

Warszawa, 27 maja 2015r

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr Rafała Łastowieckiego
„Nambu-Jona-Lasinio quark matter modeling for neutron
stars physics”

Rozprawa dotyczy rozwinięcia i zastosowania modelu materii kwarkowej, którego podstawowa idea została sformułowana w 1961r przez Nambu i Jona-Lasinio jeszcze przed powstaniem kwarkowego modelu struktury hadronów. Model NJL materii kwarkowej jest w rozprawie zastosowany do obliczenia równania stanu (RS) materii kwarkowej, w tym różnych faz nadprzewodzących tej materii, a także przejścia fazowego od materii hadronowej do materii kwarkowej. Parametry w efektywnym lagrangianie NJL są ograniczane poprzez narzucenie warunków zgodności pełnego RS gęstej materii (hadronowej z przejściem do materii kwarkowej) z niedawnym przełomowym odkryciem dwóch pulsarów z masami bliskimi $2M_{\text{Sun}}$ oraz z danymi dot. RS materii w jądrach atomowych oraz w zderzeniach ciężkich jonów (ZCJ). Tak więc rozprawa ma charakter interdyscyplinarny bowiem dotyczy problemów na pograniczu fizyki jądrowej i astrofizyki. Pragnę podkreślić, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i ważna.

Rozdział 1 to krótki szkic współczesnej teorii ewolucji gwiazd, prowadzącej do powstawanie białych karłów i gwiazd neutronowych (GN) oraz krótki jakościowy opis głównych idei współczesnej teorii gęstej materii hadronowej (w której kwarki są uwięzione w hadronach) i kwarkowej (brak uwięzienia). Gęstość materii w centrum GN może wielokrotnie przewyższać tzw. normalną gęstość materii jądrowej $\rho_0 \approx 2,5 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$. Istnieje więc możliwość, że GN posiadają rdzenie z materii kwarkowej. Takie gwiazdy hadronowo-kwarkowe przyjęło się nazywać gwiazdami hybrydowymi (GH), zaś GH oraz GN wspólnie określa się często jako gwiazdy zwarte (GZ).

Rozdział 2 jest przeglądem fizyki GZ, które są „kosmicznymi laboratoriami fizyki gęstej materii”. Autor umieszcza GZ na diagramie fazowym przewidywanym przez chromodynamikę kwantową (QCD). Następnie opisana jest historia odkrycia pulsarów oraz obiektów astronomicznych dla których kluczowe są GZ. Podany jest zarys obecnej wiedzy dot. ewolucji i dynamiki GZ. Autor dokonuje następnie przeglądu wiedzy i hipotez dot. składu i struktury wnętrza GZ, słusznie podkreślając, że wobec niepewności obliczeń teoretycznych nasza wiedza dot. rzeczywistej struktury rdzenia GZ musi opierać się na odpowiednio precyzyjnych, licznych i solidnych obserwacjach.

Dopiero w Rozdziale 3 autor wchodzi na właściwy „teren rozprawy” a więc formułuje model NJL używany następnie do obliczeń RS materii kwarkowej. Po

krótkim przedstawieniu podstaw QCD omówione są dwa zasadnicze sprzężenia występujące w efektywnym lagrangianie NJL dla kwarków: skalarne S i wektorowe V . Poza dwoma wstępnymi zdaniem Sect.3.2 to trzypięciowy cytat z pracy [54] której Rafał Łastowiecki jest współautorem. Termodynamika modelu NJL jest wyprowadzona z lagrangianu w Sect.3.3, metoda jest szczegółowo przedstawiona w Uzupełnieniach A i B. Jestem pod wielkim wrażeniem wyprowadzenia wyrażenia w równaniu (46). Następnie autor wyprowadza równania na szczeliny energetyczne w modelach nadprzewodzących i nakłada warunki obojętności elektrycznej oraz równowagę względem oddziaływań słabych. W końcowej części rozdziału wyznaczone są podstawowe parametry modelu NJL przez dopasowanie do wartości doświadczalnych dot. pionów, kaonów, nukleonów, zmierzonych dla tych hadronów w próżni. Zdecydowano się na rozważanie typów modeli NJL, różniących się wartością mas dynamicznych (*constituent mass*) lekkich kwarków (w nukleonach w próżni) $M_u=330.0$ MeV oraz $M_u=367.5$ MeV.

Zastosowanie modelu NJL do opisu przejścia fazowego między materią hadronową i kwarkową jest przedstawione w krótkim (sześć i pół strony) Rozdziale 4. RS materii hadronowej obliczono w oparciu o jeden wybrany model relatywistyczny średniego pola (RMF) ze zależnymi od gęstości sprzężeniami barionów z mezonami (model DD2), zaś samo przejście fazowe w RS obliczono posługując się konstrukcją Maxwella.

Modele gęstej materii z przejściem fazowym hadrony – kwarki, obliczone w Rozdziale 4, zostały zastosowane do konstrukcji modeli gwiazd zwartych (neutronowych i hybrydowych) w obszernym (ponad 20 stron) Rozdziale 5. Wykazano, że warunek narzucony przez obserwacje pulsarów na maksymalną masę tych gwiazd $M_{\max} > 2M_{\text{Sun}}$ prowadzi do bardzo silnych ograniczeń na stałe sprzężenia skalarne η_D i wektorowe η_V modelu NJL. Dodatkowo autor dąży do zgodności z RS w zderzeniach ciężkich jonów; wykazuje on, że przejście fazowe do materii kwarkowej może poprawiać niezgodność wykazywaną przez model DD2 materii hadronowej.

Podsumowanie wyników otrzymanych dla $M_u=367.5$ MeV jest przedstawione na Rysunku 10 na płaszczyźnie $\eta_D - \eta_V$. Rdzenie kwarkowe w GZ istnieją tylko dla odpowiednio dużych η_D i mają zerową dziwność; pojawienie się kwarków s w połączeniu z pairingiem CFL destabilizuje GZ. Niestety, ponieważ $M_{\max} > 2M_{\text{Sun}}$ wymaga dużej gęstości progowej dla uwolnienia kwarków ($4\rho_0$), modele dają RS dla symetrycznej materii jądrowej niezgodne ze zderzeniami CJ (za sztywne).

Sytuacja jest odmienna w przypadku $M_u=330.0$ MeV. Materia kwarkowa może pojawiać się przy $2.5-3 \rho_0$ i możliwa jest jednoczesna zgodność z $M_{\max} > 2M_{\text{Sun}}$ oraz RS otrzymanym ze zderzeń CJ.

W Rozdziale 5 przedstawione są również inne ciekawe wyniki. Pierwszy z nich dotyczy wpływu oddziaływania typu KMT, obliczonego w przybliżeniu średniego pola. Wykazano, że dodanie członu KMT powoduje znaczne obniżenie gęstości progowej dla materii kwarkowej, umożliwia zgodność ze zderzeniami CJ, a gwiazdy hybrydowe mogą istnieć tylko w postaci *oddzielnej gałęzi* o małych promieniach oraz $M_{\max} \approx 1.5M_{\text{Sun}}$ (tzw. *twin-stars*). Drugi ciekawy wynik dotyczy symulowania efektów uwięzienia kwarków przez dodanie tzw. stałej worka (*bag constant*) lub przyczynku od tzw. *Polyakov loop* – przy czym oba człony są zależne od potencjału chemicznego kwarków, co powoduje usztywnienie RS materii kwarkowej.

Główne wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w szeregu wieloautorskich prac. Upewniłem się, że stanowiły one oryginalny wkład Rafała Łastowieckiego do badań w łonie zespołu kierowanego przez prof. dr hab. Davida Blaschke. Są to wartościowe wyniki, dotyczące kluczowych zagadnień teorii materii kwarkowej i gwiazd zwartych. Autor zaimponował mi znakomitą znajomością technik teoretycznych i obliczeniowych, niezbędnych do wyprowadzenia tych wyników.

Oczywiście, rozprawa ma także pewne słabości. Użyto tylko jednego równania stanu materii hydnowej. Przejście fazowe opisano za pomocą konstrukcji Maxwella, co jest słuszne tylko pod warunkiem odpowiednio dużego napięcia powierzchniowego na granicy między fazami. Wbrew temu co autor pisze nie musi być ono nieskończone: wystarczy, że jest ono wyższe od pewnej wartości krytycznej. Ilość „błędów drukarskich” w tekście rozprawy jest moim zdaniem nieprzyzwoicie duża. Po raz pierwszy w mojej długiej karierze recenzenta potkałem się z błędem w tytule rozprawy na stronie tytułowej (**Jonna** zamiast **Jona**!). Trzystronicowy cytat z pracy [54] to też dla mnie nowość. Ale te oczywiste słabości nie przesłaniają mi wybitnej wartości wyników tej rozprawy.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona przez mgr Rafała Łastowieckiego rozprawa doktorska spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania. Dlatego wnoszę o dopuszczenie go do publicznej obrony tej rozprawy.



Prof. dr hab. Paweł Haensel
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN