

prof. dr hab. Mirosław Brewczyk  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet w Białymstoku  
Białystok

Białystok, 8 lutego 2018 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr Oksany Voronych pt.  
„Exciton-polariton X waves in a microcavity”**

Praca doktorska pani mgr Oksany Voronych zawiera wyniki badań wykonanych przez doktorantkę pod kierunkiem dr hab. Magdaleny Stobińskiej oraz promotora pomocniczego dr. Adama Buraczewskiego. Napisana jest w języku angielskim, składa się ze streszczenia (również w języku polskim), czterech rozdziałów oraz podsumowania. Całość liczy 70 stron. Spis literatury obejmuje około 150 pozycji. Do pracy dołączone zostały kserokopie artykułów, które stanowią podstawę rozprawy doktorskiej. Rozprawa oparta jest na wynikach zawartych w trzech artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. W dwóch z nich mgr O. Voronych jest pierwszym autorem.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr O. Voronych bada własności fal X w cieczy polarytonów ekscytonowych wytworzonych w półprzewodnikowych mikrownękach optycznych. Tego typu ciecze polarytonowe badane są już od dłuższego czasu, w szczególności zaobserwowane zostało zjawisko kondensacji Bosego-Einsteina polarytonów. Ze względu na małą masę polarytonu kondensacja następuje w wysokiej temperaturze, nawet w temperaturze pokojowej. Ponieważ ekscytony oddziałują ze sobą, oddziałują również polarytony. To umożliwi wytworzenie fazy nadciekłej cieczy polarytonowo-ekscytonowej. Wysokie temperatury, z jakimi mamy tu do czynienia, dają nadzieję na budowę bardzo praktycznych urządzeń optoelektronicznych opartych na polarytonach.

Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej mgr. O. Voronych skojarzone są z kolejnymi artykułami włączonymi do rozprawy. I tak, w drugim rozdziale dyskutowane są wyniki zawarte w artykule „Exciton-polariton localized wave packets in a microcavity” opublikowanym w Physical Review B. W tym artykule przedstawiona jest idea wytworzenia fal X w nadciekłym układzie polarytonowo-ekscytonowym, w szczególności udowodniona została możliwość uzyskania takich fal startując z gaussowskiego rozkładu gęstości cieczy polarytonowej. W rozdziale trzecim omówione zostały szczegóły numerycznej metody użytej do rozwiązania układu równań opisujących nadciekły układ polarytonów ekscytonowych. Szczegóły te zostały opublikowane w czasopiśmie Computer Physics Communications w artykule zatytułowanym „Numerical modeling of exciton-polariton Bose-Einstein condensate in a microcavity”. Natomiast w ostatnim rozdziale opisany został eksperyment, w którym po raz pierwszy zademonstrowano możliwość wytworzenia fal X w nadciekłym układzie polarytonowym. W ten sposób pomysł generowania fal X zaproponowany w drugim rozdziale (praca wydrukowana w Physical Review B) został pozytywnie zweryfikowany. Wyniki eksperymentu zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie: Light: Science & Applications w artykule „Superluminal X waves in a polariton quantum fluid”.

Niewątpliwie, przedstawione w rozprawie doktorskiej trzy publikacje stanowią zwartą całość: w pierwszej z nich opisany został pomysł wytworzenia fal X w cieczy polarytonowej,

w drugiej przedstawiono szczegóły rachunku numerycznego potwierdzającego powyższą ideę, a w ostatniej postawiona została „kropka nad i” – istnienie fal X w cieczy polarytonowej zostało potwierdzone eksperymentalnie. W zasadzie, trudno sobie wyobrazić bardziej kompletną rozprawę doktorską.

Bardzo przyjemnie czyta się rozdział pierwszy rozprawy, w którym podano szereg podstawowych informacji związanych z tematyką przedstawionej pracy doktorskiej. W kolejnych podrozdziałach Autorka opisuje szczegółowo półprzewodnikową mikrownękę oraz omawia przybliżenia stosowane w opisie ekscytonów. W części trzeciej wstępu podany zostaje hamiltonian polarytonu – kwazicząstki złożonej z fotonu i ekscytonu, w którym oddziaływanie ze światłem opisane jest w przybliżeniu dipolowym. W wersji kwantowej hamiltonian ten przypomina znany z optyki kwantowej hamiltonian Jaynesa-Cummingsa. Jego diagonalizacja prowadzi do dwóch typów modów. Krzywa dyspersyjna modu polarytonowego o niższej energii ma szereg istotnych własności. W szczególności, znajduje się na niej punkt przegięcia co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia generowania fal X w cieczy polarytonowej. W kolejnym podrozdziale Autorka wprowadza nas w świat bezdyfrakcyjnych pakietów falowych przedstawiając pokrótce historię odkryć związanych z wiązkami i impulsami falowymi propagującymi się prawie bezdyspersyjnie. W szczególności, dowiadujemy się o zlokalizowanych pakietach w postaci wiązek Bessela i fal X i o różnicach między nimi. W przeciwieństwie do innych zlokalizowanych pakietów jakimi są solitony, wiązki Bessela i fale X nie wymagają występowania efektów nieliniowych. To, według Autorki, pozwala na szersze praktyczne zastosowania fal X.

W rozdziale drugim mgr O. Voronych szczegółowo opisuje ideę wytworzenia fal X w nadciekłym układzie polarytonów ekscytonowych. W pierwszym kroku przedstawiona jest uproszczona analiza oparta o równanie (2.1). Jest to równanie typu równania Grossa-Pitajewskiego, które pojawia się np. w fizyce bardzo zimnych gazów bozonowych. Ewolucja funkcji falowej polarytonu (chwilowo zapominamy o jego złożonej naturze) jest rządzona właśnie tym równaniem. Jednakże (2.1) istotnie różni się od równania Grossa-Pitajewskiego. Jest ono równaniem typu hiperbolicznego. Niestety, z rozprawy nie dowiadujemy się skąd bierze się równanie (2.1). Artykuł opublikowany w Physical Review B podaje stosowny odnośnik literaturowy. Moim zdaniem, warto byłoby włączyć dyskusję wzoru (2.1) do rozprawy. Fakt, że (2.1) jest równaniem typu hiperbolicznego pozwala znaleźć rozwiązania stacjonarne mające postać fali X. Rzeczywiście, rysunki 7 a) i b) pokazują, że fala X zachowuje swój kształt (zarówno w przestrzeni położeń jak i w przestrzeni pędów) podczas ewolucji w przypadku braku oddziaływań między polarytonami. Jednocześnie, rysunki 7 c) i d) przekonują nas, że stan gaussowski ulega rozmyciu. Jednakże, gdy włączymy oddziaływanie między polarytonami, ewolucja stanu gaussowskiego zgodna z równaniem (2.1) prowadzi do powstania fali X. Fakt, że fale X powstają spontanicznie z początkowego stanu gaussowskiego (znany wcześniej z optyki nieliniowej) jest kluczową własnością badanego układu nieliniowego, gdyż znakomicie ułatwia eksperymentalną obserwację fal X. Rysunek 8 przedstawia wynik odpowiedniej symulacji numerycznej. Trochę razi mnie jakość tego rysunku, jego części b). Autorka tłumaczy, że jakość tę można poprawić np. zmniejszając krok czasowy w metodzie Rungego-Kutty użytej do rozwiązania równania (2.1). W zasadzie, należało tak właśnie zrobić i zamieścić dobrą wersję rysunku 8 b) w rozprawie, tym bardziej, że rysunek 2 c) w opublikowanym artykule wygląda znakomicie.

W dalszej części rozdziału drugiego mgr O. Voronych bada dynamikę nadciekłego układu polarytonów ekscytonowych w oparciu o bardziej realistyczny opis. W związku z tym równanie (2.1) zastąpione jest układem równań typu równanie Grossa-Pitajewskiego.

Polaryton traktowany jest jak cząstka złożona a równania opisują ewolucję funkcji falowych fotonu i ekscytonu. Równania są sprzężone via oscylacje Rabięgo, uwzględniają także straty związane ze skończonym czasem życia fotonu i ekscytonu. Równania (2.5,6) różnią się jednak zasadniczo od równania (2.1). Tym razem znak drugich pochodnych przestrzennych występujących w (2.5) jest jednakowy. Nie ma zatem rozwiązań w postaci nieporuszającej się fali X. Można jednak znaleźć rozwiązania w postaci poruszającej się fali X (w przestrzeni pędów rozwiązania dalej są stacjonarne ale skupione wokół niezerowych pędów). Konstrukcja takich rozwiązań jest możliwa dzięki temu, że krzywa dyspersyjna polarytonów (jej dolna gałąź) posiada punkt przegięcia. A wtedy drugie pochodne energii (inaczej mówiąc masy efektywne) liczone w kierunku zadanego pędu i w kierunku do niego prostopadłym mają przeciwne znaki jeśli liczymy je dla wartości pędu przekraczającej wartość odpowiadającą punktowi przegięcia. Zgrabna analiza przedstawiona w rozprawie (i w artykule) przekonuje nas, że rzeczywiście fale X mogą istnieć w cieczy polarytonowej. Mgr O. Voronych wykazuje także, że podobnie jak w uproszczonej analizie, oddziaływania między polarytonami prowadzą do powstania fali X w przypadku, gdy stan początkowy jest stanem gaussowskim. Ta obserwacja znacznie upraszcza ewentualną eksperymentalną weryfikację podanych w tym rozdziale wyników (co miało miejsce jak dowiadujemy się z dalszej części rozprawy). Ważnym rezultatem z punktu widzenia zastosowań jest też możliwość propagacji fal X w reżimie liniowym co wyraźnie odróżnia je od solitonów.

W trzecim rozdziale mgr O. Voronych przedstawia szczegółowo metodę numeryczną, która została użyta do rozwiązania sprzężonego układu równań (2.5,6) opisującego nadciekły układ polarytonów ekscytonowych. Ewolucja czasowa funkcji falowych fotonu i ekscytonu znajdowana jest metodą Rungego-Kutty czwartego rzędu. Natomiast przestrzenne pochodne funkcji falowej fotonu obliczane są przy pomocy wzorów różnicowych opartych na pięciu punktach (w dwuwymiarowym przypadku). Można by się pewnie pokusić o zwiększenie dokładności obliczania tych pochodnych przez wykorzystanie transformaty Fouriera. Autorka porównuje szereg numerycznych metod, czas przykładowych obliczeń w przypadku metody Rungego-Kutty czwartego rzędu należy zdecydowanie do najkrótszych. Oczywiście, istnieją inne algorytmy pozwalające rozwiązywać równania typu równanie Grossa-Pitejewskiego. Np., metoda 'split operator'. Ciekaw jestem czy Autorka rozważała kiedykolwiek użycie tego algorytmu. 'Split operator' doskonale nadaje się do badania ewolucji układu spinorowego (patrz np. K. Gawryluk et al. w Int. J. Comput. Math., 2017). Moim zdaniem, metoda ta powinna również 'sprawdzić się' w przypadku ewolucji układu opisanej równaniami (2.5,6).


Warto dodać, że w artykule opublikowanym w Comp. Phys. Commun. możemy znaleźć nie tylko opis metody numerycznej i analizę jej dokładności lecz także dołączony pakiet programów napisanych w języku C++. Pakiet ten jest tak dobrze napisany, że okazuje się być pakietem użytecznym dla innych naukowców.

W ostatnim rozdziale mgr O. Voronych opisuje eksperyment, w którym po raz pierwszy zaobserwowano fale X w nadciekłym układzie polarytonów ekscytonowych. Eksperyment wykonany został w grupie prof. Daniele Sanvitto, badającej już od pewnego czasu ciecze polarytonowe. Mgr O. Voronych wykonała liczne symulacje komputerowe pracując z parametrami mikrownęki, która była w posiadaniu włoskiej grupy doświadczalnej. Celem tych rachunków było oczywiście znalezienie optymalnych wartości tych parametrów, które można łatwo zmieniać w eksperymencie: szerokości początkowego rozkładu gaussowskiego, wartości składowej równoległej wektora falowego czy też mocy wiązki laserowej. W szczególności, aby odtworzyć obserwowaną gęstość polarytonów, należało wprowadzić dodatkową fazę w początkowym stanie gaussowskim. Eksperyment pokazał, że rzeczywiście

fale X wyłaniają się spontanicznie z początkowego rozkładu gaussowskiego polarytonów i propagują się przez czas znacznie dłuższy niż czas życia polarytonów. Co więcej, i to jest oryginalna cecha fal X, wykazują prędkości nadświatłne. Wszystkie te obserwacje zostały potwierdzone w symulacjach mgr O. Voronych. Ciekawą obserwacją jest obecność skwantowanych wirów (dokładniej, par wir-antywir) w procesie formowania się fali X. Oczywiście, w układach dwuwymiarowych skwantowane wiry odgrywają często kluczową rolę (wspomnę choćby fazę BKT). Wydaje mi się, że ten aspekt nie został głęboko przedyskutowany i wymaga dalszych badań.

Na zakończenie chciałbym podkreślić, że praca doktorska mgr O. Voronych dotyczy bardzo aktualnej tematyki związanej z nierównowagowymi układami polarytonów ekscytonowych, układami o dużych potencjalnych zastosowaniach. Wyniki przedstawione przez mgr O. Voronych opublikowane zostały w międzynarodowych czasopismach o dużej renomie. Dodam jeszcze, że praca doktorska napisana jest niezwykle starannie. Znalazłem jedynie bardzo nieliczne błędy (np., związek pomiędzy składowymi wektora falowego pojawiający się w pierwszym akapicie strony 28).

Podsumowując, uważam, że przedstawiona praca doktorska spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pani mgr Oksany Voronych do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ze względu na jakość przedstawionych wyników oraz renomę czasopism, w których były one prezentowane, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Oksany Voronych.

  
Mirosław Brewczyk