

Kraków 24.05.2019

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Nielsa-Uwe Firedricha Bastiana
*Density functional for a unified description of quark-hadron matter
and applications in heavy-ion collisions and astrophysics*

Tematem rozprawy doktorskiej mgr. Nielsa-Uwe Firedricha Bastiana jest modelowanie gęstej materii z kwarkowymi i hadronowymi stopniami swobody. Jest to jedno z najważniejszych i jednocześnie najtrudniejszych zagadnień w fizyce silnych oddziaływań. Opiekunami rozprawy doktorskiej są dr hab. Tobias Fisher i prof. David Blaschke z Uniwersytetu Wrocławskiego.

Materia hadronowa w dużych gęstościach przechodzi od stanu materii hadronowej do stanu materii kwarkowej. Opis zjawiska uwięzienia koloru i przejścia fazowego między materią z nukleonowymi i kwarkowymi stopniami swobody nie jest możliwy w sposób ścisły. W skończonych gęstościach nie są też możliwe obliczenia numeryczne chromodynamiki kwantowej na sieciach. Opis musi się opierać na przybliżonych modelach. Model efektywny powinien zawierać nukleonowe i kwarkowe stopnie swobody. Przy czym kwarkowe (lub di-kwarkowe) wzbudzenia powinny być silnie tłumione w fazie hadronowej. Fizycznie gęsta materia kwarkowa lub nukleonowa występuje w gwiazdach neutronowych i w obszarze zderzenia jąder przy relatywistycznych energiach. Realistyczne modele gęstej materii są konieczne do opisu procesów zachodzących przy tworzeniu gwiazd neutronowych i do opisu dynamiki zderzeń jądrowych.

Rozprawa doktorska jest napisana dość zwięźle. Składa się z dwóch części. W pierwszej części opisane są próby stworzenia efektywnych modeli materii hadronowo-kwarkowej. Druga część zawiera przedstawienie kilku zastosowań parametryzacji równania stanu materii hadronowo-kwarkowej. Pan Bastian jest współautorem ponad 10 publikacji. Kilka najważniejszych, w odniesieniu do materiału pracy doktorskiej, dołączono do tekstu rozprawy.

Model materii nukleonowo-kwarkowej zbudowany jest na dwóch parametryzacjach dla obu faz. Faza nukleonowa używa szczegółowej parametryzacji funkcjonu gęstości dla gęstości skalarnych i wektorowych wprowadzonych przez Typela i innych. Parametryzacja dobrze oddaje własności saturacji materii jądrowej i spełnia ograniczenia eksperymentalne fizyki jądrowej. Faza kwarkowa opisana jest przez wprowadzenie energii własnych zależnych od gęstości. Potencjały kwarkowe wprowadzone są w sposób samouzgodniony. Potencjał efektywny zawiera człony generujące odpowiednie energie własne. Całe podejście jest spójne termodynamicznie. Fenomenologicznie uwięzienie koloru wbudowane jest przez rozbieżności masy efektywnej kwarków w niskich gęstościach. Faza kwarkowa i gluonowa połączone są przez konstrukcję Maxwella. Wprowadzone równanie stanu ma przejście fazowe pierwszego rodzaju. Przytoczone jest zastosowanie modelu do opisu gwiazd neutronowych. Możliwe są dwie rodziny rozwiązań dla tej samej masy gwiazdy i dwóch promieni.

Kolejny rozdział opisuje konstrukcję modelu opartego na rozwinięciu wirialnym równania stanu dla układu składającego się elementarnych kwarków i klastrów. Podobne metody były stosowane w fizyce atomowej i fizyce jądrowej. Autorzy zakładają prostą formę dla przesunięć fazowych nukleonów i kwarków, a energie własne zależą od samouzgodnionych gęstości. W modelu wyliczono diagram fazowy. Wraz ze wzrostem gęstości następuje przemiana od czysto hadronowego układu, poprzez mieszany układ, do czysto kwarkowego układu. Jest to interesujące badanie modelowe.

Autor przedstawia dwa ciekawe zastosowania równania stanu gęstego układu w astrofizyce. Pierwszym rozważanym zjawiskiem jest tworzenie gwiazdy protoneutro nowej w końcowej ewolucji gwiazdy o masie 50 mas Słońca. Zaawansowane rachunki numeryczne przewidują, że dla równania stanu z przejściem fazowym pierwszego rodzaju powstaje druga fala eksplozji w trakcie zapadania się obiektu. Model przewiduje wytworzenie gwiazdy neutronowej o masie około 2 mas Słońca.

Autorzy kolejnej pracy rozważają emisję fal grawitacyjnych w procesie łączenia dwóch gwiazd neutronowych. Występują wyraźne różnice w widmie emitowanych fal grawitacyjnych dla ewolucji z przejściem fazowym pierwszego rodzaju lub bez. Rozkład widma dla równania stanu z przejściem fazowym różni się wyraźnie od symulacji dla wielu realistycznych równań stanu, ale bez przejścia fazowego. Byłaby to ciekawa sygnatura doświadczalna przejścia fazowego w równaniu stanu gęstej materii.

W ramach rozwinięcia wirialnego autor rozważa zjawisko produkcji lekkich jąder

w reakcjach jądrowych. Pełny opis dynamiczny tego zjawiska jest niemożliwy. Model pozwala na wprowadzenie poprawek od oddziaływań do gęstości równowagowych lekkich jąder. Wydaje się, że model oparty na funkcjonale gęstości nie będzie mógł opisać w pełni realistycznie dynamiki zderzeń. Jeśli pojawiają się niestabilności spinodalne w układzie, ich realistyczna dynamika wymaga uwzględnienia skal wynikających z zasięgu oddziaływań i poprawek kwantowych. Te efekty nie są uwzględnione w podejściu funkcjonału gęstości. Praca jest napisana bardzo zwięźle, co jest zaletą. Jednak w niektórych miejscach zrozumienie nowych oznaczeń i opisów rysunków wymagają od czytelnika pewnego wysiłku.

Wyniki naukowe otrzymane przez Pana Nielsa-Uwe Bastiana są ciekawe. Otrzymane parametryzacje równania stanu mają ważne zastosowania w modelowaniu zjawisk astrofizycznych. Pan Bastian jest współautorem wielu prac z zakresu tematyki rozprawy doktorskiej. Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. Nielsa-Uwe Bastiana do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Piotr Bożek

P. Bożek

