



UNIwersytet  
Warszawski

**Wydział Fizyki**

Uniwersytet Warszawski  
Ul. Pasteura 5, 02-093  
Warszawa

dr hab. Barbara Piętka  
Profesor Uniwersytetu Warszawskiego  
Lider Grupy Badawczej *Polariton*  
<https://polariton.fuw.edu.pl/>

Warszawa, 21 listopada 2024

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

Rozprawa doktorska mgr Dąbrówki Biegańskiej pod tytułem „Novel properties of exciton-polaritons” została wykonana na Politechnice Wrocławskiej pod opieką dr hab. inż. Marcina Syperka, prof. PWr oraz współopieką dr hab. Macieja Pieczarki.

Praca doktorska została przedstawiona w formie zestawienia czterech publikacji naukowych, w których Dąbrówka Biegańska była współautorem, z czego w trzech pełniła rolę pierwszego autora. Dwie prace zostały opublikowane (*Physical Review Letters*, *Science Advances*), dwie prace są w recenzji i są dostępne w publicznej bazie danych *arXiv*.

**Sylwetka naukowa Autorki na podstawie informacji z Appendix A – C**

Dąbrówka Biegańska wykazuje bogaty dorobek naukowy, łącząc działalność badawczą z licznymi międzynarodowymi stażami i udziałem w prestiżowych konferencjach naukowych. Podczas studiów doktorskich odbyła trzy zagraniczne staże badawcze, m.in. w University of Sheffield (Wielka Brytania), Australian National University (Australia) oraz w CNR-NANOTEC (Włochy), zajmując się nowatorskimi zagadnieniami z zakresu topologii i wzbudzeń kolektywnych w kondensatach polarytonowych. Jej osiągnięcia zostały docenione licznymi nagrodami i stypendiami, w tym Stypendium START dla młodych naukowców Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej oraz Nagrodą Rektora Politechniki Wrocławskiej dla najlepszych doktorantów. Prezentowała wyniki swoich badań na międzynarodowych konferencjach, zarówno w formie wystąpień ustnych (6 wystąpień), jak i plakatów (9 plakatów pierwszo-autorskich). Jej działalność badawcza, w szczególności w zakresie fizyki polarytonów, ma znaczący wpływ na rozwój tej dziedziny i wskazuje na duże zaangażowanie w promowanie nowoczesnych rozwiązań naukowych na arenie międzynarodowej.

1/9



### Tematyka pracy

Praca dotyczyła badania ekscytonów polarytonowych i ich kondensatów, kwazicząstek powstałych w wyniku silnego sprzężenia ekscytonów i fotonów w mikrownękach półprzewodnikowych. Praca skupiła się na zrozumieniu fundamentalnych cech polarytonów i ich kondensatów oraz w kontekstach związanych z anizotropią optyczną i niehermitowskością układu. W pracy badano systemy oparte na półprzewodnikach III-V (AlGaAs/AIAs) oraz perowskitach, które różnią się właściwościami optycznymi i strukturalnymi, dostarczając nowych danych o oddziaływaniach polarytonów ekscytonowych oraz mechanizmach odpowiedzialnych za anomalne zjawiska, takie jak negatywna masa efektywna czy nieliniowe własności.

W szerszym kontekście praca wpisuje się w aktualny trend projektowania zaawansowanych układów fonicznych o regulowanych parametrach. Polarytony ekscytonowe, będące silnie sprzężonymi stanami ekscytonów i fotonów, tworzą wyjątkową klasę kwazicząstek, które łączą w sobie właściwości materiałowe i optyczne. Dzięki silnemu sprzężeniu światła z materią uzyskuje się kwazicząstki o mieszanych cechach obu komponentów, co umożliwia wprowadzenie oddziaływań, dziedziczonych od składnika ekscytonowego, do układów fonicznych. Ponadto, ze względu na bozonowy charakter tych kwazicząstek w niskich gęstościach, możliwa jest obserwacja zjawisk związanych z nierównowagową kondensacją Bosego-Einsteina.

Jak słusznie zauważa Autorka rozprawy, polarytony ekscytonowe i ich kondensaty są badane od ponad dwóch dekad, jednak system ten wciąż nie został w pełni zrozumiany i eksplorowany. W ostatnich latach wprowadzono do niego nowe komponenty, takie jak spin, oddziaływania spin-orbita, anizotropia, niehermitowskość, aby wymienić tylko kilka przykładów. Dodatkowo, trwają intensywne poszukiwania nowych materiałów oraz projektowanie wnęk optycznych o innowacyjnych geometriach, które nie tylko umożliwiają obserwację fundamentalnych zjawisk w temperaturze pokojowej, ale także nadają im nową funkcjonalność poprzez geometrie układu prowadzące do powstania polarytonów o strojonej strukturze pasmowej

Przedstawiona do recenzji praca doktorska idealnie wpisuje się w te trendy, prezentując nowatorskie rozwiązania. Wyniki zaprezentowane w rozprawie mają istotne znaczenie zarówno dla fundamentalnych badań kondensatów polarytonowych, jak i dla ich potencjalnych zastosowań, na przykład w optycznych układach topologicznych czy w optycznym przetwarzaniu danych.



### Struktura pracy

Formalnie praca o objętości 212 stron zawiera abstrakt, streszczenie w języku angielskim i polskim, podziękowania, listę publikacji, przedmowę, spis treści oraz wstęp, który został podzielony na cztery rozdziały obejmujące wprowadzenie, podstawy fizyczne badanych zjawisk, perspektywy badań oraz metodologię. Następnie przedstawiono zestawienie publikacji, uzupełnione wstępem oraz szczegółowym opisem wkładu Autorki w przedstawione badania, a także materiałami dodatkowymi, które zostały opublikowane wraz z artykułami. Każde zestawienie zostało zakończone podsumowaniem, co czyni pracę spójną i dobrze zorganizowaną. Na końcu zamieszczono spis cytowanej literatury, 284 pozycje.

Dwa z opisanych w rozprawie doktorskiej artykułów zostały opublikowane (w *Physical Review Letters* oraz *Science Advances*), pozostałe dwa artykuły są umieszczone w publicznej bazie danych *arXiv* i są obecnie w recenzji. W trzech pracach Autorka rozprawy jest pierwszą autorką publikacji, natomiast w pracy w *Science Advances* jest na trzeciej pozycji, co pokazuje, że tylko w tej pracy miała mniejszy wkład w jej powstanie niż w pozostałych. Ponadto Autorka rozprawy jest też współautorką w pięciu innych publikacjach, które nie zostały opisane w rozprawie.

Artykuły przedstawione w rozprawie stanowią spójną całość naukową, w których pokazany został szereg nowych zjawisk. W szczególności na całość dokonań składają się takie wyniki jak:

1. Eksperymentalna obserwacja anizotropii dyspersji wzbudzeń kolektywnych w kondensacie polarytonów ekscytonowych w reżimie Thomasa-Fermiego. (Publikacja w *Physical Review Letters*).
2. Bezpośredni pomiar stałej oddziaływań polarytonów z uwzględnieniem stopnia swobody spinu. (Publikacja w *Physical Review Letters*).
3. Pierwszy eksperymentalny pomiar niehermitowskiego niezmiennika topologicznego w układzie światło-materia. (Publikacja w *Science Advances*).
4. Odkrycie wpływu dyssypatywnego sprzężenia na anomalną dyspersję w mikrownęce ekscytonowo-polarytonowej. (Publikacja *arXiv:2404.14116*).
5. Wykazanie wpływu dyssypacji na masę efektywną polarytonów oraz możliwość kontrolowania ich własności optycznych. (Publikacja *arXiv:2404.14116*).
6. Identyfikacja i charakterystyka trzech typów ekscytonów (prostych oraz skośnych zarówno przestrzennie i pędowo) w studniach kwantowych AlGaAs/AlAs. (Publikacja *arXiv:2404.01938*).



### Zawartość pracy

Wprowadzenie do badań stanowi istotny element rozprawy, jasno definiując kontekst naukowy, cel pracy oraz uzasadniając wybór podjętej tematyki. Dobór poruszanych zagadnień jest trafny i starannie przemyślany, a sposób ich prezentacji cechuje się klarownością oraz znacznymi walorami dydaktycznymi, dzięki uwzględnieniu najważniejszych aspektów tematu oraz wykorzystaniu obszernej, starannie dobranej i poprawnie cytowanej literatury. Wprowadzenie skutecznie wyjaśnia kluczowe koncepcje niezbędne do zrozumienia omawianej problematyki, takie jak pojęcie ekscytonów w materiałach półprzewodnikowych, fotonów w mikrowędkach optycznych oraz sprzężenia prowadzącego do powstania polarytonów ekscytonowych (dalej polarytonów). Autorka podkreśliła najważniejsze cechy polarytonów wynikające z ich podwójnej natury ekscytonowo-fotonowej, w tym właściwości spinowe, efektywne pole wynikające z rozszczepienia modów TE-TM w mikrowędcę, anizotropię oraz efekt Zeemana w zewnętrznym polu magnetycznym. Zwróciła również uwagę na istotne zagadnienia, takie jak masa efektywna polarytonów, ich skończony czas życia oraz niehermitowskość, wynikająca z cech układu obejmujących dysypację i wzmocnienie.

Ten rozdział przedstawia kluczowe właściwości polarytonów, skupiając się na fundamentalnych i dobrze znanych aspektach tego zagadnienia. Choć wprowadzenie jest poprawne i zapewnia solidne podstawy teoretyczne, warto zauważyć, że jego treść pozostaje w dużej mierze zgodna z podręcznikową wiedzą i nie wykracza poza standardowe ujęcie tematu. Potencjalnym kierunkiem dalszego rozwoju tego rozdziału mogłoby być wzbogacenie go o bardziej oryginalne analizy i krytyczne spojrzenie na aktualny stan wiedzy, co mogłoby nadać mu bardziej wyjątkowy charakter. Szczegółowego odniesienia do obecnych dokonań przedstawionych w literaturze nie brakuje jednak w pracy, omówienie bezpośredniego kontekstu wyników zawartych w publikacjach znajduje się w rozprawie bezpośrednio przed samą publikacją.

W rozdziale 1.2.1, jak również w dalszej części pracy, pojęcia „spin” i „pseudospin” są używane wymiennie, co sprawia wrażenie przypadkowości. Różnica między tymi pojęciami nie została jasno wyjaśniona, choć wydaje się, że jest to istotne dla pełnego zrozumienia omawianego tematu. Warto byłoby doprecyzować te definicje, aby zwiększyć spójność i precyzję wprowadzenia.

Ciekawym aspektem, który podkreśla wyjątkowe właściwości badanego systemu, jest rozszczepienie TE-TM oraz anizotropia wynikająca z dwójłomności kryształu, opisane odpowiednio w rozdziałach 1.2.2 oraz 1.2.3. Niemniej jednak, w przypadku przedstawionym w rozdziale 1.2.2 pojawia się pytanie, dlaczego rozszczepienie TE-TM nie jest widoczne dla modów fotonowych w warunkach zilustrowanych na rysunku 1.4. Znikome rozszczepienie modów fotonowych (linie przerywane) skutkuje znaczącym rozszczepieniem dolnych modów



polarytonowych (linie ciągłe), co wydaje się zaskakujące i wymaga głębszego wyjaśnienia. Dodatkowo, na rysunku 1.4 widać, że linia dolnego polarytonu w polaryzacji TM dla dużych wartości wektora falowego znajduje się powyżej linii ekscytonu, co stoi w sprzeczności z przewidywaniami modelu sprzężonych oscylatorów. Podobne rozbieżności występują w przypadku anizotropii opisanej w rozdziale 1.2.3. Wyjaśnienie tych różnic jest istotne do poprawności merytorycznej pracy.

Dalsze pytania dotyczące tego rozdziału odnoszą się do formy przedstawienia wyników. Nie jest jasne, dlaczego hamiltoniany opisujące rozszczepienia zostały podane w bazie polaryzacji kołowych, podczas gdy kolory na rysunkach 1.4 i 1.5 zdają się kodować własności polaryzacji liniowych (choć ten aspekt nie został jednoznacznie wyjaśniony). Warto byłoby również doprecyzować, dla jakiej energii przedstawiono rysunki 1.4 e) oraz 1.5 e). Ciekawym aspektem jest również wprowadzenie efektu Zeemana, choć niestety rozważania teoretyczne nie przełożyły się na zilustrowanie ich metodami graficznymi w postaci rysunków analogicznych do 1.4 oraz 1.5.

Wprowadzenie przedstawione w rozdziale 1 kończy się bardzo interesującym i szczegółowym opisem różnych platform materiałowych i potencjału aplikacyjnego, co stanowi ważny element pracy. Rozdział ten wyróżnia się oryginalnym podejściem oraz wyczerpującym ujęciem tematu, co pozwala czytelnikowi na lepsze zrozumienie różnorodności badanych układów. Opis platform materiałowych w tym kontekście znacząco wzbogaca wprowadzenie i podkreśla szeroką perspektywę badawczą Autorki.

W kilku miejscach pracy poruszane jest również zagadnienie zastosowań przedstawionych wyników w kontekście kwantowego przetwarzania informacji. Autorka wskazuje na potencjał polarytonów w tym obszarze, jednak brakuje informacji dotyczących konkretnych zastosowań polarytonów w zagadnieniach stricte kwantowych. Uzupełnienie pracy o bardziej szczegółowe omówienie tego aspektu mogłoby stanowić interesujące rozwinięcie i dodatkowy atut rozprawy.

W rozdziale 2 Autorka wprowadza zagadnienia związane z nieliniowym przejściem fazowym, takim jak kondensacja Bosego-Einsteina, oraz jej odpowiednikiem w kontekście polarytonów. W tym fragmencie zauważalny jest przeskok między trójwymiarowym, nieoddziałującym gazem atomów, przedstawionym w oryginalnej teorii Bosego i Einsteina, a kondensatem polarytonowym w ograniczonej dwuwymiarowej geometrii. Zagadnienia podręcznikowe, takie jak temperatura krytyczna, gęstość krytyczna czy parametr rozpraszania, nie zostały w pełni zintegrowane z problemem polarytonów w dwuwymiarowych wnękach optycznych. Nie jest również w pełni jasne, dlaczego Autorka stwierdza, że skończony rozmiar kondensatu polarytonowego sprawia, iż staje się on efektywnie trójwymiarowy? Ponadto, co opisuje parametr  $\Lambda(T)$ ?



Po tym ogólnym wprowadzeniu zjawiska kondensacji, opis oddziaływań oraz przegląd literatury przedstawione w rozdziale 2.4 są bardzo interesujące i świadczą o szerokim spojrzeniu Autorki na ten aspekt. Kolejne rozdziały, dotyczące koherencji i pułapkowania, choć nie wyczerpują całkowicie poruszanych zagadnień, zawierają wszystkie niezbędne informacje pozwalające zrozumieć tematy omawiane w publikacjach stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. Ten układ czyni pracę spójną i dobrze przemyślaną.

Rozdział 3 zapowiadany został jako „perspektywy”, choć niestety perspektyw nie prezentuje. Mam nadzieję, że w trakcie obrony doktorskiej Autorka omówi potencjalne dalsze kierunki badań nad polarytonami i ich kondensatami szczególnie w zakresie ich zastosowań w kwantowym przetwarzaniu informacji i topologicznych układach optycznych.

Po tym szerokim wstępie Autorka prezentuje zbiór artykułów naukowych, które zostały wcześniej opublikowane lub są obecnie w recenzji. Każdy artykuł opisuje konkretny aspekt badań, wnosząc istotny wkład w rozwój wiedzy w omawianej dziedzinie. Przed prezentacją każdego artykułu zawarte jest szczegółowe wprowadzenie do omawianego zagadnienia, uzupełnione o przegląd literatury, co pozwala na osadzenie wyników badań w szerszym kontekście naukowym. Te fragmenty pracy skierowane są głównie do specjalistów w dziedzinie i odzwierciedlają unikatowe spojrzenie Autorki na badany problem.

Opis wkładu doktorantki w rozwój wiedzy został przedstawiony przed każdą publikacją, która stanowi podstawę rozprawy. Doktorantka była odpowiedzialna za wykonanie eksperymentów (schematy eksperymentalne i metodologia zostały szczegółowo opisane w rozdziale 4), analizę danych oraz, w dużej mierze, za opracowanie treści publikacji. Takie podejście podkreśla znaczenie jej pracy w realizacji przedstawionych badań oraz wniosło istotny wkład w ostateczny kształt rozprawy.

### **Ocena merytoryczna i podsumowanie**

Rozprawa doktorska w pełni potwierdza zarówno ogólną wiedzę Dąbrówki Biegańskiej, jak i jej zdolność do samodzielnego prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie. W pracy Autorka pokazała dogłębną znajomość zagadnień związanych z fizyką polarytonów ekscytonowych, w tym właściwości procesu kondensacji, czy niehermitowskich oraz dynamiki w różnych platformach materiałowych, takich jak struktury półprzewodnikowe III-V czy perowskity. Autorka nie tylko zaprezentowała zdolność do zrozumienia i interpretacji skomplikowanych zagadnień, ale również umiejętność zastosowania tej wiedzy w praktyce, co jest widoczne w realizacji eksperymentów, analizie wyników i ich publikacji w renomowanych czasopismach naukowych. Jedynym niedociągnięciem tej pracy jest fakt, że na moment pisania recenzji dwie z czterech publikacji nie zostały jeszcze opublikowane w recenzowanych czasopismach, tylko znajdują się w recenzji.



# UNIwersytet Warszawski

## Wydział Fizyki

Uniwersytet Warszawski  
Ul. Pasteura 5, 02-093  
Warszawa

Wyniki rozprawy wnoszą istotny wkład w rozwój fizyki polarytonów, koncentrując się na oryginalnych zagadnieniach, takich jak niehermitowskie pola cechowania, anizotropia spinowa czy anomalna dyspersja związana z negatywną masą efektywną. Kluczowym aspektem pracy jest także innowacyjne podejście do badania efektów dyssypatywnych oraz ich wpływu na dynamikę kondensatów polarytonowych, co otwiera nowe perspektywy dla badań podstawowych i aplikacyjnych.

Oryginalność pracy polega nie tylko na podejściu badawczym, ale także na precyzyjnym doborze metodologii i systematycznym podejściu do realizacji celów. Autorka wykazała zdolność do samodzielnego zaprojektowania i wykonania eksperymentów, które nie tylko zweryfikowały istniejące teorie, ale również dostarczyły nowych, istotnych wyników, w tym bezpośredniego pomiaru niehermitowskich niezmienników topologicznych w hybrydowych układach światło-materia. Praca pokazuje również, że Autorka z powodzeniem integrowała swoją wiedzę z praktyczną realizacją badań, co jest kluczowym elementem w ocenie zdolności do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Podsumowując, rozprawa doktorska przedstawiona przez Dąbrówkę Biegańską charakteryzuje się wysoką jakością i prezentuje istotne wyniki dla społeczności naukowej. Praca ta spełnia wszystkie wymagane kryteria stawiane pracom doktorskim określone w art. 190 ust. 2 i art. 183 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.). Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wnioskuje również o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej za eksperymentalne pokazanie anizotropii dyspersji wzbudzeń kolektywnych w kondensacie polarytonów ekscytonowych oraz zaprojektowanie nowatorskiego układu mikrownęki optycznej, gdzie efekty dyssypacji pozwalają na wytworzenie polarytonów o anomalnej dyspersji.

dr hab. Barbara Piętka, prof. ucz.  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa  
[barbara.pietka@fuw.edu.pl](mailto:barbara.pietka@fuw.edu.pl),  
tel. +48605213124



Poniżej zawarte jest podsumowanie pytań zawartych w tej recenzji, które zostały szczegółowo omówione w jej głównej części:

**Rozdział 1.2.1:** Jaka jest różnica między pojęciami „spin” i „pseudospin”? Dlaczego są używane wymiennie i jak można doprecyzować te definicje?

**Rozdział 1.2.2: 1.** Dlaczego rozszczepienie TE-TM jest znikome dla modów fotonowych w warunkach zilustrowanych na rysunku 1.4?

2. Jak można wyjaśnić, że znikome rozszczepienie modów fotonowych prowadzi do znaczącego rozszczepienia dolnych modów polarytonowych?

3. Dlaczego linia dolnego polarytonu w polaryzacji TM dla dużych wartości wektora falowego znajduje się powyżej linii ekscytonu, co wydaje się sprzeczne z modelem sprzężonych oscylatorów?

4. Dlaczego hamiltoniany opisujące rozszczepienia zostały podane w bazie polaryzacji kołowych, podczas gdy rysunki 1.4 i 1.5 wydają się odnosić do polaryzacji liniowych?

5. Dla jakiej energii przedstawiono rysunki 1.4 e) oraz 1.5 e)?

6. Dlaczego rozważania teoretyczne dotyczące efektu Zeemana nie zostały zilustrowane graficznie, np. w formie rysunków analogicznych do 1.4 i 1.5?

**Rozdział 2: 1.** Dlaczego Autorka stwierdza, że skończony rozmiar kondensatu polarytonowego sprawia, iż staje się on efektywnie trójwymiarowy?

2. Co dokładnie opisuje parametr  $\Lambda(T)$ ?

**Rozdział 3 (Perspektywy):** Jakie są potencjalne dalsze kierunki badań nad polarytonami i ich kondensatami, szczególnie w kontekście zastosowań w kwantowym przetwarzaniu informacji i topologicznych układach optycznych?

Poniższe uwagi mają charakter uzupełniający i nie wpływają na ogólną wartość merytoryczną pracy, lecz ich uwzględnienie mogłoby dodatkowo zwiększyć precyzję i klarowność przedstawionych treści.

**Rozdział 1.1.2.** Zabrakło opisu kwantyzacji wektora falowego w kierunku wzrostu struktury, co mogłoby wzmocnić spójność tego fragmentu.

**Rozdział 1.1.3. 1.** Sformułowanie „*Placing excitons and photons in the same space*” może budzić pytania, czy rzeczywiście ekscyton i foton są umieszczone w tym samym miejscu.





UNIwersytet  
Warszawski

**Wydział Fizyki**

Uniwersytet Warszawski  
Ul. Pasteura 5, 02-093  
Warszawa

2. Opis silnego sprzężenia w kontekście propagacji światła, absorpcji fotonów i emisji ekscytonów (paragraf rozpoczynający się od „*Due to the light propagation, photon absorption and the exciton's radiative emission...*”) wymaga doprecyzowania, jak w tym kontekście należy rozumieć rozszczepienie Rabi'ego próżni (*vacuum field Rabi splitting*).

3. Notacja w równaniach 1.9 i 1.10. Niejasna jest różnica między parametrem  $V$  w równaniu 1.9 a  $\Omega/2$  w równaniu 1.10. Czy wprowadzenie dwóch różnych oznaczeń jest konieczne?