



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

W, Warszawa, 25.09.2021

dr hab. Jan Suffczyński
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Pawła Miętkiego
„Exciton-Polariton Condensates with Internal Degrees of Freedom”**

Rozprawa doktorska pana mgra Pawła Miętkiego zatytułowana „Exciton-Polariton Condensates with Internal Degrees of Freedom” przedstawia wyniki badań teoretycznych prowadzonych na przecięciu dziedzin nauki takich, jak fizyka ciała stałego, magnetyzm, fotonika, czy wnękowa elektrodynamika kwantowa. Celem Autora jest pogłębienie dotychczasowej wiedzy o efektach spinowych w kondensatach Bosego-Einsteina polarytonów ekscytonowych. Autor skupia się na kondensatach, które powstają w jednowymiarowych mikrownękach optycznych zawierających studnię kwantową wykonaną z półprzewodnika półmagnetycznego. W szczególności mgr Miętki odpowiada na następujące, aktualne i istotne naukowo, pytania:

1. Jakie efekty sprzężenia światło-materia wynikają z oddziaływania nierównowagowego kondensatu polarytonów ekscytonowych z jonami magnetycznymi?
2. Jaki wpływ na stabilność i dynamikę kondensatu polarytonów ekscytonowych w takiej strukturze ma rezerwuar ekscytonów?

Rozprawa w swej właściwej części liczy 97 stron i jest podzielona na 5 rozdziałów i 4 dodatki. Konstrukcja pracy jest logiczna i przejrzysta.

Rozdział 1 to krótkie wprowadzenie w tematykę rozprawy i skrótowy opis zawartości kolejnych rozdziałów.

Rozdział 2 wprowadza podstawowe pojęcia dotyczące sprzężenia światło-materia występujące w pracy, takie jak ekscyton, polaryton-ekscytonowy ze spinem, reżim słabego i silnego sprzężenia światło-materia, kondensacja Bosego-Einsteina. Omówienie pojęć jest precyzyjne, a przedstawiane wzory i wyprowadzenia opatrzone są komentarzami wskazującymi, że Autor dobrze zna aparat pojęciowy, którym będzie posługiwał się w dalszej części rozprawy.

JSuff

Rozdział 3 zawiera omówienie fizyki oddziaływań spinowych w półprzewodnikach półmagnetycznych, w tym oddziaływania wymiennego jon-nośnik i jon-jon. Wprowadzone zostaje pojęcie efektywnego pola magnetycznego, a także bazujący na dwuwymiarowym równaniu Ginzburga-Landaua model opisujący kondensat polarytonowy w przypadku, gdy materiałem aktywnym jest półprzewodnik półmagnetyczny. Dodanie w modelu członu reprezentującego odpowiedni potencjał wiążący sprowadza prowadzone rozważania do przypadku jednowymiarowego. Następnie, przedstawione są wyniki obliczeń wykonanych przez Autora metodą analizy perturbacyjnej w przybliżeniu Bogoliubova-de Gennesa. Rozważony jest przypadek w pełni i nie w pełni spolaryzowanego spinowo kondensatu polarytonów ekscytonowych. Mgr Miętki omawia kwestię stabilności kondensatu w tych dwóch przypadkach. Model przewiduje wystąpienie efektu samo-lokalizacji i polaronowego w kondensacie, czyli powstania obszarów o silnie zwiększonej gęstości polarytonów i dużym namagnesowaniu jonów magnetycznych. Analiza dynamiki kondensatu wykazuje, że polarony magnetyczne w kondensacie polarytonowym formują się z charakterystyczną stałą czasową rzędu kilkudziesięciu pikosekund. W przypadku nie w pełni spolaryzowanego kondensatu, w przestrzeni pojawiają się naprzemiennie ułożone, makroskopowe obszary o wzajemnie antyrównoległej orientacji spinowej (co jest określane przez Autora mianem sieci spinowej).

Rozdział 4 rozpoczyna się omówieniem pojęć stabilności i kwazi-stabilności kondensatu polarytonowego. Następnie przedstawiony jest model opisujący dynamikę kondensatu polarytonowego biorący pod uwagę generowany przez nierezonansowe pompowanie rezerwuar ekscytonów. Model bazuje na otwarto-dyssypatywnym równaniu Grossa-Pitaevskiego z dodatkowym równaniem odpowiedzialnym za rezerwuar ekscytonowy. Wykonane obliczenia pozwoliły Autorowi na jednoznaczne wykazanie, że także w przypadku nierównowagowym, nie rozważanym dotąd w literaturze, w kondensacie polarytonowym występują efekty samolokalizacji i może wytworzyć się polaron magnetyczny. Obszary, w których występuje lokalizacja mają rozmiary od pojedynczych do kilkudziesięciu mikrometrów. Autor analizuje m. in. wpływ zaburzenia w postaci impulsu optycznego na stan kondensatu polarytonowego w reżimie stabilnym, kwazi-stabilnym i niestabilnym, w funkcji czasu i składowej przestrzennej. Szczególna uwaga poświęcona została wpływowi mechanizmów relaksacyjnych na stabilność kondensatów. Wykazano m.in., że uwzględnienie relaksacji energetycznej polarytonów w ogólności poprawia stabilność kondensatu, choć w warunkach silnej perturbacji może prowadzić do pojawienia się niestabilności.

Rozdział 5 ma formę zwięzłego podsumowania treści pracy.

Przystępując do omówienia rozprawy mgra Miętkiego, chciałbym wpierw zauważyć, że podjęta tematyka dotyka ważnych i aktualnych zagadnień badawczych. Po pierwsze, kondensacja Bosego-Einsteina w systemach półprzewodnikowych jest wciąż w centrum zainteresowania społeczności naukowej pracującej w dziedzinie sprzężenia światło-materia. Po drugie zarówno spinowy stopień swobody, jak i efekty związane z obecnością rezerwuaru ekscytonów oddziałujących z kondensatem są bardzo często zaniebdywane w publikacjach dotyczących odnośnej tematyki. Co więcej, mimo że umieszczenie jonów magnetycznych w warstwie aktywnej umożliwia wystąpienie wielu fascynujących efektów polarytonowych,

jednakże prace poświęcone efektom spinowym, w kondensatach polarytonowych w półprzewodnikach półmagnetycznych są, jak dotąd, wciąż nieliczne.

Do efektów, które mogą wystąpić dzięki oddziaływaniu wymiennemu między spinem jonu, a spinem ekscytonu wchodzącego w skład polarytonu należy rozważana w pracy mgra Miętkiego samo-lokalizacja przestrzenna i niestabilności czasowo-przestrzenne kondensatu polarytonów. Dotychczas w opisie efektów samo-lokalizacji rozważane były modele zakładające równowagę, czyli zaniehbujące fakt, że kondensat polarytonowy jest układem nierównowagowym, w którym populacja polarytonów w sposób ciągły podlega stratom i odnawianiu. Mgr Miętki stworzył model teoretyczny pozwalający na wzięcie pod uwagę zarówno generację, jak i zanik populacji polarytonów tworzącej kondensat, czyli na opis układu w przypadku nierównowagowym, znacznie bliższy rzeczywistości eksperymentalnej. Model ten został ponadto uzupełniony przez Autora o człon odpowiedzialny za relaksację spinową kondensatu. Powoduje to, że uzyskane w wyniku przeprowadzonych obliczeń wyniki cechuje wysoki walor nowości i są one bardzo ciekawe poznawczo.

Pracę czyta się dobrze, choć jednocześnie dbałość o czytelnika ze strony autora mogłaby być większa. Np. definicja pojęcia stabilności kondensatu polarytonowego następuje dopiero w rozdziale 4, choć pojęcie to jest dyskutowane wcześniej szeroko w rozdziale 3. Podobnie z pojęciem polaronu magnetycznego, które jest faktycznie wprowadzane w rozdziale 3.1.6, gdzie omawiany jest wpływ polarytonów/ekscytonów na stan spinowy jonu magnetycznego, choć samo pojęcie polaron zostaje zdefiniowane i omówione dopiero w rozdziale 3.4.1.

Nie mam zastrzeżeń merytorycznych, czy też metodologicznych do przedstawionej pracy, którą uważam za bardzo wartościowy i potrzebny wkład w dziedzinę sprzężenia światłomateria. Moje szczegółowe uwagi, które przedstawiam poniżej w większości mają charakter raczej pytań docieklivego czytelnika, który chciałby lepiej zrozumieć treść przedstawionej mu pracy.

1. Jaka jest motywacja dla ograniczenia rozważań pracy do kondensatu polarytonowego w przypadku jednowymiarowym? Autor nie poświęca tej kwestii uwagi. Czy warunek związania w jednym wymiarze dotyczy jedynie fotonu w mikrownęce?
2. Pytanie związane z poprzednim: czy wymiarowość typu 1-D jest czynnikiem o znaczeniu kluczowym dla omawianych efektów i nie dałoby się tych efektów zaobserwować w przypadku dwuwymiarowym? Mam świadomość, że odpowiedź na to pytanie nie wynika wprost z wykonanych rachunków, ale ciekaw jestem choćby intuicji Autora w tej sprawie.
3. Na rysunku 3.5b w rozdziale 3.3.1 rozważana jest stabilność kondensatu wyliczona dla w pełni spolaryzowanego spinowo kondensatu polarytonów, mimo że jest to przypadek bez pola magnetycznego. Czy założono, że owa pełna polaryzacja kondensatu pochodzi od polaryzacji kołowej pompy rezonansowej z gałęzią polarytonową i uznano, że można zaniehbąć efekty obrotu spinu polarytonów? W tekście rozdziału 3.3.1 zabrakło komentarza opisującego jak osiągnana jest pełna polaryzacja kondensatu polarytonowego, jak realizowane jest pompowanie i w jakim stopniu uzasadnione jest zaniehbanie efektów obrotu spinu.

JSuff

4. Wyniki obliczeń pokazanych na rys. 3.8 wskazują, że przejście od w pełni spolaryzowanego do nie w pełni spolaryzowanego kondensatu indukuje nieciągłość na diagramie stabilności kondensatu. Stopień polaryzacji jest wielkością ciągłą. Nasuwa się pytanie więc w jaki sposób wyznaczana jest ostra granica między w pełni spolaryzowanym i nie w pełni spolaryzowanym kondensatem na rys. 3.8?
5. Z punktu widzenia eksperymentatora pożądany byłby komentarz w jakim zakresie warunków pomiarowych takich jak np. temperatura czy energia pobudzenia względem dolnej gałęzi polarytonu i parametrów opisujących próbkę takich jak koncentracja jonów magnetycznych w studni kwantowej, czynnik dobroci mikrownęki definiujący prędkość dyssypacji energii z mikrownęki, czy też rozszczepienie Rabiiego, można obserwować omawiane w pracy efekty, w szczególności samo-lokalizację.
6. W jaki sposób, w przypadku pompowania wiązką Gaussowską, w praktyce odróżnić efekt samo-lokalizacji kondensatu związanej z tworzeniem się polaronu magnetycznego od efektu lokalizacji kondensatu w defekcie struktury? Gdy zakładamy, że materiałem aktywnym jest półprzewodnik półmagnetyczny, to w obu przypadkach, a priori, powinien być obserwowany wpływ pola magnetycznego na rejestrowany sygnał.

Praca jest poprawna pod względem językowym. Zawiera jedynie nieliczne błędy typu literowego i pewną liczbę wyrażen, które można by określić jako nieściśle czy mylące. Z obowiązku recenzenta wymienię niektóre z tych drobnych błędów, ograniczając się do tych co istotniejszych:

- str. 6: „nonradiative decay” - powinno być „non-resonant decay”
- str. 9: “Rate of this emission depends on the shift of the resonance” – nieco bardziej precyzyjne byłoby “Rate of this emission depends on the detuning of the emitter with respect to the cavity mode”
- str. 20: „in a microcavity, one should take into consideration exciton binding energy, which in two-dimensional structures is additionally strengthened”. Wnęka może być wypełniona także materiałem objętościowym, więc powinno być raczej “„in a quantum well, one should...”
- str. 22: “as a function $k_{||}$ ” powinno być “as a function of $k_{||}$ ”
- str. 36: „between the reservoir and the condensate” powinno być “„from the reservoir to the condensate” (przyjęto, że proces rozpraszania jest jednokierunkowy)
- str. 41: Tytuł rozdziału “Magnetic effects in Semiconductors” jest nieco na wyrost, bo rozdział omawia w zasadzie wyłącznie efekty paramagnetyczne w półprzewodnikach półmagnetycznych
- str. 42 „elections” powinno być „electrons”
- str. 42 “p-type electrons” (i „s-type electrons”) - aby uniknąć konfuzji z domieszkowaniem typu p lepiej byłoby użyć wyrażenia typu “electrons on p-type orbital” („s-type orbital”) lub

przeprowadzić dyskusję w języku nośników należących do pasma walencyjnego i przewodnictwa

- str. 68 „pumping threshold” – bardziej jednoznaczną i naturalną nazwą byłoby „condensation threshold”.

Wymienione wyżej usterki nie wpływają na moją ocenę rozprawy doktorskiej mgra Pawła Miętkiego, która jest bardzo pozytywna. Przedstawione wyniki są oryginalne i dotyczą ważnego, a wciąż mało eksplorowanego obszaru badań nad kondensatami polarytonowymi.

Wyniki prezentowane w pracy ukazały się w formie dwóch artykułów w renomowanym czasopiśmie Physical Review B w 2017 i 2018 roku i cytowane są odpowiednio już 8 i 5 razy. Obie te publikacje są dwuautorские (mgr Miętki jest w nich pierwszym autorem), co wskazuje, że wkład mgra Miętkiego w ich powstanie był istotny. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w oświadczeniach Autora stanowiących załącznik do rozprawy. Ogółem, mgr Miętki jest współautorem 3 artykułów w Physical Review B poświęconych tematyce polarytonowej oraz dwóch artykułów pokonferencyjnych dotyczących tematyki cząstek elementarnych, którą zajmował się on przed rozpoczęciem studiów doktoranckich.

W moim przekonaniu prezentowana praca spełnia wszelkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję zatem o dopuszczenie mgra Pawła Miętkiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Pozostaje mi życzyć Autorowi, aby przedstawione w jego pracy frapujące przewidywania teoretyczne szybko znalazły przekonujące potwierdzenie w eksperymencie.

Jan Suffczyński