

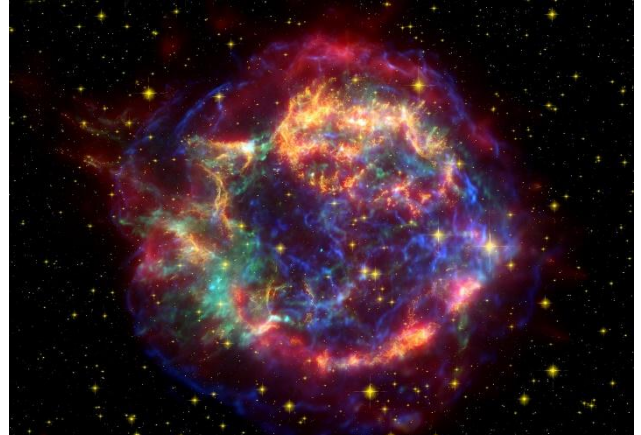
POSZUKIWANIE DŁUGOTRWAJĄCYCH FAŁ GRAWITACYJNYCH Z POZOSTAŁOŚCI PO MŁODYCH SUPERNOWYCH W DANYCH Z PIERWSZEJ CZĘŚCI KAMPANII O3

Wybuchy [supernowych](#) są gwałtownym końcem życia [masywnych gwiazd](#). Pozostałością po wybuchu jest bardzo gęsta [gwiazda neutronowa](#) otoczona szczątkami eksplodującej gwiazdy tworzącymi mgławicę (Rys. 1). Pozostałości te mogą rozciągać się na całe [lata świetlne](#), ale sama gwiazda neutronowa położona w centrum mgławicy ma średnicę zaledwie około 30 km przy masie około 1,4 razy większej od masy Słońca. Gwiazdy neutronowe są najgęstszymi stabilnymi obiektami we Wszechświecie. Skład i fizyka gwiazd neutronowych pozostaje jedną z najbardziej intrygujących tajemnic fizyki, inspirując badania w wielu dziedzinach, takich jak astrofizyka, fizyka jądrowa, fizyka cząstek elementarnych i fizyka materii skondensowanej. Dla detektorów [Advanced LIGO](#) i [Advanced Virgo](#) gwiazdy neutronowe są ważne, ponieważ są prawdopodobnymi źródłami [długotrwałych \(ciągłych\) fal grawitacyjnych](#). W najnowszej pracy poszukujemy takich fal z piętnastu młodych pozostałości po supernowych w naszej Galaktyce, wykorzystując dane zebrane w ciągu sześciu miesięcy w roku 2019, stanowiących pierwszą połowę trzeciej kampanii obserwacyjnej detektorów LIGO i Virgo, zwanej w skrócie O3a.

Obecnie krótko trwające sygnały fal grawitacyjnych, nazywane przejściowymi, są regularnie obserwowane, jednak ciągłe fale grawitacyjne nadal umykają detekcji. Jest tak dlatego, że przejściowe sygnały są głośnie i krótkie (w czym przypominają wybuchy), podczas gdy ciągłe fale grawitacyjne są dużo słabsze i trudne do odróżnienia od szumu. Aby je wykryć, musimy być cierpliwi, zbierając dane przez długi okres czasu i szukając drobnych, ale trwałych fluktuacji, które pasują do naszego modelu sygnału. W przypadku typowych poszukiwań fal ciągłych, szukamy sygnałów generowanych przez szybko rotującą gwiazdę neutronową. Każde odchylenie gwiazdy od idealnej symetrii względem osi obrotu, wytworzy fale grawitacyjne o częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości rotacji gwiazdy, przy czym większe odchylenia spowodują silniejsze [odkształcenia](#) przestrzeni wywołane falami grawitacyjnymi (czyli głośniejszy sygnał). Taka gwiazda ma kształt trójwymiarowej elipsoidy, podobny do piłki do rugby, i nazywamy ją „trójosiową”, ponieważ w każdym z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków gwiazda ma nieco inny rozmiar.

W naszej Galaktyce znajduje się wiele pozostałości po supernowych. Wybraliśmy piętnaście młodych pozostałości liczących od 100 do 10000 lat, dla których nie jest znana częstotliwość rotacji gwiazdy. Wybieramy młode pozostałości, ponieważ młode gwiazdy neutronowe są bardziej podatne na nierównomierne deformacje niż gwiazdy starsze. Młode gwiazdy neutronowe rotują również szybciej, wytwarzając silniejsze fale grawitacyjne. Ponieważ jednak nie wiemy, jak szybko obraca się gwiazda neutronowa, musimy przeszukiwać szeroki zakres częstotliwości. Młode gwiazdy neutronowe również szybciej tracą energię rotacji i w związku z tym spowalniają swoją rotację, dlatego musimy również przeszukać możliwy zakres wartości tego spowalniania. Wreszcie obserwacje znanych pulsarów sugerują, że częstotliwość ich rotacji może ulegać małym i przypadkowym fluktuacjom.

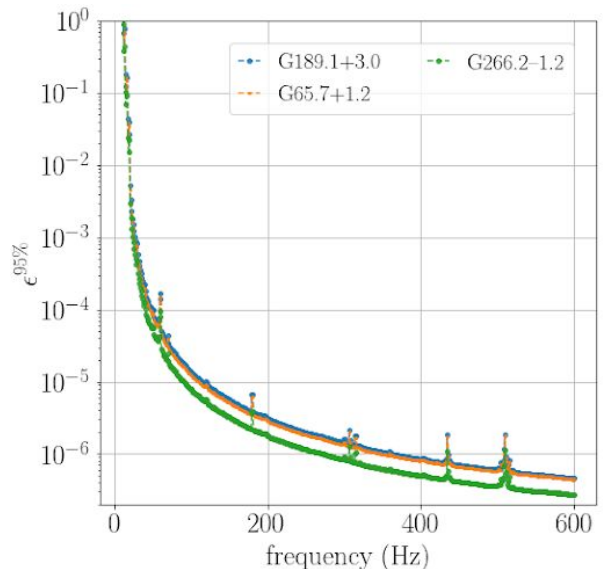
Zazwyczaj przeprowadzamy analizę zwaną koherentną: konstruujemy szablony (ang. templates) będące kopią sygnału, który spodziewamy się znaleźć w danych, i próbujemy dopasować je do danych. Jeśli wybraliśmy właściwy rodzaj szablonów i jeśli ich liczba nie jest zbyt duża, to wyszukiwanie koherentne jest metodą bardzo czułą. Tutaj mamy jednak piętnaście źródeł o nieznanych częstotliwościach rotacji, które mogą się zmieniać lub ulegać małym, losowym fluktuacjom. Analiza koherentna dla tylu nieznanymi zmiennych jest zbyt kosztowna obliczeniowo.



Rysunek 1: Cassiopeia A, jedna z młodych pozostałości po [supernowej](#), która jest celem opisywanych analiz (źródło: NASA/JPL-Caltech/Krause et al).

RYSUNKI Z PUBLIKACJI

Więcej informacji na temat rysunków i metod użytych do ich wykonania znajdziesz w publicznie dostępnym [artykule](#).

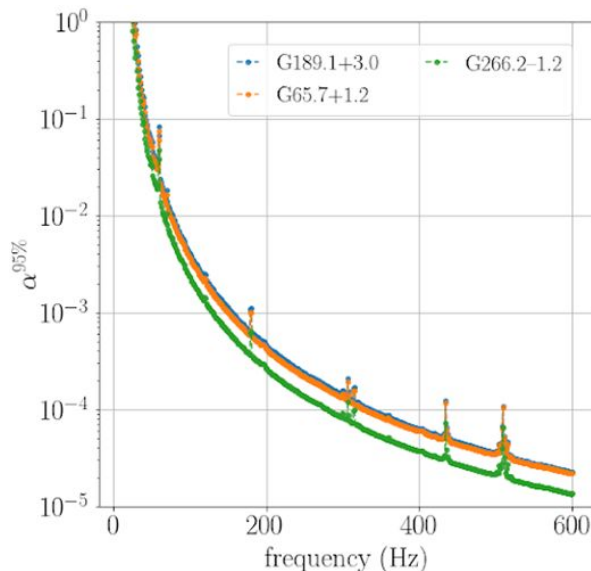


Rysunek 2: [Górne granice](#) wartości [eliptryczności](#) ϵ gwiazd neutronowych dla kilku analiz i kilku źródeł badanych w pracy. Oś pozioma to częstotliwość, przy której moglibyśmy wykryć sygnał fali grawitacyjnej; oś pionowa to 95% górne ograniczenie na eliptryczność. Krzywe zielona (źródło G266.2-1.2), niebieska (G189.1+3.0) i pomarańczowa (G65.7+1.2) pokazują dla trzech różnych źródeł ich minimalną możliwą eliptryczność, którą moglibyśmy wykryć. Jest to górna granica wartości eliptryczności gwiazdy neutronowej, ponieważ gdyby eliptryczność była większa niż ta wartość, wykrylibyśmy ją!

Zamiast tego używamy trzech w przybliżeniu koherentnych metod do efektywnego przeszukiwania danych z pierwszej połowy kampanii O3. Takie przybliżone przeszukiwanie używa koherentnego przeszukiwania do krótkich fragmentów danych, po czym łączy je razem, aby w ten sposób objąć cały czas obserwacji. Krótsze zestawy danych wymagają mniejszej liczby modeli do przeszukiwania, więc wyszukiwanie częściowo koherentne jest znacznie bardziej wydajne obliczeniowo. Zastosowaliśmy trzy algorytmy częściowo koherentne do danych z pierwszej połowy O3: jeden zoptymalizowany pod kątem czułości, drugi pod kątem szybko zmieniającego się sygnału, a trzeci pod kątem konkretnego modelu astrofizycznego. Żadne z tych trzech poszukiwań nie wskazuje na istnienie sygnału fali ciągłej.

Brak detekcji nie oznacza jednak braku wyników. Możemy oszacować czułość naszych poszukiwań i na tej podstawie wnioskować o właściwościach gwiazd, które badaliśmy. Szybko obracająca się gwiazda neutronowa emituje ciągłe fale grawitacyjne i im bardziej jest ona zdeformowana, tym głośniejszy powinien być sygnał. Wyznaczając ograniczenie na siłę sygnału, możemy określić górną granicę deformacji gwiazdy neutronowej. Asymetrię gwiazdy neutronowej mierzy się za pomocą parametru ϵ , nazywanego eliptycznością. Różne modele gwiazd neutronowych przewidują różne ograniczenia na eliptyczność, ale większość przewiduje $\epsilon < 10^{-6}$. Na Rys. 2 pokazujemy ograniczenia na eliptyczność trzech źródeł. Oś pionowa to 95% górną granicę na ϵ uzyskana w tym wyszukiwaniu. Oś pozioma to częstotliwość fal grawitacyjnych, która wpływa na eliptyczność w dwojaki sposób. Po pierwsze, odkształcenie fali grawitacyjnej przy danej częstotliwości jest silniejsze w przypadku gwiazdy bardziej eliptycznej. Po drugie, czułość LIGO jest zależna od częstotliwości, więc nasze ograniczenia dotyczące odkształcenia fali grawitacyjnej zmieniają się w całym zakresie częstotliwości. Udaje nam się ograniczyć eliptyczność poniżej teoretycznego maksimum ($\epsilon < 10^{-6}$). Wraz z poprawą tego ograniczenia będzie można wykluczyć niektóre modele fizyczne opisujące właściwości gwiazd neutronowych.

Trójosiowa gwiazda neutronowej nie jest jedynym powodem emisji przez gwiazdę ciągłych fal grawitacyjnych. Obrót gwiazdy może również wzbudzać takie fale poprzez oscylacje modu r gwiazdy, ze skalą oscylacji sparametryzowaną przez ich amplitudę α . Teoretyczne górne ograniczenie na amplitudę wynosi $\alpha < 10^{-3}$. Ograniczenie na odkształcenie od eliptycznej gwiazdy można przekształcić w ograniczenie na α , co robimy na Rys. 3. Oś pionowa to 95% przedział ufności dla α , a oś pozioma to częstotliwość fal grawitacyjnych (w Hz). Dla trzech gwiazd znajdujemy powyżej 150 Hz ograniczenie $\alpha < 10^{-3}$ na amplitudę oscylacji modu r. Wraz z gromadzeniem nowych danych i ulepszeniem metod ich analizy zwiększa się prawdopodobieństwo pierwszej detekcji. Do tego czasu ograniczamy w oparciu o brak detekcji modele fizyczne gwiazd i dążymy do zwiększenia czułości naszych poszukiwań.



Rysunek 3: Górną granicę oszacowania amplitudy oscylacji modu r dla kilku analiz i źródeł badanych w pracy. Oś pozioma to częstotliwość, przy której moglibyśmy wykryć sygnał fali grawitacyjnej; oś pionowa to 95% górne ograniczenie na amplitudę. Krzywe zielona (źródło G266.2-1.2), niebieska (G189.1+3.0) i pomarańczowa (G65.7+1.2) pokazują minimalną możliwą amplitudę, którą moglibyśmy wykryć. Jest to górna granica tego, jak silna może być oscylacja modu r, ponieważ gdyby jego amplituda była większa, wykrylibyśmy sygnał!

Odwiądź nas w internecie:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en



Przeczytaj [tutaj](#) bezpłatny preprint artykułu naukowego.

SŁOWNICZEK

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

Eliptyczność: miara tego, jak zdeformowane jest ciało niebieskie. Eliptyczność jest definiowana jako względne odkształcenie w płaszczyźnie równikowej w odniesieniu do odkształcenia wzdłuż kierunku prostopadłego do tej płaszczyzny.

Rok świetlny: jednostka długości równa odległości, jaką światło pokonuje w ciągu jednego roku. Rok świetlny jest w przybliżeniu równy 9,46 trylionom kilometrów.

LIGO: Laserowe Interferometryczne Obserwatorium Fal Grawitacyjnych to amerykańska para detektorów fal grawitacyjnych. Jeden z nich znajduje się w pobliżu Livingston w stanie Luizjana, a drugi w pobliżu Hanford w stanie Waszyngton. Oba detektory są wielkoskalowymi interferometrami laserowymi z dwoma prostopadłymi ramionami o długości 4 km, które mierzą zmiany względnej długości ramion spowodowane przechodzącą falą grawitacyjną.

Masywna gwiazda: gwiazda, która na początku swojego życia ma masę ponad 8 razy większą od masy Słońca. Takie gwiazdy pod koniec życia wybuchają jako supernowe i pozostałością po wybuchu może być gwiazda neutronowa. Jeśli mają mniejszą masę, pozostałością jest biały karł.

Gwiazda neutronowa: niezwykle gęsty obiekt, który pozostaje po zapadnięciu się masywnej gwiazdy. Typowa gwiazda neutronowa ma masę pół miliona razy większą od masy Ziemi, ale jej średnica wynosi zaledwie około 30 km.

Mod r: fale w płynnej części gwiazdy neutronowej. Ich częstotliwość jest porównywalna z częstotliwością rotacji gwiazdy, więc dla młodych gwiazd neutronowych może ona znajdować się w zakresie częstotliwości LIGO i Virgo.

Czułość: opis zdolności detektora do wykrywania sygnału. Detektory o niższym poziomie szumu są w stanie wykryć słabsze sygnały i dlatego mówi się, że mają wyższą (lub większą) czułość.

Odkształcenie: względna zmiana odległości dwóch punktów pomiarowych spowodowana deformacją czasoprzestrzeni przez przechodzącą falę grawitacyjną. Typowe odkształcenie nawet najsilniejszych fal grawitacyjnych docierających do Ziemi jest bardzo małe, zwykle mniejsze niż 10^{-21} .

Supernowa: gwałtowna eksplozja, często widoczna jako nagle pojawiający się na niebie jasny obiekt, który następnie szybko gaśnie. Supernowa może przyciemnić resztę swojej galaktyki. Istnieje wiele różnych typów supernowych. Niektóre z nich powstają w wyniku kolapsu masywnych gwiazd, inne mogą być wynikiem zderzenia się dwóch białych karłów.

Przebiegowe fale grawitacyjne: fale grawitacyjne powstałe w wyniku krótkiego, często kataklizmicznego zdarzenia, np. koalescencji ciasnego układu podwójnego. Większość przebiegowych fal grawitacyjnych pojawia się w detektorze tylko na sekundy lub krócej.

Górna granica: górna granica jakiejś wielkości, np. odkształcenia fali grawitacyjnej, to najmniejsza wartość, którą wykrylibyśmy z 95% pewnością. Jeśli więc niczego nie wykryliśmy, mamy 95% pewności, że źródło nie emituje fal wytwarzających większe wartości odkształcenia.

Virgo: detektor Virgo jest naziemnym interferometrem laserowym znajdującym się we Włoszech, w Cascinie niedaleko Pizy.