

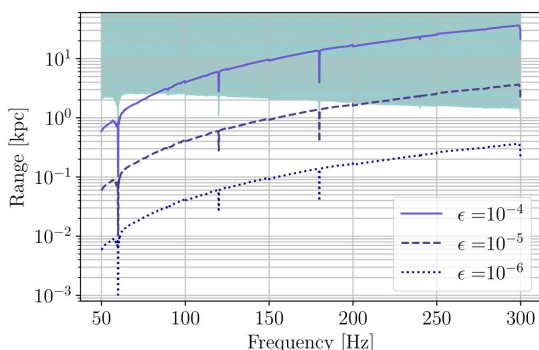
WYSZUKIWANIE CIĄGLYCH FAL GRAWITACYJNYCH Z GWIAZD NEUTRONOWYCH W NIEZNANYCH UKŁADACH PODWÓJNYCH

Gwiazdy neutronowe (GN) powstają w wyniku wybuchu supernowej, który kończy ewolucję gwiazdy o masie od 10 do 25 mas Słońca. Są one zwartymi obiektami o promieniu około 10 km i masie podobnej do masy naszego Słońca, co czyni z GN jedno z najbardziej ekstremalnych środowisk, w których kiedykolwiek zaobserwowano materię. Obecnie struktura i skład GN jest aktywną i interdyscyplinarną dziedziną badań, łączącą wysiłki Środowiska fizyki jądrowej, cząstek elementarnych i astrofizyki.

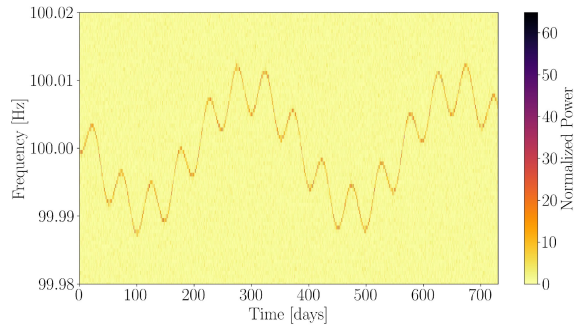
Ekstremalna zwartość (i gęstość) tych obiektów czyni je interesującym laboratorium do testowania efektów relatywistycznych, takich jak emisja promieniowania grawitacyjnego. Rzeczywiście, detektory Advanced LIGO i Advanced Virgo z powodzeniem wykryły kilka sygnałów fal grawitacyjnych związanych z **koalescencją dwóch GN**. Jednej z tych detekcji, **GW170817**, towarzyszył nawet sygnał elektromagnetyczny, stanowiąc tym samym pierwszą w historii detekcję zdarzenia astrofizycznego za pomocą fal grawitacyjnych i światła.

Innym sposobem sondowania wewnętrznej struktury szybko wirujących GN są emitowane przez nie **ciągłe fale grawitacyjne** (CFG). Źródłem CFG są odstępstwa GN od doskonale symetrycznego kształtu; mogą to być np. niedoskonałości w zewnętrznej skorupie gwiazdy, albo oscylujące zaburzenia w jej strukturze wewnętrznej, albo swobodna precesja wywołana obrotem gwiazdy wokół osi niepokrywającej się z jej osią symetrii. Gdy GN obraca się szybko, takie odkształcenia byłyby przyczyną promieniowania grawitacyjnego w postaci CFG. Takie promieniowanie jest o kilka rzędów wielkości słabsze niż promieniowanie powstające podczas koalescencji zwartych obiektów, jednak trwa ono przez długie okresy czasu (miesiące lub lata), umożliwiając analizę długich zbiorów danych charakteryzujących się dużym stosunkiem sygnału do szumu.

W zależności od tego, co wiadomo o potencjalnych Źródłach, rozróżnia się kilka typów poszukiwań CFG. Na przykład *targeted searches* dotyczą GN, dla których położenie na niebie oraz częstotliwość rotacji GN są znane z obserwacji elektromagnetycznych, podczas gdy *directed searches* używają ustalonego położenia na niebie, w którym mogłaby znajdować się GN o nieznannej częstotliwości.



Rys. 2: Maksymalny zasięg astrofizyczny objęty naszymi poszukiwaniami jako funkcja częstotliwości. Krzywe reprezentują różne wartości odkształcenia GN, określanego jako jej eliptyczność ϵ . Większe odkształcenia i wyższe częstotliwości oznaczają wytworzenie silniejszych CFG, które można badać na dalszych odległościach. Zaciemniony obszar odpowiada wartościom spowolnienia wykraczającym poza badane przez poszukiwania, jeśli nie zakłada się innego mechanizmu równoważenia. Dla porównania, najbliższa znana GN znajduje się w odległości 0,1 kpc.



Rys. 1: Spektrogram symulacji silnego sygnału CFG, który odpowiada GN obracającej się 50 razy na sekundę i krążącej wokół towarzysza z okresem orbitalnym 50 dni. Ogólna skala częstotliwości, 100 Hz, jest dwukrotnością częstotliwości obrotowej GN. Najdłuższe oscylacje, z okresem 365 dni, odpowiadają modulacji dopplerowskiej wywołanej ruchem orbitalnym Ziemi wokół Słońca. Krótsze, z okresem 50 dni, odpowiadają orbitalnemu ruchowi źródła CFG w polu grawitacyjnym towarzysza. Dla celów ilustracyjnych przyjęto 2-letni czas obserwacji, który jest dłuższy niż 6-miesięczny czas obserwacji wykorzystany w omawianej analizie.

W prezentowanej pracy przedstawiamy wyniki *all-sky search*, czyli poszukiwania sygnałów CFG pochodzących z zupełnie nieznanymi GN o dowolnych częstotliwościach rotacji i położeniu na niebie. Dodatkowo skupiamy się na nieznanymi GN w **układach podwójnych**. Oczekiwany sygnał z izolowanych GN jest falą długotrwałą, której częstotliwość powoli maleje w wyniku emisji energii np. w postaci promieniowania elektromagnetycznego lub grawitacyjnego. Ten efekt **spowolnienia** (ang. *spindown*) można zaniedbać, biorąc pod uwagę populację GN, której dotyczy to poszukiwanie. Z punktu widzenia detektora na Ziemi częstotliwość sygnału jest modulowana w wyniku dobowego ruchu obrotowego i rocznego ruchu orbitalnego naszej planety. Sygnał ten jest dodatkowo skomplikowany w przypadku GN w układzie podwójnym, ponieważ wówczas należy wziąć pod uwagę dodatkową **modulację Dopplera** wywołaną ruchem źródła wokół ciała towarzyszącego.

W naszych badaniach stosujemy odmianę **transformaty Hougha**, zwaną **BinarySkyHough**, która do analizy wykorzystuje **spektrogram** danych. Spektrogram dostarcza informacji o tym, które częstotliwości są najbardziej widoczne w danych w miarę upływu czasu.

Podstawową ideą jest to, że sygnał CFG ujawniałby się w spektrogramie jako nadmiar mocy o bardzo szczególnym rozkładzie, jak pokazano to na rys. 1. Możemy opisać te „ścieżki mocy” za pomocą zestawu parametrów związanych z właściwościami fizycznymi źródła, takimi jak częstotliwość rotacji lub położenie na niebie; stąd poszukiwanie CFG jest kwestią identyfikacji znaczących ścieżek mocy w danych.

Konieczność uwzględnienia parametrów opisujących orbitę źródła w układzie podwójnym powoduje, że musimy przeszukiwać większą liczbę parametrów niż w przypadku samotnej GN. Stanowi to problem dla typowych algorytmów wyszukiwania, ponieważ ich koszt obliczeniowy łatwo staje się tak duży, że obliczenia stają się niewykonalne. W takim przypadku problem można podzielić na wiele podobnych mniejszych zadań, a wyszukiwanie można przyspieszyć wykorzystując **Graphics Processing Units** (GPU), które równolegle realizują dużą liczbę tych podzadań.

W badaniach korzystamy z danych z 1szej fazy 3ciej kampanii obserwacyjnej detektorów Advanced LIGO i Advanced Virgo (O3a), obejmującej sześć miesięcy od kwietnia do września 2019 r., poszukując CFG z nieznanymi GN w nieznanymi układach podwójnych w najbardziej czułym paśmie detektorów. Nie znaleźliśmy dowodów na obecność sygnałów CFG. W rezultacie oszacowaliśmy czułość naszych poszukiwań, badając parametry populacji symulowanych sygnałów. Czułość ta jest początkowo wyrażana jako najniższa amplituda fali grawitacyjnej wykrywanej przez naszą analizę. Otrzymujemy najlepszą do tej pory czułość dla analizowanej przestrzeni parametrów, przy najniższej wykrywalnej amplitudzie o 60% niższej niż poprzednie badania.

Interpretujemy te wyniki w kategoriach odpowiedzi na dwa interesujące astrofizycznie pytania: jak daleko od Ziemi jesteśmy w stanie wykryć źródła promieniowania, i jaka jest maksymalna deformacja dopuszczalna dla źródła CFG w zakresie badanym przez nasze poszukiwania. Rysunki 2 i 3 podsumowują maksymalny zasięg naszych poszukiwań i maksymalne odkształcenie dopuszczone dla źródła CFG, w funkcji częstotliwości fali grawitacyjnej. Jak wspomniano wcześniej, rozważamy źródła CFG z pomijalnym spowolnieniem rotacji. Założenie to nie wprost wyznacza granicę dla maksymalnego odkształcenia badanego dla GN, reprezentowaną przez zacienione obszary na rys. 2 i 3. Innymi słowy, jeśli nie istnieją żadne mechanizmy równoważenia, zacienione obszary są wykluczone z naszych wyników, ponieważ oznaczałyby one wyższe wartości spowolnienia niż te objęte tym wyszukiwaniem. Możliwym mechanizmem równoważącym przeciwdziałającym spowolnieniu GN może być **akrecja** materii z towarzysza. Wyniki te pokazują rosnącą poprawę detektorów Advanced LIGO i Advanced Virgo, które osiągnęły swoją planowaną czułość, co pozwala nam zbliżyć się do górnych ograniczeń na właściwości GN coraz bliższych wyników uzyskanych za pomocą symulacji numerycznych.

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

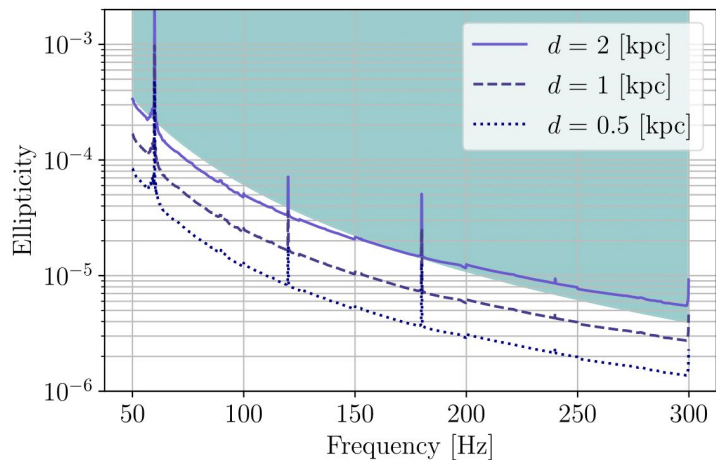
Przeczytaj [tutaj](#) preprint artykułu naukowego.

Przeczytaj [tutaj](#) wprowadzenie do CFG.

Odwiedź nasze strony:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



Rys. 3: Maksymalne dopuszczalne odkształcenie GN w funkcji częstotliwości. Krzywe pokazują, jak zdeformowana powinna być GN, aby wytworzył CFG wykrywalną przez nasze poszukiwania. Ponieważ amplituda CFG maleje wraz z odległością, bliższe źródła muszą mieć niższe eliptyczności niż te bardziej oddalone. Zacieniony obszar odpowiada wartościom spowolnienia wykraczającym poza te badane przez poszukiwania, jeśli nie zakłada się innego mechanizmu równoważenia (więcej informacji na ten temat w tekście).

SŁOWNICZEK

Gwiazda neutronowa: Pozostałość po wybuchu supernowej, któremu uległa gwiazda o masie pomiędzy 10 a 25 masami Słońca. Typowa gwiazda neutronowa ma masę ok. 1-2 mas Słońca i promień ok. 10-15 kilometrów, jest jednym z najbardziej zwartych obiektów kiedykolwiek odkrytych.

Ciągła fala grawitacyjna: Długotrwała forma promieniowania grawitacyjnego. Więcej szczegółów znajdziesz [tutaj](#).

Eliptyczność: Miara tego jak bardzo kształt ciała różni się od kształtu sferycznego, określona jako odkształcenie od kołowości ciała w jego płaszczyźnie równikowej odniesione do odkształcenia wzdłuż prostopadłego do tej płaszczyzny kierunku.

Spowolnienie (spindown): Tempo, z jakim wirująca gwiazda neutronowa zwalnia z powodu emisji energii przez fale elektromagnetyczne lub grawitacyjne.

Przesunięcie Dopplera: Zmiana obserwowanej częstotliwości fali wywołana ruchem względnym źródła fali i obserwatora.

Układ podwójny: Para astronomicznych obiektów związanych ze sobą przyciąganiem grawitacyjnym.

Transformacja Hougha: Algorytm do identyfikacji dobrze opisanych kształtów na obrazach, takich jak spektrogram.

Spektrogram: Wizualna reprezentacja widma częstotliwości szeregu czasowego.

Graphics Processing Unit (GPU): Specjalistyczny sprzęt przystosowany do przetwarzania danych z wykorzystaniem masowego równoległego obliczeń.

Akrecja: Przepływ masy pomiędzy dwoma grawitacyjnie związanymi ciałami w układzie podwójnym.

Kiloparsek (kpc): Tysiąc parseków. [Parsek](#) to astronomiczna jednostka długości odpowiadająca ok. 3 latom świetlnym lub 30 bilionom kilometrów.