

Piotr Bożek  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza

Kraków 9.11.2021

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. Victora Svenssona  
*Relativistic hydrodynamics beyond the second order*

Badania mgr. Victora Svenssona dotyczą teoretycznego opisu dynamiki układów nierównowagowych, który wychodzi poza hydrodynamikę relatywistyczną. Jest to jedno z najważniejszych i jednocześnie najtrudniejszych zagadnień formalnych pojawiających się w opisie zderzeń jądrowych wysokich energii. Opiekunem rozprawy doktorskiej jest dr hab. Michał Heller. Rozprawa doktorska ma formę 6 opublikowanych prac naukowych, których Pan Svensson jest współautorem.

Prace wchodzące w skład rozprawy są wieloautorskie. Zostały opublikowane w większości w najważniejszych czasopismach w dziedzinie, 1x Physical Review Letters, 1x JHEP, 3x Physical Review D i 1x SciPost Phys.. Doktorant i promotor przedstawili oświadczenia określające wkład Pana Svenssona do każdej z prac. Pozostali współautorzy prac dołączyli notki określające ich wkład we wspólne prace. Deklaracje są bardzo precyzyjne. W dwóch pracach z 2018 roku wkład Pana Svensson był techniczny, polegał na rozwinięciu i zaadaptowaniu metod i obliczeń numerycznych do rozważanego problemu. Taki wkład jest zgodny z oczekiwaniami dla doktoranta na początku pracy na rozprawą doktorską. W pozostałych czterech pracach (z 2020 i 2021 r) doktorant miał istotny wkład w część koncepcyjną i/lub techniczną w zasadniczych elementach badań. Świadczy to o zdobytym doświadczeniu i coraz większej samodzielności doktoranta. Wkład Pana Svenssona w prezentowane prace jest istotny i w pełni uzasadnia ich włączenie do jego rozprawy doktorskiej.

W opisie dynamiki zderzeń jądrowych często używa się hydrodynamiki relatywistycznej dla płynu z lepkością. Badania te spowodowały zainteresowanie stworzeniem odpowiedniego formalizmu i zrozumieniem zakresu stosowalności hydrodynamiki. Zastosowania dla zderzeń ciężkich jonów sugerują, że praktyczny opis dynamiki wykracza poza prosty zakres stosowalności hydrodynamiki. W ramach rozprawy doktorant analizował uproszczone układy dynamiczne z dodatkowymi symetriami w dynamice. W pracach rozważano dwa główne zagadnienia:

- sposób konstrukcji i optymalny dobór rozwinięcia gradientowego dla hydrodynamiki
- oraz zachowanie dynamiki na wczesnym etapie ewolucji i sposób osiągnięcia zachowania hydrodynamicznego.

W pracy M. Heller P., A. Kurkela, M. Spaliński, V. Svensson, Hydrodynamization in kinetic theory: Transient modes and the gradient expansion. *Physical Review D*, 97 (2018) 091503 przebadano rozwinięcie gradientowe dla teorii kinetycznej w przybliżeniu czasu relaksacji i dla przepływu Bjorkena. Praca uzupełnia podobne rozważania dla innych teorii hydrodynamicznych w tej geometrii. Autorzy pokazali, że w resumacji Borela rozbieżnego rozwinięcia gradientowego pojawiają się osobliwości typu cięcia w płaszczyźnie zespolonej. Ciekawym wynikiem jest obserwacja, że niektóre osobliwości są niefizyczne, a niektóre odpowiadają modom niehydrodynamicznym, podobnie jak w innych teoriach. Zachowania asymptotyczne są podobne dla różnych teorii i następuje zbieżność do rozwiązania hydrodynamicznego w niskim rzędzie.

W kolejnej pracy (M. Heller, V. Svensson, How does relativistic kinetic theory remember about initial conditions? *Phys.Rev.D*, 98 (2018) 054016) przebadano rozwinięcie gradientowe dla teorii kinetycznej w przybliżeniu czasu relaksacji dla różnej zależności czasu relaksacji od temperatury. Osobliwości w transformacji Borela rozwinięcia gradientowego są związane z odpowiednim zachowaniem modów opisujących zanik ogólnych warunków początkowych dynamiki. Zachowania numeryczne pokrywają się z oczekiwaniami teoretycznymi. Ciekawa obserwacja dotyczy roli osobliwości niefizycznych w transformacji Borela dla przypadku czasu relaksacji z silną zależnością od temperatury. Pokazuje to jak zmienia się wkład od modów hydrodynamicznych i

innych przy zmianie szybkości termalizacji.

W pracach M. Heller, A. Serantes, M. Spaliński, V. Svensson, B. Withers, Hydrodynamic gradient expansion in linear response theory, Phys.Rev.D 104 (2021) 066002, M. Heller, A. Serantes, M. Spaliński, V. Svensson, B. Withers, Transseries for causal diffusive systems, Journal of High Energy Physics 04 (2021) 192 i M. Heller, A. Serantes, A., M. Spaliński, V. Svensson, V., B. Withers, Convergence of hydrodynamic modes: insights from kinetic theory and holography, SciPost Phys. 10 (2021) 123 rozważano dynamikę na poziomie odpowiedzi liniowej. Te prace są ważne bo pozwalają na zbadanie zachowania teorii dla innego przypadku niż przepływ Bjorkena. Analiza prowadzi do ważnego wyniku: możliwość zastosowania rozwinięcia gradientowego zależy od zakresu pędów dla konkretnych warunków początkowych. Innym ciekawym wynikiem jest analiza rozwinięcia gradientowego za pomocą transserii dla przepływu Bjorkenowskiego w przybliżeniu odpowiedzi liniowej.

Praca M. Heller, R. Jefferson, M. Spaliński, V. Svensson, Hydrodynamic Attractors in Phase Space, Physical Review Letters, 125 (2020) 132301 jest bardzo ciekawą propozycją analizy ilościowej zbliżania ewolucji do atraktora na wczesnym etapie dynamiki. Autorzy proponują pomiar efektywnej redukcji wymiaru w przestrzeni fazowej w trakcie zbliżania się do atraktora. Potencjalnie taka metoda może być użyta do badania dynamiki dla ogólnego przypadku wymiarowości i warunków początkowych.

Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej mgr. Svenssona są znaczące i nowatorskie. W szczególności seria prac dotyczących analizy w podejściu odpowiedzi liniowej oraz praca dotycząca analizy redukcji wymiaru w przestrzeni fazowej za pomocą metody głównych składowych. Dla teorii kinetycznej w przybliżeniu czasu relaksacji pojawiają się niefizyczne osobliwości w resumacji Borela rozwinięcia gradientowego. Czy można stwierdzić, że ten efekt jest technicznym artefaktem dla tego przybliżenia i w pełnej wersji teorii kinetycznej nie wystąpi? Drugie pytaniem, które pojawia się po przeczytaniu pracy dotyczy ewentualnego rozszerzenia dynamiki na więcej wymiarów. Czy w pełnej, nieliniowej 3+1 wymiarowej ewolucji można się spodziewać efektyw-

nego uśredniania warunków początkowych dla modów niehydrodynamicznych, które jeszcze bardziej przyspieszy zbieżność do atraktora hydrodynamicznego?

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. Victora Svenssona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Składam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. Victora Svenssona. Prace Pana Svenssona w znaczącym stopniu rozszerzyły nasze zrozumienie dynamiki wychodzącej poza hydrodynamikę w najniższych rzędach. W szczególności istotne i nowe wyniki dotyczą analizy rozwinięcia gradientowego w przybliżeniu odpowiedzi liniowej. Drugim ważnym wynikiem jest zaproponowana metoda analizy składowych głównych dla dynamiki zbliżania się do atraktora. Trzeci ciekawy wynik to wprowadzenie transserii dla analizy asymptotycznych rozwinięć równań dla wzbudzeń czasoprzestrzennych. Ranga otrzymanych wyników naukowych daleko wykracza poza osiągnięcia spotykane w większości rozpraw doktorskich.