

Warszawa, 18 lipca 2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandra Głódkowskiego pod tytułem
„Effective theories for many-body systems with nonuniform symmetries”**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska, przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Piotra Surówki dotyczy sformułowania efektywnych teorii pola w przypadku układów posiadających symetrie których generatory nie komutują z operatorami przesunięć. W trakcie ostatnich dziesięciu lat teorie takie stały się przedmiotem zainteresowania wielu badaczy na całym świecie. Ważnym impulsem dla tej aktywności było zastosowanie języka efektywnej teorii pola do modeli określonych na sieciach, w których takie symetrie i związane z nimi efekty się pojawiają. Tematyka ta jest obecnie znaczącym kierunkiem badawczym w wielu wiodących ośrodkach na całym świecie, a przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera szereg nowych i istotnych wyników.

Efektywne teorie pola stanowią de facto obowiązujący paradygmat w fizyce wysokich energii, funkcjonując jako porządkująca zasada w kwantowej teorii pola. Kluczowym elementem w implementacji tego podejścia jest występowanie i realizacja symetrii. W kontekście teorii cząstek elementarnych i teorii strun podstawowym wymogiem jest niezmienniczość Lorentzowska, która w znaczący sposób ogranicza możliwe wyrazy w działaniu definiującym daną teorię, a tym samym przestrzeń wszystkich możliwych teorii. W kontekście układów nierelatywistycznych, gdzie wymogi symetrii Lorentza nie są egzekwowane, możliwości określenia dynamiki jest znacznie więcej. Tym większą rolę odgrywają inne symetrie, także te które mogą się wydawać nieco egzotyczne z perspektywy teorii relatywistycznych. Do takich symetrii należą symetrie określone w recenzowanej dysertacji jako niejednorodne (lub może nierównomierne – ang. *nonuniform*), czyli takie których generatory nie komutują z generatorami przesunięć przestrzennych. W swojej pracy mgr Głódkowski w systematyczny sposób przedstawia podstawowe pojęcia związane z takimi modelami i omawia ich konsekwencje dla widma wzbudzenia i dynamiki teorii; część przedstawianych w dysertacji wyników jest całkiem nowa, wykraczając poza materiał zawarty w publikacjach których mgr Głódkowski jest współautorem.

Praca napisana została w języku angielskim; składa się z sześciu rozdziałów, trzech dodatków o charakterze technicznym i spisu bibliografii, który zawiera 112 pozycji. Rozdział pierwszy ma charakter wprowadzający: zawiera ogólne wprowadzenie w tematykę i strukturę

pracy. Rozdział ten w czytelny i dobrze przemyślany sposób wprowadza pojęcie symetrii niejednorodnych, podkreślając istotne różnice między tego rodzaju symetrias a zwykłymi symetrias globalnymi i niezmienniczością względem cechowania. Reszta dysertacji podzielona jest na dwie części. Pierwsza część, na którą składają się dwa rozdziały, poświęcona jest przedstawieniu podstawowych pojęć związanych ze spontanicznym łamaniem symetrii niejednorodnych i konsekwencjami takiego łamania dla widma teorii. Część druga, zawierająca trzy rozdziały, przedstawia konsekwencje spontanicznie łamanych symetrii niejednorodnych dla dynamiki.

Rozdział drugi poświęcony jest zestawieniu podstawowych faktów na temat spontanicznego łamania symetrii niejednorodnych i przedstawia istotne dla całej pracy zagadnienie wyznaczenia liczby modów bezmasowych w sytuacji gdy symetrie są realizowane w sposób spontanicznie złamany. W tej recenzji używam określenia “mod bezmasowy” lub (zależnie od kontekstu) “mod hydrodynamiczny” jako tłumaczenie pojęcia “gapless mode” używanego w recenzowanej dysertacji. W teoriach relatywistycznych liczba takich modów dana jest przez twierdzenie Goldstone’a, ale bez symetrii Lorentza, a w szczególności gdy obecne są symetrie niejednorodne, odpowiedź na to pytanie jest jednym z głównych wątków tej pracy. Mimo pedagogicznego tonu, rozdział drugi zawiera nowe wyniki dotyczące zliczania modów bezmasowych, a jednocześnie w zwarty sposób przedstawia wyniki istniejące w literaturze.

Rozdział trzeci przedstawia bardzo nietrywialną ilustrację pojęć i wyników zawartych w rozdziale drugim, a mianowicie obracającego się układu nadciekłego, kondensatu Bose-Einsteina w układzie schłodzonych atomów. Autor przedstawia efektywną teorię pola opisującą taką sytuację, i pojawienie się krystalicznego układu wirów będącego konsekwencją spontanicznego złamania symetrii. Prezentacja tego materiału (zawartego w cytowanej pracy [13], której autor dysertacji jest współautorem) jest bardzo ładna, choć zabrakło mi trochę dyskusji związku omawianej efektywnej teorii pola z innymi podejściami do tego kręgu zagadnień (np. w cytowanej gdzie indziej pracy Murayamy i Watanabe [12], lub w artykule “Effective field theory of a vortex lattice in a bosonic superfluid” Moroza et al.). Wydaje mi się, że takie odniesienia wzbogaciły by tę dyskusję, ukazując związki formalizmu przedstawionego w tym rozdziale z innymi podejściami do badania tej fizyki.

Część drugą pracy otwiera rozdział czwarty, który poświęcony jest hydrodynamicie układów z symetrias niejednorodnymi. Rozdział ten ma charakter wprowadzający i omawia współczesne podejście do dynamiki płynów najpierw w sposób ogólny, a potem w odniesieniu do kategorii układów dalej w pracy rozważanych, w szczególności tzw. płynów Arystotelesowskich, czyli takich dla których nie narzuca się niezmienniczości względem pchnięć. Zgodnie z zapowiedzią autora zamieszczoną na początku rozdziału, większość tego materiału można znaleźć w literaturze, lecz warto podkreślić, że prezentacja autora jest bardzo czytelna i spójna, w sposób który w pełni uzasadnia zawarcie jej w recenzowanej dysertacji.

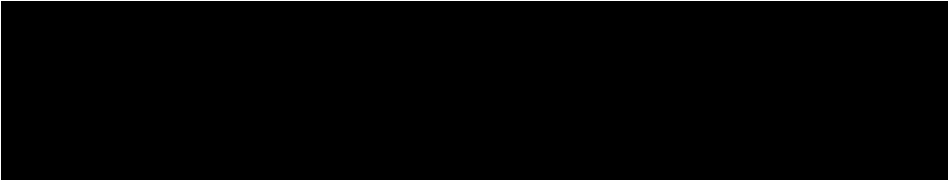
Rozdział piąty przedstawia zastosowania perspektywy symetrii niejednorodnych do fizyki fraktonów, czyli wzbudzeń o ograniczonej mobilności. Właściwości fraktonów można powiązać z symetriami względem transformacji, które wyglądają jak transformacje cechowania z parametrami zależnymi od tylko części współrzędnych. Tego typu transformacje nie komutują z generatorami przesunięć, a więc są przykładem symetrii niejednorodnych. W tym rozdziale mgr Głódkowski przedstawia związki symetrii niejednorodnych z modelami zawierającymi wzbudzenia fraktonowe, z uwzględnieniem wyników uzyskanych w publikacjach których jest współautorem. Oryginalne wyniki zawarte w tym rozdziale dotyczą układów z symetriami dipolowymi w których zarówno te symetrie, jak i symetrie monopolowe są spontanicznie złamane. Autor formułuje efektywny opis takich układów, a następnie bada linearyzację równań ewolucji i dualny opis wzbudzeń w języku wieloindeksowych pól antysymetrycznych. Rozdział ten zwraca też uwagę na specyfikę transportu ładunku w modelach z symetrią dipolową, która manifestuje się jako subdyfuzyjność, widoczną w odpowiedniej relacji dyspersyjnej. Autor przedstawia też ciekawy przykład tego zjawiska w wariancie bozonowego modelu Hubbarda w polu elektrostatycznym, co jest szczególnie ciekawe ze względu na jego realizację eksperymentalną.

Rozdział szósty dotyczy cieczy fraktonowych opisywanych teoriami zachowującymi zarówno zwykły ładunek (monopolowy) jak i ładunek dipolowy. Rozdział ten zawiera oryginalne wyniki, opublikowane w artykułach mgr Głódkowskiego i współautorów. Autor opisuje sformułowanie termodynamiki takich modeli i ich opis hydrodynamiczny, który już w najniższym rzędzie rozwinięcia gradientowego jest dysypatywny. W pracy przedstawiona została konstrukcja hydrodynamiki w najniższych dwóch rzędach i linearyzację równań ewolucji wokół stanu równowagi, a także widmo modów hydrodynamicznych. Analiza ta jest podzielona na dwa istotnie różne przypadki: gdy spontanicznie łamana jest tylko symetria dipolowa, i gdy łamana jest także symetria monopolowa, co prowadzi do nadciekłości. Opisywane tu konstrukcje stanowią zasadniczą część nowych rezultatów zawartych w tej dysertacji.

Rozprawa doktorska mgr Aleksandra Głódkowskiego prezentuje szereg wartościowych wyników, i czyni to w sposób wyjątkowo czytelny i zajmujący. W mojej ocenie na szczególnie wyróżnienie zasługuje sformułowanie hydrodynamiki nadciekłych płynów dipolowych, a także ogólna analizę zliczania modów Goldstona przedstawioną w rozdziale drugim. Oryginalne rezultaty przedstawione w tej pracy opublikowane zostały częściowo czterech w artykułach. Mgr Głódkowski jest jednak autorem w sumie ośmiu prac naukowych o tej lub blisko powiązanej tematyce. Z tego, sześć prac zostało już opublikowane w bardzo dobrych czasopiśmie naukowych o międzynarodowym zasięgu – JHEP i Physical Review. Według bazy inspirehep.net ich sumaryczna liczba cytowań wynosi 81. Uważam, że to jest dobry wynik dla osoby na tym etapie kariery naukowej.

Praca została zredagowana starannie; nie dopatrzyłem się praktycznie żadnych niedociągnięć redakcyjnych, poza drobniakiem w równaniu 2.12, gdzie brak subskryptu (zamiast D powinno być D_x). Rozprawa jest dobrze zorganizowana i w dosyć pełny sposób przedstawia zarówno tło jak i nowe wyniki autora, choć wydaje mi się, że warto było coś napisać na temat mikroskopowej genezy przedstawianych teorii hydrodynamicznych. Efektywne teorie pola opisujące fraktony pojawiły się jako opis modeli sieciowych na odpowiednio dużych skalach odległości, ale jak to jest z hydrodynamiką fraktonów? Autor prezentuje konstrukcję szeregu modeli hydrodynamicznych w oparciu o symetrie, ale czy istnieją wyprowadzenia przedstawianych w pracy teorii hydrodynamicznych w oparciu o opis stanów nierównowagowych w mikroskopowych teoriach zawierających fraktony? Jeśli nie, to jakie są perspektywy takiej analizy? Czy do pomysłu jest program badawczy mający na celu określenie granic stosowalności opisu hydrodynamicznego cieczy fraktonów poprzez ocenę wpływu modów niehydrodynamicznych na nierównowagową dynamikę takich układów odpowiednio blisko równowagi? Niezależnie od tych uwag, czytając tę rozprawę doktorską miałem wrażenie że jej autor podchodzi do swojego tematu bardzo poważnie i z zapałem, co dodatkowo wpłynęło na moją bardzo pozytywną ocenę tej pracy.

Po zapoznaniu się z przedstawioną do recenzji rozprawą doktorską mgr Aleksandra Głódkowskiego stwierdzam, że spełnia ona ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim, a dorobek naukowy Autora rozprawy jest bardzo dobry. W tych okolicznościach wnoszę o dopuszczenie mgr Aleksandra Głódkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto, biorąc pod uwagę zarówno wysoki poziom osiągnięć przedstawionych w tym doktoracie jak i bardzo wysoką jakość ich prezentacji, wnoszę o wyróżnienie tej rozprawy.



Prof. dr hab. Michał Spaliński