

# *Streszczenie rozprawy doktorskiej*

## **Relativistic Hydrodynamics Beyond the Second Order**

### **Hydrodynamika Relatywistyczna w Rzędach Wyższych niż Drugi**

Viktor SVENSSON

Zderzenia jąder atomowych przy wielkich energiach w Relatywistycznym Zderzaczu Ciężkich Jonów i w Wielkim Zderzaczu Hadronów osiągają temperatury wystarczające do stopienia materii hadronowej i powstania plazmy kwarkowo-gluonowej. Procesy dynamiczne które temu towarzyszą są skomplikowane w opisie w języku fundamentalnej teorii oddziaływań silnych — chromodynamiki kwantowej. W związku z tym, różne uproszczone modele zostały wprowadzone do opisu poszczególnych etapów tych złożonych procesów. W szczególności, hydrodynamika relatywistyczna opisuje ekspansję plazmy kwarkowo-gluonowej powstającej po krótkim czasie od zderzenia jąder atomowych.

Hydrodynamika relatywistyczna ma za zadanie opisać dynamikę klasy układów fizycznych lokalnie bliskich równowadze, jednak dokładne warunki jej stosowalności pozostają otwartym problemem. W badaniach nad zderzeniami jąder atomowych przy ultrarelatywistycznych energiach zaobserwowano, że opis w języku hydrodynamiki relatywistycznej może już po krótkim czasie zaskakująco dobrze opisywać wynik zderzenia, mimo, że układ fizyczny jest ciągle bardzo daleki od lokalnej równowagi termodynamicznej. Niniejsza praca doktorska rozwija dwa komplementarne podejścia do zrozumienia co ogranicza stosowalność opisu hydrodynamicznego.

Relacje hydrodynamiczne są centralnym objektem w hydrodynamicie relatywistycznej i są zazwyczaj sformułowane jako rozwinięcie perturbacyjne w gradientach, którego forma jest ograniczona przez symetrie opisu mikroskopowego. Modele hydrodynamiczne są zazwyczaj tworzone poprzez efektywne obcięcie rozwinięcia gradientowego, na przykład, w drugim rzędzie. Rachunki w modelach mikroskopowych, takich jak teoria kinetyczna przy słabym sprzężeniu czy holografia w przypadku silnego sprzężenia, pokazują, że rozwinięcie gradientowe zawiera nieskończenie wiele wyrazów. Żeby naprawdę zrozumieć skąd wynika zachowanie hydrodynamiczne, należy lepiej zrozumieć własności tego rozwinięcia, zwłaszcza, że rozwinięcie gradientowe często okazuje się rozbieżne. Artykuły wchodzące w skład tej rozprawy doktorskiej dostarczyły lepszego zrozumienia źródeł i własności tych rozbieżności, co stanowi jedno z dwóch wyżej wymienionych podejść do problemu stosowalności opisu hydrodynamicznego.

Wyznaczenie zachowania rozwinięcia gradientowego w wysokich rzędach jest trudne i do tej pory zostało osiągnięte tylko w prostych modelach dla przepływów charakteryzujących się bardzo wysokim stopniem symetrii, takich jak przepływ Bjorkena niezmienniczy ze względu na pchnięcia w kierunku osi zderzenia. Wyniki dostarczone w artykułach wchodzących w skład niniejszej rozprawy doktorskiej zademonstrowały rozbieżność rozwinięcia gradientowego zarówno dla szerszej klasy modeli, jak i przepływów. Przyczyna tej rozbieżności okazuje się wynikać ze

związków między hydrodynamiką a niehydrodynamicznymi wzbudzeniami układów. Badania przeprowadzone w niniejszej pracy doktorskiej rozwinęły naszą wiedzę na temat tych relacji. W szczególności, użyto tu metod z matematycznej teorii resurgencji, które pozwalają lepiej zrozumieć szeregi rozbieżne. Podejście to bazuje na uzupełnieniu sumy hydrodynamicznego rozwinięcia gradientowego poprzez efekty niehydrodynamiczne w ramach jednolitej struktury matematycznej noszącej nazwę transszeregu.

Najbardziej dogłębna analiza tych aspektów hydrodynamiki relatywistycznej w niniejszej pracy doktorskiej przeprowadzona została w relatywistycznej teorii kinetycznej w przybliżeniu czasu relaksacji. Model ten, reprezentujący podejścia charakterystyczne dla słabo sprzężonych układów, pozwolił dostarczyć wyniki, które w pewnych ważnych aspektach okazały się znacząco odbiegać od wcześniejszej analizy w przypadku silnie sprzężonych systemów.

W kolejnej serii badań, zastosowano teorię liniowej odpowiedzi w celu lepszego zrozumienia mechanizmów rządzących (ro)zbieżnością rozwinięcia gradientowego w hydrodynamice relatywistycznej. W szczególności pokazano, że rozbieżność rozwinięcia gradientowego nie jest konsekwencją wysokiej symetrii przepływu niezmienniczego ze względu na pchnięcia, gdyż istnieje wiele innych rozwiązań o mniejszej symetrii, które również są rozbieżne. Ponadto zademonstrowano, że w przypadku danych początkowych których transformata Fouriera nie zawiera wkładów od dużych pędów / częstości, hydrodynamiczne rozwinięcie gradientowe może być szeregiem zbieżnym. Użycie tych metod pozwoliło również znaleźć uogólnienie transszeregu na przepływy o mniejszej symetrii niż przepływ niezmienniczy ze względu na pchnięcia.

Daleko od równowagi, relacje hydrodynamiczne mogą się zawiązać w postaci atraktorów hydrodynamicznych. Jest to drugie z wyżej wymienionych podejść do stosowalności opisu hydrodynamicznego, które zostały rozważone w niniejszej pracy doktorskiej. Podobnie do hydrodynamicznego rozwinięcia gradientowego, atraktory hydrodynamiczne zostały odkryte w prostych modelach w przypadku przepływów o dużej symetrii i jednym z najważniejszych problemów badawczych w tej dziedzinie jest ich zrozumienie w bardziej realistycznych sytuacjach. Badania zawarte w pracy doktorskiej dostarczyły nowej perspektywy na atraktory hydrodynamiczne, która bazuje na ilościowej charakteryzacji zjawisk takich jak wymazanie informacji o szczegółach stanu początkowego w wyniku dynamiki układu czy pojawienie się uniwersalności w zachowaniu układu dla odpowiednio długich czasów. Podejście zaproponowane w ramach pracy doktorskiej bazuje na analizie danych i pozwala rozważyć przypadki, których zrozumienie analityczne jest za skomplikowane. W znanych przypadkach, odtwarza ono jednocześnie zidentyfikowane już atraktory hydrodynamiczne.

Praca doktorska ma formę serii artykułów składającej się z pięciu opublikowanych prac i jednej w recenzji. Rozszerzony wstęp prezentuje te artykuły w kontekście szerszej dyscypliny badawczej, która jest przez nie reprezentowana, i wprowadza konieczne podstawowe pojęcia. Ponadto, wstęp podsumowuje najważniejsze wnioski płynące z badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej, jak również prezentuje nowe pytania i kierunki badawcze, które wynikają z przedstawionych artykułów.