

**Recenzja Rozprawy Doktorskiej pt.  
„Complex dynamics of nonlinear modes of an exciton-polariton condensate”**

**Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Opala**

**Promotor: prof. dr hab. Michał Matuszewski**

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Andrzeja Opali dotyczy opisu i możliwości zastosowania nieliniowej dynamiki kondensatów polarytonów ekscytonowych. Jest to tematyka bardzo aktualna, którą zajmuje się obecnie wiele najlepszych laboratoriów na świecie. Praca została wykonana w Instytucie Fizyki, PAN, pod kierunkiem prof. dr hab. Michała Matuszewskiego. Zawiera ona wyniki zawarte w dwóch artykułach opublikowanych w Physical Review B, jednym artykule w Physical Review Applied oraz dwóch artykułach w Nano Letters.

W 1958 roku niezależnie w pracach, napisanych przez Piekara<sup>1</sup> i Hopfielda<sup>2</sup>, opisano oddziaływanie ekscytonów z promieniowaniem elektromagnetycznym. Okazało się, że stany własne układu kryształ-pole promieniowania są kwazicząstkami złożonymi z fotonów i ekscytonów lub, mówiąc inaczej, sprzężonymi modami ekscytonowo-fotonowymi. Kwazicząstki powstałe w wyniku silnego sprzężenia fotonów zlokalizowanych w mikrownęce optycznej z ekscytonami, najczęściej zlokalizowanymi w studniach kwantowych, nazywamy polarytonami ekscytonowymi. Warto zauważyć, że termin polaryton wprowadzony został przez Hopfielda i określał mod niesprężony. Dopiero w pracach ukazujących się później ten termin zaczęto używać dla określenia modów sprzężonych pola elektromagnetycznego i np.: ekscytonów. Wynikiem sprzężenia jest powstanie dwóch nowych modów, (tzw. górnego i dolnego), współdzielących właściwości obu swoich komponentów<sup>3</sup>. Polarytony ekscytonowe dziedziczą małe masy efektywne od części fotonowej (około cztery rzędy wielkości mniejsze od masy swobodnego elektronu) i mają możliwość oddziaływać – co pochodzi z kolei od składnika ekscytonowego. W 2006 roku J. Kasprzak i M. Richard<sup>4</sup> pokazali, że polarytony przy dużych gęstościach przechodzą do nowego stanu kwantowego: kondensatu, analogicznego do kondensatu Bosego-Einsteina znanego głównie z fizyki atomowej. Ten stan kwantowy został przewidziany przez A. Einsteina już w latach dwudziestych XX wieku. Einstein zainspirowany pracami S. N. Bosego pokazał, że możliwe są makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego i całkowita nierozróżnialność cząstek w niskich temperaturach. Przez bardzo długi czas obserwacja tej degeneracji kwantowej była zarezerwowana tylko dla gazu atomów w bardzo niskich temperaturach. Jednak, kondensacja polarytonów ekscytonowych obecnie jest obserwowana również w temperaturze pokojowej<sup>5</sup>, co

---

<sup>1</sup> S. J. Pekar, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 6, 785 (1958); 38, 1786 (1960)

<sup>2</sup> J. J. Hopfield, Phys. Rev. 112, 1555 (1958)

<sup>3</sup> C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Phys. Rev. Lett. 69, 3314 (1992)

<sup>4</sup> J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, R. André, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud, Le Si Dang, Nature 443, 409 (2006)

<sup>5</sup> S. Christopoulos, G. Baldassarri, Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. G. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean. Phys. Rev. Lett. 98, 126405 (2007), J. J. Baumberg, A. V. Kavokin,

otworzyło ogromne możliwości badania tego posiadającego bardzo interesujące właściwości stanu kwantowego. Jednak w odróżnieniu od układu zimnych gazów atomowych w przypadku polarytonów ekscytonowych mamy do czynienia z układem, który nie jest w równowadze termodynamicznej z prozaicznego powodu związanego z ich krótkim czasem życia, co wymusza konieczność ciągłego pompowania czyli dostarczania nowych cząstek.

Badanie właściwości kondensatu polarytonów ekscytonowych wymaga powiązania pojęć z wielu dziedzin jakimi są fizyka materii skondensowanej, fizyka statystyczna oraz optyka kwantowa. Zaś złożoność opisywanego układu wymusza pewne uproszczenia. Jednym z takich istotnych uproszczeń jest zastosowanie przybliżenia średniego pola i wykorzystanie równania Grossa-Pitaiewskiego, do którego dodano składniki odpowiedzialne za pompowanie optyczne oraz dysypację. Ze względu na swoją nieliniową naturę kondensaty polarytonów ekscytonowych pozwalają na obserwację wielu efektów nieliniowych takich jak oscylacje Josephsona, fale solitonowe oraz zjawisko bistabilności. Unikalne własności kondensatów polarytonów ekscytonowych powodują, że tworzą one doskonały fundament do przyszłych zastosowań w zintegrowanej nanofotonice oraz do badań nad nierównowagowymi układami koherentnymi. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w zaprezentowanych w recenzowanej pracy wynikach badań udowodniono, że polarytony ekscytonowe można wykorzystać również do realizacji tak zwanych neuromorficznych układów obliczeniowych. A to z kolei prowadzi do otwarcia zupełnie nowej dziedziny badań.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 174 strony, włączywszy bardzo obszerną bibliografię. Przedstawiona praca zawiera streszczenie (w języku polskim i angielskim), 4 części (w języku angielskim) podzielone na 9 rozdziałów, przy czym do części (I) należą rozdziały: od 1 do 4; do części (II) – rozdział: 5; do części (III) należą rozdziały: od 6 do 9, przy czym 8 rozdział w części (III) stanowi podsumowanie, 9 rozdział w części (III) zawiera artykuły na których praca została oparta oraz oświadczenia autorów o ich wkładzie do tych prac. Część (IV) stanowi bibliografię.

Warto w tym miejscu podkreślić, jaki wkład do tych publikacji wniósł mgr inż. Andrzej Opala: (a) wkład do prac opublikowanej w Phys. Rev. B 97, 155304 (2018) oraz Phys. Rev. B 98, 195312 (2018) polegał na zaproponowaniu ogólnej koncepcji badań, wykonaniu wszystkich obliczeń analitycznych i symulacji numerycznych, opracowaniu wyników, przygotowaniu rysunków oraz udziale w pisaniu manuskryptu; (b) wkład do pracy opublikowanej w Phys. Rev. Applied 11, 064029 (2019) polegał na wykonaniu wszystkich symulacji numerycznych w głównej części pracy, interpretacji wyników, przygotowaniu rysunków oraz udziale w pisaniu manuskryptu; (c) wkład do pracy opublikowanej w Nano Lett. 20, 3506-3512 (2020) polegał na przeprowadzeniu wstępnej analizy numerycznej w celu określenia optymalnej architektury sieci eksperymentalnej, projektowaniu i pisaniu kodów, które były używane do generowania danych wejściowych i analizowania wyników, oraz uczestniczeniu w interpretacji wyników i pisaniu manuskryptu; (d) wkład do pracy opublikowanej w Nano Lett. 21, 3715-3520 (2021) polegał na zaprojektowaniu architektury sieci neuronowej, wykonaniu symulacji numerycznych badanej sieci neuronowej, analizie danych eksperymentalnych, i udziale w interpretacji wyników.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej rozważano dwa główne tematy badawcze: (1) teoretyczny opis nieliniowej dynamiki kondensatu polarytonów ekscytonowych i (2) zastosowanie nieliniowej dynamiki polarytonów ekscytonowych w realizacji neuromorficznych układów obliczeniowych. W części pierwszej autor rozprawy wprowadza do tematyki swoich badań. W części drugiej autor wprowadza do projektowania układów obliczeniowych inspirowanych strukturą

---

S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltin, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Phys. Rev. Lett. 101, 136409 (2008).

ludzkiego mózgu. W tej części pojawia się próba wyjaśnienia pojęć sztucznego neuronu i sztucznych sieci neuronowych. Kolejna część jest poświęcona uzyskanym результатам i stanowi zasadniczą część pracy.

Pierwszym tematem badawczym pracy był teoretyczny opis nieliniowej dynamiki kondensatu polarytonów. Ta część opiera się na wynikach, które zawarte zostały w pracach Phys. Rev. B 97, 155304 (2018) oraz Phys. Rev. B 98, 195312 (2018). Opisano dynamikę ciemnych solitonów w quasi-jednowymiarowym, nierezonansowo pompowanym kondensacie polarytonów ekscytonowych. W pracy rozpatrzono ciąg ciemnych solitonów generowanych przez dodatkowy potencjał, który wytworzony może być poprzez dynamiczny efekt Starka. Zarówno proces tworzenia solitonu, jak i jego dynamika zostały analizowane z różnymi parametrami fizycznymi. Następnie wyznaczono numerycznie warunki konieczne do powstania solitonu oraz porównano je z analitycznym warunkiem stabilności kondensatu polarytonowego. Dodatkowo, wyznaczono analityczną postać trajektorii solitonów w przybliżeniu wariacyjnym, która okazuje się bardzo dokładnie odtwarzać wyniki numeryczne. Ostateczne wyrażenia są identyczne z tymi które otrzymano metodą perturbacyjną. Wyprowadzenie w ramach podejścia wariacyjnego jest bardziej czytelne. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że: (a) częstość emisji solitonów zależy od parametrów układu, takich jak moc pompowania, która optymalnie powinna być dobrana w pobliżu progu kondensacji; (b) nie jest możliwe zaobserwowanie stabilnych solitonów w układzie, w którym kondensat przepływa obok stacjonarnego defektu, ponieważ sam kondensat staje się niestabilny w tej konfiguracji; (c) emisja solitonów była związana z oscylacjami siły oporu. Uzyskane wyniki pozwoliły określić ewolucję nieliniowych wzbudzeń generowanych w kondensacie. Ponadto, warto zwrócić uwagę, że przedstawiona teoria może być wykorzystana do badania topologicznego kryształu Wignera solitonów w spinorowym kondensacie Bosego-Einsteina. Dodatkowo Autor stwierdza, że rozważana dynamika ciemnych solitonów może w przyszłości zostać zastosowana w ultraszybkim przesyłaniu informacji. Mam do tej części dwa pytania, na które liczę, że Doktorant odpowie na obronie: (a) czy należy się spodziewać że, prędkość krytyczna, powyżej której generowane są solitony, jest związana z prędkością dźwięku w płynie polarytonowym; (b) czy można oszacować wartość takiej prędkości, bądź wyznaczyć analityczne wyrażenia w funkcji parametrów układu? W tej części rozprawy brakuje mi szerszej dyskusji na temat generowania ciemnych solitonów oraz głębszego odniesienia się do rozważań na ich temat w dotychczas znanej literaturze.

Kolejna porcja wyników oparta jest na pracy Phys. Rev. B 98, 195312 (2018) i dotyczy badań oscylacji relaksacyjnych w kondensacie polarytonów ekscytonowych. Ten typ nieliniowej dynamiki polarytonów wynika z procesów wielopoziomowej relaksacji wysokoenergetycznych nośników rozpraszających się do kondensatu. Autor pracy stwierdza, że to zjawisko może znaleźć zastosowanie w projektowaniu nowych koherentnych emiterów światła działających w sposób impulsowy. Wyniki przedstawionych badań odpowiadają na istotne pytania dotyczące dynamiki kondensatu polarytonów ekscytonowych. Rezultaty w tej części pracy zostały uzyskane w wyniku modelowania takiego kondensatu zasilanego przez dwa rezerwuary wysokoenergetycznych cząstek. Szczegółowo została zbadana topologia trajektorii w przestrzeni fazowej. W zależności od parametrów układu, przedstawiono kilka możliwych zachowań dotyczących dynamiki kondensatu takich jak: szybka stabilizacja, powolne oscylacje i emisja ultrakrótkich impulsów. Najważniejszym wynikiem tej części pracy było wyznaczenie analitycznego warunku na wystąpienie oscylacji relaksacyjnej. Ten rezultat potwierdzają zarówno symulacje numeryczne jak i wcześniejsze obserwacje eksperymentalne. Następnie Autor wykazał teoretycznie (numerycznie), że oscylacje relaksacyjne kondensatu polarytonów ekscytonowych powinny być obserwowalne głównie w mikrownękach niskiej jakości tj. takich w których czas życia ekscytonów jest o wiele większy niż czas życia fotonów. Ponadto, Autor pracy wykazał, że istnienie rezerwuaru gorących nośników jest niezbędne do wyjaśnienia zjawiska

oscylacji relaksacyjnych w kondensacie wzbudzonym krótkim impulsem laserowym, tj konieczne jest użycie modelu z dwustopniową relaksacją. Do tej części pracy mam również dwa pytania: (a) ponieważ jednym z wyników pracy jest fakt że oscylacje relaksacyjne powinny być widoczne w mikrowędkach o niskiej jakości, to w jaki sposób mógłby wtedy zaistnieć kondensat polarytonów ekscytonowych? (b) Czym kierowano się przy wyborze wartości parametrów użytych w obliczeniach i jak ich zmiana wpłynęłaby na ostateczne wnioski?

Kolejne zaprezentowane rezultaty są związane z drugim tematem badawczym rozprawy, który dotyczył wykorzystania nieliniowej dynamiki polarytonów ekscytonowych do projektowania układów obliczeniowych inspirowanych strukturą ludzkiego mózgu. Ta część opiera się na wynikach które zawarte zostały w pracach Phys. Rev. Applied 11, 064029 (2019), Nano Lett. 20, 3506-3512 (2020) oraz Nano Lett. 21, 3715-3520 (2021). Jak wiadomo, istotnym globalnym problemem jest ominięcie pewnego rodzaju kryzysu powodowanego ograniczonym rozwojem współczesnej elektroniki, i związanego się z końcem stosowalności prawa Moore'a. Nowoczesne metody obliczeniowe, dla których inspiracją stały się układy biologiczne, wychodzą poza schemat stosowanej dotychczas architektury obliczeniowej. I to one mogą okazać się sposobem pozwalającym na dalszy rozwój technologii obliczeniowych. Jak udało się dotychczas pokazać, jednym z kierunków badań jest stosowanie układów neuromorficznych, które byłyby, potencjalnie, ultraszybkie oraz energooszczędne. W pracach zostało pokazane, że sieć sprzężonych kondensatów polarytonów ekscytonowych uwięzionych w mikrofilarach półprzewodnikowych jest efektywną platformą do realizacji obliczeń rezerwuarowych. Należy zaznaczyć, że obliczenia rezerwuarowe to nowy trend realizacji obliczeń neuromorficznych. W pracy Phys. Rev. Applied 11, 064029 (2019) zaproponowano koncepcję obliczeń na siatce słabo sprzężonych kondensatów polarytonowych, opisanych równaniem Ginzburga-Landaua. Ponadto, przedstawiono połączenie unikalnych właściwości kondensatu polarytonów ekscytonowych z inspirowanym biologicznie schematem obliczeniowym. Dodatkowo, pokazano, że sieci sprzężonych kondensatów polarytonów ekscytonowych uwięzionych w mikrofilarach półprzewodnikowych oferują możliwość wykonywania obliczeń z dużą szybkością przetwarzania sygnałów. Można to osiągnąć dzięki olbrzymiej optycznej nieliniowości zachodzącej w pikosekundowej skali czasowej. Warto nadmienić, że w obu mawianych artykułach w Nano Letters przedstawiono także pierwszą eksperymentalną implementację polarytonowych sieci neuronowych. W wyniku tych badań wykazano, że wydajność polarytonowych sieci neuronowych może być konkurencyjna lub lepsza od najnowocześniejszych sprzętowych implementacji sieci neuronowych. Do tej części pracy mam kolejne dwa pytania: (a) czy możemy wyobrazić sobie architekturę neuromorficzną, która może pozwolić układowi węzłów kwantowych na realizację obliczeń kwantowych? (b) Sztuczna sieć neuronowa, tak jak układy biologiczne, składa się z neuronów. Oczywiście neurony połączone są ze sobą wzajemnie, a ich układy mogą również tworzyć warstwy. Przyjmując odpowiednie wagi pomiędzy połączeniami poszczególnych warstw możemy „nauczyć” taką sieć różnych czynności. W jaki sposób wybierać te wagi?

W ogólności należy stwierdzić, że przedstawiona rozprawa zawiera ciekawe i wartościowe naukowo wyniki i zdecydowanie oryginalne w skali międzynarodowej. Praca napisana jest jednak bardzo nierówno, tak jakby Autor poszczególne części pisał w bardzo dużych odstępach czasu albo przykładał do nich nierównomierną wagę. Po zapoznaniu się ze streszczeniem z entuzjazmem rozpocząłem czytanie rozprawy. Jednak niestety jej pierwsza część mnie zawiodła. Jest napisana tak, że raczej nie zachęciłaby młodszych adeptów nauki do podjęcia badań w przedmiocie niniejszego doktoratu. Miałem nadzieję, że przeczytanie tego rozdziału pozwoli czytelnikowi poznać tematykę kondensatu polarytonów ekscytonowych. A okazało się, że przeczytałem wprowadzenie skrótowe, niekompletne, i w niektórych miejscach niezrozumiałe (przykłady podaję poniżej). Podobne wrażenie można mieć po przeczytaniu części III, w której zostały opisane wyniki. Praca zyskałaby bardzo gdyby Autor z podobną pasją z jaką musiał prowadzić te badania, przedstawił i omówił wszystkie osiągnięte

rezultaty – bo przecież to jest rozprawa doktorska. Ale jeśli uznać, że przedłożona rozprawa nie ma formę klasycznej, zwartej rozprawy, wówczas można znacznie łagodniej potraktować moją powyższą uwagę. Same wyniki są imponujące, o dużym ciężarze ilościowym i jakościowym. Wymagały od Autora zrozumienia wielu aspektów dotyczących fizyki materii skondensowanej, optyki i współczesnego podejścia do uczenia maszynowego. Dojrzałość naukowa Doktoranta jest dodatkowo wsparta współautorstwem w 10 artykułach w czasopismach (baza *Web of Science*) wysokiej rangi w skali międzynarodowej. Istotnym elementem dotychczasowego dorobku Pana Opali jest również to, że był kierownikiem grantu Etiuda Narodowego Centrum Nauki, co również świadczy o osiągnięciu właściwego stopnia dojrzałości zawodowej i niezależności naukowej. Dlatego też moja sumaryczna ocena wyników pracy mgr. inż. Andrzeja Opali jest bardzo pozytywna. Istotnym walorem rozprawy jest fakt, że zaproponowane obliczenia rezerwurowe w architekturze polarytonowej stanowią całkowicie nowy kierunek badań. Wyniki dotyczące symulacji komputerowych, stały się podstawą do pierwszych eksperymentalnych realizacji polarytonowych sieci neuronowych. Wartym podkreślenia jest w tym miejscu fakt, że dzięki temu Pan mgr inż. Andrzej Opala nauczył się sposobu współpracy z grupami eksperymentalnymi.

Praca doktorska mgr. inż. Andrzeja Opali jest w ogólności napisana poprawnie. Autor nie ustrzegł się jednak kilku niejasności czy niedomówień, które nasuwają następujące pytania:

1. Dlaczego tytuł 1 rozdziału brzmi: „When light interacts with matter” kiedy autor po prostu m.in. charakteryzuje elektrony, dziury, ekscytony, przejścia optyczne, nanostruktury półprzewodnikowe?
2. W równaniu (1.32) mamy symbol  $m_c^*$  a w linijce poniżej tego równania autor opisuje symbol  $m_c$  ?
3. Czy równanie (4.7) jest poprawnie zapisane?
4. Podpis pod rysunkiem (6.3) jest nieprecyzyjny – na rysunku brakuje oznaczeń (a), (b).
5. Dla czytelnika jest to dzieło „wymagające” ze względu na niełatwe ułożenia kolejności wątków pojawiających się w pracy, np.: o pierwszym temacie badawczym i jego realizacji dowiadujemy się ze stron: 8, 12, 46-51, 63-73 oraz 84-85; podobnie jeśli chodzi o drugi temat badawczy.

Uwagi krytyczne jednak nie zmieniają mojej bardzo wysokiej oceny całej rozprawy. Zawiera ona zdecydowanie wartościowe wyniki badań, które wnoszą do dziedziny nowe i istotne informacje na temat nieliniowej dynamiki kondensatu polarytonów ekscytonowych oraz zastosowania nieliniowej dynamiki kondensatu polarytonów ekscytonowych do realizacji neuromorficznych układów obliczeniowych. Dysertacja wnosi istotny wkład do tego obszaru fizyki i spełnia wszystkie zarówno zwyczajowe jak i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim, dlatego też zwracam się do Rady Naukowej Instytutu Fizyki PAN z wnioskiem o dopuszczenie mgr. inż. Andrzeja Opali do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto uważam, że z powodu dużej wartości naukowej uzyskanych rezultatów, opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach, rozprawa ta zasługuje na wyróżnienie, o co wnioskuję do Rady Naukowej.

  
Krzysztof Ryczko