

GWTC-1: NOWY KATALOG DETEKCCI FAL GRAWITACYJNYCH

Prezentujemy nowy katalog źródeł fal grawitacyjnych (nazwany GWTC-1 czyli "katalog przejściowych źródeł fal grawitacyjnych nr 1") odkrytych podczas pierwszej i drugiej kampanii obserwacyjnej prowadzonej przez globalną sieć zaawansowanych detektorów [fal grawitacyjnych](#).

Nasz katalog zawiera cztery nowe obserwacje łączenia się [czarnych dziur](#) w układach podwójnych, o których wcześniej nie informowaliśmy – w tym nową "potrójną detekcję" zaobserwowaną przez dwa detektory [LIGO](#) i detektor [Virgo](#) 18 sierpnia 2017 r. W przypadku tego sygnału pozycja na niebie układu podwójnego czarnych dziur, który znajdował się 2,5 miliarda [lat świetlnych](#) od Ziemi, została wyznaczona z dokładnością 39 stopni kwadratowych – lepiej niż jakiegokolwiek inne zjawisko zderzenia się czarnych dziur zaobserwowane do tej pory.

W naszym katalogu poprawiliśmy oszacowanie parametrów źródeł wszystkich jedenastu potwierdzonych sygnałów fal grawitacyjnych: 10 sygnałów pochodzących z układów podwójnych czarnych dziur i jednego sygnału z układu podwójnego [gwiazd neutronowych](#). Dodatkowo przedstawiamy także listę sygnałów "marginalnych" (albo sygnałów-kandydatów), dla których nie można rzetelnie potwierdzić ich astrofizycznego pochodzenia. Aktualizujemy również nasze oszacowania częstości występowania łączących się czarnych dziur i gwiazd neutronowych w układach podwójnych we Wszechświecie i podajemy górne ograniczenie na częstość łączenia się gwiazd neutronowych i czarnych dziur w mieszanych układach podwójnych.

Tworząca się w naszych oczach astronomia fal grawitacyjnych wkracza w ekscytującą nową erę!

DWIE PIERWSZE KAMPANIE OBSERWACYJNE DETEKTORÓW ADVANCED LIGO I ADVANCED VIRGO

W ciągu ostatnich trzech lat uczestniczyliśmy w dwóch kampaniach obserwacyjnych sieci detektorów fal grawitacyjnych [Advanced LIGO](#) i [Advanced Virgo](#). Detektory Advanced LIGO przeprowadziły pierwszą kampanię obserwacyjną (O1) w okresie od 12 września 2015 r. do 19 stycznia 2016 r., a druga kampania (O2) trwała od 30 listopada 2016 r. do 25 sierpnia 2017 r. Podczas kampanii O2, 1 sierpnia 2017 r., po raz pierwszy detektor Advanced Virgo dołączył do dwóch detektorów Advanced LIGO. Najciekawszymi obserwacjami dokonanymi podczas kampanii O1 i O2 były:

- [GW150914](#): historycznie pierwsza detekcja fal grawitacyjnych, związana ze zderzeniem się dwóch czarnych dziur znajdujących się w odległości ponad miliarda lat świetlnych od Ziemi;
- [GW170814](#): sygnał fali grawitacyjnej wykryty po raz pierwszy przez sieć złożoną z trzech – a nie dwóch – detektorów, także związany ze zderzeniem się dwóch czarnych dziur;
- [GW170817](#): pierwszy sygnał fali grawitacyjnej związany ze zderzeniem się dwóch gwiazd neutronowych – i także pierwszy sygnał fali grawitacyjnej zaobserwowany "w świetle", przez kilkadziesiąt teleskopów w pełnym zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego.

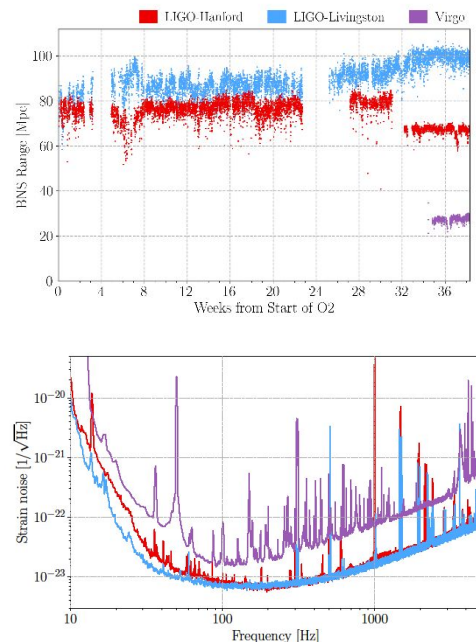
W czasie pomiędzy kampaniami O1 i O2 czułość obu detektorów LIGO była zwiększana, w przypadku detektora LIGO w Livingston (LLO) była ona również ulepszana w ciągu kampanii O2. W wyniku tego "zasięg dla zlewających się układów podwójnych gwiazd neutronowych" (ang. BNS range, jest to pojedyncza liczba charakteryzująca czułość detektora, równa z grubszą średniej odległości, na jakiej detektor może wykryć układ dwóch zderzających się gwiazd neutronowych) wzrósł z około 60 Mpc w kampanii O1 (1 Mpc = 1 milion [parseków](#)), do 80 Mpc na początku kampanii O2 i do ponad 100 Mpc pod koniec tej kampanii. Zasięg ten dla detektora LIGO w Hanford (LHO) wyniósł około 80 Mpc pod koniec kampanii O1 i wzrósł średnio o około 20% podczas całej kampanii O2.

Detektor Advanced Virgo bazuje na detektorze Virgo pierwszej generacji, który zakończył działanie w 2011 r. Główne udoskonalenia wprowadzone w Virgo to nowa konstrukcja optyczna z wiązką laserową o większym rozmiarze i wyższą "finezją" wnek rezonansowych interferometru (oznaczającą większą liczbę odbić światła laserowego wewnątrz wnęki, co sprzyja poprawie czułości), lepszej jakości lustrami i ławami optycznymi izolowanymi w próżni od zjawisk sejsmicznych. Odległość, przy której Advanced Virgo wykrywało sygnały z układów podwójnych gwiazd neutronowych z określonym standardowym stosunkiem sygnał-szum, wynosiła podczas kampanii O2 około 25 Mpc.

Rysunek 1 pokazuje zasięg trzech detektorów i najlepszą czułość, jaką osiągnęły one podczas O2.

RYSUNKI Z PUBLIKACJI

Więcej informacji na temat tych rysunków i sposobu, w jaki zostały wyprodukowane, znajdziesz w [artykule](#).



Rysunek 1: Górny panel pokazuje "zasięg wykrywalności układów podwójnych gwiazd neutronowych" detektorów LIGO i Virgo podczas O2. Przerwa w tygodniu 3 nastąpiła pod koniec 2016 r. Dodatkową przerwę w tygodniu 23 zaplanowano w celu poprawienia czułości instrumentu. W 31 tygodniu można zobaczyć wpływ trzęsienia ziemi w Montanie na czułość instrumentu LIGO-Hanford. Virgo dołączył do O2 w tygodniu 34. Dolny panel pokazuje czułość każdego z detektorów tzn. amplitudę całkowitego szumu detektorów jako funkcja częstotliwości. Krzywe reprezentują najlepszą wydajność każdego z detektorów podczas O2 (zgodnie z rysunkiem 1 naszego [artykułu](#)).

Detektory LIGO zbierały dane przez około 60% czasu, a dane zbierane jednocześnie przez oba detektory (określane jako "obserwacje w koincydencji") stanowiły 45% czasu. Po usunięciu przerw spowodowanych zakłóceniami instrumentalnymi okres "wspólnych obserwacji" wynosi 118 dni. 15 z tych dni było obserwacjami prowadzonymi wspólnie z detektorem Virgo, który zbierał dane naukowe przez około 80% czasu swojej pracy.

Poszukiwania sygnałów fal grawitacyjnych z łączenia się układów podwójnych obiektów zwartych zostały przeprowadzone za pomocą dwóch niezależnych algorytmów o nazwach "PyCBC" i "GstLAL", które porównują – za pomocą techniki zwanej "metodą filtru dopasowanego" – zebrane dane z teoretycznym sygnałem przewidywanym przez [ogólną teorię względności](#). Ponadto zastosowano również inny ogólny algorytm wyszukiwania o nazwie "cWB", który nie zakłada określonego, teoretycznego modelu sygnału fali grawitacyjnej.

Udoskonalenia w tych algorytmach wyszukiwania i rozszerzenie zakresu parametrów szukanych obiektów astrofizycznych, były motywacją do ponownej analizy danych O1. Podobnie, zastosowanie procedury „oczyszczania danych” w celu usunięcia szumów detektora i poprawy jego czułości, uzasadniły ponowną analizę danych O2.

Każda z metod poszukiwania sygnałów tworzy listę sygnałów-kandydatów, które są uszeregowane pod względem siły sygnału w porównaniu do szumu detektora – parametr ten określamy nazwą "[stosunek sygnału do szumu](#)" (SNR) – i ich istotności statystycznej, określanej ilościowo przez współczynnik fałszywego alarmu (FAR), tj. częstotliwość, z jaką można oczekiwać przypadkowego zdarzenia, pojawiającego się losowo w szumie detektora, i podobnego do prawdziwych sygnałów fal grawitacyjnych.

Ustawiając próg FAR na mniej niż 1 na 30 dni (około 12,2 na rok) w co najmniej jednym z dwóch algorytmów używających metody filtru dopasowanego, ograniczyliśmy listę kandydatów i wyeliminowaliśmy wiele sygnałów-kandydatów, które najprawdopodobniej powstały w wyniku szumu detektorów: wśród tych kandydatów znaleźliśmy 11 zdarzeń z prawdopodobieństwem pochodzenia astrofizycznego większym niż 50% w porównaniu do hipotezy bycia wynikiem szumu instrumentalnego. Kandydaci są oznaczeni prefiksem "GW", a następnie datą obserwacji (np. GW150914). Pozostali kandydaci są uważani za zdarzenia "marginalne" i jest mało prawdopodobne, że mają pochodzenie astrofizyczne.

STARZY PRZYJACIELE I NOWE ODKRYCIA

Nasze trzy algorytmy używane do poszukiwania sygnałów zidentyfikowały łącznie 11 niewątpliwych detekcji w danych O1 i O2. Siedem z nich zostało już wcześniej ogłoszonych: trzy sygnały pochodzące z układów czarnych dziur w O1, trzy kolejne połączenia czarnych dziur w O2 i jeden sygnał z układu gwiazd neutronowych w O2. Jeden z sygnałów z O1 był poprzednio określany jako LVT151012 (został on wykryty 12 października 2015 r.), ponieważ jego początkowe oszacowanie upublicznione w 2016 r. miało zbyt małe [znaczenie statystyczne](#), by zasłużyć na oznaczenie GW (niewątpliwiej detekcji). Szczegółowa ponowna analiza tego sygnału wykazała jednak, że rzeczywiście spełnia on kryteria rzetelnej detekcji i w związku z tym jest teraz oznaczany symbolem GW151012.

Ponadto w kampanii O2 odkryliśmy cztery nowe sygnały fal grawitacyjnych: GW170729 (wykryty 29 lipca), GW170809 (9 sierpnia), GW170818 (18 sierpnia) i GW170823 (23 sierpnia), wszystkie pochodzące z układów podwójnych czarnych dziur. GW170818 wyróżnia się spośród nowych obserwacji: jest to druga, po GW170814, "potrójna detekcja" zderzających się czarnych dziur obserwowana zarówno przez detektory LIGO, jak i Virgo – oraz trzecia "potrójna detekcja" wliczając również obserwację zderzenia się gwiazd neutronowych GW170817.

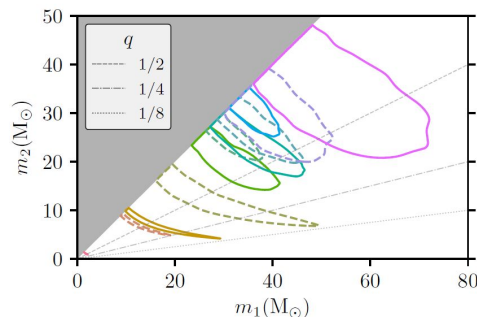
MIERZENIE WŁAŚCIWOŚCI ŹRÓDEŁ FAL GRAWITACYJNYCH

Sygnał fali grawitacyjnej pochodzącej od układu dwóch czarnych dziur krążących wokół wspólnego środka masy po niemal kołowych orbitach opisany jest kombinacją 15 wielkości fizycznych. Osiem z nich to właściwości samego układu czarnych dziur: są to masy czarnych dziur i ich „spiny”, które są związane z [momentem pędu](#) każdego ze składników. 7 dalszych parametrów związanych jest z tym, w jaki sposób na Ziemi obserwowane jest źródło fal grawitacyjnych: są to położenie źródła na niebie, jego odległość od nas, jak bardzo płaszczyzna orbitalna układu podwójnego jest nachylona w stosunku do linii widzenia, kąt [polaryzacji](#) fal grawitacyjnych emitowanych przez źródło, czas, w którym para czarnych dziur się łączy, oraz faza fali grawitacyjnej w tym czasie.

Ponieważ gwiazdy neutronowe zbudowane są z materii, fale grawitacyjne wytwarzane przez układy podwójne zawierające gwiazdę neutronową zależą również od dodatkowego parametru znanego jako „[deformacja pływowa](#)”; parametr ten mierzy deformację każdej z gwiazd – widoczną podczas kilku ostatnich orbit przed połączeniem – spowodowaną siłami pływowymi pochodzącymi od gwiazdy towarzysza. Pomiar deformacji pływowej dostarcza informacji o wewnętrznej strukturze gwiazd neutronowych.

Rysunek 2 pokazuje nasze oszacowania mas składników wszystkich obserwowanych do tej pory źródeł sygnałów fal grawitacyjnych, wywnioskowane z danych; dla każdego zdarzenia pokazany obszar przedstawienia zakresu wartości mas składników, dla których jesteśmy w 90% pewni ich wartości: zakres ten określamy nazwą "obszar 90% wiarygodności". (W każdym przypadku masywniejszy składnik układu jest oznaczony numerem 1). Widać, że masy składników układów podwójnych czarnych dziur pokrywają szeroki zakres od około 5-ciu [mas Słońca](#) do około 70-ciu mas Słońca, co jest zgodne z zakresem oczekiwanym dla czarnych dziur o masach gwiazdowych. Najbardziej masywny układ podwójny czarnych dziur to GW170729, a dwa najmniej masywne to GW151226 i GW170608.

Sygnał fali grawitacyjnej generowany na długo przed połączeniem (związany ze wzajemnym ruchem składników układu po zagęszczającej się spirali, ang. inspiral), zależy głównie od funkcji mas składników nazywanej "[masą ćwierku](#)", parametru, który można mierzyć z większą dokładnością dla układów podwójnych o małych masach. Inne ważne parametry, takie jak stosunek mas składników oraz "składowa efektywnego momentu pędu wzdłuż kierunku orbitalnego momentu pędu" (związana z określoną kombinacją spinów poszczególnych składników przed ich połączeniem) są trudniejsze do dokładnego zmierzenia, ponieważ różne wartości tych parametrów wpływają podobnie na ostateczny kształt fali grawitacyjnej.



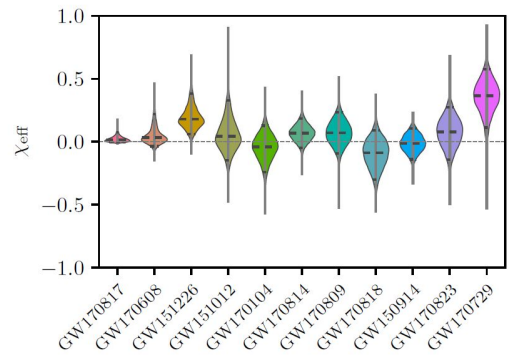
Rysunek 2: Obszary 90% wiarygodności dla oszacowanych mas składników układów podwójnych w naszych detekcjach fal grawitacyjnych, w jednostkach masy Słońca. Oszacowanie mas gwiazd neutronowych sygnału GW170817 jest pokazane w lewym dolnym rogu rysunku. Wszystkie inne sygnały to połączenia się układów podwójnych czarnych dziur. Widać, że szacunkowe masy obejmują szeroki zakres, od około 5 do około 70 mas Słońca. Dla każdego sygnału bardziej masywny składnik układu jest oznaczony numerem "1" (zgodnie z rysunkiem 4 naszego [artykułu](#)).

Możemy to zobaczyć na przykładzie Rysunku 3: dla wszystkich sygnałów rozkład efektywnego spinu jest wyśrodkowany wokół zera, z wyjątkiem GW170729 i GW151226, gdzie możemy wykluczyć wartość zerową efektywnego spinu z ponad 90% pewnością. W przyszłości dokładniejsze pomiary spinów i mas dadzą nam lepszy wgląd w różne scenariusze powstawania i ewolucji gwiazdowych układów podwójnych. Na razie jednak, przy obecnej czułości detektorów, trudno zmierzyć spin poszczególnych czarnych dziur wchodzących w skład układów podwójnych.

Innymi ważnymi wielkościami obliczonymi dzięki zarejestrowanym sygnałom fal grawitacyjnych są: ostateczna masa i spin końcowego obiektu, ilość energii wyemitowanej w postaci fal grawitacyjnych i maksymalna chwilowa moc promieniowania tych fal. Okazuje się, że kilka procent całkowitej masy układu podwójnego zostaje zamienionych na energię fal grawitacyjnych: im większa masa całkowita, tym większa ilość promieniowania. Na przykład dla GW170729, najbardziej masywnego układu podwójnego czarnych dziur wykrytego do tej pory, energia promieniowania odpowiada prawie pięciu masom Słońca, a szczytowa moc to więcej niż 4×10^{56} erg/s – około 50 razy więcej niż sumaryczna jasność wszystkich gwiazd w całym Wszechświecie!

Amplituda sygnału fali grawitacyjnej jest odwrotnie proporcjonalna do odległości Źródła fali (dokładniej, odległość ta znana jest w kosmologii jako "odległość jasnościowa"), pomiar amplitudy pozwala zatem oszacować odległość. Nasze szacunki niosą ze sobą znaczną niepewność, szczególnie w przypadku bardziej odległych Źródeł, ale jasne jest, że wykrywamy fale grawitacyjne, które powstały "dawno dawno temu, w odległej galaktyce".

Spośród dziesięciu układów podwójnych czarnych dziur znajdujących się w naszym katalogu, dla sześciu oszacowane odległości wynoszą około jednego gigaparseka (1 Gpc = 1 miliard parseków) lub więcej. Najdalszym Źródłem (które również jest najbardziej masywne) jest GW170729, znajdujące się w odległości 2,76 Gpc lub około 9 miliardów lat świetlnych. Z kolei najbliższym Źródłem jest GW170608 znajdujące się w odległości 0,32 Gpc (czyli około 1 miliarda lat świetlnych). Natomiast układ podwójny gwiazd neutronowych GW170817 jest, relatywnie rzecz biorąc, na naszym "kosmicznym podwórku", w odległości zaledwie 0,04 Gpc lub 130 milionów lat świetlnych.



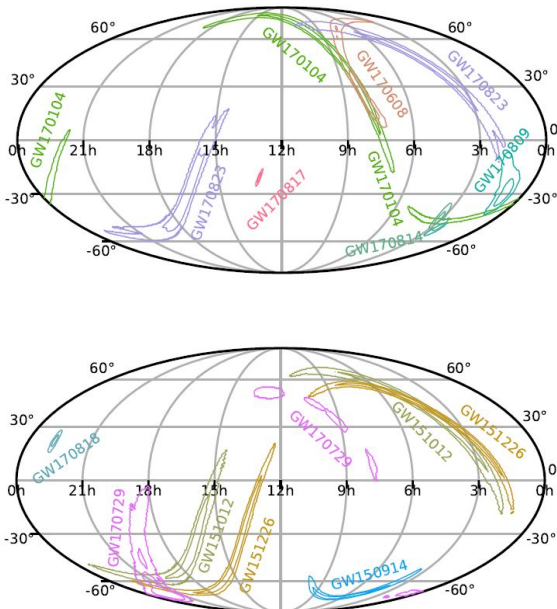
Rysunek 3: Szacunkowe wartości efektywnego spinu dla każdej z naszych detekcji. Widzimy, że we wszystkich przypadkach oszacowana wartość jest wyśrodkowana wokół zera, z wyjątkiem GW170729 i GW151226, w których możemy wykluczyć wartość zerową efektywnego spinu z ponad 90% pewnością (rysunek 5 naszego [artykułu](#)).

ZNACZENIE SIECI DETEKTORÓW

Gdy sygnał fali grawitacyjnej osiąga Ziemię, dociera on do detektorów znajdujących się w różnych miejscach, w nieco różnych chwilach czasu. Zaobserwowane chwile dotarcia sygnału, a także jego amplitudy zmierzone przez każdy detektor, pozwalają określić miejsce na niebie, z jakiego sygnał był wysłany. Dwa detektory mogą ograniczyć położenie Źródła sygnału do obszarów będących fragmentami dość rozległego pierścienia rozciągającego się na niebie. Dopiero informacje dostarczone przez trzeci detektor pozwalają określić położenie Źródła na niebie znacznie dokładniej, co umożliwia zaalarmowane astronomów, którzy mogą przeszukać wskazany obszar nieba za pomocą teleskopów działających w całym zakresie widma [promieniowania elektromagnetycznego](#).

W sierpniu 2017 r. potrójna detekcja sygnału GW170817, pochodzącego ze zderzenia się dwóch gwiazd neutronowych, zaobserwowanego przez globalną sieć złożoną z dwóch detektorów Advanced LIGO i jednego detektora Advanced Virgo, była początkiem nowej ekscytującej ery astronomii wieloaspektowej. Nasz katalog zawiera informacje o pięciu sygnałach "potrójnie wykrytych": GW170729, GW170809, GW170814, GW170817, oraz GW170818.

Opublikowane wyniki bardzo jasno pokazują znaczące poprawienie dokładności lokalizacji Źródła sygnału na niebie wynikające z obserwacji dokonywanych przez sieć trzech, a nie dwóch, detektorów – widać to na Rysunku 4. Dla przykładu, najgorzej zlokalizowanym sygnałem w naszym katalogu jest sygnał GW170823 związany ze złaniem się dwóch czarnych dziur – był on zaobserwowany tylko przez dwa detektory LIGO, które były w stanie zlokalizować Źródło tego sygnału w obszarze nieba o polu większym niż 1600 stopni kwadratowych (jest to obszar około 5000 większy od fragmentu nieba zajmowanego przez księżyc w pełni). Z drugiej strony sygnał GW170818, również związany ze złaniem się dwóch czarnych dziur, w przybliżeniu tak samo silny jak sygnał GW170823, był zaobserwowany przez wszystkie trzy detektory, co umożliwiło lokalizację jego Źródła na niebie w obszarze o polu zaledwie 39 stopni kwadratowych. Bardziej dokładnie był zlokalizowany, w obszarze o polu tylko 16 stopni kwadratowych, jedynie potrójnie wykryty sygnał GW170817 ze zderzających się gwiazd neutronowych.



Rysunek 4: Mapy nieba pokazujące obszary 50% i 90% wiarygodności dla lokalizacji na niebie źródeł zarejestrowanych sygnałów. Znacznie lepsza lokalizacja nieba zapewniana przez sieć trzech detektorów (LLO, LHO i Virgo) jest widoczna np. dla sygnału GW170818 (zgodnie z rysunkiem 8 naszego [artykułu](#)).

Wreszcie, Rysunek 5 pokazuje wszystkie umieszczone w katalogu sygnały związane ze zlewającymi się czarnymi dziurami w postaci map czasowo-częstotliwościowych (w lewej części każdego panelu ilustrującego sygnał): w tej reprezentacji czas jest odłożony na osi poziomej, na osi pionowej odkłada się chwilową częstotliwość sygnału fali grawitacyjnej, natomiast siła sygnału oznaczana jest różnymi kolorami. Dla wielu sygnałów wyraźnie widoczny jest charakterystyczny "ćwierk" o wzrastającej z czasem częstotliwości, który jest teoretycznie przewidywany dla sygnałów związanych ze zlewającymi się czarnymi dziurami. Prawe części paneli pokazują przebieg czasowy sygnału zrekonstruowany na dwa różne sposoby, które – po uwzględnieniu niepewności zastosowanych procedur – dają zgodne ze sobą wyniki.

PATRZĄC W PRZYSZŁOŚĆ

Przedstawione w katalogu wyniki obserwacji fal grawitacyjnych pozwoliły na nowo oszacować, jak często w naszym Wszechświecie łączą się ze sobą dwie czarne dziury bądź dwie gwiazdy neutronowe, oraz podać górne ograniczenie na tempo łączenia się układów złożonych z gwiazdy neutronowej i czarnej dziury – biorąc pod uwagę fakt, że nie wykryliśmy takich zjawisk w kampaniach obserwacyjnych O1 i O2. Więcej informacji na temat tych oszacowań i sposobu ich wyznaczania można znaleźć w [artykule towarzyszącym](#) katalogowi. Przyszłe obserwacje pozwolą wyznaczyć tempo łączenia się gwiazd neutronowych i czarnych dziur w układach podwójnych ze znacznie większą dokładnością.

Obecnie pracujemy nad zwiększeniu czułości detektorów Advanced Virgo i Advanced LIGO. Trzecia kampania obserwacyjna, nazwana O3, ma rozpocząć się wiosną 2019 r. i potrwać przez cały rok. Spodziewamy się odkrycia kilkudziesięciu koalescencji czarnych dziur i gwiazd neutronowych w układach podwójnych. Ponadto oczekujemy, że pod koniec kampanii obserwacyjnej O3 japoński detektor [KAGRA](#) dołączy do sieci detektorów Advanced Virgo i Advanced LIGO, co pozwoli na dalsze znaczne poprawienie naszej zdolności dokładnego lokalizowania źródeł fal grawitacyjnych na niebie.

Publikacja katalogu GWTC-1 ma przełomowe znaczenie dla astronomii fal grawitacyjnych i zapowiada bardzo obiecującą przyszłość tej dyscypliny nauki.

GLOSARIUSZ

Czarna dziura: obszar czasoprzestrzeni zdeformowany przez wyjątkowo zwartą masę, w którym grawitacja jest tak silna, że uniemożliwia ucieczkę z tego obszaru nawet światłu.

Gwiazda neutronowa: wyjątkowo gęsta pozostałość po zapadnięciu się masywnej gwiazdy.

Szum: fluktuacja mierzonego sygnału wywołana różnymi efektami instrumentalnymi i środowiskowymi. Czułość detektora fal grawitacyjnych jest ograniczona przez szum.

Kampania obserwacyjna: okres, w którym detektory fal grawitacyjnych zbierają dane. **Czułość:** zdolność detektora do wykrywania sygnału. Detektory pracujące z niższym szumem są w stanie wykryć słabsze sygnały, dlatego mówi się o nich, że mają wyższą (lub większą) czułość.

Napężenie: względna zmiana odległości między dwoma odległymi punktami wywołana przechodzącą między nimi falą grawitacyjną.

Przebieg sygnału: sposób, w jaki w czasie zmienia się sygnał fali grawitacyjnej.

Spin: wielkość mierząca jak szybko obiekt obraca się wokół własnej osi.

Polaryzacja fali grawitacyjnej: geometryczny kształt zmiany (rozciągania i ściskania) czasoprzestrzeni wywołanej falą grawitacyjną.

Deformacja pływowa: Odształcenie obiektu wywołane przez pole grawitacyjne innego obiektu. Przykładowo, na Ziemi zmiany poziomu mórz i oceanów są powodowane przez oddziaływanie grawitacyjne Słońca i Księżyca.

WIĘCEJ INFORMACJI:

Odwiedź nasze strony internetowe: <http://www.ligo.org>,

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

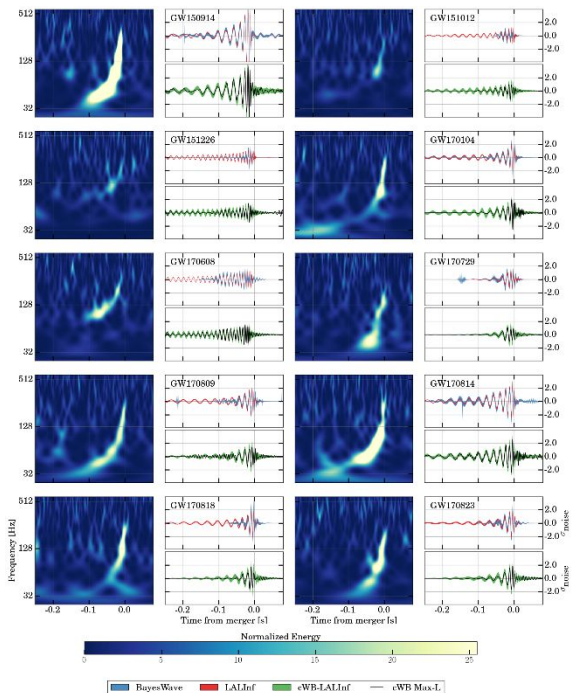
Przeczytaj [artykuł online](#).

Przeczytaj powiązany z katalogiem [artykuł](#) o właściwościach populacji układów podwójnych czarnych dziur, wynikających z obserwacji O1 i O2.

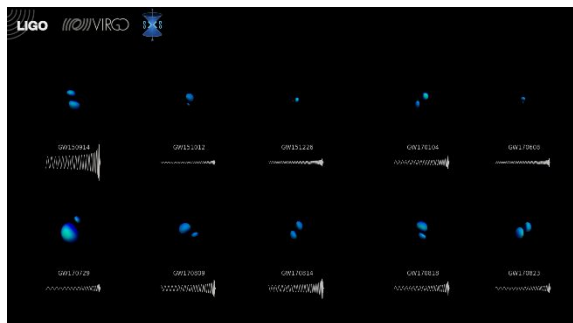
Przeglądaj [katalog](#) na stronie [Centrum Otwartych Danych Fal Grawitacyjnych](#).



Odwiedź nasze strony internetowe:
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



Rysunek 5: Mapy czasowo-częstotliwościowe (lewe części panelów) i zrekonstruowane przebiegi sygnałów (prawe części panelów) dla dziesięciu ogłoszonych w katalogu zderzeń czarnych dziur. W prawych częściach panelów różne kolory reprezentują różne metody rekonstrukcji sygnałów; są one zgodne ze sobą, gdy weźmiemy pod uwagę niepewności zastosowanych metod rekonstrukcji. (Rysunek 10 naszego [artykułu](#)).



Rysunek 6: Obraz z symulacji "Binary Black Hole Orrery" opracowanej przez konsorcjum LIGO i Virgo: wizualizacja łączących się czarnych dziur zaobserwowanych przez detektory LIGO i Virgo. Film (dostępny [tutaj](#)) ilustruje obliczone w numerycznej teorii względności horyzonty czarnych dziur i fale grawitacyjne emitowane podczas ostatnich kilku orbit układu, od fazy ruchu po spirali, przez łączenie się do „podzwonnego” (ringdown). Wyniki obliczeń są zgodne z obserwacjami z katalogu LIGO-Virgo. Gdy horyzonty czarnych dziur krążą wokół siebie coraz bliżej i łączą się, emitowane fale grawitacyjne stają się głośniejsze (mają większą amplitudę) i ich częstotliwość wzrasta. Film inspirowany jest [mechanicznym modelem układu słonecznego Keplera \(Kepler Orrery\)](#) (Teresita Ramirez / Geoffrey Lovelace / SXS Collaboration / konsorcja LIGO Virgo).