



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

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

Warszawa, 31 marca 2026

Prof. dr hab. Julian Leszek Zdunik
Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika
Polska Akademia Nauk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Agaty Marty Zdanowicz *Collective properties of superfluid fermionic mixture in neutron star crust.*

Rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Zdanowicz jest monografią składającą się z siedmiu rozdziałów i literatury liczącej 226 pozycji. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Gabriel Wlazłowski, profesor Politechniki Warszawskiej.

W swojej pracy doktorskiej pani mgr inż. Agata Zdanowicz bada kolektywne własności materii występującej w skorupie gwiazd neutronowych zwracając szczególną uwagę na takie parametry jak masa efektywna jąder atomowych znajdujących się w wewnętrznej skorupie, podatność jąder na deformacje oraz oddziaływanie wir-jądro.

Rozdział pierwszy to bardzo krótki wstęp prezentujący podstawowe pojęcia użyte w rozprawie.

Rozdziały drugi i trzeci to szczegółowy opis obecnego stanu wiedzy w dziedzinie gwiazd neutronowych, fizyki ich wnętrza i procesów związanych z nadciekłością w skorupie. Oryginalne wyniki otrzymane przez mgr inż. A. Zdanowicz przedstawione są w rozdziałach od czwartego do szóstego. Część wyników zaprezentowanych w rozdziałach 4 i 5 została opublikowana w renomowanych czasopismach.

Rozdział drugi to opis podstawowych własności materii we wnętrzu gwiazd neutronowych istotnych dla głównych rozważań doktoratu przedstawionych w następnych rozdziałach. Autorka omawia strukturę gwiazd neutronowych, poświęcając szczególną uwagę skorupie tych obiektów. Duża część tego rozdziału poświęcona jest zjawisku nadciekłości i jego występowaniu w wewnętrznej skorupie gwiazd neutronowych.

Rozdział trzeci zawiera dyskusję modeli teoretycznych używanych w pracy do opisu własności gęstej materii. Przedstawione są podstawy metody średniego pola, opisany jest formalizm Hartree-Focka-Bogoliubowa oraz teoria funkcjonału gęstości. Szczególna uwaga poświęcona jest funkcjonałom Brussels-Montreal Skyrme (BSk). Jeden z tych



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

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

modeli (BSk31) jest używany przez autorkę do obliczeń. Ostatnia część tego rozdziału to opis biblioteki numerycznej W-BSk Toolkit, utworzonej na Politechnice Warszawskiej i publicznie dostępnej. Oprogramowanie to używane jest przez mgr inż. A. Zdanowicz do otrzymania rezultatów prezentowanych w rozprawie doktorskiej.

Rozdział czwarty jest oparty o pracę zatytułowaną *Time-Dependent Nuclear Energy-Density Functional Theory Toolkit for Neutron Star Crust: Dynamics of a Nucleus in a Neutron Superfluid*, której Pani Agata Zdanowicz jest współautorką. Artykuł opublikowano w Phys. Rev. X 14, 041054 w 2024 roku. Jak wynika z deklaracji autorów, zamieszczonej w tej publikacji, rola Pani mgr inż. Agaty Zdanowicz była bardzo istotna jeśli chodzi o przeprowadzenie obliczeń numerycznych i analizę otrzymanych wyników.

W rozdziale tym autorka przedstawia ideę masy efektywnej i jej zastosowanie do jąder atomowych zanurzonych w cieczy neutronowej - sytuacji odpowiadającej wewnętrznej skorupie gwiazdy neutronowej. Masę tą wyznacza następnie w ramach Teorii Funkcjonału Gęstości (ang. DFT - Density Functional Theory) rozwiązując numerycznie równania ruchu jądra w materii neutronowej. Symulacje te zostały przeprowadzone przez Panią Agatę Zdanowicz przy pomocy oprogramowania W-BSk Toolkit. Otrzymane rezultaty wskazują na dużą zgodność z innymi metodami wyznaczania masy efektywnej. Metoda ta umożliwia jednocześnie studiowanie dodatkowych procesów w skorupie gwiazdy neutronowej, jak np. dyssypacja energii.

W rozdziale 5 przedstawione są wyniki opublikowane w pracy *Dynamical scheme for computing the mass parameter of a system in a medium* opublikowaną w Physical Review C 122, 045804 w 2025 roku. Autorami pracy są A. Zdanowicz, D. Pęczak, P. Magierski, G. Włazłowski. Z deklaracji autorów opublikowanych w pracy wynika, że wkład Pani Agaty Zdanowicz był dominujący.

Rozdział ten poświęcony jest badaniu parametru masy dla kolektywnych wzbudzeń w układzie odpowiadającym jądom atomowym zanurzonym w nadciekłej cieczy neutronowej (skorupa wewnętrzna gwiazdy neutronowej). Numeryczne symulacje w oparciu o teorię zależnego od czasu funkcyjonału gęstości pozwalają na wyznaczenie parametru masy dla wymuszonych oscylacji badanego układu. Masa jąder atomów cynku (Zn , $Z=40$) otrzymana w ten sposób jest zbieżna z wynikami otrzymanymi przez autorkę i przedstawionymi w rozdziale 4 (metoda dynamiczna).

W dalszej części rozdziału 5 mgr inż. A. Zdanowicz przedstawia wyznaczenie parametru masy dla oscylacji kwadrupolowych jąder cynku. W tym przypadku parametr masy opisuje podatność obiektu (jądra) na jego deformacje (jednostką jest masa/powierzchnia). Wyniki są intuicyjne zrozumiałe - parametr masy monotonicznie maleje i staje się bliski zeru w okolicach gęstości odpowiadającej pojawieniu się tak zwanej fazy makaronowej (pasta phase) w miejsce jąder atomowych.

Metoda przedstawiona w tym rozdziale jest również użyteczna przy analizie procesów dyssypacyjnych w materii neutronowej.



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

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

Rozdział 6 poświęcony jest badaniu oddziaływania wiru z jądrem w wewnętrznej skorupie gwiazdy neutronowej. W oparciu o symulacje numeryczne ruchu jądra względem wiru autorka jest w stanie określić siłę oddziaływania wir-jądro oraz jej zależność od odległości między tymi obiektami. Możliwe jest również oszacowanie energii „pinningu” („zakotwiczenia wirów”) oraz zmiany długości wiru na skutek oddziaływania z jądrem. Otrzymane przez Panią Zdanowicz wyniki są jakościowo zgodne z ocenami i przewidywaniami innych metod. Mgr inż. A.Zdanowicz wyznaczyła również odkształcenia jąder na skutek oddziaływania z wirem określając zmiany momentu kwadrupolowego i oktopolowego.

Rozdział 7 to kilkustronicowe podsumowanie zawierające, poza dyskusją otrzymanych wyników, interesujące wskazówki dla przyszłych badań z wykorzystaniem przedstawionego aparatu numerycznego. Bardzo istotne jest upublicznienie kodów użytych przez autorkę (na platformie Zenodo).

Rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Zdanowicz zawiera nowe i oryginalne wyniki pozwalające na obliczenie parametrów istotnych dla własności wewnętrznej skorupy gwiazd neutronowych. Pani Agata Zdanowicz wykazała się znajomością teoretycznych zagadnień związanych z gęstą materią, w szczególności ze zjawiskiem nadciekłości i jego rolą w astrofizyce gęstych obiektów. Autorka z powodzeniem zaimplementowała bibliotekę numeryczną WBSk-Toolkit do określenia dynamiki jąder atomowych w gęstym gazie neutronowym.

Poniżej przedstawiam moje uwagi o charakterze ogólnym, jak również zauważone błędy i pomyłki (w większości o charakterze edytorskim).

Rozdział 2

- w drugim paragrafie brakuje kwadratu przy masie (str. 3, przy definicji energii grawitacyjnej gwiazdy). Masy gwiazd neutronowych (te w miarę dokładnie określone) są mierzone w układach podwójnych, a nie z analizy promieniowania termicznego (rozdział 2.1.1). W rozdziale 2.2.1 (str.10) zamienione są definicje liczby masowej A i atomowej Z jądra atomowego.

- równania 2.3 - 2.4 są omyłkowo zapisane: 2.3 definiuje σ , a 2.4 - wielkość μ .

W rozdziale tym jest używana dość nietypowa nomenklatura - przy opisie skorupy gwiazd neutronowych zwykle używane jest określenie jąder atomowych (a nie *impurities*), a określenie *impurity* jest stosowane w odniesieniu do domieszek jąder innych niż dominujące w skorupie.

Rozdział 3

- na stronie 102 prezentowane są parametry gwiazd (masa-promień) dla różnych modeli BSk, warto by było uzupełnić je o model stosowany w rozprawie (BSk31).

Rozdział 4

- w równaniu 4.18 brakuje znaku pierwiastka kwadratowego.



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

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

- definicja prędkości dźwięku na dole strony 134 (i w podpisie pod rysunkiem 4.12) wydaje się być błędna. Dziwi mnie nieco określenie prędkości dźwięku i ciśnienia jedynie dla gazu neutronowego - wydaje się, że powinny być brane pod uwagę wszystkie składniki układu i gęstość barionów.

Rozdział 6

- wyniki zaprezentowane na wykresach 6.9, 6.10 nie są zbyt dokładne (prawdopodobnie ze względu na ograniczenia numeryczne). Rzuca to wątpliwość na aproksymację C/R^3 . Byłoby użyteczne zobaczyć jak ta aproksymacja i rzeczywiste rezultaty prezentują się na jednym wykresie.

- na wykresie 6.10 jedna z krzywych osiąga wartość 1.25 MeV/fm na odległości 10 fm - wynik ten nie jest widoczny na rys. 6.11

- autorka stwierdza, że moment oktopolowy ma dużo większe znaczenie niż kwadrupolowy. Nie jest to dla mnie oczywiste - porównanie ich roli wymaga pomnożenia momentu kwadrupolowego przez charakterystyczny rozmiar układu (tutaj ok. 10-20 fm) co na pierwszy rzut oka daje porównywalne wartości.

Podsumowanie.

Powyższe uwagi i zauważone pomyłki nie wpływają na moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Agaty Zdanowicz. Praca doktorska mgr inż. A. Zdanowicz jest obszerną dyskusją własności materii gęstej występującej skorupie gwiazd neutronowych ze szczególnym uwzględnieniem nadciekłości i własności kolektywnych materii.

Przedstawione oryginalne wyniki pozwalające na określenie istotnych parametrów takiej materii są istotnym wkładem do badań w tym zakresie. Bardzo ważna jest również publiczna dostępność zaawansowanych kodów numerycznych używanych przez autorkę. Tematyka opisana w doktoracie z pewnością może być kontynuowana i rozwijana w przyszłości przy pomocy udostępnionego aparatu.

Uważam, że rozprawa mgr inż. Agaty Zdanowicz spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim, w szczególności warunki zawarte w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i uchwale nr 321/L/2023 Senatu Politechniki Warszawskiej z dnia 29 marca 2023 (Załącznik, §2 pkt. 5,6). Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Agaty Zdanowicz do dalszych etapów postępowania, w tym do obrony rozprawy doktorskiej.

Prof. dr hab. Julian Leszek Zdunik