



Center for Theoretical Physics
Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Warszawa, 12 sierpnia 2021 r.

dr hab. Krzysztof Pawłowski, prof. CFT
pawlowski@cft.edu.pl
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Andrzej Opali na temat
"Complex dynamics of nonlinear modes of an exciton-polariton condensate"

Rozprawa doktorska Pana mgr. Andrzeja Opali dotyczy wzbudzeń w półprzewodnikach, powstających na skutek oddziaływania między elektronami, dziurami i fotonami. Wzbudzenia te, zwane polarytonami ekscytonowymi, zanikają w czasie krótszym niż nanosekunda. Pomimo tak krótkiego czasu życia, możliwe jest jednak otrzymanie interesujących efektów w gazie polarytonów, nawet przejście fazowe do kondensatu Bosego-Einsteina. Wymaga to ciągłego tworzenia nowych wzbudzeń. Pan mgr. Andrzej Opala badał nieliniowe zjawiska zachodzące w tym układzie oraz zastosowanie efektów nieliniowych do uczenia maszynowego. Badania miały charakter teoretyczny, ale były to rozważania realistyczne. Niektóre z rezultatów przełożyły się na zakończone sukcesem doświadczenia.

Napisana po angielsku rozprawa składa się z opisu badań, zestawu publikacji stanowiących podstawę rozprawy oraz oświadczeń autora i współautorów, w których zadeklarowali swoje wkłady w publikacje. Opis na pierwszych 86 stronach wprowadza czytelnika w temat polarytonów ekscytonowych i uczenia maszynowego wraz z krótkim opisem najważniejszych wyników. Autor rozprawy klarownie przedstawił własności półprzewodników, tworzenie wzbudzeń oraz modele używane do opisu polarytonów. Zastanawia mnie jednak dlaczego ekscytony są zawsze traktowane jakby były w stanie podstawowym jeśli chodzi o wewnętrzne stopnie swobody. Nie jest też wytłumaczone pominięcie w Hamiltonianie (2.1) sprzężenia między ekscytonami i fotonami o różnych pędach. Z obowiązku muszę wskazać drobne błędy edytorskie w opisie. W tekście można dopatrzeć się wielu literówek. Notacja nie zawsze jest spójna. W referencjach zdarza się, że nazwisko „Einstein” pisane jest małą literą.

Po opisie autor przytoczył 5 publikacji stanowiących podstawę rozprawy. W trzech z nich jest pierwszym autorem. Wszystkie publikacje ukazały się w prestiżowych czasopismach naukowych.

Pierwsza z publikacji dotyczy solitonów w spójnej chmurze polarytonów ekscytonowych. Analogiczne solitony, rozumiane tutaj jako trwałe, nierozpływające się fale, są bardzo dobrze zbadane w chmurach ultrazimnych gazów schłodzonych do stanu kondensatu Bosego-Einsteina. Jednak standardowa technika tworzenia solitonów w chmurach atomów, poprzez tzw. „nadruk fazy”, jest trudna do powtórzenia w przypadku kondensatu polarytonowego. Autor rozprawy



Center for Theoretical Physics
Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

z badał alternatywne rozwiązanie, odwołujące się do pojęcia nadciekłości. W duchu kryterium Landaua, niejednorodność poruszająca się w fazie nadciekłej z prędkością przewyższającą prędkość dźwięku, może generować w niej wzbudzenia. Okazuje się, że jest to skuteczna metoda tworzenia solitonów w kondensacie polarytonowym, które jednak zanikają, zapewne w związku z szybką dyssypacją energii w układzie. Autor dogłębnie zrozumiał układ. Był w stanie poprzez szereg dobrze uzasadnionych przybliżeń uzyskać wyniki analityczne, przekonująco zinterpretować dynamikę kondensatu polarytonowego z solitonami i podać kryteria, w których efekty mają największe szanse na uwidocznienie. Rezultaty symulacji są dla mnie zaskakujące, gdyż w kondensatach atomowych w pierwszej kolejności powstałyby fonony, a nie ciemne solitony, które wymagają większego nakładu energii. Nie jest też dla mnie zupełnie jasne, czy w takiej metodzie można wytworzyć doskonale czarne solitony, z gęstością polarytonów wynoszącą zero w środku solitonu.

Autor kontynuuje badanie zjawisk nieliniowych w problemie relaksacji oscylacji kondensatu. Wprowadzony jest skomplikowany model, który w mojej ocenie nie został wyczerpująco opisany w rozprawie. Wzbudzenia spoza kondensatu podzielone są na dwa typy, tworzące „aktywne” i „pasywne” otoczenia. Opis matematyczny, wyrażony za pomocą trzech fenomenologicznych i nieliniowych równań różniczkowych jest trudny w interpretacji, ale autor podaje możliwe wyjaśnienia. W pracy klasyfikowano typy dynamiki poprzez analizę portretów fazowych i typów punktów stałych. Według mnie ta publikacja nie została tak dobrze opisana jak pozostałe.

Pozostałe trzy prace dotyczą zastosowań efektów nieliniowych w uczeniu maszynowym z wykorzystaniem otoczenia (ang. "reservoir computing"). W tym algorytmie efekty nieliniowe zachodzące w otoczeniu mają tak przekształcać dane wejściowe, aby można je było potem łatwo klasyfikować. Układ nieliniowy dokonujący przekształceń, jest stały, a uczenie maszynowe dotyczy właściwie tylko ostatecznego odwzorowania danych z sygnału emitowanego przez otoczenie. W pracy teoretycznej (Physical Review Applied 11, 064029 (2019)), autorzy zaproponowali wykorzystanie do tej metody kondensatu polarytonów jako nieliniowego otoczenia. Poprzez symulacje numeryczne pokazano, że jest to układ fizyczny o kilku pożądanym własnościach, m.in. bardzo szybkim przetwarzaniu sygnału (odpowiadającym taktowaniu THz). Wyniki były inspiracją do dwóch projektów realizowanych z grupami doświadczalnymi, w których, po różnych modyfikacjach zrealizowano ogólną ideę. Oba projekty, z których jeden był realizowany w Warszawie, zakończone zostały sukcesem, a wyniki opublikowano w artykułach w czasopiśmie Nano Letters. Obie publikacje przeczytałem z dużym zaciekawieniem. W obu projektach różne sygnały (obrazy, dźwięki, dane numeryczne) są przetwarzane na sygnał optyczny, który wzbudza kondensat polarytonowy. W gazie polarytonowym, pełniącym rolę otoczenia, zachodzi skomplikowana nieliniowa dynamika. Okazuje się, że sygnał świetlny, emitowany ciągle przez próbkę z polarytonami, silnie zależy od stanu początkowego układu i pozwala automatycznie i skutecznie klasyfikować sygnały wejściowe. W jednej, „warszawskiej”, implementacji rozbudowano część optyczną, dzięki czemu układ stanowi szybką jednostką obliczeniową. Osiągnięte wyniki są na frocie światowych badań. Pod wieloma względami układ przewyższa alternatywne rozwiązania. Na tym etapie ciężko powiedzieć, czy prace te okażą się przełomowe w dziedzinie, ale mają do tego potencjał.

