

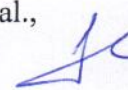
Warszawa, 19.02.2025

Prof. dr hab. Czesław Skierbiszewski  
Instytut Wysokich Ciśnień PAN  
ul. Sokołowska 27/37

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dąbrówki Biegańskiej pt.  
„Novel properties of exciton polaritons”**

Praca doktorska mgr inż. Dąbrówki Biegańskiej koncentruje się wokół badań właściwości kondensatów Bosego-Einsteina dla polaritonów ekscytonowych we wnękach rezonansowych.

Polarytony ekscytonowe są to kwazicząstki powstałe na skutek oddziaływania ekscytonów z modami optycznymi (fotonami) we wnękach rezonansowych. Silne sprzężenie tych modów uzyskuje się umieszczenie studni kwantowych w maksimum rozkładu pola elektrycznego w mikrownęce złożonej z dwóch luster Bragga, przy czym energie fotonów we wnęce dostrojone są do częstości przejścia ekscytonu w studni kwantowej. W wyniku sprzężenia modów ekscytonowych studni kwantowej i fotonowych z wnęki rezonansowej otrzymuje się dwa nowe mody: górny i dolny polaryton (o właściwościach obu swoich komponentów) rozseparowanych tzw. rozszczepieniem Rabiego. Istotne jest, że polarytony „dziedziczą” małą masę efektywną od części fotonowej (masa polarytonów ekscytonowych jest 4-5 rzędów wielkości mniejsza od masy elektronów) i możliwość oddziaływań od składnika ekscytonowego. Polarytony ekscytonowe są bozonami i w związku z tym możliwa jest ich kondensacja (BEC – Bose-Einstein Condensation) – tj. przejście fazowe wszystkich cząstek w układzie do stanu podstawowego opisywanego dwoma parametrami (amplitudą i fazą). Ten szczególny stan kwantowy przewidziany został przez Alberta Einsteina w latach dwudziestych XXw zainspirowanego pracami Satyendry Natak Bosego pracującego nad statystycznymi własnościami fotonów. Einstein rozszerzył prace Bosego na wszystkie bozony i pokazał, że możliwe jest makroskopowe obsadzenie podstawowego stanu kwantowego i całkowita nierozróżnialność cząstek w niskich temperaturach. Kondensaty BEC dla zespołu atomów Rb ochłodzonych do bardzo niskiej temperatury 170 mK, po raz pierwszy obserwowane eksperymentalnie w latach dziewięćdziesiątych XXw - M. Anderson et al.,



Institute of High Pressure Physics  
Polish Academy of Sciences

Sokołowska 29/37; 01-142 Warsaw, Poland  
☎ 48 22 632 50 10; 48 22 888 02 26; fax 48 22 632 42 18  
e-mail: dyrekcja@unipress.waw.pl http://www.unipress.waw.pl



„Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor” Science 269, 198 (1995). Istnienie polarytonowych kondensatów BEC po raz pierwszy pokazał Jacek Kasprzak w 2006 roku (J. Kasprzak et al, Bose–Einstein condensation of exciton polaritons Nature 443, 409 (2006)). Rola polaritonów ekscytonowych w badaniach nad BEC jest związana z ich małą masą efektywną – co umożliwia obserwację BEC nawet w temperaturach pokojowych (dla ekscytonów o dużych energiach wiązania  $\gg kT$ ). Jednakże należy podkreślić, że czas życia polarytonów (bezpośrednio związany z czasem życia fotonów w mikrownęce) jest często krótszy niż czas potrzebny do termalizacji układu. W związku z tym mamy do czynienia z pewnym paradoksem: stan podstawowy układu jest osiągany tylko wtedy, gdy wszystkie fotony znikają z wnęki. Zatem utrzymanie stałej gęstości polarytonowego kondensatu BEC we wnęcie rezonansowej wymaga ciągłego pompowania optycznego mikrownęki. Polarytonowy kondensat powstaje w wyniku zrównoważenia strat i pompowania optycznego. W konsekwencji, stan ustalony kondensatu polarytonowego **jest metastabilny i poza stanem równowagi**. Właściwości polarytonów we wnękach rezonansowych pozwalają na obserwację szerokiej klasy zjawisk kwantowych i nieliniowych m. in. takich jak oscylacje Josephsona, generacja solitonów, bistabilność optyczna, nadciekłość, optyczny spinowy efekt Halla.

Polaritonowe kondensaty Bosego-Einsteina (w odróżnieniu od ‘klasycznych’ kondensatów atomowych) stanowią bardzo dobry przykład systemu, gdzie mamy do czynienia z ciągłym ‘wyciekaniem’ energii. Niezależnie od wielkich sukcesów i bardzo ciekawych wyników eksperymentalnych związanych z badaniem kondensatów polaritonowych, przez lata narzucało się pytanie: jak to jest z tym stanem podstawowym układu polaritonowego, skoro aby zaistniał potrzebne jest stałe pompowanie optyczne laserem?

W ostatnich czasach pojawiło się szereg prac dotyczących rozszerzenia tradycyjnego podejścia do opisu układów fizycznych na tzw. układy niehermitowskie, tj układy które z są z definicji nierównowagowe (zawierają straty lub wzmocnienie). Niehermitowskie Hamiltoniany opisujące takie systemy z reguły mają nieortogonalne stany własne, (co m. in. powoduje pojawienie się tzw. „diabolic points”). Ostatnio panuje przekonanie, że wiele systemów fizycznych, zwłaszcza tych połączonych ze środowiskami rozpraszającymi, jest lepiej opisanych przez hamiltoniany niehermitowskie. Szczególnie interesujące jest to w przypadku opisu kondensatów polaritonowych we wnękach rezonansowych. Dlatego

uważam, że cel pracy Pani Dąbrówki Biegańskiej za bardzo ambitny: zbadanie i opis kondensatów polaritonowych z uwzględnieniem dyssypacji energii. Otwiera to nowe perspektywy w zrozumieniu i opisie szeregu zjawisk budzących spory i kontrowersje.

Praca doktorska mgr inż. Dąbrówki Biegańskiej składa się z 211 stron, podzielona jest na 6 rozdziałów oraz dodatki i spis literatury. Główne wyniki zamieszczone w Rozprawie zostały są podstawą 4 publikacji (dwie z nich są umieszczone w formie preprintu arXiv i mają status „w recenzji”). W trzech z tych publikacji Doktorant jest pierwszym autorem. Ponadto Doktorant wymienia 5 publikacji – są one związane są z przedmiotem badań, w których jest współautorem. Na podkreślenie zasługuje wysoka jakość publikacji (Physical Review Letters, Science Advances). Załączona bibliografia liczy 284 pozycji i świadczy o głębokiej znajomości literatury przez Autora.

Rozprawa doktorska składa się ze zbioru publikacji będących oryginalnym dorobkiem Doktorantki - Rozdziały II-V. Każdy z tych rozdziałów opatrzony jest niezbędnym wprowadzeniem zawierającym omówienie głównych celów publikacji, rolę Autora w pracy dla danej publikacji oraz podsumowanie. Rozprawa zawiera również ogólne wprowadzenie do tematyki badań prowadzonych przez Doktorantkę - Rozdział I oraz podsumowanie z dodatkami i spisem literatury - Rozdział VI.

Rozdział I zawiera przegląd podstawowych koncepcji na temat ekscytonów, polaritonów, mikrownęk optycznych oraz reżimu silnego sprzężenia światło-materia i kondensacji polarytonowej. Przedstawiono podstawy fizyczne opisujące zachowanie się ekscytonów uwięzionych w mikrownęce optycznej. Pokróctce omówiono główne techniki doświadczalne pozwalające na obserwację i detekcję polarytonów ekscytonowych oraz kondensacji polarytonowej. Rozdział ten napisany jest w sposób przystępny i umożliwia w łatwy sposób zrozumienie zagadnień zawartych w dalszej części Rozprawy.

W Rozdziale II znajduje się opis polarytonów ekscytonowych w modzie silnego sprzężenia we wnęce rezonansowej wykazującej dwójłomność (wynikająca z małych naprężeń związanych z wytwarzaniem wielowarstwowych zwierciadeł Bragga). Wyniki te są opublikowane w bardzo dobrym czasopiśmie - Physical Review Letters, gdzie mgr inż. Dąbrówka Biegańska jest pierwszym autorem.

Najważniejsze wyniki tej pracy:

- (a) Wyznaczenie dla niskiej gęstości polaritonów (low density limit) dwójłomności optycznej  $\Omega$  (28 ueV), oraz TE-TM splitting  $\beta$  (15 ueV/um<sup>-2</sup>)



- (b) Dla kondensatów BEC (high density limit), obserwacje anizotropii w kierunku równoległym i prostopadłym do polaryzacji kondensatu. Pokazanie po raz pierwszy eksperymentalnie dla że polaritony ekscytonowe z tym samym spinem **oddziałują silniej** (oddziaływanie opisane przez stałą  $\alpha_1$ ) niż ze spinem antyrównoległym ( $\alpha_2$ ),  $\alpha_1 \gg \alpha_2$ . Prace te pozwoliły na weryfikację modelu teoretycznego który przewidywał takie efekty.
- (c) Pokazanie krzyżowania się pasm związanych z pseudospinem polaritonów oraz istnienie tzw. diabolic points zarówno dla niskiej gęstości polaritonów jak i dla kondensatów BEC.

W Rozdziale III [oraz pracy R. Su, E. Estrecho, **D. Biegańska**, Y. Huang, M. Wurdack, M. Pieczarka, A. G. Truscott, T. C.H. Liew, E. A. Ostrovskaya, Q. Xiong, "Direct measurement of a non-Hermitian topological invariant in a hybrid light-matter system", *Science Advances*, 7, eabj8905 (2021)] Doktorantka opisuje zachowanie się wnek rezonansowych wypełnionych perowskitami. Perowskity ze względu na wysokie energie wiązania ekscytonów umożliwiają uzyskanie i badanie BEC w temperaturze pokojowej. Duża dwójłomność perowskitów ułatwia silną polaryzację pseudospinu w kondensatach. Praca ta jest naturalną kontynuacją badań Doktorantki opisanych w Rozdziale II. Do najciekawszych wyników tej pracy należy zaliczyć obserwacje podwójnych 'exceptional points' (EP – miejsca gdzie liczba stanów własnych jest mniejsza niż wynika to z algebraicznej liczby rozwiązań Hamiltonianu).

W Rozdziale IV badane są właściwości ekscytonów w studniach kwantowych AlGaAs/AlAs. W tych strukturach obserwowano trzy przejścia ekscytonowe. Jedno związane z przejściem prostym dla ekscytonów związanych w studni InAlAs oraz dwa skośne pomiędzy stanami elektronowymi w barierze AlAs i dziurami w studni AlGaAs. Doktoranta bada w tej pracy dynamikę tych ekscytonów: ich czasy życia oraz dyfuzję. Badania te są były wykonane na strukturach które wyjściowo posiadały wnęki rezonansowe - a do badań usunięte zostało górne zwierciadło Bragga. Badania wykonane w ramach tego rozdziału stanowią silną podstawę w interpretacji wyników dla pełnych wnek rezonansowych opisanych w Rozdziale V.

Do ciekawszych wyników opisanych w Rozdziale V należy obserwacja oddziaływania pomiędzy ekscytonami i fotonami we wnęce rezonansowej prowadzącego do anomalnej dyspersji dolnej gałęzi polaritonowej – pokazującej, że polaritony ekscytonowe w tej gałęzi



mają ujemną masę. Wyniki eksperymentalne wytłumaczone są na podstawie modelu teoretycznego, który zakłada dyssypację energii poprzez kanał związany z jednym ze skośnych ekscytonów.

Poniżej zamieszczam listę pytań, które nasuwają się po przeczytaniu Rozprawy:

1. W Rozdziałach II i III opisywane są zjawiska prowadzące do powstania nowego rodzaju kwazicząstek w układach dwuwymiarowych – tutaj w układzie przestrzennego rozkładu kondensatu BEC. W mechanice kwantowej przyzwyczajeni jesteśmy do opisu zjawisk przy pomocy bozonów i fermionów – jest to słuszne dla układów trójwymiarowych. W przypadku układów niskowymiarowych (np. dwuwymiarowych) możliwy jest opis obserwowanych zjawisk poprzez kwazicząstki nie będące ani bozonami ani fermionami. Dodatkową komplikację pojęciową powoduje fakt, że w reżimie BEC badane są zjawiska związane z pseudospinem kwazicząstek - które nominalnie są bozonami. Pytanie: Jaką statystyką opisujemy kwazicząstki dla układów BEC w przypadku zjawisk badanych w rozdziałach II i III?
2. Jaka jest różnica w opisie kwazicząstek dla kolektywnych oddziaływań w ramach kondensatu BEC oraz dla układu gdy polaritony ekscytonowe znajdują się poniżej progu kondensacji?
3. W Rozdziale IV badana jest dynamika ekscytonów. Mam pytanie dotyczące długiej drogi dyfuzji ekscytonu  $X_{x,y}$  (Rys 4, praca D. Biegańska et al., *arXiv:2404.01938* (2024)) oraz krótkiego czasu życia tego ekscytonu (Rys 5a) - oba pomiary przeprowadzone były dla temperatury  $T=4.8K$ . Długa droga dyfuzji ekscytonu  $X_{x,y}$  (na przykład w porównaniu do ekscytonu  $X_z$ ) powinna wiązać się z długim czasem życia dla ekscytonu  $X_{x,y}$ . Natomiast wyniki eksperymentalne wskazują na coś odmiennego. Czy Autorka może wytłumaczyć tę sprzeczność. Czy może być to wskazaniem za dużo mniejszą masą zredukowaną dla ekscytonu  $X_{x,y}$  w porównaniu z  $X_z$  ?
4. Proszę o wyjaśnienie dlaczego zdjęcie górnego zwierciadła Bragga powoduje zmniejszenie szerokości linii dla ekscytonu  $X_{x,y}$  ?
5. Dlaczego parametr  $\gamma_0=41$  meV nie jest zgodny z pomiarami szerokości linii dla ekscytonu  $X_z$  ?



**Institute of High Pressure Physics  
Polish Academy of Sciences**

Sokołowska 29/37; 01-142 Warsaw, Poland  
☎ 48 22 632 50 10; 48 22 888 02 26; fax 48 22 632 42 18  
e-mail: [dyrekcja@unipress.waw.pl](mailto:dyrekcja@unipress.waw.pl) <http://www.unipress.waw.pl>



Podsumowując, praca doktorska mgr inż. Dąbrówki Biegańskiej pt. „Novel properties of exciton polaritons” zawiera szereg wartościowych wyników na temat kondensatów polaritonowych we wnękach rezonansowych. W szczególności należy podkreślić badania nad kondensatami BEC w reżimie nieliniowym z uwzględnieniem oddziaływań pomiędzy polaritonami ekscytonowymi. Badania te prowadzone we współpracy z uznanymi ośrodkami naukowymi doczekały się publikacji w bardzo dobrych czasopismach naukowych.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Dąbrówki Biegańskiej spełnia wszystkie kryteria stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Wnoszę o skierowanie tej rozprawy do publicznej obrony. Jednocześnie ze względu na wysoki poziom i unikalność prezentowanych wyników wnoszę o wyróżnienie tej pracy. Na wyróżnienie pracy zasługuje unikalne podejście do opisu nierównowagowych polaritonowych kondensatów BEC z uwzględnieniem kanałów dyssypacji energii, co otwiera nowe perspektywy w analizie oddziaływań pomiędzy polaritonami ekscytonowymi w nieliniowym reżimie BEC.

Czesław Skierbiszewski

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Skierbiszewski".