



ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa
tel: (22) 841 00 41, (22) 3296 100
fax: (22) 841 00 46
email: camk@camk.edu.pl
<http://www.camk.edu.pl>

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

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

Rozprawa poświęcona jest teoretycznemu opisowi materii hadronowej i materii kwarkowej oraz przejściu fazowemu między tymi dwoma stanami materii, oraz zastosowaniom wyników teoretycznych w fizyce zderzeń ciężkich jonów i w astrofizyce.

Rozprawa złożona jest z pięciu rozdziałów (54 strony), trzech dodatków, z których dwa przedstawiają metody teoretyczne oraz modele używane w rozprawie, zaś dodatek trzeci to lista publikacji których współautorem jest mgr Bastian. Strony 69-123 to dołączone kopie tych publikacji mgr Bastiana, których wyniki odgrywają istotną rolę w rozprawie, oraz pełna lista literatury cytowanej w rozprawie.

Obecny stan wiedzy nt. diagramu fazowego chromodynamiki kwantowej (QCD) w płaszczyźnie T (temperatura)- μ_B (barionowy potencjał chemiczny) jest zdecydowanie niezadowolający. Stan ten jest zwięźle opisany w Rozdziale 1, który pełni rolę wstępu. Dostępne symulacje numeryczne QCD na siatkach mogą określić parametry przejścia faza hadronowa-faza kwarkowa jedynie na osi $\mu_B = 0$. to fatalny stan z punktu widzenia zastosowań astrofizycznych. Mianowicie, dla $\mu_B > 0$, istotnego dla rdzeni gwiazd neutronowych, symulacje numeryczne *lattice QCD* załamują się z powodu tzw. problemu znaku (*sign problem*). Pozostaje użycie modeli efektywnych zarówno dla fazy hadronowej (H) jak i kwarkowej (Q). Modele te zawierają liczne słabo określone parametry, a ekstrapolacja linii przejścia fazowego H-Q od osi $\mu_B = 0$ do osi $T = 0$ jest w konsekwencji tych niepewności szerokim obszarem na płaszczyźnie $\mu_B - T$. To widać wyraźnie na Rys.1.2. Dla fazy H godna zaufania metoda teoretyczna (*chiral effective field theory*) jest w praktyce stosowalna tylko dla gęstości znacznie mniejszych od gęstości jądrowej $n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ podczas gdy faza Q może być opisana w ramach perturbacyjnej QCD dopiero powyżej setek n_0 . Z kolei więzy empiryczne z fizyki jądrowej są dostępne jedynie w pobliżu n_0 , do tego doszedł ostatnio najbardziej masywny pulsar radiowy o masie $2M_{\text{Sun}}$.

W Rozdziale 2 opisana jest zasadnicza metoda użyta do obliczenia równania stanu (EOS) dla faz H i Q, a mianowicie metoda relatywistycznego funkcjonału gęstości (*relativistic density functional* - RDF). Metoda jest oparta na przybliżeniu średniego pola, analogicznie

to szeroko stosowanego modelu Walecki dla materii hadronowej. Dla fazy Q uwzględnione są pewne cechy związane z uwięzieniem kwarków, podobnie jak te związane z odzyskaniem symetrii chiralnej. Dla fazy H użyty jest model Walecki przeformułowany w ramach RDF. Ilość parametrów których wartości można "dobierać", a które są potrzebne do otrzymania rozsądnego modelu opisującego obie fazy, jest nieprzyjemnie duża. Podobnie niepokojąca jest bardzo silna zależność diagramu fazowego od niektórych parametrów modelu RDF. Dodatkowa uwaga: zgodność modelu RDF z pół-empirycznymi parametrami materii jądrowej jest gwarantowana przez gaussowską postać (nazwaną "standard ansatz") czynnika "ułamka dostępnej objętości" dla hadronów, Eq. (2.33). Moim zdaniem taka postać nie ma innego uzasadnienia oprócz tego, że jest wygodna technicznie.

Rozdział 3 jest poświęcony rozwinięciu wirialnemu (*virial expansion*) równania stanu (EOS) w ramach formalizmu Φ -pochodnego (Φ -*derivable*), sformułowanego przez Gordona Bayma w 1962r. Formalizm jest użyty do termodynamiki faz H i Q, oraz do przejścia fazowego między nimi. Rozdział ten wygląda imponująco od strony formalizmu, równań i wyprowadzeń. Ale chciałbym podkreślić, że kluczowa idea usprawiedliwiająca użycie wyrafinowanej maszyny teorii układów kwantowych wielu cząstek jest fizycznie b. prosta. Mianowicie, chodzi o uzyskanie wystarczająco silnego usztywnienia równania stanu materii kwarkowej przy dużych gęstościach, aby zapewnić istnienie stabilnej gałęzi "gwiazd-bliźniaków z rdzeniem kwarkowym". Parametrów jest bardzo dużo, i samokrytyczna uwaga autora "we want to mention that the parameter choice is purely academic and a thorough parameter scan needs to be performed" jest jak najbardziej właściwa.

Rozdział 4 to przegląd zastosowań równań stanu z przejściem fazowym H-Q do astrofizyki i zderzeń ciężkich jonów. Trzy wskazane możliwe znaki obserwacyjne wskazujące na silne przejście fazowe 1-szego rodzaju związane z uwolnieniem kwarków to: (1) istnienie oddzielnej gałęzi masa-promień z supergęstymi zwartymi gwiazdami o małym promieniu z rdzeniem kwarkowym; (2) wybuchy supernowych w których presupernową jest masywny (masa rzędu $50 M_{\text{Sun}}$) niebieski nadolbrzym; (3) specyficzne cechy impulsu fal grawitacyjnych na etapie spiralowania w zlewającym się układzie podwójnym dwóch gwiazd neutronowych. We wszystkich wymienionych przypadkach wymagane jest silne zmiękczenie EOS wynikające z uwolnienia kwarków po którym wraz ze wzrostem gęstości musi nastąpić bardzo sztywne EOS materii kwarkowej. Lista dalszych zastosowań w ustępie 4.2 jest imponująca, w każdej wymienionej pracy mgr Bastian odpowiadał za równanie stanu. Myślę jednak, że byłoby chyba korzystniejsze dla rozprawy, gdyby mgr Bastian ograniczył się do tych zastosowań w których jego udział był najbardziej znaczący.

Dodatki A i B ładnie uzupełniają główny tekst rozprawy. Autor wykazuje w nich opanowanie metod i przybliżeń relatywistycznej kwantowej teorii wielu cząstek, zarówno dla materii hadronowej jak i kwarkowej. Rozprawa jest świetnie napisana i

zredagowana, rysunki są znakomite. Moje uwagi krytyczne, sformułowane przy omawianiu kolejnych rozdziałów, nie wpływają na moją ogólną pozytywną ocenę rozprawy.

Mgr Bastian uczestniczył w wielu projektach badawczych realizowanych w IFT UW. Jest współautorem 14 publikacji, a w 6ciu z nich jest pierwszym autorem. To znakomity dorobek, świadczący o wielkiej aktywności mgr Bastiana, a także o twórczej, inspirującej atmosferze w grupie badawczej w której pracował.

Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgr Nielsa-Uwe F. Bastiana do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



czł. korespondent PAN, prof. dr hab. Paweł Haensel
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN, Warszawa

Warszawa, 6.05.2019