

dr hab. Jan Chwedeńczuk
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Pasteura 5, 02-093, Warszawa
tel. 22 55 32 922
e-mail: jan.chwedenczuk@fuw.edu.pl

Warszawa, 23 października 2020r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jacka Dobrzynieckiego

Niniejszy dokument zawiera recenzję rozprawy doktorskiej mgr. Jacka Dobrzynieckiego pod tytułem "Tunelowanie kilku oddziałujących ultrazimnych atomów do otwartej przestrzeni". Dysertację przedstawiono Radzie Naukowej Polskiej Akademii Nauk, a przygotowana została w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk (IF PAN), pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Sowińskiego, prof. IF PAN.

Dorobek Autora to 7 prac, a niniejsza dysertacja powstała na kanwie trzech z nich. Dwie z tych trzech prac ukazały się już w renomowanym czasopiśmie Physical Review A (w latach 2018 i 2019), jedna umieszczona została we wrześniu 2020 w publicznie dostępnym archiwum arXiv.

Poza oświadczeniami, streszczeniem i spisem treści, praca zawiera 75 numerowanych stron, w tym 62 strony treści zasadniczej, 6-stronicowy dwuczęściowy dodatek i siedem stron bibliografii, zawierającej 119 pozycji. Część zasadnicza składa się z 5 rozdziałów, w tym wstępu i podsumowania o tytule "Wnioski i zakończenie". Układ pracy jest czytelny. Autor nie pozostawia też wątpliwości, które wyniki stanowią jego osiągnięcie, a które fragmenty są omówieniem dotychczasowego stanu wiedzy.

Trzeba podkreślić, że praca jest napisana bardzo dobrą polszczyzną. Nie ma żadnych luk logicznych, wynikania między zdaniem są prawidłowe. To sprawia, że jej czytanie jest przyjemnością. Rysunki są pierwszorzędnej jakości, czytelne, dobór kolorów doskonały, podpisy osi duże. Tymi uwagami kończę część formalną recenzji. Odniosę się teraz do zawartości każdego z merytorycznych rozdziałów, do dodatków nie mam uwag.

Rozdział 1 zawiera wartościowe wprowadzenie do omawianego zagadnienia. Skrótowo przedstawiona jest historyczna perspektywa kwantowego zjawiska tunelowania, od wykorzystania go do opisu rozpadu cząstki α po współczesne zastosowania w półprzewodnikach

czy ultra-zimnych gazach atomowych w sieciach optycznych. Następnie Autor wprowadza zagadnienie, któremu poświęcona jest rozprawa, to jest problem tunelowania kilku silnie oddziałujących cząstek. Co cenne, Autor już na wstępie motywuje wybór tematyki badań współczesnym stanem wiedzy i możliwościami doświadczalnymi. Pan Dobrzyniecki argumentuje, że tunelowanie, nawet w układach kilku cząstek, jest złożonym zjawiskiem i może przebiegać różnorodnie, zależnie od statystyki cząstek i siły ich oddziaływania.

Pragnę zwrócić uwagę na nomenklaturę, którą posługuje się Autor w całej dysertacji. Mówi mianowicie o “identycznych bozonach” lub “identycznych fermionach”. Bozony są bozonami, a fermiony fermionami, tylko gdy są identyczne. Mówić o dwóch rozróżnialnych cząstkach, że są dwoma bozonami, to mija się z celem, gdyż ich statystyka nie gra wtedy roli.

Wstęp odwołuje się do 55 pozycji z bibliografii i poza powyższą, nie mam do niego uwag.

Rozdział 2 poświęcony jest problemowi tunelowania układu bozonów oddziałujących kontaktowo z zadany­m potencjałem zewnętrznym, składającym się z części harmonicznej i gaszącego czynnika gaussowskiego. Dla takiej konfiguracji Autor rozważa tunelowanie $N = 2$ i $N = 3$ bozonów i dopuszcza, że nie oddziałują ($g = 0$), przyciągają się ($g < 0$) bądź odpychają ($g > 0$). W analizie Autor korzysta z prawdopodobieństw $P_{0/1/2}$, przy pomocy których ilustruje to, jaki proces tunelowania jest dominujący (jednociałowe, czyli sekwencyjne, czy tunelowanie par).

Pan Dobrzyniecki wykazuje, że prawdopodobieństwo $P_2(t)$ zanika w czasie wykładniczo i znajduje zależność tego wykładnika od g . Dzięki temu można “odkryć” zjawisko rezonansowe, kiedy to tempo zaniku radykalnie się zwiększa na skutek spełnienia zasady zachowania energii.

Dynamika tunelowania $N = 3$ bozonów jest bardziej złożona (możliwe tunelowanie trymeru), lecz zastosowane metody są podobne do tych użytych dla $N = 2$, więc nie będę tej części szczegółowo recenzował. Natomiast, to, co wydaje się szczególnie cenne, to odkrycie, że proces tunelowania można scharakteryzować badając pędy rozpraszających się cząstek, w szczególności pęd środka masy. Pozwala to na uniknięcie szczegółowej analizy przy pomocy prądów prawdopodobieństwa, co ma znaczenie dla wagi tej teorii dla opisu konkretnych wyników doświadczalnych.

Podsumowując, Rozdział 2 bardzo czytelnie wprowadza podstawowe pojęcia i ilustruje

zachodzące w układzie zjawiska. Jest też potwierdzeniem wkładu Autora w rozwój dziedziny.

Rozdział 3 skupia się na badaniu tego, jaki wpływ na proces tunelowania, ma postać oddziaływania dwuciałowego. Autor rozważa $N = 2$ bozony i modeluje oddziaływanie poprzez pewną wariację na temat potencjału van der Waalsa, to jest $U(r) \propto [1 + (r/w)^6]^{-1}$, gdzie w jest zasięgiem oddziaływania. Pan Dobrzyniecki, budując intuicję poprzez analizę widma Hamiltonianu z takim potencjałem, bada proces tunelowania w zależności od w oraz siły sprzężenia g .

Wnioski, jak stwierdza sam Autor, są następujące: “[...] układ dwóch bozonów zachowuje się w bardzo podobny sposób, co układ bozonów oddziałujących kontaktowo.” Stąd moja wątpliwość co do słuszności tezy wysnutej akapit wcześniej, czy mianowicie słaba zależność dynamiki od w rzeczywiście ma znaczenie dla doświadczenia. Proszę Autora o komentarz jaka precyzja pomiaru (i czego?) wymagana od eksperymentatorów, by mogli, na przykład, wyznaczyć w poprzez wartość krytyczną g_0 z dużą precyzją.

Drobne uwagi do tego rozdziału:

1. Przechodząc od Hamiltonianu dwuciałowego (3.4) do Hamiltonianu ruchu względnego (3.5), Autor zmienił jednostki (nie ma masy), zatem nie jest chyba prawdą, że po prostu $r = x_1 - x_2$.
2. Podpis osi poziomej na Rysunku 28b powinien mieć postać w , nie R_c .

W **Rozdziale 4** Autor zmienia statystykę cząstek zamiast bozonów, rozważa układ fermionów. Raz jeszcze powtórzona jest kompletna analiza od widma Hamiltonianu i jego zależności od siły i zasięgu oddziaływania, przez ewolucję gęstości i interpretację rodzajów tunelowania po wyznaczenie punktu krytycznego stałej zaniku γ dla różnych w . Za główny wynik tego rozdziału uważam stwierdzenie, że tunelowanie pary wymaga znacznie silniejszego przyciągania niż w przypadku bozonów, co jest naturalną konsekwencją statystyki fermionowej.

Pewne zastrzeżenia w tym rozdziale budzi akapit zamieszczony na stronie 55, a zaczynający się od słów “Obecność tych linii...”. Odnoszę wrażenie, że Autor nadużywa języka klasycznego, mówiąc o tym, że “tunelowanie [...] staje się bardziej prawdopodobne, gdy dociera on do bariery po prawej stronie studni”. Ponadto Autor skupia się na ewolucji cząstki

pozostałej w studni, zapominając o tej, która uległa rozproszeniu. Taki proces "zapominania" wymaga skonstruowania macierzy gęstości i wykonania śladu po drugiej cząstce. Czy wtedy nadal obecne byłyby superpozycje? Proszę o odpowiedź na to pytanie.

Podsumowując, jest to ciekawa praca, która pokazuje, jak złożony może być nawet pozornie nieskomplikowany układ kilku cząstek i jak nietrywialne mogą być w nim zjawiska kwantowe. Dysertacja dowodzi sprawności Autora na poziomie teorii kwantów i rozwiązywania zagadnień numerycznych. Ciekawi mnie, czy w tym układzie da się pogłębić opis analityczny. Praca w sporej części skupia się na opisie wyników numerycznych. Opis ten jest wynikiem pogłębionego zrozumienia zagadnienia, ale może dałoby się rozszerzyć część czysto analityczną?

o

Wysoko oceniam zawartość merytoryczną opisywanej rozprawy. Biorąc pod uwagę znaczny dorobek Autora oraz to, że moje uwagi do powyższej dysertacji nie zawierają fundamentalnych zastrzeżeń, wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie pana mgr. Jacka Dobrzynieckiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jan Chodźmiński