



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Jan Chwedeńczuk

Warszawa, 26 listopada 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Weroniki Golletz

Rozprawa mgr. Weroniki Golletz „Discrete Time Crystals in Ultra-Cold Atoms” traktuje o dynamice dyskretnych kryształów czasowych w kondensatach Bosego-Einsteina. Praca ma bardzo czytelną strukturę, z klarownym podziałem na część wprowadzającą i trzy rozdziały przedstawiające wyniki Autorki. Te trzy rozdziały podsumowują wyniki opublikowane w dwu pracach, obu w renomowanym New Journal of Physics (rozdział 2 i 3) oraz będące jeszcze w przygotowaniu (rozdział 4). Pracę zamyka zwięzłe podsumowanie i imponująca, kompletna lista prac (łącznie 151 pozycji). Praca jest napisana bardzo dobrą angielszczyzną. Co ważne, jest dopracowana od strony typograficznej, a to sprawia, że bardzo dobrze się ją czyta. Rysunki są wysokiej jakości, na uznanie zasługuje pastelowa kolorystyka. Podsumowując, pod względem formalnym, jest to bardzo dobra praca.

Przechodzę teraz do omówienia czterech rozdziałów stanowiących trzon pracy. Wstęp jest bardzo dobrze napisany i ułatwia śledzenie dalszych części pracy. Mam drobne pytanie / uwagę dotyczące podrozdziału 1.2. Nie jest dla mnie jasne, czy mówiąc o „time-independent many-body system” Autorka ma po prostu na myśli prosty stany własne Hamiltonianu (w domyśle niezależnego od czasu). To, o czym pisze Autorka, mianowicie że operator ewolucji komutuje z Hamiltonianem, jest zawsze prawdą w tym przypadku. Ale to nie znaczy, że układ w ogólności nie ewoluuje, tylko, jak słusznie pisze Autorka, że oba te operatory mają wspólne spektrum. Proszę o wyjaśnienie tego punktu.

Ponadto, czy dobrze rozumiem, że w części 1.5, począwszy od równania (1.16) wielkości fizyczne wyznaczone są w jednostkach (1.15)? W przeciwnym wypadku, jeżeli w równaniu (1.17) λ ma wymiar długości, zaś ω to częstość, to dodawanie $f(t)$ do x w (1.16) byłoby podejrzan.



UNIwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

Następnie, proszę o wyjaśnienie, z czym związany jest układ nieinercjalny klasycznej cząstki w przypadku, gdy lustro nie drga. Czy to jest po prostu przypadek klasycznego punktu materialnego odbijającego się od podłoża? Ciężko mi to wyłuskać z równań (1.25).

Nie mam uwag do pozostałej części tego rozdziału. W szczególności wyprowadzenie wielociałowego odpowiednika Hamiltonianu Bosego-Hubbarda jest bardzo jasne i odwołuje się do intuicji budowanej w wielociałowych układach bozonów w zewnętrznych okresowych potencjałach.

Kolejny rozdział omawia pierwszą z prac Autorki, poświęconą stabilności dyskretnych kryształów czasowych. Autorka zaczyna od podkreślenia analogii między dwumodowymi kryształami czasowymi a modelem LMG. Czy dobrze rozumiem, że forma Hamiltonianu po prawej stronie równania (2.4) odwzorowuje (1.39) pod warunkiem, że ograniczamy się tylko do stanów bozonowych? Ta forma Hamiltonianu LMG chyba pozwala też na działanie na stany niesymetryczne. Następnie, proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób można rozumieć grubość krzywych przedstawiających $F(t)$ na rysunkach 2.3 (a) i (c). Do części 2.2.2-2.2.4 nie mam uwag, część 2.3.1 bardzo udanie wprowadzania teorii Bogoliubova. Ciekawi mnie, do jakiej postaci ewoluuje początkowy stan $|N,0\rangle$ pod wpływem Hamiltonianu (2.50). Domyślam się, że obecność członu dwuciałowego ścisła fluktuacje kwantowe w jakimś kierunku na uogólnionej strefie Blocha. Czy tak jest? Podsumowując ten rozdział, jest on bardzo dobrze napisany i nie budzi większych zastrzeżeń.

W kolejnym rozdziale, wprowadzenie zagadnienia N cząstek ustawionych pionowo i odpijających się od lustra (i od siebie), jest bardzo dobre. Nie jest dla mnie co prawda jasne dlaczego poniżej (3.9) pojawia się odwołanie do $\Omega(I_j)$, która chyba nie pojawia się w samym równaniu. Proszę o wyjaśnienie. W równaniu (3.12) niejasna jest dla mnie rola delty Kroeneckera. Proszę o komentarz. Natomiast wtrącenie uwagi o pracy [137] rwie narrację i utrudnia lekturę, gdyż rozważany w tamtej pracy układ jest znacząco różny od tego, który do tej pory opisywała Autorka.

Czy dobrze rozumiem, na podstawie części 3.2.4, że przestrzeń fazowa dla N cząstek będzie stanowiła $1/N!$ całości? Co do tej części – przyznam, że niewiele zrozumiałem z argumentacji geometrycznej, choć przypuszczam, że nie dało się tego napisać lepiej. Jestem



UNIwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

pełen uznania dla Autorki, że osiągnęła taki poziom biegłości w wielowymiarowej geometrii i była w stanie przeprowadzić tak zaawansowaną analizę trajektorii w przestrzeni fazowej. Czy przedstawione obliczenia opisują również przypadek, gdy trzy cząstki zderzają się w jednej chwili? Pozostała część rozdziału 3, gdzie Autorka skupia się na zagadnieniu oscylującego lustra, jest silnie techniczna, i stanowi podglebie dla rozdziału 4. Nie mam do niej uwag.

Przechodzę do Rozdziału 4, który traktuje o układzie chmur atomowych, wzajemnie odpychających i wewnętrznie przyciągających, odbijających się od drgającego lustra (i od siebie). Zacznę od uwagi: pod rysunkiem 4.2 brak opisu (legandy) wyjaśniającego, czym są linie różnego typu. Wynika to co prawda z kontekstu, ale warto prowadzić czytelnika za rękę, żeby się nie zgubił(a). Również w równaniu (4.11) umiejscowienie σ za nawiasem w w_k jest nieco mylące (domyślałem się, że to literówka).

Przygotowania do minimalizacji funkcjonału kwazi-energii, czyli sekcje 4.4 i 4.5 są imponujące. Autorka włożyła ogrom wysiłku w analizę jakości przybliżenia funkcji Wanniera przez funkcje Gaussa oraz wykazała głębokie zrozumienie otrzymanych wyników (np. wpływ przybliżeń na stałe tunelowania czy oddziaływania). Następnie, Autorka przechodzi do badania dynamiki układu w przypadku, gdy obie chmury zawierają po dwa atomy. Zgodnie z intuicją, łamanie symetrii obserwowane jest dla odpowiednio silnego przyciągania w ramach pojedynczej chmury. To, co mnie ciekawi, to skąd biorą się tak duże wartości g_A , rzędu 10^2 ? Czy można to jakoś wytłumaczyć? Prosiłbym też o wyjaśnienie, jak wybrano wartości parametrów ω czy λ w rysunku 4.4. Na koniec pytanie o większe liczny N_A i N_B : czy to jest numerycznie możliwe, czy też złożoność zagadnienia rośnie zbyt szybko?

Podsumowując, jest to bardzo dobra, ciekawa i starannie napisana rozprawa Autorki o znacznym dorobku. Dowodzi tego, że Pani Weronika Golletz zdobyła wysokie umiejętności w dziedzinie wielociałowej mechaniki kwantowej. Pozostaje mi stwierdzić, że rozprawa doktorska pod tytułem „Discrete Time Crystals in Ultra-Cold Atoms” spełnia wymagania opisane w art. 187 ust. 2 i 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie Autorki do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.