne uwagi:

- w drugiej linii formuły 1.3 całkowanie nie powinno rozciągać się na współrzędne pierwszej cząstki,
- operator translacji pisany jest przeważnie czcionką kaligraficzną ale pod formułą 1.2 użyto czcionki zwykłej,
- mam wrażenie, że na rysunku 1.5 oś czasu ma niepoprawny zwrot.

Drugi rozdział jest pierwszym z rozdziałów opisujących oryginalne wyniki. Pokazano w nim że czas życia dyskretnego kryształu czasowego w kondensacie Bosego-Einsteina rośnie eksponencjalnie ze wzrostem liczby cząstek. Następnie przebadano możliwość istnienia dyskretnego kryształu czasowego w zależności od siły oddziaływania oraz odporność dyskretnego kryształu czasowego na niedoskonałości doświadczalne związane z przygotowaniem stanu początkowego takie jak położenie początkowe, niezerowy pęd początkowy i niedoskonałości pułapki harmonicznego. Badany stan przybliżono tu funkcją Gaussa. Przy idealnym dopasowaniu pokazano, że jeśli oddziaływanie jest odpowiednio silne to można zaobserwować dyskretny kryształ

czasowy. Następnie przebadano jak niedoskonałości w przygotowaniu stanu początkowego wpływają na możliwość obserwacji tego zjawiska. Wyniki przedstawiono w postaci diagramu fazowego z obszarami parametrów, dla których dyskretny kryształ czasowy można zaobserwować. Wykazano, że odpowiednio silne oddziaływanie może naprawić początkowe niedoskonałości. Pokazano również, że przez dostrojenie drgań lustra można skompensować niedoskonałości w położeniu chmury atomów. W końcu wykazano, że skalach czasowych doświadczenia zjawisko opróżniania kondensatu z powodu kwantowych fluktuacji jest do zaniedbania. Wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały opublikowane w pracy „Phase Diagram and Optimal Control for n-tupling Discrete Time Crystal”, New J. Phys. 22 095001 (2020).

Trzeci rozdział opisuje układ N cząstek odbijających się od drgającego lustra. W całym rozdziale użyty jest opis klasyczny, a jego wyniki stanowią podstawę do opisu kwantowego, który jest przedstawiony w następnym, czwartym rozdziale. W pierwszej części trzeciego rozdziału przedstawiony jest opis N cząstek, które nie oddziałują ze sobą ale odbijają się od nieruchomego lustra. W opisie użyto tu zmiennych kąta-działanie tak jak dla pojedynczej cząstki we wstępie ale tu uogólniono opis na N cząstek. Pokazano, że cząsteczki poruszają się po kółkach w przestrzeni fazowej. Daje się to przedstawić w postaci N -torusa w $2N$ wymiarowej przestrzeni fazowej. Następnie przedstawiono opis dla układu N oddziałujących, nieprzenikających się cząstek odbijających się os statycznego lustra. W sytuacji gdy cząstki mają różne energie wprowadzono nowe zmienne kąta-działanie, które kodują w sobie zderzenia w taki sposób, że po przejściu do tych zmiennych układ zachowuje się jak układ N nieoddziałujących cząstek. Rozmaitość po której porusza się w tej sytuacji układ to N -torus w $2N$ wymiarowej przestrzeni fazowej ale tym razem cząstki nie poruszają się po kółkach tylko poruszają się po spirali. Dla oddziałujących, nieprzenikających się cząstek o takich samych energiach przeanalizowano układ składający się z dwóch i trzech cząstek. W pierwszym wypadku pokazano, że rozmaitość po której porusza się układ to wstęga Möbiusa, a w drugim wypełniony torus. Rozdział kończy się wyprowadzeniem efektywnych hamiltonianów w pobliżu orbity rezonansowej dla przypadku drgającego lustra zarówno dla cząstek o różnych jak i takich samych energiach. Wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały opublikowane w pracy „Basis for Time Crystal Phenomena in Ultra-Cold Atoms Bouncing on an Oscillating Mirror”, New J. Phys. 24 093002 (2022), w której doktorantka jest pierwszym autorem. Dwie drobne uwagi są następujące

- Rysunek (c) na ilustracji 3.3 zdaje się nie odpowiadać rysunkom (a) i (b). Może taka była intencja ale starając się zrozumieć rysunek (c) starałem się skleić trajektorię z (b). Ponadto wersory na rysunku (c) nie do końca pokazują właściwe kierunki. Gdyby położyć je na torusie to byłoby to jasne.
- Oznaczenia na zmienne oryginalne kąt-akcja i nowe kąt akcja są zamienione w linii nad wzorem 3.35 i po lewej stronie wzoru 3.36 (druga zmienna).

W czwartym rozdziale badany jest układ składający się z dwóch chmur takich samych atomów ale będących w innych stanach wewnętrznych. Atomy wewnątrz chmur oddziałują przyciągająco, a pomiędzy chmurami odpychająco przy czym odpychanie jest nieskończenie silne. To znaczy, że atomy z dwóch różnych chmur nie mogą się mieszać. Dolna chmura odbija się od lustra i od górnej chmury, a górna od dolnej. Do opisu tego układu został wprowadzony ansatz wariacyjny uwzględniający fakt, że rozpatrywane atomy są bozonami przez symetryzację ze względu na wymianę dwóch atomów tego samego typu. Nieskończone oddziaływanie zostało uwzględnione przez antysymetryzację ansatzu dla atomów pochodzących z innych chmur co pozwoliło na wyeliminowanie tego oddziaływania z hamiltonianu. Na bazie tego ansatzu skonstruowano odpowiedni funkcjonał, który następnie minimalizowano. Użyto też funkcji Gaussa do przybliżenia funkcji Wanniera w celu przyspieszenia obliczeń. Całą tę maszynę zastosowano do układu składającego się z czterech atomów, po dwa w każdej z dwóch chmur. Parametry były tak dobrane by mieć do czynienia z rezonansem typu 2:1 i 3:1 odpowiednio dla pierwszej i drugiej chmury. Przebadano układ w funkcji przyciągającego oddziaływania wewnątrz chmur i pokazano,

że dla odpowiednio silnego oddziaływania dochodzi do spontanicznego złamania symetrii czasowej i powstania złożonego dyskretnego kryształu czasowego. Wyniki tego rozdziału znajdują się w kolejnej publikacji. Mam do tego rozdziału dwa pytania

- W tym rozdziale brakuje mi dokładniejszego opisu od strony numerycznej rozważanego problemu. Pojawia się jedna informacja o liczbie całek potrzebnych do wyliczenia energii. Czy doktorantka może powiedzieć więcej na temat użytych narzędzi (język programowania, biblioteki, gotowe pakiety oprogramowania), czasu obliczeń, rozmiaru problemu w pamięci operacyjnej, użytych zasobów obliczeniowych.
- Czy są szanse na powiększenie rozważanego problemu z układu dwóch chmur po dwa atomy na więcej chmur, więcej atomów?

Pytanie dotyczące całości pracy.

- Jako, że prace na których oparta jest rozprawa mają wielu autorów to czy można dookreślić z jaką częścią badań doktorantka identyfikuje się najbardziej?

Podsumowując, jestem przekonany, że praca mgr. Weroniki Golletz zawiera bardzo dobrze przygotowany materiał naukowy i stanowi istotny wkład w badaniu dyskretnych kryształów czasowych w ultra zimnych gazach atomowych. W szczególności pokazano, że dyskretny kryształ czasowy mogą zostać zaobserwowane w realistycznych warunkach doświadczalnych. Ponadto przez analizę układu klasycznych, niepenetrujących się cząstek położono podwaliny pod badanie układów kwantowych i obserwację złożonych dyskretnych kryształów czasowych. W końcu rozpoczęto badania teoretyczne nad jednym z takich układów i przedstawiono pierwsze rezultaty. Wyniki badań zostały opublikowane w dwóch pracach w renomowanych, wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Doktorantka jest pierwszym autorem w drugiej z tych prac. Rozprawa doktorska zawiera również materiał do tej pory nieopublikowany, a który znajdzie się w trzeciej publikacji. Ponadto doktorantka jest współautorką publikacji o innej tematyce nie wchodzącej w skład rozprawy doktorskiej. Potwierdza to, że doktorantka posiada szeroką wiedzę w zakresie dyscypliny Nauki Fizyczne. Jestem przekonany, że rozprawa, której tyczy recenzja, z należytą starannością spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z art. 186 i 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie o dopuszczenie mgr. Weroniki Golletz do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Tomasz Karpiuk, prof. UwB