

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Ewy Maksymiuk
„Exact solutions of the Boltzmann equation in the relaxation time approximation”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa, napisana pod kierunkiem prof. dr. hab. Wojciecha Florkowskiego, oparta jest na badaniach opublikowanych w pięciu artykułach naukowych których mgr Maksymiuk jest współautorem, opublikowanych w wiodących czasopismach w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych.

Tematyka rozprawy

Badania przedstawione w rozprawie motywowane są fizyką plazmy kwarkowo-gluonowej. Jest to tematyka, która od wielu lat leży w centrum zainteresowań fizyki wysokich energii ze względu na to, że bada fundamentalne własności silnie-oddziałującej materii. Mimo tego, że teoria oddziaływań silnych – chromodynamika kwantowa – sformułowana została ponad 40 lat temu, to bezpośrednie zastosowanie jej do opisu procesów dynamicznych jest bardzo trudne. Podstawowym narzędziem w tym kontekście stała się teoria kinetyczna. Przynajmniej w na pewnych etapach ewolucji, plazma kwarkowo-gluonowa tworzona w eksperymentach powinna poddawać się opisowi formułowanemu w tym języku. Ponieważ równania teorii kinetycznej są bardzo skomplikowane dla realistycznych (motywowanych chromodynamiką kwantową) postaci jądra kolizyjnego, to kluczową rolę na przestrzeni lat odgrywa przybliżenie czasu relaksacji w równaniu Boltzmann. Przybliżenie to umożliwia szereg rachunków, zarówno analitycznych jak i numerycznych. Praca mgr Maksymiuk poświęcona jest właśnie zastosowaniu tego przybliżenia w badaniach numerycznych rozwiązań równania Boltzmann i porównaniu tych rozwiązań z efektywnym opisem formułowanym w języku hydrodynamiki. Takie porównanie jest bardzo ważne zarówno z perspektywy czysto pojęciowej jak i dla praktyki opisu wyników eksperymentalnych. Tematyka podjęta w omawianej rozprawie wpisuje się w prowadzony intensywnie od kilku lat program badawczy, którego efektem jest istotna rewizja poglądów na temat zakresu stosowalności opisu w języku hydrodynamiki relatywistycznej i szeregu podstawowych aspektów tej teorii.

Konstrukcja i główne wyniki rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku angielskim. Układ pracy jest czytelny i przejrzysty. Składa się siedmiu rozdziałów, czterech dodatków i spisu bibliografii, który zawiera 133 pozycje.

Rozdział pierwszy zawiera ogólne wprowadzenie w tematykę zderzeń ciężkich jonów i plazmy kwarkowo-gluonowej a także wstępne uwagi na temat teorii kinetycznej i opisu hydrodynamicznego.

Rozdział drugi prezentuje równania kinetyczne dla mieszaniny kwarków i gluonów w przybliżeniu czasu relaksacji, a także wykorzystywane dalej parametryzacje funkcji rozkładu. Czas relaksacji przyjęty jest jako stały. Autorka również przyjmuje masę 300 MeV dla kwarków – oba te wybory łamią symetrię konforemną. Zdefiniowane tu są też momenty funkcji dystrybucji i warunki Landaua dla tensora energii-pędu i prądu zachowanej liczby barionowej. Takie postawienie problemu uogólnia wcześniejsze rozważania opisane w literaturze na przypadek masywnych fermionów z uwzględnieniem zachowania liczby barionowej. Autorka stosuje także w pełni poprawne statystyki kwantowe raczej niż używane często w tym kontekście przybliżenie poprzez statystykę Boltzmana.

Rozdział trzeci definiuje odpowiednie zmienne kinematyczne właściwe dla przepływu niezmienniczego względem pchnięć Lorentzowskich i opisuje redukcję równań Boltzmana do równań całkowych, uogólniając wcześniejsze wyniki w tym zakresie opisane w artykułach [121,122] i [25] w bibliografii. Ponieważ te równania dają się numerycznie rozwiązywać w bardzo efektywny sposób, Autorka określa tak uzyskane rozwiązania mianem rozwiązań dokładnych (choć nie są one uzyskane analitycznie). Terminologia ta wydaje mi się potencjalnie myląca, ale została przyjęta we wcześniej publikowanych artykułach naukowych, więc dalsze jej użycie w pracy doktorskiej wydaje się naturalne.

Rozdział czwarty zawiera opis rachunków numerycznych polegających na rozwiązywaniu wyżej wspomnianych równań całkowych metodą iteracyjną i dyskusję uzyskanych wyników. Znajdujemy tu też omówienie warunków początkowych i parametrów użytych w obliczeniach. Autorka następnie omawia otrzymane rozwiązania numeryczne (czyli uzyskane zależności temperatury i potencjału chemicznego od czasu własnego), a następnie porównuje je z odpowiednimi rozwiązaniami hydrodynamicznymi uzyskanymi w kontekście równań hydrodynamiki relatywistycznej w przybliżeniu płynu doskonałego i Naviera-Stokesa. Uzyskane wyniki numeryczne pozwoliły autorce na badanie zjawiska hydrodynamizacji i związanego z nim pojawieniu się zachowania atraktorowego przy dużej anizotropii ciśnienia, uogólniając wyniki wcześniej uzyskane w kontekście układów konforemnych na przypadek niekonforemny rozważany

w omawianej pracy. Ciekawym wynikiem tego rozdziału jest też stwierdzenie, że hydrodynamizacja równania stanu (czyli zrównanie się średniego ciśnienia z ciśnieniem równowagowym) zachodzi później niż hydrodynamizacja w sensie anizotropii ciśnienia podłużnego i poprzecznego. Jest to zgodne z wynikami uzyskanymi wcześniej metodami opartymi na korespondencji AdS/CFT w odniesieniu do silnie sprzężonych modeli holograficznych ze złamaną symetrią konforemną. Metody te stosują się w całkiem innym reżimie fizycznym niż stosowane w rozprawie podejście oparte na teorii kinetycznej, co sugeruje, że omawiane następstwo tych dwóch aspektów hydrodynamizacji rzeczywiście zachodzi niezależnie od przybliżeń i ograniczeń właściwych dla obu rodzajów analizy.

Rozdział piąty poświęcony jest sformułowaniu anizotropowej hydrodynamiki (aHydro) dla mieszaniny gluonów i kwarków rozważanej w omawianej rozprawie. Wyniki te są następnie użyte w rozdziale szóstym do porównania przewidywań numerycznych rozwiązań równań całkowych z opisem w języku aHydro.

Rozdział siódmy zawiera zwięzłe podsumowanie rozprawy. Ponadto pracę uzupełnia pięć dodatków zawierających szereg szczegółów technicznych.

Uwagi krytyczne

Omawiana praca doktorska zawiera szereg ciekawych i solidnych rachunków, ale wydaje mi się, że ich potencjał nie został w pełni wykorzystany. W szczególności wydaje mi się, że zawarte w rozdziale 6 porównanie z anizotropową hydrodynamiką można łatwo było wzbogacić poprzez porównanie wyników z przewidywaniami teorii Israela-Stewart. Autorka ogranicza się do porównania wyników obliczeń w ramach teorii kinetycznej do sprawdzenia, że obliczenia te są zgodne z teorią Naviera-Stokesa i aHydro w obszarze bliskim równowagi. Ciekawe byłoby jednak porównanie tych teorii z często w takim kontekście stosowaną teorią Israela-Stewart, bo chociaż wszystkie te opisy pokrywają się w pobliżu równowagi, to dla wczesnych czasów powinny być odmienne. Ponieważ jedną z motywacji dla aHydro jest właśnie opis wcześniejszych etapów ewolucji, to takie porównanie wydaje się być celowe.

Wydaje się też, że dyskusja wyników (a w szczególności wspomniane wyżej porównanie) mogłaby być jeszcze ciekawsza poprzez zbadanie zależności tych wyników od wartości czasu relaksacji. W szczególności, oczekiwałbym że czas relaksacji będzie odpowiadał za tempo zaniku modów niehydrodynamicznych, więc można by w ten sposób zobaczyć jak hydrodynamizacja zależy od wartości czasu relaksacji. Ciekawe też mogłoby być porównanie z przypadkiem

konforemny i ewentualne zbadanie zależności wyników od łamania tej symetrii przez masy kwarków.

Na koniec chciałbym zwrócić uwagę na fakt, że podsumowanie wyników zawarte w rozdziale 7 może się wydać dość skromne i nie daje pełnego obrazu znaczących moim zdaniem rezultatów uzyskanych przez Autorkę.

Podsumowanie

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską mgr Ewy Maksymiuk uważam, że zawiera ona solidne i ciekawe wyniki, które wnoszą wartościowy wkład do naszego obrazu dochodzenia do równowagi w kontekście fizyki plazmy kwarkowo-gluonowej. Stwierdzam, że rozprawa ta spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim, wobec czego wnoszę o dopuszczenie mgr Maksymiuk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr. hab. Michał Spaliński