

dr hab. Bogdan Damski
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Fizyki Teoretycznej
ul. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
bogdan.damski@uj.edu.pl

Kraków, 30-8-2021

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Pawła Miętkiego zatytułowanej
„Exciton-polariton condensates with internal degrees of freedom”**

Omawiana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim pod opieką prof. dr. hab. Michała Matuszewskiego w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Przedstawia ona szereg zagadnień dotyczących kondensatów ekscytonowo-polaritonowych. Badania takich układów są obecnie prowadzone w wiodących ośrodkach naukowych na świecie i mają charakter zarówno teoretyczny jak i eksperymentalny. Zatem rozprawa doktorska magistra Pawła Miętkiego dobrze wpisuje się w tematykę współczesnych badań.

Jest ona oparta na oryginalnych wynikach przedstawionych w dwóch pracach

1. Magnetic polarons in a nonequilibrium polariton condensate
Miętki & Matuszewski, Phys. Rev. B **96**, 115310 (2017)
2. Spontaneous formation of spin lattices in semimagnetic exciton-polariton condensates
Miętki & Matuszewski, Phys. Rev. B **98**, 195303 (2018)

oraz na obliczeniach, które nie zostały jeszcze opublikowane. Ww. prace były do tej pory kilkanaście razy cytowane. Oświadczenia autora rozprawy i jego promotora nie pozostawiają wątpliwości co do tego, że magister Miętki wniósł istotny wkład w ich powstanie. Warto podkreślić, że jest on również współautorem jednej publikacji, która jest tematycznie powiązana z zagadnieniami omawianymi w rozprawie doktorskiej [Bobrovska, Opala, Miętki, Kulczykowski, Szymczak, Wouters & Matuszewski, Critical dynamics and tree-like spatiotemporal patterns in exciton-polariton condensates, Phys. Rev. B **99**, 205301 (2019)]. Powyższa dyskusja pokazuje, że magister Miętki zdobył istotne doświadczenie w pracy naukowej podczas studiów doktoranckich. Poniżej pokrótce omówię treść rozprawy doktorskiej i pozwolę sobie zadać autorowi rozprawy kilka pytań.

Rozprawa rozpoczyna się od dyskusji, która treściwie przedstawia zagadnienia omawiane w kolejnych rozdziałach. Następnie w drugim rozdziale obszernie przedstawiony jest wstęp do fizyki omawianych układów. Szczególny nacisk jest tam położony na systematyczne wprowadzenie podstawowych pojęć dotyczących ekscytonów, polaritonów i ich kondensacji. Jest to moim zdaniem ważna część rozprawy doktorskiej ze względu na to, że kondensaty ekscytonowo-polaritonowe są stosunkowo skomplikowanymi układami. W szczególności, są to układy dużo bardziej skomplikowane niż ich popularne zimno-atomowe odpowiedniki, w których kondensacja Bosego-Einsteina została zaobserwowana w 1995 roku. Bez gruntownego wprowadzenia do fizyki tych układów, zrozumienie kolejnych rozdziałów rozprawy, prezentujących oryginalne wyniki autora, byłoby utrudnione. Uzupełnieniem tych rozważań są wyprowadzenia wzorów przedstawione w załącznikach A i B. Wraz z nimi

wprowadzenie do zagadnień badanych przez doktoranta zajmuje ponad 40 stron, co dobrze ilustruje złożoność badanych układów.

W trzecim rozdziale przedstawione są oryginalne wyniki autora rozprawy, opublikowane w Physical Review B w dwóch pracach z 2017 i 2018 roku.

W pierwszej z nich analizowane jest auto-uwieżenie (ang. self-trapping) magnetycznych polaronów. W celu opisu tego zjawiska, kondensat ekscytonowo-polarytonowy jest modelowany teoretycznie jednowymiarowym zespolonym równaniem Ginzburga-Landaua sprzężonym z równaniem opisującym relaksację spinową magnetycznych jonów, którymi domieszkowany jest półprzewodnik. Całkowita spinowa polaryzacja kondensatu jest założona, co skutkuje tym, że jednokomponentowa średniopółowa funkcja falowa opisuje kondensat. Dodatkowo warto wspomnieć, że to równanie uwzględnia straty występujące w układzie i jego optyczne pompowanie kompensujące je w stanie równowagi. Pomysłowa analiza stabilności tego stanu prowadzi do głównego wyniku analitycznego w tej pracy, którego poprawność jest numerycznie zweryfikowana. Wykresy ilustrują powstawanie magnetycznych polaronów w badanym układzie.

W drugiej pracy dwukomponentowe funkcje falowe kondensatu ekscytonowo-polarytonowego są ewoluowane przy pomocy ww. równań. Ponownie stabilność układu, ze względu na małe zaburzenia jego stanu równowagi, jest analizowana. Jej dyskusja jest bardziej skomplikowana niż w pracy z 2017 roku, ponieważ mamy teraz nie trzy a pięć modów Bogolubova-de Gennesa do uwzględnienia. Nadmienię również, że w rozprawie doktorskiej część opublikowanych na ten temat analitycznych rozważań została pominięta. Ciekawym efektem tych badań jest obserwacja powstawania periodycznych sieci polaronowych. Na koniec dodam, że rozważania prezentowane w trzecim rozdziale są uzupełnione „technicznymi” szczegółami zaprezentowanymi w załącznikach C i D.

W czwartym rozdziale prezentowane są wyniki, które nie zostały jeszcze opublikowane. Po krótkiej dyskusji zagadnienia stabilności, ponownie omawiana jest dynamika kondensatu ekscytonowo-polarytonowego. Tym razem jednak, nacisk jest położony na uwzględnienie rezerwuaru ekscytonowego oraz relaksacji energii poprzez domnożenie operatora energii kinetycznej w równaniu ewolucji przez odpowiedni czynnik. Numeryczne symulacje są przeprowadzone przy użyciu jednokomponentowego równania Grossa-Pitaevskiego sprzężonego z równaniem opisującym dynamikę rezerwuaru. Warunek stabilności tego układu ze względu na małe zaburzenia jest wyprowadzony w załączniku E i omówiony w rozdziale czwartym. Interesujące odstępstwa od tego warunku, występujące na skutek silnego zaburzenia układu, są tam również numerycznie zilustrowane i treściwie przedyskutowane.

Piąty rozdział prezentuje jednostronicowe podsumowanie rozprawy doktorskiej.

Poniżej przedstawię bardziej „techniczne” uwagi na temat rozprawy doktorskiej i komentarze, które chciałbym przedyskutować podczas jej obrony:

1. Pomimo znacznego wysiłku, jaki doktorant musiał włożyć w przygotowanie tej przeszło stu stronicowej rozprawy, moją uwagę zwracają niedoróbki, których kilka pozwolę sobie poniżej wymienić
 - zamiast q powinno być q^2 w (2.16),
 - brakuje dwóch sprzężeń hermitowskich [zespolonych] w (2.40) [(B.15)],

- brakuje minusa przy operatorze energii kinetycznej w (2.86), (2.88) i (3.27),
- brakuje minusa w argumentcie dwóch funkcji wykładniczych na stronie trzydziestej siódmej,
- zamiast $\psi \exp(i\mu_0 t)$ nad (2.91) powinno być $\psi_0 \exp(-i\mu_0 t / \hbar)$,
- problemy z oznaczaniem wektorów lub z umieszczaniem ich w miejscach, gdzie nie powinny one być, widać np. w (3.12), (3.18) i (B.24),
- symbol \hat{p} występuje jako moment dipolowy, operator pędu i operator anihilacji, co prowadzi do kolizji oznaczeń,
- operatory są niekonsekwentnie oznaczane przez tzw. „daszek”,
- brakuje indeksów „pędowych” przy u , v , w i przy symbolach sumowania w (3.35) i (3.36).

Warto zapewne podkreślić, że te i podobne niedociągnięcia nie prowadzą do istotnych nieporozumień podczas czytania omawianej rozprawy.

2. Symulacje numeryczne dyskutowane w rozdziale trzecim startują z minimalnie „zszumionego” stanu układu. Warto byłoby wyjaśnić czemu ten szum jest konieczny i jak był analizowany jego wpływ na końcowe wyniki symulacji. Czy jego postać ma jakiś związek z eksperymentalnie badanymi układami?
3. Zastanawia mnie, czy doktorant mógłby jakoś skomentować/wyjaśnić rzucające się w oczy oscylacje przedstawione na Rys. 3.9c?
4. Rys. 4.1 ilustruje trzy różne zachowania nierównowagowych rozwiązań jednowymiarowego równania Ginzburga-Landaua. Zastanawia mnie, czy istnieje jakies *ilościowe* kryterium prowadzące do przedstawionej na Rys. 4.1 klasyfikacji zależnych od czasu rozwiązań tego równania? Ponadto chciałbym również spytać, czy istnieje możliwość *analitycznego* oszacowania tych parametrów układu, które prowadzą do dynamiki przedstawionej na Rys. 4.5?
5. Spodziewam się, że krytyczna wartość parametru β , podana pod (4.12), wynosi $2g_R/\hbar R$ a nie $2g_C/\hbar R$. Ponadto mam wrażenie, że w równaniach (E.7)—(E.12) brakuje czynnika ϵ^1 i wyrazów rzędu ϵ^0 . Czy doktorant mógłby się do tych uwag odnieść?
6. Symulacje numeryczne omawiane w trzecim i czwartym rozdziale są wykonywane dla konkretnych parametrów przy pomocy jednowymiarowych modeli. Zastanawia mnie, jakie są perspektywy eksperymentalnej realizacji analizowanych numerycznie układów i *detekcji* dyskutowanych w pracy zjawisk. Krótkie podsumowanie rozdziału trzeciego sugeruje komplikacje w eksperymentalnej eksploracji omawianych zjawisk. Podsumowanie czwartego rozdziału nie odnosi się do ww. kwestii.

Tytułem uwag końcowych chcę podkreślić, że w mojej ocenie dyskusja przedstawiona w rozprawie jest interesująca zarówno w części dotyczącej oryginalnych wyników doktoranta jak i w części poświęconej wprowadzeniu podstawowych pojęć. Pomimo drobnych niedociągnięć, jest to ciekawa lektura na temat fizyki kondensatów ekscytonowo-polarytonowych.

Stwierdzam, że rozprawa Pana magistra Pawła Miętkiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim z dziedziny fizyki. Wnoszę o dopuszczenie Pana magistra Pawła Miętkiego do dalszych etapów obrony pracy doktorskiej.

Bogdan Damski