

Gwiazdy neutronowe są jednymi z najbardziej fascynujących, egzotycznych laboratoriów fizyki jądrowej we Wszechświecie. Te nieprawdopodobnie gęste obiekty powstają, gdy masywna gwiazda wyczerpuje zapasy termojądrowego paliwa i umiera, eksplodując jako supernowa. Jądro gwiazdy, które znajduje się w centrum eksplozji nie jest już dłużej utrzymywane w stanie równowagi przez procesy jądrowe i zapada się pod wpływem własnej grawitacji. Jeżeli gwiazda przed wybuchem była dostatecznie masywna (powyżej około 30 mas Słońca), będzie zapadała się bez końca, tworząc czarną dziurę; mniej masywne gwiazdy tworzą bardzo gęste jądro, w którym materia nie może być zgnieciona bardziej, co powstrzymuje kolaps i daje początek „martwej” gwiazdzie: w przypadku najlżejszych gwiazd efekty kwantowe oddziaływania pomiędzy elektronami są wystarczające, by powstrzymać zapadanie na etapie białego karła. Dla nieco masywniejszych gwiazd kolaps zachodzi do momentu, gdy neutrony znajdują się tak blisko siebie, że ich kwantowo-mechaniczne ciśnienie powstrzymuje siły grawitacji. W ten sposób powstaje gwiazda neutronowa.

Gwiazdy neutronowe są tak ekstremalne, że gęstość w ich wnętrzu jest wyższa od gęstości jąder atomowych: mają masę około półtora masy Słońca, ale rozmiar około 10 km (czyli o rozmiarze miasta np. Warszawy).

Radioastronomia oferuje unikalną możliwość zajrzenia do wnętrza tych obiektów, jako że mogą emitować obserwowalne sygnały radiowe emitowane przez namagnesowane, rotujące gwiazdy neutronowe, których snop promieniowania regularnie omiata Ziemię (na podobieństwo latarni morskiej). Dokładny chronometr tych sygnałów pokazuje, że niektóre gwiazdy do wiadczy „skoków” cząstki rotacji („glicze”), o których uważa się, że spowodowane wpływem nadciężkiego wnętrza. Nadciężkość jest znana z doświadczeń laboratoryjnych z gazami np. helum, które ochłodzone do temperatury bliskiej zeru absolutnemu wykazują zupełny brak lepkości. Wnętrze gwiazd neutronowych zachowuje się jak tego typu płyn, co umożliwia skomplikowane przepływy przewodzące do powstania gliczy i oscylacji gwiazdy. Rotujący nadciężki płyn zachowuje się w sposób niezwykle: rotacja powoduje podział całkowitego momentu pędu w mikroskopowe wiry, które zachowują się jak obiekty kwantowe. Pulsarowe glicze są więc wielkoskalową konsekwencją zjawisk kwantowych w mikroskali.

Znajdujemy się jednak na progu rewolucji w astronomii, która na zawsze zmieni nasze postrzeganie Wszechświata i ujawni sekrety ukryte we wnętrzu gwiazd neutronowych: wkrótce będziemy wiadkami narodzin astronomii fal grawitacyjnych. Fale grawitacyjne są jednym z przewidywanych ogólnych teorii względności Einsteina, która przewiduje, że podczas gwałtownych kosmicznych procesów z udziałem czarnych dziur i gwiazd neutronowych powstają „zmarszczki” w czasoprzestrzeni, propagujące się we wszystkich kierunkach i zmieniając odległości między punktami w przestrzeni. Efekt fal na Ziemi jest niezwykle mały: fala grawitacyjna o standardowej wielkości zmienia odległości między dwoma obiektami odległymi od siebie o parę kilometrów o mniej niż rozmiar protonu! Nie jest więc zaskoczeniem, że nie zostały one dotychczas bezpośrednio zarejestrowane. W związku z tym potrzebna była ogromna inżynierska wysiłku, który trwa przez ostatnie 20 lat. Był to pierwszy w historii bezpośrednio zarejestrowane fale, powstały trzy wielkie detektory: dwa w Stanach Zjednoczonych (Advanced LIGO), oraz jeden we Włoszech (Advanced Virgo). Urządzenia te są interferometrami, w których mierzy się czas przelotu wiązki laserowego odbijanej od lusterek umieszczonych na końcach ramion wielokilometrowej długości. Jeżeli podczas pomiaru przez interferometr przechodzi fala grawitacyjna, zmienia ona długość jednego z ramion w inny sposób, co spowoduje, że czas podróży wiązki będzie różny dla obu ramion. W praktyce wiele różnic zakłóceń, od fluktuacji termicznych, po szum sejsmiczny (powodowany np. przez ruch samochodów w pobliżu laboratorium) będzie dużej amplitudy sygnału. Cały system musi więc pracować w próżni, używając starannie dobranych materiałów i laserów.

Zespoły Advanced LIGO i Advanced Virgo, w skład których wchodzi także polski zespół POLGRAW, zaczęły obserwacje we wrześniu 2015 roku: jest realna szansa na rewolucyjne obserwacje, które zmienią nasz obraz Wszechświata podobnie do pierwszych obserwacji teleskopów optycznych.

Gwiazdy neutronowe są głównymi celami obserwacji detektorów fal grawitacyjnych, jednak sygnały przez nie emitowane są bardzo słabe. Do wykrycia słabych sygnałów ukrytych w szumie potrzebne są modele teoretyczne sygnału (podobnie do sytuacji, w której napisy w kinie pomagają zrozumieć, co mówi aktor podczas głębszej sceny).

Projekt podejmuje pionierskie badania teoretyczne polegające na trójwymiarowych symulacjach komputerowych nadciężkich gwiazd neutronowych, i otrzymaniu modeli które pomogą w poszukiwaniu fal grawitacyjnych oraz interpretacji obserwacji radiowych i rentgenowskich, czyli w zrozumieniu podstawowych praw fizyki rzadkich materii w ekstremalnych warunkach.

Rozwinęliśmy narzędzie obliczeniowe, które będzie połączeniem trzech kodów numerycznych: trójwymiarowej symulacji hydrodynamicznej nadciężkiego płynu, wykorzystującej bibliotekę metod spektralnych do zastosowań astrofizycznych LORENE, by studiować globalne parametry gwiazdy i modelować oczekiwane sygnały, kodu 3D do modelowania transportu ciepła i jego wpływu na ruch płynu, oraz kodu 3D do symulacji ruchu nadciężkich wirów, który posłuży do zbadania ich skomplikowanej dynamiki w skalach mikroskopowych. Narzędzia numeryczne wykorzystają najnowsze dane fizyki jądrowej i modele gęstej materii opracowane w Centrum Astronomicznym PAN w Warszawie. Otrzymane rezultaty wykorzystamy do zbadania gliczy radiopulsarów, poszukiwania fal grawitacyjnych i oscylacji gwiazd.

Jest to szczególnie interesujące, ponieważ wykrycie i interpretacja sygnału fali grawitacyjnej pochodzącej z takich obiektów (detekcja fal związanych z wnętrzem gwiazdy) umożliwi badanie ich struktury wewnętrznej podobnie do obecnych badań wnętrza Słońca (lub do analizy fal na powierzchni morza, która w niektórych przypadkach pozwala na określenie kształtu dna). Projekt jest również kontrybucją do międzynarodowej współpracy detektorów fal grawitacyjnych, grupującej ponad tysiąc naukowców, która wkrótce dostarczy potencjalnie przełomowych danych w ekscytującej nowej dziedzinie astronomii fal grawitacyjnych.