

Dr hab. Marcin Radosław Piątek, prof. US
Instytut Fizyki,
Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych,
Uniwersytet Szczeciński,
Wielkopolska 15, 71-451, Szczecin
marcin.piatek@usz.edu.pl

Szczecin, dnia 28 lipca 2026 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

1. Uwagi wstępne

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr. **Aleksandra Głódkowskiego**, zatytułowana *Effective theories for many-body systems with nonuniform symmetries*, została napisana w języku angielskim i liczy 117 stron. Rozprawa poświęcona jest efektywnym teoriom pola oraz hydrodynamicie układów wielu ciał z niejednorodnymi symetriami (*nonuniform symmetries*). Jest to aktualna i intensywnie rozwijana tematyka badawcza, sytuująca się na pograniczu fizyki materii skondensowanej, teorii pola oraz fizyki matematycznej. Autor przedstawia jednolity formalizm opisujący rolę niejednorodnych symetrii zarówno w efektywnych teoriach pola w niskoenergetycznym opisie układów kwantowych, jak i w hydrodynamicie.

Dorobek naukowy Doktoranta oceniam bardzo wysoko. W trakcie studiów doktoranckich był współautorem pięciu artykułów naukowych opublikowanych w uznanych czasopismach o międzynarodowym zasięgu, takich jak *Journal of High Energy Physics*, *Physical Review D*, *Physical Review B* oraz *Physical Review E*. Na szczególne podkreślenie zasługuje najnowsza publikacja, oznaczona jako A1 i opublikowana w *Journal of High Energy Physics*, której Doktorant jest jedynym autorem. Świadczy to o jego rosnącej samodzielności badawczej i dojrzałości naukowej.

Rozprawa została przygotowana z wykorzystaniem wcześniej opublikowanych prac Autora oznaczonych jako A2, A4, A5 i A6. Nie jest jednak zbiorem publikacji, lecz spójną monografią, w której Autor przedstawia własne podejście do omawianego zagadnienia i porządkuje uzyskane wyniki w jednolitą całość.

2. Charakterystyka problematyki badawczej i cele rozprawy

Pojęcie symetrii oraz mechanizm jej spontanicznego łamania to fundamenty współczesnej fizyki teoretycznej. W tradycyjnym ujęciu zjawiska te prowadzą do pojawienia się stopni swobody — tzw. bezmasowych modów Goldstone'a, które opisują niskoenergetyczną dynamikę układu w temperaturze zera bezwzględnego. W temperaturach skończonych analogiczną rolę pełni hydrodynamika oparta na prawach zachowania. Naturalnym językiem opisu takich zjawisk są efektywne teorie pola, pozwalające badać uniwersalne własności układów fizycznych bez konieczności szczegółowego opisu ich mikroskopowej struktury.

W ostatnich latach duże zainteresowanie wzbudziły układy posiadające tzw. niejednorodne symetrie (*nonuniform symmetries*), których generatory nie komutują z translacjami czasoprzestrzennymi. Symetrie te są kluczowe dla opisu egzotycznych faz materii, takich jak układy fraktonowe, kryształy wirów czy układy z zachowaniem momentu dipolowego. Zamiast generować nowe mody Goldstone'a, symetrie niejednorodne narzucają na istniejące stopnie swobody sztywne więzy kinematyczne. Prowadzi to do nowych zjawisk: ograniczenia ruchliwości wzbudzeń, zmiany relacji dyspersyjnych oraz anomalnie wolnej subdyfuzji.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. Aleksandra Głódkowskiego wpisuje się w ten aktualny nurt badań. Głównym celem rozprawy jest opracowanie ogólnego formalizmu opisu układów wielu ciał z niejednorodnymi symetriami oraz zbadanie wpływu tych symetrii na strukturę efektywnych teorii pola i hydrodynamiki.

3. Omówienie zawartości rozprawy

Rozprawa składa się ze wstępu, pięciu zasadniczych rozdziałów merytorycznych, zakończenia oraz trzech dodatków zawierających uzupełniające wyprowadzenia i szczegóły formalizmu matematycznego. Jej struktura jest przejrzysta i logiczna, a układ kolejnych rozdziałów konsekwentnie prowadzi od zagadnień ogólnych do szczegółowych zastosowań opracowanego formalizmu.

Rozprawę otwiera obszerny wstęp, w którym Autor przedstawia motywację podjętych badań oraz definiuje pojęcie symetrii niejednorodnych. Omawia różnice pomiędzy symetriami jednorodnymi i niejednorodnymi oraz formułuje główną ideę rozprawy, zgodnie z którą symetrie niejednorodne nie prowadzą do pojawienia się nowych niezależnych modów Goldstone'a, lecz narzucają dodatkowe więzy na istniejące stopnie swobody. We wstępie przedstawiono również organizację rozprawy oraz krótko scharakteryzowano zawartość poszczególnych rozdziałów.

Pierwsza część rozprawy (*Nonuniform symmetry breaking*) poświęcona jest zagadnieniu spontanicznego łamania symetrii niejednorodnych. W rozdziale drugim Autor przedstawia ogólną analizę problemu zliczania bezmasowych modów Goldstone'a w układach ze spontanicznie złamanymi symetriami niejednorodnymi. Rozważania obejmują zarówno symetrie abelowe, jak i nieabelowe, a zaproponowany formalizm ma charakter ogólny i opiera się wyłącznie na strukturze algebraicznej rozpatrywanych symetrii, niezależnie od mikroskopowego mechanizmu ich łamania. Najważniejszym rezultatem tego rozdziału jest sformułowanie ogólnej reguły zliczania modów Goldstone'a dla układów z symetriami niejednorodnymi. Otrzymane wyniki Autor ilustruje na przykładzie ciał krystalicznych, pokazując zgodność opracowanego formalizmu z klasycznym opisem fononów akustycznych w teorii sprężystości.

Rozdział trzeci zawiera pierwsze zastosowanie opracowanego wcześniej formalizmu do opisu kryształów wirów w cieczach nadciekłych. Autor analizuje wzorzec spontanicznego łamania symetrii w tym układzie oraz konstruuje odpowiadającą mu efektywną teorię pola z wykorzystaniem metody konstrukcji warstwowej (*coset construction*). Istotnym elementem analizy jest zastosowanie odwrotnego mechanizmu Higgsa (*inverse Higgs mechanism*), który pozwala wyeliminować nadmiarowe pola Goldstone'a i uzyskać efektywny opisiskoenergetycznej dynamiki. Otrzymana teoria efektywna pozwala opisaćiskoenergetyczną dynamikę tzw. modów Tkachenki oraz ich własności dyspersyjne.

Druga część rozprawy (*Many-body dynamics with nonuniform symmetries*) rozszerza rozważania na układy w skończonych temperaturach. W rozdziale czwartym Autor przedstawia formalizm hydrodynamiki układów posiadających symetrie niejednorodne. Punktem wyjścia jest klasyczna teoria dyfuzji, która zostaje następnie uogólniona poprzez uwzględnienie więzów wynikających z obecności takich symetrii. Autor pokazuje, w jaki sposób ograniczenia narzucone przez symetrie niejednorodne wpływają na strukturę równań hydrodynamicznych oraz własności modów transportowych. W dalszej części rozdziału omówiono hydrodynamikę cieczy arystotelesowskich (*Aristotelian fluids*) oraz wpływ zewnętrznych pól elektromagnetycznych na dynamikę układu.

Rozdział piąty poświęcony jest układom fraktonowym. Po krótkim wprowadzeniu do tej problematyki Autor konstruuje model sigma z zachowaniem momentu dipolowego i analizuje go zarówno z punktu widzenia efektywnej teorii pola, jak i hydrodynamiki. Następnie przedstawia dualność ładunek–dipol–wir, stanowiącą uogólnienie klasycznej dualności ładunek–wir na układy z niejednorodnymi symetriami. W dalszej części rozdziału analizuje konsekwencje zachowania momentu dipolowego dla transportu, w szczególności zjawisko subdyfuzji, oraz omawia możliwość jego realizacji w zmodyfikowanej wersji

modelu Bosego–Hubbarda.

Ostatni rozdział poświęcony jest hydrodynamice nadcieczy fraktonowych. Autor omawia twierdzenie o braku przepływu (*no-flow theorem*), formułuje równania hydrodynamiczne dla układów z zachowaniem momentu dipolowego oraz analizuje własności nadcieczy fraktonowych zarówno w granicy idealnej, jak i z uwzględnieniem procesów dyssypacyjnych.

Rozprawę kończy krótkie podsumowanie oraz trzy dodatki. Zawierają one przegląd konstrukcji warstwowej dla symetrii niejednorodnych, omówienie reprezentacji grupy arystotelesowskiej oraz szczegółowe wyprowadzenia wykorzystywane w analizie hydrodynamiki układów z zachowaniem momentu dipolowego. Dodatki stanowią cenne uzupełnienie głównego tekstu i ułatwiają śledzenie przedstawionych wyprowadzeń.

4. Ocena merytoryczna

W mojej ocenie najważniejszym osiągnięciem recenzowanej rozprawy jest opracowanie ogólnego formalizmu umożliwiającego analizę układów z niejednorodnymi symetriami zarówno w ramach efektywnych teorii pola, jak i hydrodynamiki. Jednym z najważniejszych elementów tego formalizmu jest sformułowanie ogólnej reguły wyznaczania liczby bezmasowych modów Goldstone'a w układach z niejednorodnymi symetriami, stanowiącej punkt wyjścia dla dalszych analiz przedstawionych w rozprawie. Na uwagę zasługuje również fakt, że Autor konsekwentnie rozwija ten sam formalizm — od jego podstaw algebraicznych, poprzez konstrukcję odpowiednich teorii efektywnych, aż do zastosowań w konkretnych układach fizycznych. Dzięki temu rozprawa zachowuje dużą spójność merytoryczną i stanowi przemyślaną całość.

Pierwszy z głównych kierunków badań rozwijanych w rozprawie dotyczy opisu spontanicznego łamania symetrii niejednorodnych oraz konstrukcji odpowiadających im teorii efektywnych. Autor wykorzystuje konstrukcję warstwową oraz odwrotny mechanizm Higgsa do systematycznej eliminacji nadmiarowych pól Goldstone'a i pokazuje, w jaki sposób mogą one zostać zastąpione odpowiednimi więzami kinematycznymi. Następnie formułuje ogólne zasady opisujące wpływ symetrii niejednorodnych na liczbę niezależnych modów Goldstone'a oraz ich własności. Ważnym elementem tej części rozprawy jest również zastosowanie opracowanego formalizmu do opisu poprzecznych oscylacji Tkachenki w kryształach wirów, stanowiące dobrą ilustrację możliwości proponowanego podejścia.

Drugim istotnym kierunkiem badań przedstawionym w rozprawie jest rozszerzenie opracowanego formalizmu na układy w skończonych temperaturach oraz sformułowanie ich opisu hydrodynamicznego. Autor analizuje wpływ niejednorodnych symetrii na

strukturę równań hydrodynamicznych oraz wynikające z nich własności transportowe. W szczególności omawia konsekwencje zachowania momentu dipolowego, prowadzące do pojawienia się subdyfuzji oraz modyfikacji modów hydrodynamicznych. Wyniki tej części rozprawy stanowią wartościowy wkład do badań nad hydrodynamicznym opisem układów posiadających niejednorodne symetrie oraz wynikającymi z nich ograniczeniami transportowymi.

Na podkreślenie zasługuje również umiejętne połączenie metod współczesnej teorii pola z zagadnieniami hydrodynamiki i fizyki materii skondensowanej. Świadczy to o szerokim przygotowaniu teoretycznym Doktoranta oraz jego swobodzie w wykorzystywaniu różnorodnych metod badawczych.

5. Uwagi i pytania

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje bardzo wysoki poziom merytoryczny i formalny. Nie znalazłem w rozprawie uchybień o charakterze merytorycznym ani formalnym, które wpływałyby na jej ocenę. Co więcej, opisane wyniki zachęcają do dalszych rozważań nad przedstawioną tematyką badawczą. W związku z tym kieruję do Autora następujące pytania:

W rozprawie odwrotny mechanizm Higgsa odgrywa kluczową rolę w eliminacji nadmiarowych stopni swobody. Czy Autor widzi możliwość uogólnienia tego mechanizmu na przypadek teorii z anomaliami lub z kwantowymi poprawkami, gdzie klasyczne więzy mogą ulec modyfikacji?

Doktorant wskazuje, że w skończonych temperaturach obecność więzów kinematycznych prowadzi do anomalnie wolnej subdyfuzji. W jakich konkretnie układach eksperymentalnych można najłatwiej zaobserwować te nietypowe własności transportowe?

6. Konkluzja

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Aleksandra Głódkowskiego stanowi wartościowe i oryginalne opracowanie poświęcone aktualnemu problemowi współczesnej fizyki teoretycznej. Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem teoretycznym, swobodą w posługiwaniu się aparatem matematycznym wykorzystywanym we współczesnych efektywnych teoriach pola oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Rozprawę oceniam bardzo wysoko zarówno pod względem merytorycznym, jak i formalnym. Praca jest dobrze napisana, ma przejrzystą strukturę, a przedstawione wyniki tworzą spójną całość. Uzyskane rezultaty stanowią istotny wkład do badań nad

efektywnymi teoriami pola oraz układami posiadającymi niejednorodne symetrie.

W mojej ocenie rozprawa w pełni spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 ze zm.). W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr. Aleksandra Głodkowskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne.

Biorąc pod uwagę poziom rozprawy, jej spójność, aktualność podjętej problematyki oraz dorobek publikacyjny Doktoranta, obejmujący sześć prac opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych, w tym samodzielną publikację w *Journal of High Energy Physics*, uważam, że rozprawa zasługuje na wyróżnienie. W związku z tym wnoszę o przyznanie rozprawie doktorskiej stosownego wyróżnienia.



Marcin Piątek