

Makroskopowy świat wokół nas, znajdujący się w zakresie fizyki niskich energii, jest skomplikowaną kompozycją zawierającą wiele struktur na różnych poziomach. Cząstki fundamentalne najniższego poziomu nazywamy kwarkami. Łączą się one ze sobą, tworząc neutrony i protony - nukleony (zawierające kwarki górne i dolne) z których powstają jądra atomowe. Te jądra, otoczone elektronami, tworzą atomy które łączą się ze sobą tworząc molekuły i inne substancje chemiczne. Naukowe osiągnięcie fizyki były zawsze zaskakujące i otwierały nowe możliwości badania wszechświata. Jednym z takich osiągnięć jest Model Standardowy Cząstek Elementarnych, który ujawnił obecność cząstek o których mieliśmy ograniczone pojęcie. Wszystkie pierwiastki oddziałują ze sobą na różne sposoby poprzez wymianę cząstek. Na bardzo krótkich dystansach, gluony, mezony i inne bozony są najważniejszymi pośrednikami oddziaływań. Fotony i grawitony z kolei opisują długodystansowe oddziaływania elektromagnetyczne i grawitacyjne. Najbardziej zagęszczona materia na ziemi znajduje się w jądrach ciężkich atomów, które można badać za pomocą eksperymentalnego zderzania ciężkich jonów (ang. heavy-ion collision, HIC). Badanie materii w tak wysokich gęstościach jest interesujące, ponieważ w takich warunkach można zaobserwować egzotyczne stany materii, w tym cząstki zawierające jeden lub dwa kwarki dziwne które nie pojawiają się samoistnie w normalnej materii. W modelu standardowym obecność takich stanów jest możliwa dzięki zdefiniowaniu nowej liczby kwantowej, dzwoności, co pozwala rozszerzyć klasyfikację hadronów z nukleonów o dodatkową rodzinę cząstek: hiperiony. Te niesamowite "dziwne" cząstki pozwalają nam lepiej poznać wysokoenergetyczne właściwości materii w warunkach ekstremalnych gęstości i wysokich temperatur. Najlepszym miejscem do obserwacji materii w warunkach ekstremalnych, z gęstościami nawet wyższymi niż obserwowane w HIC, są ciała niebieskie nazywane gwiazdami neutronowymi (NS). Współczesne obserwacje astrofizyczne sugerują możliwość pojawiania się hiperonów w jądrach tych gwiazd, będących naturalnymi laboratoriami materii w warunkach ekstremalnych. Oprócz hiperonów, w jądrach gwiazd neutronowych spodziewamy się obecności wolnych kwarków czyli przejścia fazowego z materii hadronowej do kwarkowej w wysokich gęstościach, co również sugerują obserwacje. Warto wspomnieć, że hiperony pozostawiają po sobie zauważalny ślad w ziemskich jądrach atomowych. Takie jądra z hiperonami nazywa się hiperjądrami. Istnieje dynamicznie rozwijana gałąź badań nad tymi obiektami, fizyka hiperjądrowa, a ich znaczenie dla fizyki jądrowej można porównać ze znaczeniem mezoatomów w fizyce atomowej. Pomimo odkrycia pierwszego hiperjądra ponad 70 lat temu, w 1952, nadal napotykaemy wiele niewiadomych z nimi związanych. Wiele zagadek i pytań pozostaje nierozwiązanych w tej dziedzinie fizyki. Jednym z nich jest opis oddziaływań między nukleonami i hiperionami oraz między samymi hiperionami. Rozwiązaniem tego problemu mogą być dokładne dane na temat potencjałów hiperonowych uzyskane dzięki eksperymentom HIC. Na podstawie tych danych można zbudować równania stanu (ang. equation of state, EoS) materii hiperjądrowej za pomocą technik teorii wielu ciał. Dokładna estymacja mikroskopowego równania stanu gęstej materii ma znaczny wpływ na nasze zrozumienie właściwości termodynamicznych materii. W ramach tego projektu, zamierzam opracować bardziej wszechstronne równania stanu za pomocą dwóch różnych metod teoretycznych. Jedna z nich jest oparta o aproksymację średniego pola oddziaływania barionów z mezonami, wykorzystując chiralnych partnerów barionowych do uzyskania opisu restoracji symetrii chiralnej w sektorze hadronowym, nazywana modelem dubletu parzystości. Druga metoda wykorzystuje realistyczne potencjały par barionowych i nazywa się metodą ograniczonych wariacji najniższego rzędu (ang. lowest order constrained variational method, LOCV). Zamierzam obie metody porównać pod kątem możliwości odtwarzania danych eksperymentalnych i obserwacyjnych. Dodatkowo, zamierzam wykorzystać stworzone równania stanu w konstrukcji przejścia fazowego pierwszego rzędu lub crossover z materii hiperjądrowej do materii złożonej z wolnych kwarków i zbadam warunki wystąpienia takiego przejścia. Obserwacje gwiazd neutronowych mogą służyć do ograniczenia zakresu w jakim może dojść do takich przejść fazowych. Dodanie hiperonowych stopni swobody znacznie wpływa na właściwości termodynamiczne materii w jądrach gwiazd neutronowych oraz gęstej cieplej materii oddziałującej silnie zgodnie z opisem zawartym w teorii chromodynamiki kwantowej (ang. quantum chromodynamics, QCD). Z fizycznego punktu widzenia, można się spodziewać wystąpienia tego stopnia swobody w wysokich gęstościach, dlatego wyniki uzyskane z wykorzystaniem takich rozszerzonych równań stanu byłyby bardziej wiarygodnym świadectwem struktury fazowej materii oddziałującej silnie w pełnym zakresie gęstości i temperatur. Te nowe równania stanu powinny pozostać w zgodzie z właściwościami obserwowanymi w niskich gęstościach w okolicy nasycenia jądrowego oraz z ograniczeniami wynikającymi z obserwacji mas i promieni gwiazd neutronowych w wysokich gęstościach. Takie równanie stanu może być wykorzystane w badaniach astrofizycznych oraz w teoretycznym opisie zderzeń ciężkich jonów, a jego wyniki będą mogły zostać przetestowane w przyszłych eksperymentach HIC w placówkach FAIR, NICA oraz w innych nisko energetycznych eksperymentach.