

Podstawą Modelu Standardowego cząstek elementarnych jest teoria Yanga-Millsa: teoria cząstek o spinie 1 nieco podobnych do fotonu, ale obdarzonych bardzo specyficznymi samoodziaływaniami. Te wzajemne oddziaływania są kluczowe w całym Modelu Standardowym, ale są szczególnie spektakularne w przypadku gluonów, które są odpowiedzialne za silne oddziaływanie jądrowe, w szczególności zamykające kwarki w nukleonach.

Podczas gdy wiele wiadomo na temat Modelu Standardowego w sytuacjach, w których można założyć, że oddziaływania są słabe, nadal niewiele wiadomo na temat zachowania podstawowych składników materii w sytuacjach, w których oddziaływania są silne. Obejmuje to wiele cech diagramu fazowego materii jądrowej, który zawiera odpowiedzi na pytania takie jak to, co dzieje się z nią w wysokich temperaturach i/lub wysokich gęstościach. Takie pytania są bardzo interesujące z perspektywy badań wczesnego Wszechświata czy fizyki gwiazd neutronowych. Jedno jest jednak pewne: gdy materia jądrowa zostanie podgrzana do temperatur powyżej 200 MeV, zamienia się w stan skupienia zwany plazmą kwarkowo-gluonową (QGP).

Celem tego projektu jest znalezienie efektywnego opisu dynamiki QGP, która tutaj na Ziemi jest wytwarzana w eksperymentach, w których ciężkie jądra zderzają się w akceleratorach, takich jak Relatywistyczny Zderzacz Ciężkich Jonów (RHIC) w Brookhaven lub w eksperymencie ALICE w LHC w CERN. W następstwie zderzenia jądrowego zwykle rejestruje się dziesiątki tysięcy cząstek. Już Fermi i Landau w latach 40. i 50. XX wieku domyślali się, że powinno mieć zastosowanie podejście statystyczne w sensie relatywistycznej hydrodynamiki. Prawie 20 lat temu oczekiwania te zostały zdecydowanie potwierdzone. Nie było wcale oczywiste, że tak się stanie, ponieważ spodziewamy się, że przy wystarczająco wysokich energiach zderzeń powinniśmy zobaczyć gaz słabo oddziałujących kwarków i gluonów: oczekiwanie to wynika z asymptotycznej swobody, która jest jedną z podstawowych cech silnego oddziaływania jądrowego. Jednak zarówno w RHIC, jak i LHC wyraźnie obserwujemy efekty kolektywne charakterystyczne dla płynów, a nie gazów: rozkłady pędów wykrytych cząstek niosą informacje o geometrii zderzenia (jest to tzw. „przepływ eliptyczny”). Powstały płyn nazywa się plazmą kwarkowo-gluonową, chociaż nie jest jasne, czy można go w użyteczny sposób traktować jako zbiór pojedynczych kwarków i gluonów; jest to raczej stan kwantowy, który nie posiada opisu w języku cząstek. Istotne jest również to, że przepływ plazmy kwarkowo-gluonowej ma charakter dysypatywny: wiąże się ze wzrostem entropii. Efekt ten wynika z lepkości płynu, przy czym okazuje się, że lepkość plazmy kwarkowo-gluonowej jest niewielka w stosunku do jej gęstości entropii – dlatego czasami mówi się o QGP że jest to „najdoskonalszy płyn w przyrodzie”. Warto również zauważyć, że w eksperymencie ALICE temperatura plazmy kwarkowo-gluonowej przekracza 5 bilionów stopni.

Fundamentalna teoria oddziaływań silnych – Chromodynamika Kwantowa – jest częścią Modelu Standardowego. Ze względu na silne oddziaływania między kwarkami i gluonami na skali jądrowej, teoria ta jest trudna do rozwiązania i nie dysponujemy narzędziami matematycznymi niezbędnymi do jej efektywnego wykorzystania do opisu plazmy kwarkowo-gluonowej w sposób ilościowy. Na szczęście nawet stany nierównowagowe wykazują pewne uniwersalne właściwości. Właściwości te, wynikające z bardzo ogólnych zasad zachowania, opisuje teoria relatywistycznej dynamiki płynów. Pojawienie się tego rodzaju opisu było przedmiotem intensywnych badań w ostatnich latach, głównie właśnie ze względu na jego zastosowania w fizyce plazmy kwarkowo-gluonowej. Niezwykle ważnym zadaniem jest zrozumienie, kiedy ten opis hydrodynamiczny jest stosowalny i wyprowadzenie jego parametrów z podstawowej teorii mikroskopowej, nawet w jakiś przybliżony sposób. Zaskakujące jest, że niektóre wielkości fizyczne zachowują się w sposób uniwersalny, nawet gdy układ jest daleki od lokalnej równowagi. Takie zachowanie wynika z gwałtownej ekspansji QGP zaraz po zderzeniu i nosi nazwę „atraktora dalekiego od równowagi”.

W omawianym projekcie badawczym sformułujemy i zbadamy modele, które zapewnią praktyczne laboratorium teoretyczne, w którym będzie można badać powstawanie zachowań hydrodynamicznych, a w szczególności atraktorów. Planujemy też zbadać, w jaki sposób ślady stanu początkowego mogą przetrwać i pozostawić eksperymentalnie dostępne konsekwencje.