

GW170104: OBSERWACJA POWSTANIA CZARNEJ DZIURY O MASIE 50 MAS SŁOŃCA W WYNIKU ZDERZENIA SIĘ DWÓCH CZARNYCH DZIUR PRZY PRZESUNIĘCIU KU CZERWIENI $z=0,2$

WSTĘP

We wrześniu 2015 detektory LIGO ([Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory](#)) dokonały pierwszej bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych wyemitowanych podczas zlewania się dwóch czarnych dziur położonych w odległości ponad miliarda lat świetlnych od Ziemi. To zdarzenie, nazwane [GW150914](#), zostało zarejestrowane sto lat po ogłoszeniu ogólnej teorii względności przez Alberta Einsteina. Wkrótce potem w październiku 2015 został zarejestrowany kolejny kandydat ([LVT151012](#)), a w grudniu tego roku nastąpiła druga potwierdzona detekcja ([GW151226](#)), również związana ze zlewaniem się dwóch czarnych dziur.

Detektor Advanced LIGO rozpoczął swoją drugą sesję obserwacyjną w końcu listopada 2016, po ukończeniu prac nad zwiększeniem czułości. Nieco ponad miesiąc później odkryto kolejne zdarzenie - [GW170104](#). Poniżej przedstawiamy podsumowanie tego jak dokonano tego odkrycia, czego dowiedzieliśmy się o czarnych dziurach w tym układzie, a także czego to odkrycie dokonane przez LIGO uczy nas o grawitacji i przestrzeni.

WYKRYCIE SYGNAŁU GW170104

Sygnal GW170104 został wykryty w danych zebranych przez każdy z dwóch interferometrów Advanced LIGO: w Hanford w stanie Waszyngton oraz w Livingston w stanie Luizjana, po wstępnym znalezieniu go w Livingston przez zautomatyzowany program do analizy danych działający nieomal w czasie rzeczywistym. Szczegółowa diagnostyka stanu interferometrów w momencie detekcji, analogiczna do tej przeprowadzonej przy poprzednich odkryciach (patrz [tu](#) i [tu](#)) wykazała, że oba instrumenty działały normalnie.

Dwie górne grafiki na Rys. 1 przedstawiają dane zarejestrowane przez instrumenty LIGO podczas zlewania się czarnych dziur. Sygnal GW170104 przypomina GW150914: w obu przypadkach wyraźnie widać charakterystyczny kształt „czwierku”, oczekiwany dla układu podwójnego zacieśniającego orbitę, tzn. wyraźny wzrost amplitudy i częstotliwości fali odpowiadający przyspieszającemu ruchowi orbitujących składników tuż przed końcowym zderzeniem.

Używając metod analizy danych opartych na metodzie [filtru dopasowanego](#) (patrz także [tu](#) i [tu](#)), sygnal GW170104 został porównany ze zbiorem teoretycznych modeli sygnału w celu znalezienia najlepszego dopasowania i określenia fizycznych parametrów źródła, takich jak masy składników i położenie źródła na niebie. Zgrubne oszacowania tych wartości zostały natychmiast przesłane obserwatorom na całym globie, którzy przystąpili do poszukiwania być może towarzyszącej zdarzeniu emisji [elektromagnetycznej](#) (więcej o poszukiwaniach promieniowania elektromagnetycznego towarzyszącego falam grawitacyjnym GW150914 możesz przeczytać [tu](#)).

WYZNACZANIE PARAMETRÓW GW170104

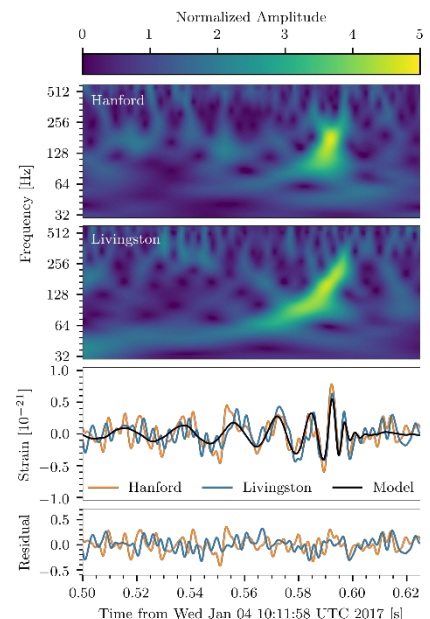
W ciągu kilku tygodni po detekcji została przeprowadzona dokładniejsza analiza metodą filtru dopasowanego z użyciem superkomputerów. Celem tej analizy było przede wszystkim ustalenie, na ile ta detekcja była znacząca, poprzez znalezienie prawdopodobieństwa fałszywego alarmu, czyli prawdopodobieństwa tego, jak często podobny sygnał może pojawić się w detektorach przez przypadek. Im niższe to prawdopodobieństwo, tym bardziej znacząca jest detekcja. Więcej na ten temat można dowiedzieć się w [opisie detekcji](#) sygnału GW150914.

Analiza pokazała, że taki sygnał może pojawić się w detektorze przez przypadek rzadziej niż raz na 70 000 lat, co oznacza, że detekcja GW170104 jest bardzo znacząca i mamy do czynienia z prawdziwym zdarzeniem astrofizycznym. Na Rys. 1 na drugim wykresie od dołu przedstawiamy porównanie pomiędzy najlepszym teoretycznym modelem sygnału i danymi zebranymi w czasie rejestracji GW170104. Najniższy wykres od dołu na Rys. 1 to rezysta dopasowania (różnica pomiędzy modelem a danymi): widać, że model bardzo dobrze odtwarza dane.

Dalsza dokładna analiza danych wykorzystująca obliczenia na superkomputerach pozwala na dokładne wyznaczenie parametrów GW170104, takich jak masy składników układu podwójnego, jego odległość i położenie na niebie, nachylenie płaszczyzny orbity, czy też tempo obrotu każdej z czarnych dziur i tempo precesji. Wyznaczanie parametrów polega na porównaniu milionów kombinacji tych parametrów z danymi i sprawdzeniu, jak dobrze obserwacje LIGO zgodne są z kształtem fali dla danego zestawu parametrów. Więcej informacji o wyznaczaniu parametrów przez LIGO można znaleźć [tutaj](#) i [tutaj](#).

ILUSTRACJE

Szczegółowe opisy rysunków znajdują się w [publikacji](#).



Rysunek 1: Dwie grafiki na górze przedstawiają ewolucję częstotliwości sygnału zarejestrowaną przez detektory LIGO podczas obserwacji GW170104, w przedziale czasu o długości 0.1 sekundy. Natężenie (amplituda) sygnału jest opisane kolorem. Na trzeciej od góry grafice porównujemy teoretyczny model sygnału (linia czarna) najlepiej dopasowany do sygnałów zmierzonych przez detektory LIGO. W porównaniu uwzględniono 3 ms różnicę czasu pomiędzy chwilami nadejścia sygnałów w obu detektorach oraz różne ustawienie ramion detektorów. Dolna grafika przedstawia rezysta dopasowania. Łatwo zauważyć, że nie pozostał w nich żaden sygnał.



Odwiedź LIGO na stronie
<http://www.ligo.org/>

Oceniono również niepewność wyznaczenia parametrów GW170104, i to zarówno pojedynczych parametrów, jak i ich kombinacji. Na przykład, na Rys. 2 pokazane jest, co można powiedzieć o masach obiektów zwartych, których wyznaczone wartości to 20 i 30 mas Słońca, co wskazuje na to że mamy do czynienia z dwoma czarnymi dziurami. Porównanie tych mas z wyznaczoną masą końcowej czarnej dziury pokazuje, że energia wypromieniowanych fal grawitacyjnych odpowiada dwóm masom Słońca. Odpowiada to jasności przewyższającej jasność wszystkich gwiazd we Wszechświecie razem wziętych!

Określiłiśmy także odległość do GW170104: okazuje się, że zdarzenie to zaszło około dwukrotnie dalej niż GW150914 tzn. w odległości 3 miliardów lat świetlnych. GW170104 znajduje się tak daleko, że w trakcie podróży z miejsca emisji do Ziemi fale grawitacyjne zostały rozciągnięte w wyniku ekspansji Wszechświata o 20%. Proces ten nazywa się kosmologicznym przesunięciem ku czerwieni i jest rutynowo obserwowany w przypadku światła pochodzącego z odległych galaktyk. Tabela zawierająca parametry najlepszego dopasowania dla sygnału GW170104 znajduje się w artykule oraz w tym [zestawieniu](#).

CZEGO NOWEGO DOWIADUJEMY SIĘ Z GW170104?

Populacja czarnych dziur o masie gwiazdowej

GW170104 jest trzecią potwierdzoną detekcją fal grawitacyjnych i czwartym przedstawicielem (włączając kandydata na detekcję LVT151012) powiększającej się rodziny układów masywnych czarnych dziur o bezpośrednio zmierzonych masach. Rysunek 2 przedstawia porównanie mas wyznaczonych dla GW170104 z poprzednio zmierzonymi masami; masy składników GW170104 znajdują się pomiędzy wartościami mas składników GW150914 i LVT151012. Dodatkowo, detekcja GW170104 poprawia nasze oszacowania na częstość występowania tego typu zdarzeń w kosmosie. Mimo że częstość ta jest wciąż słabo określona, jest już teraz niezgodna z niektórymi astrofizycznymi modelami powstawania i ewolucji układów podwójnych czarnych dziur, co pozwala na ich korektę lub wyeliminowanie.

Dodatkowe ograniczenia na modele populacji takich układów można otrzymać z pomiarów tempa rotacji ([spinów](#)) czarnych dziur, gdyż różne modele różnie przewidują na ile osie rotacji czarnych dziur są do siebie równoległe. Spiny czarnych dziur nie są jeszcze określone z zadowalającą dokładnością, mimo to nasze obserwacje wskazują na to, że kierunki osi rotacji czarnych dziur - składników układu podwójnego - nie są równoległe do siebie i nie są równoległe do kierunku orbitalnego momentu pędu.

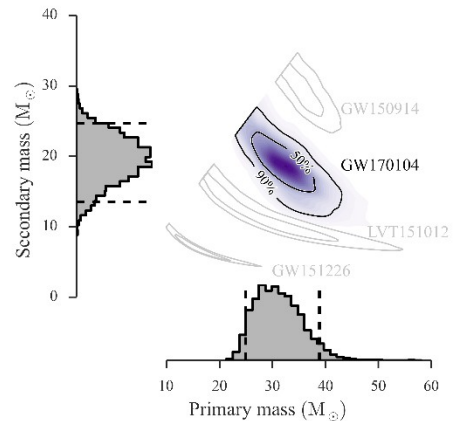
Testowanie ogólnej teorii względności

Trzecia potwierdzona rejestracja fal grawitacyjnych zwiększyła możliwości testowania pewnych fundamentalnych aspektów ogólnej teorii względności. Porównaliśmy nowe obserwacje i obserwacje dokonane przy poprzednio zarejestrowanych sygnałach GW150914 i GW151226 ze specyficznymi przewidywaniami ogólnej teorii względności dotyczącymi tego, jak zarejestrowane sygnały powinny zmieniać się w czasie. Szukaliśmy w zebranych danych jakichkolwiek zauważalnych odchyłeń od tego, co przewiduje ogólna teoria względności. Wyniki tych poszukiwań były zgodne z tymi uzyskanymi już poprzednio (patrz [tu](#) i [tu](#)): ogólna teoria względności Einsteina ponownie śpiewająco zaliczyła ten test!

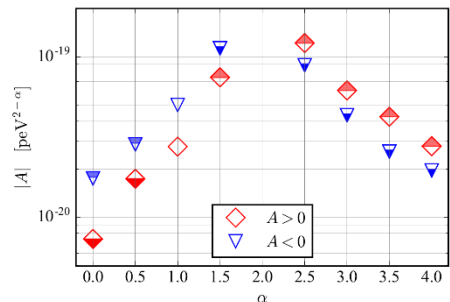
Ogromna odległość źródła sygnału GW170104 od Ziemi pozwoliła nam również na sprawdzenie innego przewidywania ogólnej teorii względności mówiącego, że fale grawitacyjne podróżują z prędkością światła i nie ulegają [dyspersji](#). W pewnych sytuacjach fala (niekoniecznie grawitacyjna) może ulec dyspersji, np. podczas przemieszczania się w ośrodku materialnym. Oznacza to, że fala zostaje rozszczepiona, ponieważ jej składowe o różnych częstościach poruszają się z różnymi prędkościami. (Przykładami ilustrującymi to zjawisko jest rozszczepienie białego światła słonecznego w [tecznie](#), albo zniekształcenie dźwięku słyszanego, gdy znajdujemy się pod wodą. Z drugiej strony z dobrym przybliżeniem fale dźwiękowe nie ulegają dyspersji przemieszczając się w powietrzu wypełniającym salę koncertową. Gdyby było inaczej, słuchając grającej orkiestry słyszelibyśmy dźwięki fletu piccolo i kontrabasu docierające do nas nierównocześnie, nie w takt.) By sprawdzić, czy fale grawitacyjne rzeczywiście nie ulegają dyspersji, rozważyliśmy prosty model zakładający jej istnienie. Model ten motywowany był pewnymi alternatywnymi w stosunku do ogólnej teorii względności teoriami grawitacji, w których zjawisko dyspersji fal grawitacyjnych występuje. Porównaliśmy przewidywania tego modelu z obserwacjami sygnału GW170104 oraz sygnałów GW150914 i GW151226.

Rysunek 3 pokazuje ograniczenia na wielkość możliwej dyspersji, dla różnych wartości parametru α charakteryzującego użyty model. Widzimy, że zgodność z obserwacjami dopuszcza tylko bardzo małe wartości dyspersji. Oznacza to, że ogólna teoria względności, w której wartość dyspersji wynosi dokładnie zero, ponownie pomyślnie zdała test. Chociaż w przypadku fal elektromagnetycznych propagujących się w pustej przestrzeni, na ich możliwą [dyspersję](#) zostały nałożone silniejsze ograniczenia niż te zilustrowane na rys. 3, jednak nasza analiza po raz pierwszy rozszerzyła test sprawdzający brak dyspersji na fale grawitacyjne.

Aktualnie trwające obserwacje detektorów Advanced LIGO będą kontynuowane do połowy roku 2017. Spodziewamy się, że wkrótce dołączą do nich detektor [Advanced Virgo](#). Większa liczba detekcji dokonanych przez te detektory w najbliższej przyszłości oznaczać będzie lepsze zrozumienie mechanizmów tworzenia się i ewolucji czarnych dziur o masach gwiazdowych oraz umożliwi sprawdzenie poprawności przewidywań ogólnej teorii względności za pomocą jeszcze bardziej precyzyjnych testów.



Rysunek 2: Ograniczenia na zakres mas (wyrażonych w masach Słońca) składników, które są zgodne z obserwacjami GW170104. Mapa konturowa w górnej prawej części rysunku pokazuje dozwolony zakres mas, gdy rozpatrujemy obie czarne dziury razem. Obszar ciemniejszy to obszar większego prawdopodobieństwa dla poszczególnych mas, które osiągają maksimum dla 30 lub 20 mas Słońca. Dla porównania w kolorze jasnoszarym pokazane są zakresy mas dla pozostałych trzech obiektów wykrytych przez LIGO. Patrz Rys. 2 w publikacji.



Rysunek 3: Górne ograniczenia na wielkość parametru dyspersji A dla kilku wartości α dopuszczonych przez obserwacje GW170104. W modelu dozwolone są zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości A i ograniczenia są podobne w obu przypadkach. Ogólna teoria względności przewiduje, że A jest równe dokładnie zero.

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

[Publikacja o odkryciu GW170104](#)

[Zespół naukowy LIGO](#)

[Advanced LIGO](#)

[Technologie używane w Advanced LIGO](#)

[Advanced Virgo](#)

[Centrum Otwartych Danych LIGO](#) (z dostępem do danych związanych z GW170104)