

GW190412: PIERWSZA OBSERWACJA POŁĄCZENIA DWÓCH CZARNYCH DZIUR O ZNACZĄCO RÓŻNYCH MASACH

CO ZAOBSERWOWALIŚMY?

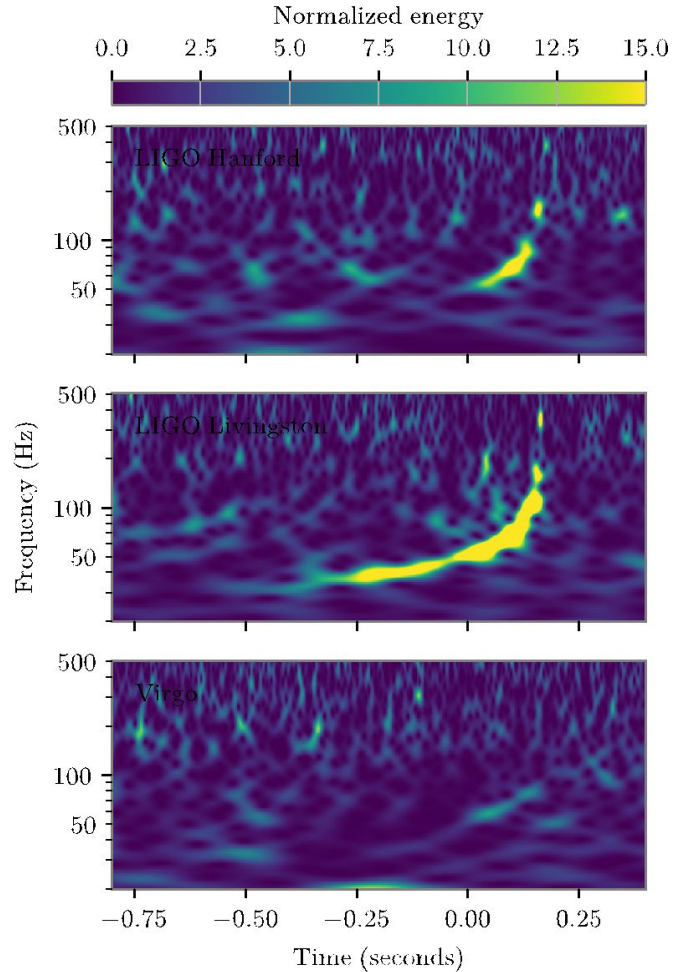
12 kwietnia 2019 r. współpraca naukowa LIGO i współpraca Virgo zaobserwowały fale grawitacyjne wytworzone podczas ostatnich orbit i połączenia się składników układu podwójnego dwóch czarnych dziur. Sygnał nazwany GW190412 zarejestrowały wszystkie trzy detektory pracujące w sieci: oba detektory LIGO (jeden w Hanford w stanie Waszyngton, drugi w Livingston w Luizjanie), jak i detektor Virgo (znajdujący się w Cascinie we Włoszech). GW190412 został wykryty na początku trzeciej kampanii obserwacyjnej Advanced LIGO i Advanced Virgo, oznaczonej symbolem O3, która rozpoczęła się 1 kwietnia 2019 r. i została zawieszona 27 marca 2020 roku.

Mimo iż wartości mas obu czarnych dziur są zgodne z wcześniejszymi obserwacjami, sygnał GW190412 jest wyjątkowy dlatego, że jest to pierwsza obserwacja połączenia się dwóch czarnych dziur, w której masy składników są istotnie różne - jedna czarna dziura jest 3 razy bardziej masywna od drugiej. Asymetria mas modyfikuje sygnał fali grawitacyjnej w taki sposób, że możemy znacznie lepiej zmierzyć inne parametry, takie jak odległość i nachylenie płaszczyzny orbity układu, spin bardziej masywnej czarnej dziury oraz zjawisko precesji w układzie. Ponadto nierówne masy GW190412 pozwalają nam zweryfikować jedno z podstawowych przewidywań ogólnej teorii względności Alberta Einsteina: fale grawitacyjne „dzwonią” z więcej niż jedną częstotliwością podstawową, w tak zwanych *wyższych multipolach*.

SKĄD WIADOMO, ŻE GW190412 JEST SYGNAŁEM FALI GRAWITACYJNEJ?

GW190412 to silny sygnał, który zaobserwowano we wszystkich trzech detektorach. Ponieważ detektory są od siebie oddalone o tysiące kilometrów, detekcja sygnału w trzech naraz prawie jednocześnie znacząco zwiększa prawdopodobieństwo, że został on wywołany przez źródło astrofizyczne, a nie z powodu szumu detektorów.

Rysunek 1 pokazuje reprezentację częstotliwościowo- czasową sygnału GW190412, znaną jako *spektrogram*. Podczas gdy GW190412 jest wystarczająco silny, aby można go było zobaczyć „na oko” w danych z detektorów Hanford i Livingston, do systematycznego skanowania danych używamy wielu algorytmów poszukiwania sygnałów i określania ich istotności. Większość technik opiera się na *filtrze dopasowanym*, który porównuje obserwowane dane z przewidywaniami ogólnej teorii względności. Prawdopodobieństwo tego, że źródłem sygnału jest szum w detektorze, wyrażamy jako *częstość fałszywych alarmów*. Korzystając z danych zebranych od 8 do 18 kwietnia oszacowaliśmy częstość fałszywych alarmów na poziomie jednego zdarzenia losowego na 30 000 lat! Analiza większej ilości danych poprawi ten wynik. Sprawdziliśmy również źródła innych rodzajów instrumentalnych i środowiskowych szumów i nie znaleźliśmy niczego, co mogłoby znacząco wpłynąć na wykrycie lub analizę GW190412.



Rysunek 1. Spektrogram sygnału GW190412 zarejestrowany w trzech detektorach fal grawitacyjnych. Oś pozioma reprezentuje czas, a oś pionowa częstotliwość sygnału. Kolor reprezentuje ilość energii o określonej częstotliwości w określonym czasie. Sygnał nazywany „*ćwierkiem*” charakteryzuje się wzrostem częstotliwości i energii w czasie, wynikającym z wzrastającej emisji fal grawitacyjnych, gdy dwie czarne dziury krążą coraz bliżej siebie („*spiralowanie*”, ostatnie orbity układu), a następnie łączą się w jeden obiekt.

Odwiedź nasze strony
w internecie:

<http://www.ligo.org>

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



WŁASNOŚCI GW190412

Wartości mas czarnych dziur w GW190412 są zgodne z tym, co obserwowano poprzednio - główny składnik ma masę około 30 razy większą od masy Słońca, a druga czarna dziura jest około 8 razy masywniejsza od Słońca. Jednak stosunek mas GW190412, zdefiniowany jako iloraz lżejszej do cięższej masy czarnej dziury, nie jest podobny do Żadnego z innych sygnałów czarnych dziur, które wcześniej wykryliśmy. Wszystkie 10 sygnałów czarnych dziur z pierwszych dwóch kampanii obserwacyjnych było zgodnych z hipotezą równych mas składników, natomiast w GW190412 masywniejsza czarna dziura jest ponad trzykrotnie cięższa niż druga, mniej masywna czarna dziura.

Nierówne masy GW190412 prowadzą do asymetrii w emisji fal grawitacyjnych, co pomaga lepiej określić niektóre parametry układu. Stwierdzamy, że efektywny spin jest dodatni, co mówi nam, że co najmniej jedna z czarnych dziur wiruje w orientacji zbliżonej do orbity dwóch czarnych dziur krążących wokół siebie. Ze względu na nierówne masy możemy też po raz pierwszy nałożyć silne ograniczenia na spin większej czarnej dziury, która, jak się okazuje, wiruje na poziomie około 40% maksymalnej wartości dozwolonej przez ogólną teorię względności. Rys. 2 pokazuje zależność efektywnego spinu od stosunku mas dla GW190412. Widzimy również marginalne oznaki, że system wykonuje precesję, choć jakiegokolwiek skutki precesji nie są wystarczająco silne, aby ostatecznie to stwierdzić. Ponadto nierówne masy pomagają również przełamać degenerację w pomiarze odległości i nachylenia układu, umożliwiając lepszy pomiar obu parametrów. GW190412 pojawił się w odległości prawie 2,5 miliarda lat świetlnych od Ziemi!

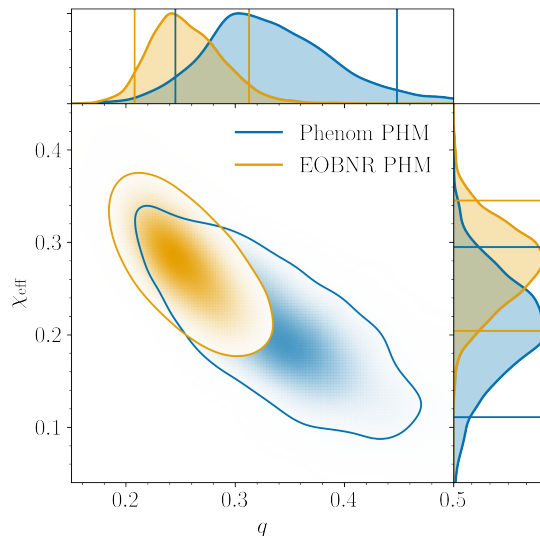
SŁUCHANIE DŹWIĘKU WYŻSZYCH HARMONIK

Unikalne właściwości GW190412 pozwalają również na obserwację pewnej podstawowej właściwości fal grawitacyjnych. Począwszy od pionierskiej pracy Einsteina, następnie udoskonalonej przez Newmana, Penrose'a, Thorne'a i wielu innych, wykazano, że promieniowanie grawitacyjne ze zwartych układów podwójnych jest głównie kwadrupolowe. To promieniowanie kwadrupolowe można traktować jak główny dźwięk, który słychać podczas uderzenia struny w gitarze. Jednak, podobnie jak w instrumentach muzycznych, przewiduje się, że promieniowanie grawitacyjne będzie również „dźwięczeć” w wyższych tonach. Te wyższe harmoniczne lub wyższe multipole są wyjątkowo trudne do wyodrębnienia z sygnału wtedy, gdy czarne dziury mają niemal identyczne masy. Nierówne masy GW190412 pozwalają lepiej „usłyszeć” te subtelne efekty podczas emisji fal grawitacyjnych. Okazuje się, że zebrane dane w stosunku większym niż 1000:1 wspierają hipotezę, że w sygnale występują wyższe harmoniczne. W przyszłości zaobserwowanie względnych natężeń różnych wyższych multipoli pomoże lepiej zbadać właściwości zderzających się czarnych dziur. Przeprowadzono również zestaw testów w celu ustalenia, czy GW190412 jest zgodny z ogólną teorią względności. Nie stwierdzono żadnych niespójności z tą teorią, po raz kolejny potwierdzając słuszność teorii grawitacji Einsteina.

POWSTAWIANIE UKŁADÓW PODWÓJNYCH CZARNYCH DZIUR O ISTOTNIE RÓŻNYCH MASACH

Każda kampania obserwacyjna konsorcjum Advanced LIGO/Virgo przynosiła nowe i ekscytujące informacje o różnych cechach układów podwójnych złożonych ze zwartych obiektów. GW190412, jako pierwszy układ podwójny czarnych dziur o istotnie różnych masach, stanowi ważny obserwacyjny przyczynek do zrozumienia własności populacji układów podwójnych czarnych dziur. Obserwacja tego pojedynczego zdarzenia pokazuje, że układy podwójne czarnych dziur o nierównych masach są stosunkowo powszechne i że powinniśmy w przyszłości zobaczyć wiele tego typu układów.

Korzystając z fizyki ewolucji gwiazd, astronomowie stworzyli modele teoretyczne powstawania układów podwójnych czarnych dziur we wszechświecie, przewidując ich masy i inne właściwości. Chociaż większość modeli przewiduje, że układy podwójne o podobnych masach powinny być najczęściej obserwowane, to uważa się, że tworzona jest również znaczna liczba układów takich jak GW190412, tj. o istotnie różnych masach. Sądzi się, że układy takie będą tworzyć się co najmniej dziesięć razy rzadziej niż układy o podobnych masach. Jednak obserwacja GW190412 z jego pozornie ekstremalnym stosunkiem masy nie jest nieoczekiwana, biorąc pod uwagę to, że dotychczas wykryliśmy już ponad 10 zdarzeń. W miarę zwiększania czułości naszych detektorów i coraz większej liczby zarejestrowanych sygnałów fal grawitacyjnych z łączących się obiektów zwartych w ciasnych układach podwójnych spodziewamy się, że będziemy obserwować wiele różnych układów, które pomogą nam lepiej zrozumieć ewolucję gwiazd, powstawanie układów podwójnych oraz dać odpowiedź na wiele pytań z fizyki fundamentalnej.



Rysunek 2. Zależność efektywnego spinu (χ_{eff}) od stosunku mas (q) dla źródła sygnału GW190412. Pomarańczowe i niebieskie kontury pokazują rozkłady prawdopodobieństwa parametrów uzyskane za pomocą dwóch różnych modeli, które dokonują nieco innych przybliżeń prawdziwego sygnału przewidzianego przez ogólną teorię względności.

SŁOWNIK

Czarna Dziura: Obiekt tak zwarty, że nawet światło nie może uciec z jego bliskiego otoczenia ze względu na bardzo silne przyciąganie grawitacyjne.

Układ podwójny obiektów zwartych: Układ złożony z dwóch obiektów zwartych takich jak gwiazdy neutronowe lub czarne dziury.

Efektywny spin: Parametr sygnału fali grawitacyjnej najlepiej wyznaczalny spośród parametrów zawierających informację o spinie czarnych dziur. Formalnie jest to rzut spinów, ważony masą każdej z czarnych dziur, na kierunek prostopadły do orbity dwóch czarnych dziur.

Ogólna teoria względności: Teoria grawitacji zaproponowana przez Alberta Einsteina w 1915 r. W tej teorii przestrzeń jest jak gumowa membrana, która ugina się w obecności materii i energii, a obiekty poruszają się w zakrzywionej przestrzeni.

Wyższe harmoniki: Emisję fal grawitacyjnych można przedstawić jako rozwinięcie na „harmoniki sferyczne”. Wyższe harmoniki są to multipole rzędu wyższego niż dominujący w sygnale moment kwadrupolowy.

Inklinacja: Nachylenie orbity układu dwóch czarnych dziur względem kierunku Ziemia - układ podwójny.

Metoda filtru dopasowanego: Technika wykrywania słabych sygnałów w zasumowanych danych, w której wzorce sygnału fal grawitacyjnych obliczone na podstawie ogólnej teorii względności są stosowane do znajdowania sygnału w danych.

Precesja: Ze względu na zasadę zachowania momentu pędu, gdy kierunek spinu czarnych dziur jest inny niż kierunek orbitalnego momentu pędu układu podwójnego, płaszczyzna orbity będzie się obracać wokół kierunku całkowitego momentu pędu.

Kwadrupol: Najsilniejszy z multipoli w sygnale fali grawitacyjnej z układu podwójnego obiektów zwartych. Myśląc o falach grawitacyjnych jako o „dźwiękach czasoprzestrzeni”, kwadrupol jest tonem podstawowym. Nazwa odnosi się do zależności natężenia emisji od kierunku: dla porównania prosta antena radiowa wysyła głównie promieniowanie dipolowe.

Spektrogram: Wizualizacja zależności częstotliwości i energii sygnału od czasu. Ilość energii dla poszczególnych częstotliwości jest pokazana przy zastosowaniu różnych kolorów.

Kształt fali: Teoretyczny sygnał fali grawitacyjnej utworzony przy zastosowaniu różnych przybliżeń ogólnej teorii względności Einsteina.