

GW241011 i GW241110: DWIE PARY ŁĄCZĄCYCH SIĘ SZYBKO WIRUJĄCYCH CZARNYCH DZIUR O RÓŻNYCH MASACH, WYKRYTE DZIĘKI FALOM GRAWITACYJNYM

W ostatnich miesiącach 2024 roku konsorcjum [LIGO–Virgo–KAGRA \(LVK\)](#) zarejestrowało dwa niezwykle podobne (i to nie tylko z nazwy) sygnały [fal grawitacyjnych](#): GW241011 i GW241110. Pierwszy z nich, GW241011, został wykryty 11 października 2024 roku o godzinie 23:38:34 UTC. Sygnał GW241110 zaobserwowano niemal dokładnie miesiąc później, 10 listopada o godzinie 12:41:23 UTC. Oba te sygnały pochodzą z układów podwójnych szybko wirujących czarnych dziur i w każdym z tych układów jego składniki mają różne masy. Właściwości te mają znaczenie dla naszego zrozumienia procesów powstawania i ewolucji par czarnych dziur, jak również dla fizyki fundamentalnej.

WYKRYWANIE SYGNAŁÓW

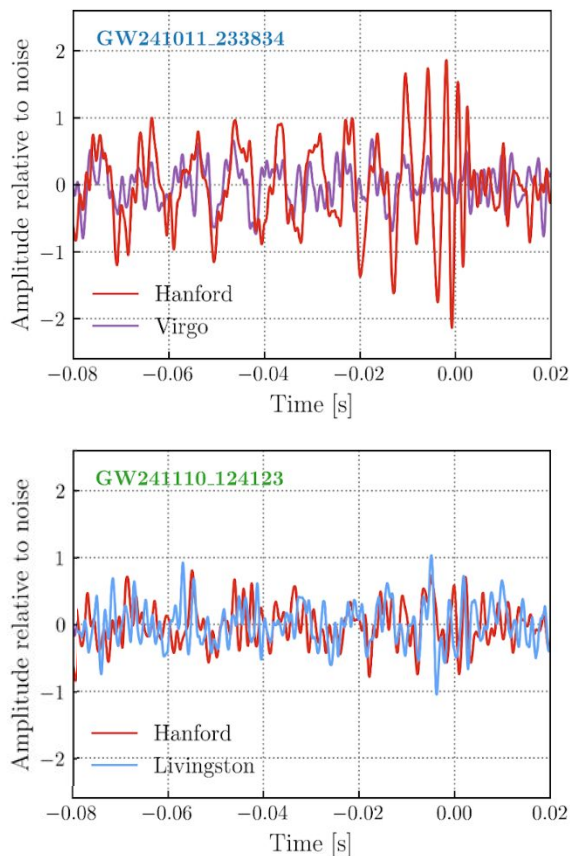
Detektory LIGO i Virgo wykryły oba zdarzenia podczas drugiej części czwartej (O4b) [kampanii obserwacyjnej](#) LIGO–Virgo–KAGRA. Na **Rys. 1** przedstawiono zarejestrowaną amplitudę fal grawitacyjnych od czasu dla tych zdarzeń.

Sygnał GW241011 wyróżniał się natychmiast — wyraźnie przewyższał typowy poziom [szumu](#) w obu detektorach. W detektorze [LIGO Hanford](#) sygnał był około 35 razy silniejszy od poziomu szumu, natomiast w detektorze [Virgo](#) około 9 razy. Detektor [LIGO Livingston](#) w tym czasie nie pracował. Wykorzystując zaawansowane algorytmy wyszukiwania i techniki statystyczne, ustalono, że przypadkowy szum mógłby naśladować ten sygnał nie częściej niż raz na 10^{26} lat (to znacznie dłużej niż [wiek Wszechświata](#)).

Sygnał GW241110 został wykryty miesiąc później przez wszystkie trzy detektory. Choć sygnał był słabszy niż GW241011, był wyraźnie widoczny w obu detektorach LIGO, natomiast detektor Virgo zarejestrował sygnał o mniejszej sile. Ruchy gruntu w pobliżu detektora Livingston były wówczas dość silne, co spowodowało pewne zakłócenia dla niskich częstotliwości; nie miało jednak to istotnego wpływu na samą detekcję. Po dokładnej analizie oszacowano, że sygnał ten mógłby zostać wywołany przypadkowym szumem nie częściej niż raz na 1500 lat.

ZNAJDŹ WIĘCEJ!

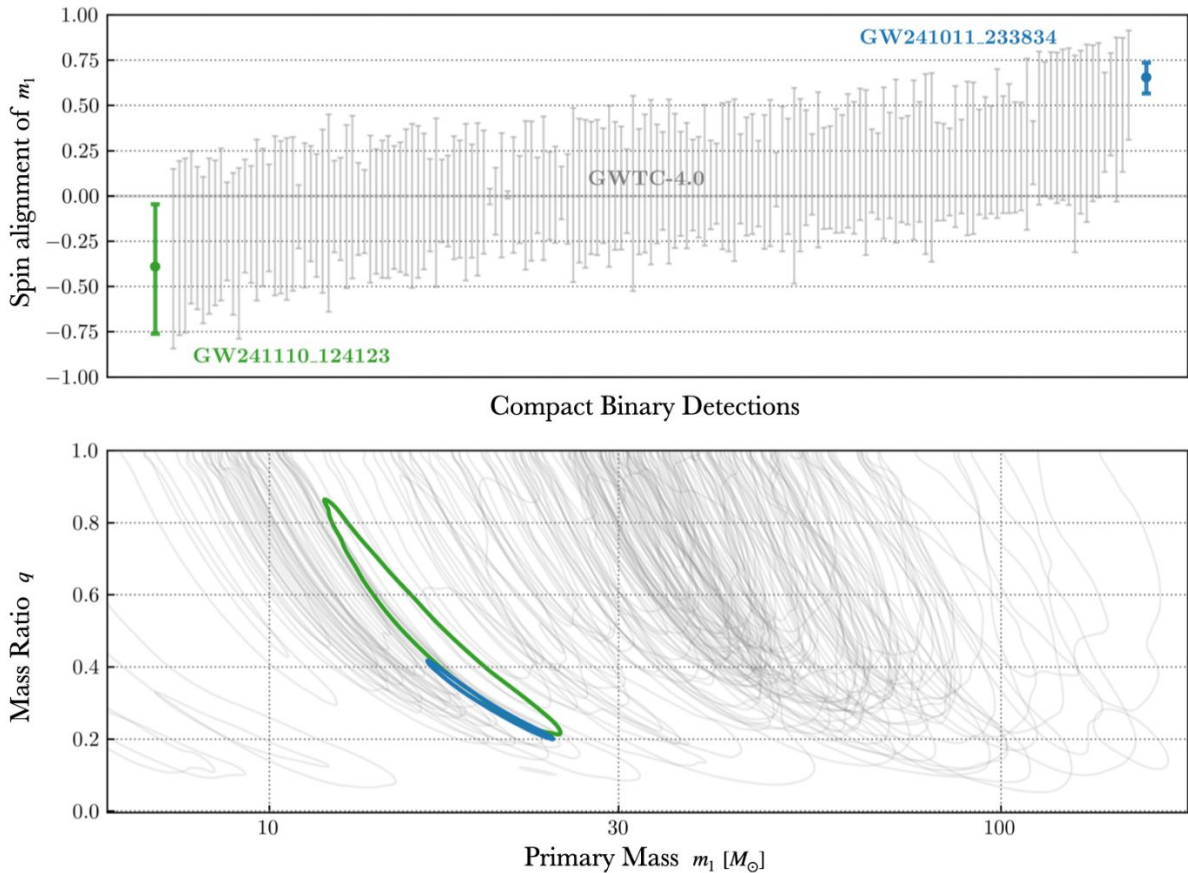
Odwiedź www.ligo.org
 nasze www.virgo-gw.eu
 strony: gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Rysunek 1. Panele pokazują zależność amplitudy od czasu sygnałów GW241011 (panel górny) i GW241110 (panel dolny) dla par detektorów LIGO Hanford i Virgo oraz LIGO Hanford i Livingston. Moment połączenia się czarnych dziur przypada na Time=0.

CO BYŁO ŹRÓDŁEM SYGNAŁÓW?

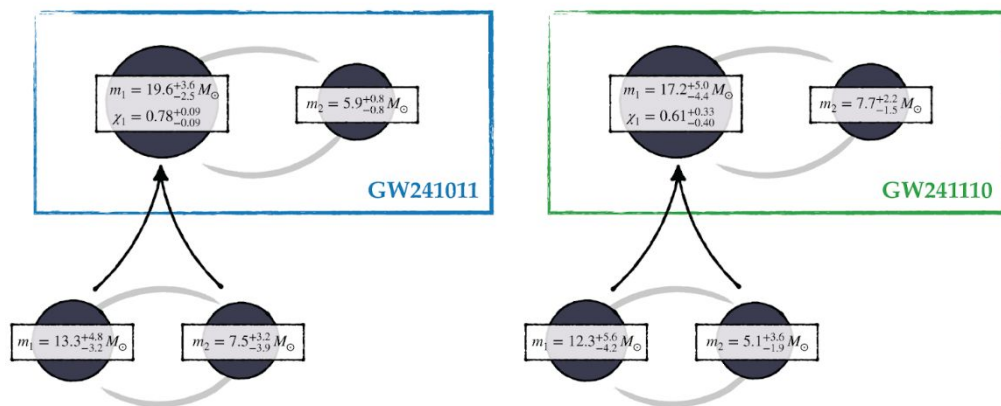
Każde ze zdarzeń było wynikiem gwałtownego połączenia się dwóch [czarnych dziur](#). GW241011 to sygnał fali grawitacyjnej pochodzący ze zderzenia dwóch czarnych dziur o masach około 20 i 6 razy większych od [masy Słońca](#), natomiast czarne dziury w GW241110 miały masy uderzająco podobne: około 17 i 8 razy większe od masy Słońca! (Zobacz **Rys. 2**, dolny panel.) Oba obiekty wirowały z dużą prędkością, a spin GW241011 został precyzyjnie zmierzony. (Zobacz **Rys. 2**, górny panel.)



Rysunek 2 (adaptacja Rys. 1 z naszej publikacji). Górny panel pokazuje wszystkie zdarzenia z najnowszego katalogu konsorcjum LVK, [GWTC-4](#), oraz dwa nowe zdarzenia GW241011 i GW241110, uporządkowane według rzutu [spinu](#) głównej czarnej dziury na kierunek orbitalnego momentu pędu — innymi słowy, pokazano jak bardzo kierunek obrotu głównej czarnej dziury jest zgodny z kierunkiem ruchu orbitalnego układu podwójnego. Wartości większe od zera oznaczają, że czarna dziura wiruje w kierunku zgodnym z kierunkiem obiegu orbity, natomiast wartości mniejsze od zera oznaczają, że kierunki te są przeciwnie. Dolny panel pokazuje rozkład masy bardziej masywnej czarnej dziury (w masach Słońca) i [ilorazu mas](#) obu czarnych dziur dla wszystkich zdarzeń z katalogu GWTC-4, w tym naszych dwóch nowych zdarzeń.

JAK POWSTAŁY UKŁADY PODWÓJNE BĘDĄCE ŹRÓDŁAMI SYGNAŁÓW?

Omawiane zdarzenia mają kilka interesujących cech wspólnych: w każdym układzie masywniejsza czarna dziura (nazywana *główną* czarną dziurą) miała dokładnie zmierzony spin, kierunki spinów głównych czarnych dziur nie pokrywały się dokładnie z kierunkami orbitalnego momentu pędu układu, w każdym układzie jedna czarna dziura miała masę około dwa razy większą od masy drugiej czarnej dziury. Wskazówki te sugerują, że główna czarna dziura w każdej parze mogła powstać w wyniku wcześniejszego połączenia się innych czarnych dziur – co czyni ją czarną dziurą „drugiej generacji” (zobacz **Rys. 3**). Taki scenariusz nazywa się **hierarchicznym łączeniem się** i wskazuje na możliwość, że układy te powstały w gęstych środowiskach, takich jak [gromady gwiazd](#), gdzie czarne dziury mają większą tendencję do wpadania na siebie i wielokrotnego łączenia się. Nie możemy jednak wykluczyć alternatywnego scenariusza, w którym oba te układy powstały z pary gwiazd ewoluujących w izolacji.



Rysunek 3 (adaptacja Rys. 7 z naszej publikacji). Na rysunku przedstawiono pary czarnych dziur dla każdego ze zdarzeń GW241011 i GW241110, a także możliwe przodków masywniejszej czarnej dziury w każdej z par. Dla każdej czarnej dziury podano jej szacunkową masę w jednostkach masy Słońca wraz z niepewnością. Dla każdej pary pokazano również zmierzony spin χ masywniejszej czarnej dziury.

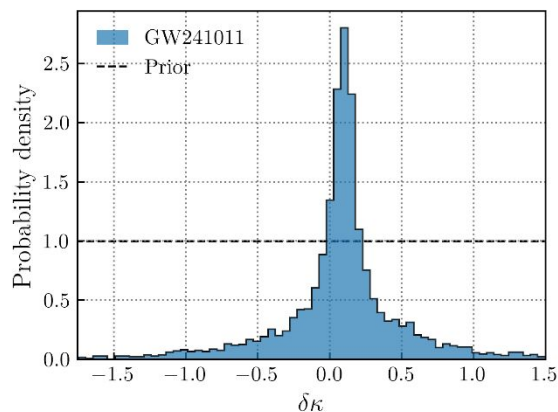
IMPLIKACJE DLA FIZYKI FUNDAMENTALNEJ

Niesamowicie precyzyjny i wiarygodny pomiar spinu głównej czarnej dziury w GW241011 pozwolił nam przetestować kluczowe przewidywanie [ogólnej teorii względności Einsteina](#), znane jako **indukowany spinem moment kwadrupolowy** czarnej dziury. Wielkość ta opisuje sposób, w jaki szybka rotacja nieznacznie zniekształca kształt czarnej dziury i zmienia emitowane przez nią fale grawitacyjne. Dzięki dokładnej analizie sygnału GW241011 (zobacz **Rys. 4**) z niespotykaną dotąd dokładnością zweryfikowaliśmy przewidywania Einsteina dotyczące tego efektu (tak, Einstein znów miał rację!), nakładając najsilniejsze jak dotąd ograniczenia na ten aspekt wirujących czarnych dziur.

Wirujące czarne dziury, takie jak główne czarne dziury w GW241011 i GW241110, pozwalają nam również badać istnienie nowych, nieodkrytych jeszcze cząstek. Niektóre teorie przewidują, że ultralekkie [bozony](#) (czyli potencjalne cząstki [ciemnej materii](#)) znacznie lżejsze od wszystkich cząstek [Modelu Standardowego fizyki cząstek elementarnych](#)) mogą z czasem stopniowo „wydobywać” spin z czarnych dziur. Gdyby takie cząstki miały masy w pewnym zakresie wartości i tworzyły chmury wokół głównych czarnych dziur w GW241011 i GW241110, spowodowałyby one spowolnienie prędkości obrotowej czarnych dziur na długo przed ich połączeniem. Biorąc pod uwagę to, że obie główne czarne dziury wciąż szybko się obracają, wyklucza to szeroki zakres możliwych mas tych bozonów – w ten sposób zdarzenia te stanowią potężne narzędzie do badania nowej fizyki.

WNIOSKI

Wykrycie sygnałów GW241011 i GW241110 ilustruje niezwykle postępy astronomii fal grawitacyjnych w odkrywaniu ukrytego życia łączących się czarnych dziur. Oba układy wskazują na możliwość powstawania czarnych dziur „drugiej generacji” w gęstych środowiskach, w których mogą zachodzić powtarzające się procesy łączenia się czarnych dziur. Co więcej, bezprecedensowy pomiar spinów i multipoli wyższego rzędu dla GW241011 pozwolił na przetestowanie ogólnej teorii względności w ekstremalnych warunkach – otrzymane wyniki nie wykazały żadnych odchyleń od przewidywań Einsteina. Wiedza, jaką uzyskujemy dzięki każdej detekcji, pomaga nam złożyć w całość wielką układankę Wszechświata, przypominając nam, że każde zdarzenie jest nie tylko odkryciem astrofizycznym, ale także laboratorium do testowania podstawowych praw fizyki.



Rysunek 4 (adaptacja Rys. 9 z naszej publikacji). Odchylenie od przewidywań ogólnej teorii względności dla spinowego momentu kwadrupolowego głównej czarnej dziury w GW241011. Odchylenie jest zgodne z wartością zerową, co wskazuje, że zdarzenie jest zgodne z teorią Einsteina.

ZNAJDŹ WIĘCEJ!

Odwiedź nasze strony: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Przeczytaj bezpłatny preprint pełnej wersji artykułu naukowego [tutaj](#) lub w repozytorium [arXiv](#).

Dane opublikowane w Gravitational-Wave Open Science Centre:

dla GW241011 – <https://doi.org/10.7935/3drz-8m81>,

dla GW241110 – <https://doi.org/10.7935/46xh-t016>.