

dr hab. Sebastian Kubis  
Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Magdaleny Sieniawskiej

*Rotating neutron stars: dense-matter interiors and gravitational-wave searches using the time-domain  $\mathcal{F}$ -statistic method*

Pani Magdalena Sieniawska przedstawiła pracę doktorską dotyczącą estymacji obserwacyjnych parametrów gwiazd neutronowych w kontekście najnowszych obserwacji fal grawitacyjnych prowadzonych przez zespoły LIGO i Virgo. Trzon rozprawy stanowią cztery rozdziały (od 2 do 5-go) będące wcześniej opublikowanymi artykułami. Według oświadczeń współautorów doktorantka miała dominujący wkład w otrzymaniu wyników i ostatecznie redagowała te artykuły.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi zgrabne wprowadzenie do tematyki gwiazd neutronowych, a ostatni, 6-ty to podsumowanie wyników pracy. Praca jest obszerna i to nie tylko w swej objętości, ale i w zakresie podejmowanych zagadnień, co chciałbym podkreślić na samym początku, jako jej pozytywny walor.

Rozdział drugi stanowi analizę wpływu równania stanu na różne wielkości obserwacyjne, przede wszystkim stanowi próbę odpowiedzi na pytanie, do jakiego stopnia niepewność w równaniu stanu gęstej materii może być ograniczona przez dokładny (na poziomie 5%) pomiar promienia gwiazdy neutronowej. Tak dokładny pomiar promienia gwiazdy jest wiązany z wynikami obserwacji obecnie prowadzonych przez eksperyment NICER, a w przyszłości przez ATHENA. Za punkt odniesienia przyjęto powszechnie znane równanie stanu z modelu Skyrma (SLy4). Niepewność równania stanu w obszarze rdzenia gwiazdy jest zamodelowana przez zastosowanie kawałków politrop relatywistycznych. Parametry politrop są tak dobrane, aby w punkcie zszycia zapewnić równość ciśnień i barionowego potencjału chemicznego, co jest ważne z punktu widzenia konsystencji termodynamicznej. Następnie autorka pokazuje, jak "rozmycie" w równaniu stanu prowadzące do 5% niepewności w promieniu gwiazdy rzutuje na wielkości charakterystyczne dla rotujących gwiazd neutronowych, takie jak: ciśnienie centralne, spłaszczenie, efektywna powierzchnia gwiazdy, moment pędu, moment bezwładności w funkcji częstości rotacji. Na koniec porównuje deformowalność gwiazdy z wynikami obserwacji fal grawitacyjnych pochodzących ze złączenia się dwóch gwiazd neutronowych, GW170817. Ten rozdział dowodzi, że autorka dobrze orientuje się we własnościach rotujących gwiazd neutronowych, potrafi przejrzeć zreferować korelacje między nimi a równaniem stanu gęstej materii, posiada umiejętność korzystania z zaawansowanego kodu do modelowania rotacji (LORENE).

Rozdział trzeci to kolejna analiza równania stanu skonfrontowana z wynikami GW170817. Badane jest równanie stanu zawierające przejście fazowe do materii kwarkowej. Cechą charakterystyczną zastosowanego równania stanu jest skok gęstości w relacji ciśnienie-gęstość. Jest to specyficzne równanie stanu, w którym równowaga ładunkowa między fazami nie jest zachowana. Konstrukcja Maxwella nie zapewnia równości

potencjału chemicznego elektronu na granicy faz. Takie zachowanie wymaga specyficznego rozkładu potencjału elektrycznego między fazą nukleonową a kwarkową. Istnienie takiej bariery zależy od szczegółów oddziaływań i jest sprawą dyskusyjną. Dlatego warto przeanalizować jej wpływ na parametry gwiazdy, by móc je porównać z najnowszymi obserwacjami. Autorka wywiązała się z tego zadania znakomicie. Wskazała na istnienie gwiazd bliźniaczych, t.j. mniejszy promień przy tej samej masie, niż dla gwiazdy ze zwykłą materią. Ważna jest konkluzja, że deformowalność i promień gwiazd bliźniaczych przyjmują znacznie szerszy zakres niż w przypadku gwiazd zwykłych o standardowym równaniu stanu (SLy4).

Rozdział czwarty ma charakter artykułu przeglądowego, opisującego aktualny stan badań dotyczących poszukiwania ciągłego sygnału fal grawitacyjnych. Na początku dyskutuje się naturę fal grawitacyjnych, obecnie działające oraz przyszłe detektory, a także różne metody stosowane w analizie danych. O ile zaletą ciągłego sygnału fali grawitacyjnej jest praktycznie nieograniczony czas jego trwania, a nawet znana częstotliwość (jeśli nasłuchujemy konkretny pulsar), o tyle jego amplituda jest zwykle kilka rzędów wielkości mniejsza od amplitudy dla obecnie zmierzonych zdarzeń. Rzeczywisty sygnał jest wtedy głęboko "zakopany" w szumie własnym detektora. Konieczność odszumiania sygnału prowadzi do szukania kompromisu między oczekiwaną amplitudą fali a możliwościami obecnych komputerów. Autorka przedstawia różne strategie poszukiwania możliwych źródeł od "ślepych" przeglądów nieba po obserwacje nakierowane na konkretny pulsar. Zestawia różne metody analizy numerycznej danych z detektora.

Głównymi kandydatami na emitery ciągłej fali grawitacyjnej są rotujące gwiazdy neutronowe posiadające różnego rodzaju deformacje. Kwadrupolowość rozkładu masy (konieczna dla emisji fali) może być spowodowana sztywnością skorupy, polem magnetycznym czy też precesją gwiazdy. Podstawowym parametrem określającym deformację jest eliptyczność charakteryzująca odstępstwo rozkładu masy od symetrii osiowej. Autorka przedstawia wartości eliptyczności będące wynikiem rozważań modelowych dla gęstej materii oraz wpływ procesów dyssypacyjnych, które są ważne w przypadku deformacji "magnetycznych".

Odmienną klasę stanowi niestabilność grawitacyjna Chandrasekhara-Friedmanna-Schutzta, która prowadzi do oscylacji rozkładu gęstości i prędkości materii gwiazdy. Głównym kandydatem są tu r-mody, czyli oscylacje powodowane siłą Coriolisa i posiadające charakterystyczną częstotliwość równą  $3/4$  częstości rotacji. Jako że są one oscylacjami prędkości przepływu materii, są wrażliwe na różnego rodzaju procesy lepkościowe (pierwsza i druga lepkość, tarcie rdzeń-skorupa, tarcie wzajemne w fazie nadcieklej). Ponieważ lepkość zwykłej materii i materii kwarkowej różnią się istotnie, to tym samym detekcja r-modów może potencjalnie rozstrzygnąć o istnieniu gwiazd kwarkowych. Rozdział ten stanowi bardzo zgrabne zestawienie najważniejszych informacji, jest zaopatrzony w wiele cytowań i potwierdza gruntowne zaznajomienie się doktorantki z tematyką fal grawitacyjnych.

Rozdział piąty przedstawia procedurę analizy danych z detektorów fal grawitacyjnych pod kątem poszukiwania ciągłego sygnału pochodzącego od izolowanych gwiazd neutronowych. Sygnał taki będący kilka rzędów wielkości słabszy od "błysku" będącego efektem zlania się układu podwójnego, ma szansę być zaobserwowany w udoskonalonych generacjach detektorów LIGO-Virgo. Mimo niekorzystnego stosunku sygnału do szumu, na korzyść detekcji fali grawitacyjnej przemawia nieograniczony czas trwania jej emisji. Filtrowanie sygnału przeprowadza się metodą  $\mathcal{F}$ -statystyki. Ponieważ koszt

numeryczny tej metody rośnie z piątą potęgą czasu obserwacji, nie można jej stosować na dowolnie długich przebiegach czasowych. Konieczny jest kompromis między długością badanego przebiegu, a kosztem analizy numerycznej. Autorka zaproponowała tu metodę hierarchicznego podziału na segmenty czasowe i zawężania przestrzeni dostępnych parametrów, które są następnie użyte na segmencie dwukrotnie dłuższym i cała procedura jest w ten sposób iterowana. Metoda została przetestowana na sztucznym sygnale "wstrzykniętym" do białego szumu i dała obiecujące wyniki. Chociaż moja wiedza w dziedzinie filtrowania sygnałów jest fragmentaryczna, muszę przyznać, że autorka przejrzysto wprowadza czytelnika w to złożone zagadnienie.

Podsumowując: przedyskutowane powyżej wszystkie rozdziały pracy są napisane bardzo starannie, z dużym znawstwem przedmiotu. Tok wywodu jest klarowny, co nie jest łatwe wobec mnogości poruszanych zagadnień. Pracę czyta się bardzo dobrze. Wyniki prezentowane są na estetycznie przygotowanych, czytelnych rysunkach, cytowana literatura to aż 16 stron referencji. Rozprawa spełnia wszelkie kryteria jako praca doktorska i należy ją dopuścić do publicznej obrony. Wydaje mi się, że powinna również zostać wyróżniona.

Sebastain Kubis, dr hab.

