

INSTYTUT FIZYKI TEORETYCZNEJ
UNIWERSYTET WARSZAWSKI
UL. PASTEUR 5, 02-093 WARSZAWA

prof. dr hab. Witold Bardyszewski
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5, 00-681 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr Michała Kulczykowskiego
pt.: "Procesy nierównowagowe i stany zlokalizowane w kondensatach
ekscytonowo-polarytonowych"

Rozprawa poświęcona jest, zgodnie z tytułem, teoretycznym badaniom kondensatów ekscytonowo-polarytonowych.

Zjawisko kondensacji polarytonów w mikrownękach optycznych jest przedmiotem intensywnych badań od momentu pierwszych sukcesów eksperymentalnych na tym polu. W największym skrócie efekt ten jest traktowany jako realizacja kondensacji gazu bozonów w dwóch wymiarach. Dzięki specyficznemu powiązaniu własności ekscytonowych i fotonowych, polarytony mogą przejawiać niezwykle właściwości. W szczególności pozwalają na obserwację kondensacji i nadciekłości w temperaturach pokojowych. Jednak w odróżnieniu od "klasycznych" układów, takich jak warstwy ciekłego helu ^4He , czy też dwuwymiarowych struktur zimnych gazów atomowych mamy tutaj do czynienia z układem, który nie jest w równowadze termodynamicznej z prozaicznym powodem związanego z krótkim czasem życia polarytonów we wnęce, pociągającym za sobą konieczność ciągłego pompowania, tj. dostarczania nowych cząstek do układu.

Teoretyczne badanie własności kondensatu polarytonowego wymagają syntezy pojęć i metod z dziedziny fizyki materii skondensowanej, optyki kwantowej i kwantowej fizyki statystycznej i w oczywisty sposób skazane jest na pewne uproszczenia. Najważniejsze z nich opiera się na zastosowaniu przybliżenia średniego pola wykorzystującej równanie Grossa-Pitajewskiego znanego z teorii nadciekłości, wzbogaconego o dodatkowe elementy odpowiedzialne za dysypację i pompowanie optyczne. Jednym z osiągnięć takiego uogólnionego podejścia było wyjaśnienie spontanicznego powstawania wirów w kondensacie polarytonowych. Inną ciekawą konsekwencją nierównowagowego charakteru kondensatu polarytonowego jest dyfuzyjny charakter modu Goldstone'a. Teoria oparta na analizie pól klasycznych pozwala na uwzględnienie fluktuacji poprzez wprowadzenie czynnika stochastycznego

do równania Grossa-Pitajewskiego. Umożliwiło to analizę zjawisk związanych z przejściem typu Berezinskii-Kosterlitz-Thouless analogicznym do przejść zachodzących w układach równowagowych. W ramach tego formalizmu można prowadzić obliczenia numeryczne dotyczące zarówno fluktuacji czasowych jak i niejednorodności przestrzennych.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr M. Kulczykowskiego wykonana pod opieką dr. hab. M. Matuszewskiego, prof. nadzw. IFPAN jest ściśle powiązana z nakreślonymi powyżej ideami. Zawiera ona wyniki zawarte w dwóch artykułach opublikowanych w *Physical Review B*. Autor rozprawy jest ponadto współautorem dwóch prac niezwiązanych bezpośrednio z rozprawą.

Rozprawa liczy 83 strony i zawiera 4 rozdziały oraz krótkie podsumowanie. Pierwszy rozdział ma charakter ogólnego wprowadzenia do fizyki kondensatów polarytonów ekscytonowych. Pozostałe trzy zawierają oryginalne wyniki uzyskane przez autora poprzedzone krótkim wstępem.

W rozdziale pierwszym omówiono trzy podstawowe grupy zagadnień leżących u podstaw dyskutowanych zjawisk. Wprowadzone jest pojęcie ekscytonów w studniach kwantowych oraz polarytonów ekscytonowych w mikrowędkach. Ponadto przedstawiono zjawisko kondensacji Bosego-Einsteina na poziomie bardzo ogólnym. Wreszcie, omawiając kondensację polarytonów ekscytonowych wprowadzono nieliniowe równanie otwarto dysypatywne Grossa-Pitajewskiego opisujące ewolucję kondensatu sprzężonego z rezerwuarem ekscytonowym. Choć materiał prezentowany w tej części ma charakter podręcznikowy, należy podkreślić zwięzłość i jasność prezentacji. Na zakończenie rozdziału, jako przykład zastosowania przedstawionej teorii, przeprowadzono analizę wzbudzeń Bogoliubowa kondensatu w ramach przybliżenia liniowego. Rachunki wykonane dla specyficznego zespołu parametrów wykazały niestabilność układu w sytuacji zbyt wolnej relaksacji rezerwuaru.

Rozdział drugi poświęcony jest nieliniowym, samozlokalizowanym stanom nadciekłego płynu polarytonowego. Autor wykazuje, że w modelu jednowymiarowym otwarto dysypatywne równanie Grossa-Pitajewskiego dopuszcza istnienie stabilnych jasnych, samozlokalizowanych stanów typu anty-ciemny soliton zwanych sinkami. Sink powstaje na styku frontów fal płaskich nadchodzących z przeciwnych źródeł. W ciekawej dyskusji autor wykazuje związek sinków z rozwiązaniami ogólnego zespolonego równania typu Ginzburga-Landaua. Dokładna analiza numeryczna zagadnienia jednowymiarowego pozwoliła wyznaczyć obszar parametrów, dla których istnieje rozwiązanie typu sink. Wynik ten został przedstawiony w postaci wykresu fazowego. Rachunki numeryczne zostały zweryfikowane przez przybliżone obliczenia analityczne w granicy niskiej amplitudy sinku. W przypadku dwuwymiarowym przeprowadzone symulacje numeryczne nie ujawniły powstawania sinków. Stwierdzono natomiast pojawienie się wirów, które przeciwdziałają powstawaniu regularnych struktur.

Rozdział trzeci, moim zdaniem niosący najciekawsze wyniki rozprawy odnosi się do zjawisk jakie towarzyszą przejściu fazowemu typu Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT). Chodzi tutaj o sprawdzenie hipotezy dynamicznego skalowania skali długości w funkcji korelacji w procesie porządkowania fazy. W tym celu odwołano się do funkcji rozkładu Wignera kondensatu. Równanie ewolucji w tym przypadku ma charakter równania Fokkera-Plancka, które w tzw. przybliżeniu “truncated Wigner” prowadzi do równania Grossa-Pitajewskiego z dodatkowym wyrazem stochastycznym odpowiedzialnym za fluktuacje parametru porządku. Przeanalizowano dwa przykłady numeryczne odpowiadające dwóm skrajnym sytuacjom: równoczesnego formowania się kondensatu i porządkowania fazy w drodze anihilacji wirów oraz przypadkowi silnego pompowania tzw. próbki gorszej jakości o bardzo krótkim czasie życia polarytonów, w której porządkowanie fazy zachodzi głównie w obecności uformowanego kondensatu w stanie nasycenia. Najciekawszym wynikiem omówionych symulacji jest potwierdzenie prawa skalowania długości korelacji $L(t)$ w zależności od czasu w procesie porządkowania fazy. Stwierdzono, że otrzymane prawo skalowania jest charakterystyczne dla dwuwymiarowego układu z wektorowym parametrem porządku, a więc inne niż w przypadku zachowawczych kondensatów atomowych. Rachunki przeprowadzone dla nieskończonej bariery potencjału na granicach próbki dają podobne wyniki jak obliczenia z periodycznymi warunkami brzegowymi. Tutaj krótka uwaga: w krótkim podrozdziale na ten temat pomylono chyba odnośnik do rysunku 3.4(a) z 3.4(b) co potwierdza podpis pod rysunkiem 3.5. Na tle przedstawionych wyników zaskakująco brzmi spostrzeżenie wyrażone na końcu rozdziału. Okazuje się, że dopasowanie zależności $L(t)$ bez uwzględnienia poprawki logarytmicznej nie wygląda gorzej niż dopasowanie z tą poprawką. Zmieniają się jedynie wykładniki potęgowe. Niestety autor zostawił to stwierdzenie bez komentarza.

Dyskusja własności kondensatu w odniesieniu do przejścia B-K-T jest kontynuowana w rozdziale czwartym. Na początku rozdziału przedstawiono zwarte omówienie tego zjawiska w przypadku równowagowego modelu XY . Uporządkowanie dalekiego zasięgu różni się w tym przypadku od fazy nieuporządkowanej asymptotyczną zależnością funkcji korelacji od odległości. Przedstawiono analizę analogicznego efektu w przypadku nierezonansowego pompowania kondensatu polarytonowego w ramach formalizmu stochastycznego, otwarto dysypatywnie równania Grossa-Pitajewskiego. Analiza wyników numerycznych pozwala stwierdzić, że rzeczywiście, po przekroczeniu odpowiedniego poziomu pompowania zmienia się charakter zaniku korelacji z wykładniczego na algebraiczny, a zatem, mamy do czynienia ze zjawiskiem podobnym do przejścia typu Berezinskii-Kosterlitz-Thouless. Wykresy funkcji korelacji na rys. 4.2 i 4.3 dla różnych poziomów pompowania optycznego są w tej mierze przekonywujące. Na poparcie swojej argumentacji autor prezentuje profile gęstości i fazy kondensatu poniżej i powyżej progu. Faza nieuporządkowana odznacza się znacznie większą gęstością wirów i

antywirów niż faza uporządkowana.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa zawiera ważne wyniki dotyczące kondensatów ekscytonowo-polarytonowych, które są na tyle oryginalne, że doczekały się publikacji w prestiżowym Physical Review B. Z drugiej strony, być może z faktu ich opublikowania wynika dość lakoniczna, pozostawiająca pewne kwestie w zawieszeniu forma rozprawy. Jako przykład można przywołać wspomnianą już dyskusję niestabilności układu na końcu rozdziału 1, w której nie wyjaśniono na ile jest ona związana za szczególnym wyborem parametrów numerycznych. W rozdziale 4, str. 64 przeprowadzono staranną dyskusję warunków stosowalności modelu zwanego "truncated Wigner", aby potem z pełną świadomością prowadzić rachunki z jawnym naruszeniem tych warunków, bez komentarza.

Generalnie jednak moje wrażenie jest bardzo dobre. Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty. Wydaje się być również bez zarzutu pod względem edytorskim. Duże wrażenie robią starannie wykonane rysunki, doskonale ilustrujące prezentowane tezy. Jedyne drobne zastrzeżenia dotyczą, jak się zdaje mylnego oznaczenia paneli (a) i (b) na rysunku 3.7.

Oceniając wagę otrzymanych wyników oraz zdając sobie sprawę z faktu, że ich uzyskanie wymagało od autora wysokich umiejętności teoretycznych oraz sprawności numerycznej uważam, że rozprawa spełnia warunki niezbędne do dopuszczenia do publicznej obrony. Uważam też, że rozprawa zasługuje na wyróżnienie m.in. za numeryczne potwierdzenie uniwersalnego prawa skalowania funkcji korelacji w kondensacie polarytonowo-ekscytonowym.



Warszawa, 27 marca 2018 r.

prof. dr hab. Witold Bardyszewski