

Teoria kinetyczna i hydrodynamika gazów niemal całkowalnych

Maciej Łebek

Całkowalne jednowymiarowe gazy kwantowe cieszą się dużym zainteresowaniem głównie z dwóch powodów: umożliwiają analityczny wgląd w silnie skorelowaną, nieperturbacyjną fizykę oraz są powszechnie realizowane w eksperymentach. W ostatnim czasie uwaga badaczy przesunęła się w stronę dynamiki nierównowagowej, co zostało spowodowane przez przełomy teoretyczne, takie jak uogólniony zespół Gibbsa (GGE) oraz uogólniona hydrodynamika (GHD).

Obecność czynników łamiących całkowalność w eksperymentach, takich jak zewnętrzne pułapkowanie czy dodatkowe oddziaływania dalekozasięgowe, wymaga jednak rozwoju metod perturbacyjnych do opisu dynamiki gazów prawie całkowalnych. Pułapkowanie zewnętrzne występuje w laboratoriach praktycznie zawsze, natomiast oddziaływania dalekozasięgowe są szczególnie widoczne w dipolowych gazach kwantowych pierwiastków o dużych magnetycznych momentach dipolowych, takich jak dysproz. Teoretyczny opis takich układów stanowi główny temat niniejszej rozprawy.

Głównym celem pracy było stworzenie ram teoretycznych dla zrozumienia dwóch klas zjawisk nierównowagowych w gazach niemal całkowalnych. Pierwsza klasa zagadnień dotyczy szeroko pojętej relaksacji i termalizacji. W kontekście gazów opis relaksacji opiera się zazwyczaj na teorii kinetycznej, której punktem wyjścia jest hierarchia BBGKY (Borna-Bogoliubowa-Greena-Kirkwooda-Yvona) dla funkcji korelacji. Hierarchia ta służy do wprowadzania dalszych przybliżeń i po obcięciu prowadzi do operatorów zderzeń, takich jak równania Boltzmanna czy Landaua, które wyznaczają skalę czasową relaksacji oraz punkty stałe dynamiki.

W dysertacji zaadaptowano strukturę typu BBGKY do układów prawie całkowalnych, co pozwoliło na jej efektywne obcięcie. Wyprowadzone w ten sposób równanie kinetyczne opisujące termalizację zostało pomyślnie zweryfikowane za pomocą symulacji numerycznych oraz danych doświadczalnych dotyczących szybkości termalizacji w gazach dipolowych. Ponieważ w eksperymentach gazy jednowymiarowe umieszcza się często w sieciach dwuwymiarowych, zbadano również łamanie całkowalności poprzez oddziaływania między dwiema tubami. W takim scenariuszu odkryto interesujące atermalne stany stacjonarne, których mechanizm wyjaśniono poprzez kinematykę rozpraszania dwucząstkowego w jednowymiarowych układach z symetrią Galileusza.

Druga część pracy poświęcona jest hydrodynamice gazów niemal całkowalnych, czyli efektywnej teorii dynamiki wyłaniającej się w dużych skalach czasoprzestrzennych. Struktura hydrodynamiki jest ściśle powiązana z występującymi w układzie prawami zachowania. Zestaw zachowanych ładunków zmienia się drastycznie po złamaniu całkowalności, co pociąga za sobą również fundamentalną zmianę hydrodynamiki.

Opierając się na strukturach GGE i GHD wykazano, że na dostatecznie dużych skalach czasoprzestrzennych klasa uniwersalności hydrodynamicznej gazów prawie całkowalnych zmienia się z GHD na jednowymiarową wersję równań Naviera-Stokesa (NS). Współczynniki transportu – lepkość oraz przewodnictwo cieplne – zostały obliczone w sposób jawny. Cel ten osiągnięto poprzez odpowiednie uogólnienie klasycznego wyprowadzenia hydrodynamiki NS z równania Boltzmanna przy użyciu rozwinięcia Chapmana-Enskog (ChE). Logikę metody ChE zastosowano także do opisu układu dwutubowego wykazującego stany atermalne, gdzie niespodziewanie odkryto równanie Burgersa w wielkoskalowej dynamice gęstości.

Na koniec rozważono problem transportu anormalnego w jednowymiarowych gazach niecałkowalnych. Wykorzystując nieliniową fluktuującą hydrodynamikę, czyli ugruntowaną metodę w tej dziedzinie, znaleziono mechanizm prowadzący do tłumienia anomalii transportowych wraz z odwrotnością parametru łamania całkowalności. Sformułowano także ogólne przewidywanie, według którego gazy prawie całkowalne charakteryzują się trzema różnymi klasami uniwersalności hydrodynamiki, ujawniającymi się w różnych reżimach czasoprzestrzennych.

Słowa kluczowe: hydrodynamika, teoria kinetyczna, układy całkowalne, jednowymiarowe gazy kwantowe, termalizacja, transport