

Kraków, 6 kwiecień 2018 r.



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Kulczykowskiego

Pan Michał Kulczykowski przygotował pracę doktorską pod kierunkiem dra hab. Michała Matuszewskiego. Rozprawa nosi tytuł "Procesy nierównowagowe i stany zlokalizowane w kondensatach ekscytonowo-polaritonowych" i dotyczy teoretycznej analizy zachowania specyficznego kondensatu Bosego-Einsteina, który można osiągnąć eksperymentalnie nawet w temperaturze pokojowej. Praca oparta jest na dwóch artykułach opublikowanych w czasopiśmie Physical Review B, oraz na rezultatach, które nie zostały jeszcze zebrane w formie publikacji naukowej. Wszystkie wyniki dotyczą zjawisk, które można zrealizować i badać w laboratorium.

Pierwszy rozdział poświęcony jest wprowadzeniu w tematykę kondensacji polaritonów ekscytonowych i muszę przyznać, że jest dla mnie najsłabszą częścią rozprawy doktorskiej. Miałem nadzieję, że przeczytanie pierwszego rozdziału będzie idealną okazją poznania tematyki kondensatów polaritonowych, która dynamicznie rozwijana jest w badaniach eksperymentalnych i teoretycznych. Niestety okazało się, że podawane informacje są skrótowe, niekompletne lub po prostu niezrozumiałe. Bez sięgnięcia do artykułu przeglądowego H. Deng in inni Rev. Mod. Phys. 82, 1489 (2010) nie byłbym w stanie odgadnąć które, krzywe na rysunkach 1.3-1.5 dotyczą których relacji dyspersji omawianych w treści rozprawy. Na ww. rysunkach brak oznaczeń liczbowych na osiach. Relacja dyspersji dla fotonów jest nieliniowa, ale w rozdziale nie ma słowa dlaczego, a wyjaśnienie jest proste i nie wymaga bardzo skomplikowanych wyprowadzeń. Nie będę drobiazgowo wyliczał wszystkich uwag, które nasunęły mi się w trakcie czytania pierwszego rozdziału, podam tylko kilka:

1. W podpisie rysunku 1.2 podana jest informacja, że przedstawiono poziomy energetyczne, w treści pracy, że na rysunku widać rozkład pasm energetycznych - ani jedna, ani druga nazwa nie odpowiada precyzyjnie rzeczywistości.
2. Mam wątpliwości czy postać potencjału oddziaływania elektron-dziura we wzorze (1.5) jest poprawna.
3. Część 1.4.1 jest dla mnie niezrozumiała. Nie wiem co znaczy pompowanie światłem o „energii równej minimum dolnego polaritonu”. Schematyczne rysunki 1.7-1.8 być może byłyby pomocne, gdyby zostały jasno opisane w tekście. Z rozdziału pierwszego rozprawy trudno zrozumieć na czym polegają eksperymentalne metody otrzymywania kondensatów polaritonów ekscytonowych.
4. Warunek stabilności dyskutowany na stronach 21-22 jest nieprecyzyjny. Z postaci wyrażenia (1.50) wynika, że wartości własne operatora (1.52) i te same wartości własne sprzężone w sensie zespolonym pojawiają się w

Instytut Fizyki

imienia

Mariana Smoluchowskiego

Zakład Optyki Atomowej

ul. Reymonta 4

PL 30-059 Kraków

tel. +48(12) 663-57-79

fax +48(12) 633-84-94

e-mail:

krzysztof.sacha@uj.edu.pl

Kraków, 6 kwiecień 2018 r.



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Instytut Fizyki

imienia

Mariana Smoluchowskiego

Zakład Optyki Atomowej

rozwiązaniu. A więc aby kondensat był stabilny części urojone wartości własnych muszą zniknąć i nie wystarczy, że $\text{Im}(\omega) < 0$.

O ile pierwszy rozdział trochę mnie rozczarował, to następne będące główną częścią rozprawy, są napisane dobrze i przede wszystkim zawierają ciekawe wyniki. Podstawowym narzędziem, które wykorzystuje mgr Michał Kulczykowski do opisu kondensatu polarytonowego jest równanie Grossa-Pitajewskiego sprzężone z równaniem opisującym „pompowany” rezerwuuar ekscytonów z uwzględnieniem strat kwazicząstek. Mamy zatem do czynienia z układem niezachowawczym.

Pierwszym zagadnieniem analizowanym w rozprawie jest tzw. rozwiązanie typu *sink* w jednowymiarowej przestrzeni. Autor pokazał, że odpychanie między polarytonami i niejednorodne przestrzennie pompowanie prowadzą do uformowania przeciwbieżnych fal, które spotykając się w obszarze o słabszym pompowaniu tworzą profil gęstości przypominający jasny soliton znany w zachowawczych układach kondensatów z przyciągającymi oddziaływaniami między bozonami. Istnienie rozwiązań typu *sink* wymaga obecności strat w układzie, a ich charakter odbiega od jasnych solitonów. Pan Michał Kulczykowski wyznaczył zakres parametrów, dla których wspomniane rozwiązania istnieją oraz przebadał dość wszechstronnie ich własności. Wyznaczył również przybliżone analityczne rozwiązanie opisujące „*sinki*” oraz przedstawił wyniki symulacji numerycznych ilustrujące brak tego typu zachowania w dwuwymiarowym przypadku czego powodem jest, jak sugeruje Autor, wzbudzenie wirów w kondensacie. Rozwiązania o charakterze solitonowym są niezwykle ciekawymi przykładami zachowania układów nieliniowych. W kondensatach ultrazimnych gazów atomowych przeprowadzono szereg eksperymentów związanych z solitonami. Myślę, że dysypatywny charakter kondensatu polarytonowego nie daje szans na obserwacje wielociałowych kwantowych efektów związanych z solitonami. Z drugiej strony oferuje nowe możliwości nieobecne w zachowawczych układach, których przykładem są odkryte przez Autora rozwiązania typu *sink*. Nasuwa mi się generalne pytanie na ile przybliżenie średniego pola jest wystarczające do opisu kondensatu polarytonowego, tzn. czy jest szansa na kwantowe wielociałowe zachowanie, którego przy pomocy jednocząstkowego równania Gorssa-Pitajewskiego i równań Bogoliubowa opisać się nie da?

Dwuwymiarowy przypadek kondensatu polarytonowego analizowany jest szerzej w rozdziałach trzecim i czwartym. Na początku Pan Michał Kulczykowski zajmuje się zagadnieniem uniwersalnych własności porządkowania fazy funkcji falowej kondensatu po osiągnięciu kondensacji. Kondensat polarytonów ekscytonowych objawia w tym względzie różne zachowania zależnie od wyboru parametrów. Jeśli czas życia polarytonów jest odpowiednio krótki, funkcja korelacji pierwszego rzędu spełnia hipotezę skalowania, a długość korelacji zmienia się w czasie zgodnie z prawem skalowania znanym z analizy układów dwuwymiarowych z wektorowym parametrem porządku. Autor wyjaśnia to zachowanie przy pomocy modelu, w którym występuje równowaga między przyciąganiem wir-antwir i efektywnym tarcie. Jeżeli zmienimy parametry układu może okazać się, że stabilizacja gęstości kondensatu i porządkowanie fazy w wyniku anihilacji par wir-antwir następuje w tym samym przedziale czasowym. Zmienia się wówczas

ul. Reymonta 4

PL 30-059 Kraków

tel. +48(12) 663-57-79

fax +48(12) 633-84-94

e-mail:

krzysztof.sacha@uj.edu.pl

Kraków, 6 kwiecień 2018 r.



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

zachowanie układu i długość korelacji wykazuje prawo skalowania podobne jak np. w zachowawczych kondensatach bezspinowych. Przedstawiona analiza ilustruje bogactwo zachowań jakie można obserwować w układach polarytonów ekscytonowych.

W rozdziale piątym mgr Michał Kulczykowski użył modelu, który stosował w poprzednich rozdziałach do opisu przejścia Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (tzw. przejścia BKT). Przejście BKT w kondensatach polarytonowych, jak Autor podkreśla, było już wcześniej analizowane, ale z pominięciem ewolucji rezerwuaru ekscytonów. Zwiększanie mocy pompowania układu ma podobny efekt jak obniżanie temperatury w standardowym opisie przejścia BKT. Najciekawsze wyniki dotyczą parametrów zbliżonych do warunków w jakich przeprowadzono eksperyment w grupie Yamamoto (publikacja [88] bibliografii zamieszczonej w rozprawie). Pan Michał Kulczykowski zidentyfikował wąski zakres mocy pompowania, w którym zachodzi zmiana charakteru zaniku funkcji korelacji pierwszego rzędu z wykładniczego na algebraiczny. Autor podkreśla, że zakres mocy pompowania odpowiadający wykładniczemu zanikowi korelacji jest znacznie większy niż przewidywany w pracy [96]. W tej części rozprawy brakuje mi szerszej dyskusji jakie są różnice w opisie przejścia BKT stosowanym w rozprawie i w publikacjach innych autorów i skąd biorą się różnice w wynikach.

Reasumując wyniki przedstawione w rozprawie są ciekawe, dotyczą dziedziny intensywnie badanej obecnie i pozostają w ścisłym związku z badaniami eksperymentalnymi. W moim odczuciu najciekawsza jest część dotycząca rozwiązań typu *sink*, które w kontekście polarytonów ekscytonowych stanowią nowe odkrycie. Podoba mi się również rozdział dotyczący badań uniwersalnych własności porządkowania fazy funkcji falowej kondensatu polarytonów. Rozdział analizujący przejście BKT jest chyba najmniej nowatorski, bo zagadnienie było już wcześniej analizowane, ale zawiera nowe ilościowo wyniki i napisany jest z głębokim zrozumieniem zagadnienia. Uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Michała Kulczykowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. Krzysztof Sacha

Instytut Fizyki

imienia

Mariana Smoluchowskiego

Zakład Optyki Atomowej

ul. Reymonta 4

PL 30-059 Kraków

tel. +48(12) 663-57-79

fax +48(12) 633-84-94

e-mail:

krzysztof.sacha@uj.edu.pl