

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. Aleksandra Ramaniuka pt.
„Nonlinear couple systems: effects of gain, loss and nonlocality”**

Praca doktorska pana mgr. Aleksandra Ramaniuka zawiera wyniki badań wykonanych przez doktoranta pod kierunkiem prof. dr. hab. Marka Trippenbacha. Napisana jest w języku angielskim, składa się z sześciu rozdziałów, podsumowania, listy rysunków oraz publikacji stanowiących podstawę pracy. Całość liczy 106 stron. Spis literatury obejmuje około 250 pozycji. Rozprawa oparta jest na wynikach zawartych w czterech artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. W dwóch z nich mgr A. Ramaniuk jest pierwszym autorem. W spisie artykułów stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej znajduje się również pozycja numer 5, praca będąca w przygotowaniu, w której pan A. Ramaniuk jest pierwszym autorem. Zapewne znajdą się w niej wyniki prezentowane w podrozdziale „Trajectory bending in vector supermode solitons”, nie widzę jednak tej pracy na serwerze arXiv. Mgr A. Ramaniuk dołącza do rozprawy listę sześciu artykułów, których jest współautorem, opublikowanych w trakcie studiów doktoranckich. Dorobek publikacyjny pana A. Ramaniuka to w sumie dziesięć prac i jest to pokaźny dorobek na tym etapie rozwoju naukowego.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr A. Ramaniuk bada własności rozwiązań solitonowych w sprzężonych układach nieliniowych, również w obecności pompowania i strat. Analizowane są planarne domieszkowane falowody z modulowaną nieliniowością, polarytonowo-ekscytonowe kondensaty oraz ciekłe kryształy w fazie nematycznej. Z badań tych wyłania się ciekawy obraz znalezionych struktur nieliniowych, w ośrodkach niezachowawczych pojawiają się wektorowe solitony a w ośrodkach z nielokalną optyczną nieliniowością złożone, „wielopikowe” solitony. Obserwowane są dynamiczne efekty takie jak spontaniczne powstawanie wirów, spontaniczne łamanie symetrii, zachowanie chaotyczne, czy też ugięcie trajektorii solitonów.

W pierwszym rozdziale Autor rozprawy przekonuje nas, że otaczający nas świat jest pełen zjawisk nieliniowych i przedstawia krótki wstęp do optyki nieliniowej. Pojawia się tu równanie (nieliniowe równanie Schrödingera), którego solitonowe rozwiązania znaleźli w latach siedemdziesiątych Zakharov i Shabat. Próba zapisania tego równania w przypadku atomów (zimnych) obsadzających ten sam stan kwantowy (w tym przypadku nazywanego równaniem Grossa-Pitaevskiego) jest kompletnie nieudana. W krótkim drugim rozdziale pan A. Ramaniuk przedstawia szereg wyników dotyczących teorii solitonów w sprzężonych układach nieliniowych, włączając w to dyskusję całek ruchu oraz analizę stabilności. W trzecim rozdziale, z kolei, Autor opisuje metody numeryczne, których używa do rozwiązywania układów równań nieliniowych, do znajdowania stanów solitonowych oraz do badania ich ewolucji.

Dalsze rozdziały rozprawy doktorskiej mgr. A. Ramaniuka skojarzone są z kolejnymi artykułami włączonymi do rozprawy. I tak, w czwartym rozdziale, diskutowane są wyniki zawarte w artykule „Symmetry Breakings in Dual-Core Systems with Double-Spot Localization of Nonlinearity” opublikowanym w *Symmetry*. W artykule tym analizowany jest liniowo sprzężony układ dwóch planarnych falowodów z wbudowanymi lokalnymi domieszkami prowadzącymi do optycznej nieliniowości. Zakłada się, że układ jest zachowawczy. Od strony matematycznej tak sprzężone falowody opisujemy dwoma równaniami, w których współczynnik odpowiadający za nieliniowość jest funkcją położenia. W pierwszym przybliżeniu, zakładając silną lokalizację obszarów odpowiedzialnych za nieliniowość, współczynnik ten przybliżony został sumą dwóch funkcji delta Diraca. Możliwa jest dalsza ścisła analiza problemu, Autor znajduje stacjonarne rozwiązania układu równań. Okazuje się, że jest wiele typów rozwiązań różniących się między sobą tym, że rozwiązania te zachowują bądź nie zachowują jedną lub obie z dwóch symetrii posiadanych przez układ. Po pierwsze, oba falowody są jednakowe, włączając w to położenie dwóch obszarów domieszkowych. Po drugie, obszary domieszkowe są identyczne co oznacza istnienie dodatkowej symetrii odbicia przestrzennego. Rys. 4.4 to diagram fazowy pokazujący obszary (wartości parametrów definiujących model), w których występują poszczególne typy rozwiązań. Wydaje mi się, że diagram fazowy nie jest poprawnie opisany. Dowiadujemy się z niego, że np. stany łamiące obie symetrie (fully asymmetric states) występują w obszarze oznaczonym kolorem czerwonym co nie zgadza się z opisem diagramu (Fig. 2) w pracy [165]. Rys. 4.3, z kolei, ilustruje wszystkie typy rozwiązań przyjmując wartości parametrów (potencjału chemicznego oraz stałej sprzężenia) odpowiednio -0.9 i 0.5. Wartości te, i tego trochę nie rozumiem, leżą zdecydowanie poza obszarem pokazanym na diagramie fazowym.

Okazuje się, że stany łamiące symetrie są niestabilne. Aby dostać stabilne stany niesymetryczne, Autor rozważa dwuwymiarowe uogólnienie diskutowanego modelu (opisane równaniem 4.34). Dwuwymiarowy model ma stabilne solitonowe rozwiązania – rozwiązania symetryczne, takie, w których jedna symetria jest łamana oraz takie, w których obie symetrie są łamane. Z części Author Contributions artykułu „Symmetry Breakings in Dual-Core Systems with Double-Spot Localization of Nonlinearity” dowiadujemy się, że pierwsi trzej współautorzy odpowiedzialni są za rachunki numeryczne. Nie jest dla mnie jasne którą część obliczeń numerycznych wykonał mgr A. Ramaniuk.

W rozdziałach piątym i szóstym mgr A. Ramaniuk rozważa układy niezachowawcze oraz układy z nielokalną nieliniowością. Przykładem układu niezachowawczego jest w tym przypadku kondensat polarytonów ekscytonowych wytworzony w półprzewodnikowej mikrowęcie optycznej. Tego typu ciecze polarytonowe badane są doświadczalnie i teoretycznie już od dłuższego czasu. Układy takie, ze względu na skończony czas życia polarytonów, muszą być układami otwartymi. Równanie opisujące kondensat polarytonów zawiera zatem człony odpowiadające pompowaniu oraz stratom. Mgr A. Ramaniuk rozważa sprzężony układ dwóch kondensatów polarytonów ekscytonowych w kształcie pierścienia. Istotną rolę w dalszej analizie odgrywa sprzężenie pomiędzy pierścieniami. W artykule „Modulational instability of coupled ring waveguides with linear gain and nonlinear loss” zakłada się, że sprzężenie jest stałe, niezależne od położenia. Rozwiązania stacjonarne w tym przypadku są dwójakiego rodzaju: symetryczne (lub antysymetryczne) oraz asymetryczne. Jakościowa różnica pomiędzy tymi rozwiązaniami jest taka, że w przypadku niesymetrycznym prąd pomiędzy pierścieniami jest różny od zera. Pojawienie się przepływu

między jednakowymi pierścieniami jest przykładem spontanicznego łamania symetrii. Przepływ obliczany jest ze wzoru (5.4), z jego prawej części. Brakuje mi paru słów uzasadniających tę postać wzoru, choćby odesłania czytelnika do Załącznika A.

Istotnym elementem dalszej analizy jest badanie stabilności stacjonarnych rozwiązań. Okazuje się, że antysymetryczne oraz asymetryczne rozwiązania są zawsze stabilne. Rozwiązania symetryczne są przeważnie niestabilne, małe zaburzenie tych stanów prowadzi do, jak się okazuje, interesującej dynamiki. Rozwiązania niestabilne ewoluują, zależnie od wartości parametrów, w kierunku stanów antysymetrycznych, asymetrycznych, rozwiązań niejednorodnych, rozwiązań niejednorodnych oscylujących w czasie bądź chaotycznych. Dynamika jest więc niezwykle bogata.

Artykuł „Vortex Creation without Stirring in Coupled Ring Resonators with Gain and Loss” opublikowany w *Symmetry* stanowi kontynuację badań sprzężonych kondensatów polarytonów ekscytonowych. Tym razem Autor zakłada, że sprzężenie występuje w przestrzennie zlokalizowanym obszarze i zadane jest funkcją Gaussa. Ścisła analiza nie jest możliwa, mgr A. Ramaniuk rozwiązuje zatem równania metodą SSFM startując z symetrycznego stanu (w przypadku stałego sprzężenia stany te były przeważnie niestabilne). Ze wzrostem wartości stałej sprzężenia, w granicy rozległego sprzężenia, pojawiają się jakościowo nowe elementy w dynamice układu. Najbardziej interesującym wydaje się być reżim, w którym obserwujemy naprzemienne powstawanie wirów w obu kondensatach. Jeśli wyłączymy sprzężenie pomiędzy kondensatami w chwili, w której w jednym z podukładów obecny jest wir a w drugim nie to ładunki topologiczne obu kondensatów w dalszej ewolucji nie ulegają już zmianie. Autor wspomina o tym efekcie w ostatnim akapicie piątego rozdziału, nie ilustruje go jednak żadnymi rysunkami. Szkoda bo wydaje się, że jest to jeden z najważniejszych wyników dotyczących niejednorodnie sprzężonych kondensatów, o czym świadczy choćby sam tytuł artykułu.

Przykładem ośrodków z nielokalną nieliniowością są ciekłe kryształy. Materiały takie wykazują dalekozasięgowe uporządkowanie, obrót jednej molekuly pociąga za sobą obroty kolejnych molekul. Światło propagujące się w ciekłym kryształ reorientuje molekuly prowadząc do zmiany współczynnika załamania ośrodka. Efekt ten jest przyczyną silnej, nielokalnej nieliniowości optycznej ciekłych kryształów. Nieliniowość reorientacyjna współzawodniczy z efektami termicznymi, wzrost temperatury zmniejsza bowiem uporządkowanie molekul. W szóstym rozdziale mgr A. Ramaniuk bada własności struktur solitonowych rozchodzących się w ciekłych kryształach. Konkurencja wspomnianych wyżej efektów daje o sobie znać w równaniu opisującym propagację światła w ciekłym kryształ – pojawia się nielokalny nieliniowy człon (równanie (6.9) lub (6.15) zawierające nieliniowość trzeciego rzędu). Przejście do równania (6.15) z nieliniowością niższego rzędu wymaga, moim zdaniem, lepszego uzasadnienia – w reżimie nieliniowym natężenia nie są przecież małe. Ostatecznie, Autor analizuje rozwiązania sprzężonego układu dwóch równań (6.18) opisującego współliniową propagację dwóch monochromatycznych wiązek światła w ciekłym kryształ, wiązek nazywanych przez Autora „samoogniskującą” i „deogniskującą”. Jakościowo nowym elementem pojawiającym się w tym przypadku są rozwiązania typu wektorowe solitony. Różnią się one od standardowego rozwiązania typu jasny soliton z pojedynczym maksimum natężenia tym, że mogą mieć więcej takich maksimów zachowując jednocześnie stałą fazę. W kolejnym kroku mgr A. Ramaniuk bada stabilność wektorowych solitonów, wykazując, że struktury takie są stabilne jedynie w granicy skalarnej. Dynamiczne

rachunki ujawniają interesującą własność wektorowych solitonów dotyczącą ich trajektorii. Okazuje się, że trajektoria wektorowego solitonu ulega ugięciu, co jest wynikiem niezachowania pędu w układzie (co wiąże się z łamaniem trzeciej zasady dynamiki). Wyniki numeryczne potwierdza zgrabna ścisła analiza dynamiki wektorowych solitonów, której mgr A. Ramaniuk poświęca ostatnich parę stron szóstego rozdziału (to jest zapewne materiał, który znajdzie się w przygotowywanej pracy).

Na zakończenie chciałbym podkreślić, że praca doktorska mgr. A. Ramaniuka dotyczy aktualnej tematyki związanej z badaniem własności sprzężonych nieliniowych układów o dużych potencjalnych zastosowaniach. Mgr A. Ramaniuk wykazał się znajomością optyki nieliniowej oraz elementami fizyki fazy skondensowanej (kondensaty polarytonów, ciekłe kryształy). Wyniki przedstawione przez mgr. A. Ramaniuka opublikowane zostały w międzynarodowych czasopismach o dużej renomie. Praca doktorska napisana jest dosyć starannie. Znalazłem parę błędów, niedociągnięć, niektóre z nich wyliczam poniżej:

– równanie (1.4) nie jest zapisane poprawnie; pojawiające się poniżej tego wzoru dwa zdania nie są prawdziwe

– we wzorze (2.4) (prawa strona), również w Załączniku A, brakuje czynnika $\frac{1}{2}$

– wzory (4.7) i (4.8) są niespójne ze względu na zmienne niezależne

– opisy osi w bardzo wielu rysunkach są po prostu nieczytelne

Podsumowując, uważam, że praca doktorska mgr. Aleksandra Ramaniuka spełnia, pomimo drobnych zastrzeżeń, wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana mgr. Aleksandra Ramaniuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


Mirosław Brewczyk