

Prof. dr hab. Jan Cieřliński
Katedra Metod Matematycznych Fizyki,
Wydział Fizyki, Uniwersytet w Białymstoku

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Dominika Ciurli pt. „Negative radiation pressure in soliton dynamics”

Rozprawa doktorska kandydata do stopnia doktora, pana mgr. Dominika Ciurli, została przygotowana na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Romańczukiewicza, prof. UJ. Rozprawa ma formę tzw. *zszywki*, czyli połączonego tematycznie cyklu trzech artykułów naukowych poprzedzonych dodatkowym wstępem (liczącym 28 stron, w tym rysunki i bibliografia), który jest pożytecznym omówieniem kontekstu rozprawy, jej głównych wyników oraz używanych metod. Rozprawa jest napisana w całości w języku angielskim. Dołączone jest też krótkie streszczenie, zarówno w języku angielskim jak i polskim.

Prace składające się na rozprawę dokorską zostały opublikowane w renomowanych, wysoko punktowanych, czasopismach:

- [A1] **D. Ciurla**, P. Forgács, Á. Lukács, T. Romańczukiewicz: *Negative radiation pressure in Bose-Einstein condensates*, **Physical Review E** 109 (2024) 014228.
- [A2] **D. Ciurla**: *Negative radiation pressure in the abelian Higgs model*, **Physics Letters B** 856 (2024) 138954
- [A3] **D. Ciurla**, P. Dorey, T. Romańczukiewicz, Y. Shnir: *Perturbations of Q-balls: from spectral structure to radiation pressure*, **Journal of High Energy Physics** 2024 (2024) 196.

Kandydat jest więc pierwszym autorem wszystkich tych prac. Według zgodnych oświadczeń wszystkich współautorów i deklaracji samego Kandydata, we wszystkich powyższych artykułach odegrał on wiodącą rolę. W pierwszym z nich wykonał on **85%** całkowitej pracy (w tym wszystkie obliczenia numeryczne oraz spisanie tekstu tego artykułu), drugi artykuł to praca samodzielna (**100%**), a w trzecim artykule jego wkład wynosił **55%** (w tym większość obliczeń numerycznych i część obliczeń analitycznych). Wprawdzie ostatnio zaleca się, aby nie używać tego typu wskaźników procentowych, ale w tym przypadku pozwalają one jednoznacznie pozytywnie ocenić indywidualny wkład kandydata w powstanie tych prac. Na szczególne podkreślenie zasługuje znaczący lub nawet całkowity wkład w napisanie tekstu tych artykułów, co świadczy o dojrzałości i samodzielności naukowej.

Dominik Ciurla jest także współautorem trzech innych prac, opublikowanych wcześniej, w *Physical Review D*, *Physical Review E* oraz *Acta Physica Polonica B*). Dwie z tych prac dotyczą zagadnień zbliżonych do tematyki doktoratu, a trzecia z nich (chronologicznie pierwsza) dotyczy zupełnie innych zagadnień, a mianowicie faktoryzacji równania Diraca w kontekście geometrii nieprzemiennej i supersymetrii.

Wiodącym tematem rozprawy doktorskiej jest, zgodnie z tytułem, ujemne ciśnienie promieniowania mogące działać na soliton w trzech teoretycznych modelach fizycznych: dwuskładnikowym kondensacie Bosego-Einsteina, abelowym modelu Higgsa oraz modelu zespolonego pola skalarnego (gdzie solitony mają formę tzw. *Q-balls*). W każdym z tych trzech przypadków uczynione są odpowiednie założenia fizyczne upraszczające analizowany problem, na przykład ograniczono się do przypadku jednowymiarowego (ściślej 1+1, czyli pola zależą od jednej zmiennej przestrzennej i od

czasu). Cel został osiągnięty. Udało się uzyskać nowe teoretyczne przypadki, w których występuje ujemne ciśnienie promieniowania, w tym (w pracy [A3]) nowy mechanizm IV jego powstawania (charakterystyczny dla pól o wartościach zespolonych) oraz ciekawe wyniki dla kondensatu Bosego-Einsteina (w przypadku dwóch składników o tej samej masie, lecz różnych spinach), które dają nadzieję na ich weryfikację doświadczalną. Bo trzeba zaznaczyć, że zjawisko ujemnego ciśnienia promieniowania wciąż jeszcze nie zostało zaobserwowane eksperymentalnie.

Wszystkie trzy prace składające się na rozprawę doktorską p. mgr. Dominika Ciurli są opublikowane w renomowanych czasopismach, zatem wyniki tam przedstawione zostały już zrecenzowane pozytywnie przez kompetentnych recenzentów, a ich opublikowanie świadczy o tym, że tematyka i wyniki pracy są interesujące i ważne dla międzynarodowego środowiska naukowego. Prace imponują szerokim zakresem podejmowanych metod i starannym rozpatrzeniem wielu interesujących przypadków szczególnych. Używane są zarówno metody analityczne (ściśle rozwiązania, analiza rozwiązań równań zlinearyzowanych, twierdzenie Noether w teorii pola), jak i różnorodne metody numeryczne (metoda Rungego-Kutty, metoda kroków dzielonych (*split-step*), metoda spadku gradientu (*gradient flow*) czy metoda macierzy rzadkich (*sparse matrices*) w zastosowaniu do zagadnień własnych typu stacjonarnego równania Schrödingera. Ze wstępu wynika, że Kandydat przygotował samodzielnie odpowiednie implementacje tych metod. We wstępie znajduje się przystępny opis stosowanych metod, zajmujący całe 10 stron. Widać, że jest to mocna strona Kandydata.

Oprócz opisu metod numerycznych, we wstępie zwięźle przedstawiono główne metody teoretyczne stosowane w rozprawie (obliczanie zaburzeń w przybliżeniu linearyzacji, masa efektywna i pęd efektywny, czy ciśnienie promieniowania) oraz uzyskane wyniki. Naszkicowany jest także kolejny, czwarty, problem badawczy (ciężkie kinki w skalarnych teoriach pola). Słabszą stroną wstępu jest jego początek, w którym może zbyt pobieżnie potraktowano tematykę solitonów, kluczową dla rozprawy.

Soliton jest swego rodzaju zlokalizowaną falą o własnościach podobnych do cząstki (stąd nazwa). W zależności od warunków brzegowych rozróżnia się solitony jasne i ciemne, a także kinki (których typowym przykładem są ściany domenowe). Klasyczne solitony występujące w układach całkowalnych (takich jak kubiczne nieliniowe równanie Schrödingera, równanie Kortewega de Vriesa (KdV) czy równanie sinusa-Gordona) mają dodatkowe intrygujące własności (na przykład są stabilne przy wzajemnych zderzeniach, które nie wpływają na ich amplitudę czy prędkość). Układy rozważane w rozprawie wprawdzie nie są całkowalne (poza niewielkimi wyjątkami, jak układ Manakova), ale we wstępie i jego bibliografii warto by mocniej zwrócić uwagę na ten fakt. Zwłaszcza, iż jedna z własności klasycznych solitonów (ich związek z potencjałami bezodbiciowymi) ma pewne znaczenie dla niektórych wątków wspomnianych w rozprawie (np. przy opisie mechanizmu I odpowiedzialnego za pojawianie się ujemnego ciśnienia promieniowania). We wstępie słusznie wspomniana jest ważna praca Zabusky'ego i Kruskala z roku 1965, gdzie po raz pierwszy pojawiła się nazwa „soliton” (ale nie ma jej w bibliografii), natomiast nie wspomniana jest inna słynna praca (z roku 1967), także z udziałem Martina Kruskala, gdzie wskazano ścisły związek liniowego równania Schrödingera (a ściślej jego izospektralnych deformacji) z nieliniowym równaniem KdV oraz sformułowano główną ideę metody odwrotnej (*inverse scattering method*), która pozwala generować rozwiązania solitonowe równania KdV (jako potencjały bezodbiciowe liniowego równania Schrödingera). Obie te prace, opublikowane w *Physical Review Letters*, warto było zacytować we wstępie.

W recenzowanej rozprawie rozważane są pojedyncze solitony (w układach zazwyczaj niecałkowalnych) i ich oddziaływanie z małymi zaburzeniami, zwykle w postaci fal płaskich (fal harmonicznych). Pojedynczy soliton można znaleźć postulując rozwiązanie stacjonarne, czy też falę biegnącą i wybierając rozwiązanie typu separatrysy spośród otrzymanych rozwiązań (na ogół periodycznych), aczkolwiek wątek ten został w rozprawie potraktowany w sposób raczej marginalny (może nawet zbyt marginalny). Ścisłe rozwiązania solitonowe pojawiają się praktycznie bez wyprowadzenia. Dotyczy to na przykład wzorów [58] w pracy [A1], wzoru (7) w pracy [A2], czy wzorów [2.6]-[2.10]. Niestety, jest

to cena za doktorat w formie zszywki. Tematyka ta jest bowiem zbyt dobrze znana ekspertom w tej dziedzinie i może być niechętnie widziana w czasopiśmie. Zapewne w doktoracie tradycyjnym znalazło by się miejsce na ten wątek. Natomiast w pełni doceniam przeprowadzenie w rozprawie starannej interpretacji solitonów w duchu dynamiki Newtona, poprzez obliczenie całek ruchu (energia i pęd), wykorzystując odpowiednie lagranżjany i twierdzenie Noether. Pojawienie się małego zaburzenia w postaci fali harmonicznej może być zinterpretowane jako siła działająca na soliton poprzez ciśnienia promieniowania. Niebanalnym efektem bywa ujemna masa solitonu (taki przypadek wystąpił w pracy [A1]), która oczywiście zmienia znak działającej siły.

Tematem raczej nieobecnym w rozprawie jest kwestia stabilności solitonów (wydaje się być ona przyjmowana jako fakt, bez wyraźnego uzasadnienia). Zagadnienie to niewątpliwie jest trudne. Stabilnością rozwiązań solitonowych (zwłaszcza w przypadku najtrudniejszym, którym są wielowymiarowe równania niecałkowalne) zajmują się najwybitniejsi matematycy. Terence Tao, laureat Medalu Fieldsa, napisał w roku 2008 bardzo zgrabny artykuł na ten temat, zatytułowany po prostu „Why are solitons stable?”. Oddziaływanie solitonu z zaburzeniem w postaci fali harmonicznej, czyli kluczowy wątek rozprawy, jest jednym z istotnych elementów badania stabilności.

Główne wyniki prac wchodzących w skład recenzowanej rozprawy dotyczą oddziaływania solitonów z promieniowaniem (które w niektórych modelach może mieć interpretację fal dźwiękowych).

Artykuł [A1] dotyczy dwuskładnikowego kondensatu Bosego-Einsteina, przy założeniu równych mas obu składników (stała sprzężenia zależy od spinów). Na ogół założone jest, iż potencjał pułapki jest zaniedbywalnie mały. Rozważone są zlinearyzowane zaburzenia rozwiązań solitonowych, co prowadzi do wielu jakościowo różnych przypadków szczególnych. Dużo zależy od wartości i znaku różnych parametrów. Artykuł zawiera bardzo bogaty materiał teoretyczny i empiryczny (wyniki obliczeń numerycznych), którego wiele elementów zasługuje na szersze rozwinięcie. W przypadku, gdy jeden ze składników kondensatu jest niewzbudzony, otrzymujemy dla drugiego składnika układ całkowalny (kubiczne nieliniowe równanie Schrödingera), zatem nie ma ciśnienia promieniowania. Natomiast ciemny soliton w jednym składniku kondensatu zaburzony małą perturbacją harmoniczną w drugim składniku podlega dodatniemu ciśnieniu promieniowania (choć, w związku z ujemną masą solitonu, przyspieszenie jest ujemne). Natomiast przypadek solitonu jasnego w jednym składniku i ciemnego w drugim składniku prowadzi do ujemnego ciśnienia promieniowania wtedy, gdy zaburzenie dotyczy ciemnego solitonu. Ten typ mechanizmu pojawiania się ujemnego ciśnienia oznaczono numerem II.

Uwzględnienie pułapki (w rozdziale V D) komplikuje problem i znacząco pogarsza uzyskane wyniki (choć, jak wskazują autorzy, można zauważyć pewne podobieństwo jakościowe). Być może pomocne by tu było wykorzystanie ścisłych rozwiązań kwantowego oscylatora harmonicznego? Pomysł ten, w połączeniu z bardzo sprytną i dokładną dyskretyzacją ewolucji czasowej, doprowadził Badera i Blanesa do bardzo ciekawej nowej metody numerycznej dla nieliniowego równania Schrödingera, opublikowanej w roku 2011 w *Physical Review E*.

Praca [A2] dotyczy pewnej głębokiej redukcji abelowego modelu Higgsa, czyli pola zespolonego, sprzężonego z abelowym polem cechowania, z potencjałem będącym dodatnim wielomianem szóstego stopnia względem modułu pola, mającym trzy pierwiastki podwójne, będące więc jednocześnie minimami. Redukcja polega na założeniu, że ruch jest jednowymiarowy (model 1+1), pole cechowania jest poprzeczne (prostopadłe do kierunku ruchu, a pole Higgsa jest rzeczywiste. Zakładając znikanie pola cechowania otrzymuje się równanie, które zazwyczaj nazywane jest nieliniowym równaniem Kleina-Gordona. W artykule nazwa ta nie jest wspomniana, ale we wstępie do rozprawy, str. 14, jest bardzo trafnie zaznaczone, iż w artykułach [A2] i [A3] mamy do czynienia właśnie z taką klasą równań. W rozdziale 3.2 wstępu opisany jest sposób dyskretyzacji i numerycznego rozwiązywania tego typu równań przy pomocy metody RK4. Jeśli chodzi o linearyzację, to stany asymptotyczne dla pojawiającego się wówczas liniowego równania Schrödingera wyrażone są ściśle, przy pomocy funkcji

specjalnych. W zależności od strony, z której pada fala zaburzenia, otrzymuje się dodatnie lub ujemne ciśnienie promieniowania (mechanizm typu IV). Podobnie jak praca [A1], także praca [A2] napisana jest bardzo zwięźle, pomijając wiele szczegółów. Na przykład stwierdza się bez uzasadnienia, że obie siły w równaniu (27) są zawsze nieujemne (co jest prawdą, ale bynajmniej nie jest to oczywiste). Ciekawemu zabiegowi normalizującemu zaburzenie harmoniczne poświęcono zaledwie kilka linijek (krótki rozdział 5).

W pracy [A2] zwraca uwagę wykres Fig. 4, gdzie modelowo udało się przedstawić ujemne ciśnienie promieniowania (jednostajnie przyspieszony ruch środka solitonu w kierunku nadchodzącej fali). Podobnie przejrzyste są dwa wykresy (Fig. 14ab) w pracy [A3], gdzie widać dodatnie i ujemne ciśnienie promieniowania (w zależności od kanału rozpraszania). W pracy [A1] nie dostrzegłem również klarownych wyników tego typu. Wydają się być one zaciemnione innymi efektami.

Praca [A3], mimo innego kontekstu fizycznego, jest technicznie podobna do pracy [A2] i w dużej mierze sprowadza się do badania nieliniowego równania Kleina-Gordona z potencjałem szóstego stopnia (innym niż w pracy [A2]). Natomiast solitony (*Q-balls*) są zespolonymi rozwiązaniami stacjonarnymi (funkcja zależna tylko od zmiennej przestrzennej mnożona jest przez czynnik fazowy zależący harmonicznym od czasu), co upodabnia ten przypadek do równań kondensatu z pracy [A1]. W obu przypadkach mamy dwa kanały rozpraszania. Ten typ mechanizmu pojawiania się ujemnego ciśnienia (związany z rotującą fazą) został oznaczony numerem III.

W pracy [A3], obok zaburzeń w postaci fali harmonicznej, rozważany jest też drugi typ zaburzeń, w postaci początkowego ściśnięcia solitonu (znanego w tym przypadku pod nazwą *Q-ball*). Jeśli chodzi o pracę [A3], to warto byłoby dopowiedzieć, które obliczenia numeryczne (np. które z 15 wykresów zawartych w tej pracy są dziełem doktoranta, a które wykonali współautorzy). Czy podział pracy był związany z tymi dwoma typami zaburzeń?

Obok kilku drobnych zapytań sformułowanych wyżej, nasuwa mi się też kilka ważniejszych pytań dotyczących uzyskanych wyników i zastosowanych metod.

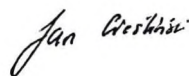
- Dlaczego do obliczeń została wybrana najprostsza metoda Rungego-Kutty (RK4)? Czy wzięcie metody typu Dormanda-Prince'a lub Fehlberga, albo jednej z metod symplektycznych było rozważane w tym kontekście? [Metody symplektyczne zachowują strukturę hamiltonowską i bardzo dobrze sprawdzają się w przypadku długiego czasu symulacji].
- Nie dostrzegłem, aby zostało podjęte zagadnienie stabilności solitonów ze względu na zaburzenia harmoniczne (częstości zespolone były od razu interpretowane jako fale gasnące lub stany związane). Czy takie wykluczanie przypadku eksponencjalnego narastania małego zaburzenia ma jakieś proste wytłumaczenie lub oparcie w rezultatach uzyskanych wcześniej przez innych badaczy?
- Intrygują mnie oscylacje widoczne na rysunkach Fig. 20ef w pracy [A1]. Mogą one sugerować, że w wyniku oddziaływania z falą harmoniczną soliton przyjmuje część energii w postaci drgań. Wykresy te są w zasadzie powiększeniem obszaru w lewym dolnym rogu rysunku Fig. 5. Ciekaw jestem, czy amplituda oscylacji (niewidocznych na rysunku Fig. 5 z racji przyjętej skali) jest mniej więcej stała, czy ulega systematycznej zmianie?
- Wzór (21) w pracy [A1] zakłada, że masa M jest niezależna od prędkości, zapewne wzór (22) także zakłada stałość siły (a więc i przyspieszenie jest automatycznie stałe). Czy nie jest to zbyt ryzykowne założenie? Bo choćby zależność pędu od prędkości, dana wzorem (35) jest wysoce nietrywialna i na pewno nie jest liniowa. Zatem masa zależy od prędkości. Dlaczego można tę zależność zaniedbać w dalszej części tego artykułu?

Pojawienie się tego typu pytań jest dodatkowym argumentem za tym, że recenzowana rozprawa doktorska jest ciekawa i inspirująca. Natomiast brakuje mi w rozprawie (mam na myśli zwłaszcza

napisany przez Doktoranta wstęp) autorefleksji związanej ze skalą trudności podejmowanych problemów oraz podjętymi skutecznymi działaniami i pomysłami, aby problemy rozwiązać, a trudności przezwyciężyć. Innymi słowy, nie mam pewności na ile praca Doktoranta polegała na pracownitym wykonaniu rachunków i procedur w zakresie nakreślonym przez Promotora pracy (bo generalnie rozprawa jest kontynuacją badań rozwijanych od kilkunastu lat przez Promotora), a w jakim stopniu pojawiły się tam nowe idee czy udoskonalenia metod badawczych będące dziełem samego doktoranta. Odpowiedź na to pytanie nie wpłynie na moją konkluzję odnośnie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej, może mieć ona jednak znaczenia dla ewentualnego uznania tej pracy za godną wyróżnienia.

Autor rozprawy wykazał się dużą wiedzą teoretyczną w dyscyplinie nauki fizyczne oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Udało mu się też uzyskać i przedstawić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zatem z przyjemnością stwierdzam, iż recenzowana rozprawa doktorska mgr. Dominika Ciurli w pełni spełnia kryteria określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571) oraz wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego aby **mgr. Dominik Ciurli został dopuszczony do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.**

Biorąc pod uwagę mocny dorobek publikacyjny Kandydata związany z tematyką rozprawy oraz zakres uzyskanych wyników, zwracam się też z wnioskiem do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne o rozważenie możliwości wyróżnienia rozprawy doktorskiej mgr. Dominika Ciurli.



Białystok, 30 grudnia 2024 roku

