

# GW190521: KOALESCENCJA REKORDOWO MASYWNYCH CZARNYCH DZIUR

## CO ZAOBSERWOWALIŚMY?

21 maja 2019 roku detektory Advanced LIGO i Advanced Virgo zarejestrowały fale grawitacyjne z koalescencji niezwyklej pary czarnych dziur. Sygnał, nazwany GW190521, był krótszy i osiągnął maksymalną amplitudę przy niższej częstotliwości niż w przypadku innych zaobserwowanych do tej pory sygnałów z ciasnych układów podwójnych czarnych dziur.

Okres czasu, jaki sygnał z połączenia czarnych dziur w układzie podwójnym spędza w paśmie czułości Advanced LIGO i Advanced Virgo jest odwrotnie proporcjonalny do całkowitej masy układu podwójnego. W przypadku GW190521 czas ten wyniósł jedynie 0,1 sekundy, czyli był znacznie krótszy niż np. w przypadku [GW150914](#) - pierwszego sygnału z łączących się czarnych dziur. Maksymalna częstotliwość sygnału jest również odwrotnie proporcjonalna do całkowitej masy układu. Dla GW190521 ta końcowa częstotliwość wynosiła tylko około 60 Hz, czyli znacznie mniej niż w przypadku GW150914. Od początku było więc jasne (patrz rys. 1), że LIGO i Virgo zarejestrowały ostatnie chwile bardzo masywnej pary czarnych dziur.

Rysunek 2 pokazuje zmierzone masy czarnych dziur, które wytworzyły sygnał GW190521. Większa z dwóch czarnych dziur miała masę około 85 razy większą od [masy Słońca](#) ( $M_{\odot}$ ), podczas gdy mniejsza czarna dziura masę zbliżoną do  $66 M_{\odot}$ . Oba te obiekty są znacznie masywniejsze niż [którakolwiek z czarnych dziur wykrytych wcześniej przez LIGO i Virgo](#) - nawet mniej masywna czarna dziura jest masywniejsza niż wiele czarnych dziur powstałych w zarejestrowanych do tej pory zdarzeniach (patrz rys. 3).

W przypadku GW190521, czarna dziura powstała w wyniku koalescencji dwóch czarnych dziur ma masę około  $142 M_{\odot}$ , co stawia ją na pierwszym miejscu listy najbardziej masywnych czarnych dziur wykrytych przez LIGO i Virgo. Masa powstałej czarnej dziury jest o około  $8M_{\odot}$  mniejsza od sumy mas czarnych dziur, które się połączyły; brakująca masa została zamieniona na energię, której część dotarła do nas w postaci fali grawitacyjnej.

## DLACZEGO SYGNAŁ GW190521 JEST INTERESUJĄCY?

Niespotykane do tej pory rekordowo duże masy czarnych dziur, które wytworzyły GW190521 są nie tylko powodem do przechwałek; stanowią one wyzwanie dla naszego rozumienia tworzenia się czarnych dziur i służą jako jedyne w swoim rodzaju laboratorium badawcze podstaw teorii grawitacji.



Odwiedź nasze strony  
w internecie:

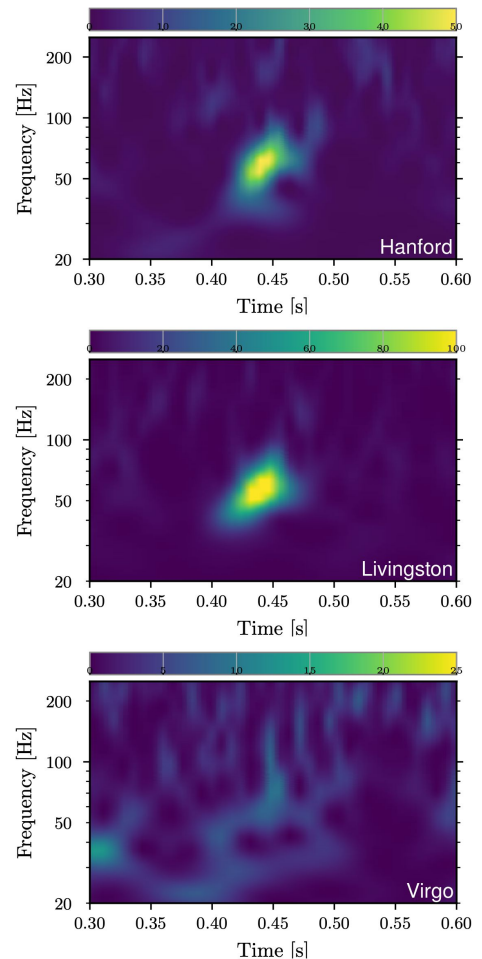
<http://www.ligo.org>

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

## Jak powstają masywne czarne dziury?

Astronomowie klasyfikują czarne dziury w zależności od ich masy. Ma to znaczenie, ponieważ czarne dziury o różnych masach powstają w różny sposób.

W centrach większości, jeśli nie wszystkich, dużych galaktyk znajdują się „supermasywne” czarne dziury o masach od setek tysięcy do miliardów mas Słońca.



**Rysunek 1.** Reprezentacje czasowo-częstotliwościowe (spektrogramy) danych zawierających sygnał GW190521, zaobserwowany przez LIGO Hanford (górny panel), LIGO Livingston (w środku) i Virgo (na dole). Czas jest pokazany w odniesieniu do godziny 03:02:29 UTC 21 maja 2019 r. Energia w każdym przedziale czasowo-częstotliwościowym jest zaprezentowana przez paletę kolorów. Zwróć uwagę na wyjątkowo krótki czas trwania sygnału i maksymalną częstotliwość około 60 herców. (Na podstawie rys. 1 z naszej [pracy badawczej opisującej odkrycie GW190521](#)).

Nasza własna galaktyka, Droga Mleczna, ma [w swoim centrum czarną dziurę](#), która jest około 4 milionów razy masywniejsza od Słońca. Jak dokładnie powstają tak wielkie czarne dziury pozostaje tajemnicą. Proces ich powstawania rozpoczął się najprawdopodobniej, gdy Wszechświat był dużo młodszy, dając czarnym dziurom czas na osiągnięcie tak dużych mas.

Na drugim końcu rozkładu mas znajdują się [czarne dziury „o masach gwiazdowych”](#), które, jak sądzimy, powstały z zapadających się jąder masywnych gwiazd podczas [wybuchów supernowych](#). Czarne dziury o masach gwiazdowych mają masy od kilku do kilkudziesięciu razy większe od masy Słońca, a fale grawitacyjne emitowane podczas ostatnich chwil ewolucji układów podwójnych złożonych z takich obiektów są obserwowane przez LIGO i Virgo.

Pomiędzy czarnymi dziurami o masach gwiazdowych a supermasywnymi czarnymi dziurami znajduje się tajemnicza strefa [czarnych dziur o „masach pośrednich”](#), to jest o masach od 100 do około 100 000 razy większych od masy Słońca. Do chwili obecnej nie ma żadnych ostatecznych obserwacji takich czarnych dziur, ale istnieje kilka różnych scenariuszy ich powstawania. Polowanie na czarne dziury o masie pośredniej ostatnio nabrało tempa, ponieważ poprawiły się możliwości obserwacyjne teleskopów i detektorów fal grawitacyjnych.

Nasze aktualne teoretyczne rozumienie budowy wnętrza masywnych gwiazd oraz sposobu powstawania czarnych dziur sugeruje, że czarne dziury o masie pomiędzy około 65 i 120 mas Słońca nie mogą być utworzone przez zapadającą się gwiazdę. Sygnał GW190521 „wyrwał się jak filip z konopii”, ponieważ masywniejsza czarna dziura w pierwotnym układzie podwójnym znajduje się w przedziale mas, co do którego nie oczekuje się czarnych dziur powstających bezpośrednio w wyniku zapadnięcia się masywnej gwiazdy. Dodatkowo, finalny obiekt pozostały po połączeniu składników układu można wprost sklasyfikować jako czarną dziurę o masie pośredniej.

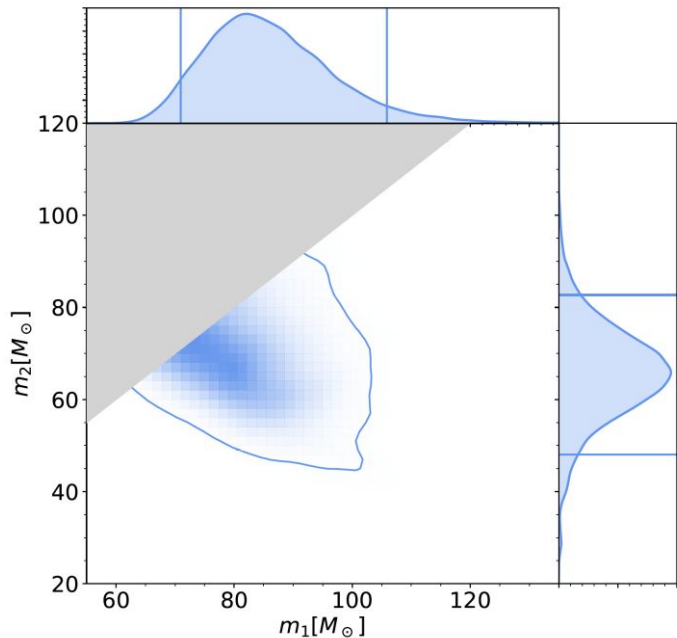
Obserwacja GW190521 przez LIGO i Virgo sugeruje, że gwiazdy mogą tworzyć czarne dziury o dużej masie, albo że niektóre czarne dziury powstają w inny sposób - być może w wyniku wcześniejszego połączenia par lżejszych czarnych dziur, co następnie otwiera drogę do utworzenia cięższej czarnej dziury. Ten hierarchiczny scenariusz wymaga, aby czarne dziury powstawały w specjalnych środowiskach, w których znajduje się wystarczająco dużo innych czarnych dziur, aby mogły wystąpić wielokrotne połączenia. Astronomowie podejrzewają gęste [gromady gwiazd](#) lub [dyski akrecyjne aktywnych jąder galaktyk](#) jako prawdopodobne przykłady takich miejsc.

Obserwacja GW190521 sugeruje również, że populacja czarnych dziur o masach pośrednich może częściowo składać się z produktów połączeń czarnych dziur o masach gwiazdowych. W podobny sposób mogą także powstawać supermasywne czarne dziury.

## Testowanie naszego rozumienia grawitacji

Nasze teoretyczne zrozumienie działania grawitacji jest dobrze opisane przez [ogólną teorię względności](#) Einsteina. Fizycy używają teorii do modelowania sygnałów fal grawitacyjnych emitowanych podczas łączenia się czarnych dziur w układach podwójnych. Przewidywania te są wykorzystywane w analizie danych LIGO i Virgo. Z drugiej strony, obserwacje sygnałów fal grawitacyjnych mogą być użyte do testowania przewidywań teorii oraz do poszukiwania oznak wszelkich odstępstw od teorii względności, które mogłyby wskazywać drogę do [alternatywnej teorii grawitacji](#).

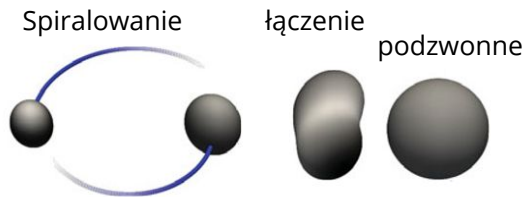
Używanie fal grawitacyjnych jako laboratoriów fizyki nie jest niczym nowym: wcześniejsze obserwacje LIGO i Virgo łączenia się czarnych dziur zostały wykorzystane do [przetestowania naszego rozumienia teorii względności](#). Co więc odróżnia GW190521 od innych sygnałów?



**Rysunek 2.** Pomiar mas czarnych dziur wchodzących w skład układu podwójnego, który wyemitował sygnał GW190521 pokazano jako rozkłady prawdopodobieństwa. Zgodnie z analizą LIGO-Virgo, rzeczywiste wartości mas czarnych dziur znajdują się z prawdopodobieństwem 90% wewnątrz niebieskiego konturu na głównym wykresie (który pokazuje wspólny rozkład prawdopodobieństwa dla obu mas). To samo dotyczy pionowych i poziomych linii na krzywych w kształcie dzwonów na górze i na prawo od rysunku, obrazujących pomiar mas dla poszczególnych czarnych dziur. Szare pole w kształcie trójkąta jest związane z założeniem, że masa „pierwszego” składnika  $m_1$  jest zawsze równa lub większa od masy „drugiego”  $m_2$ .

Sygnał fali grawitacyjnej emitowany przez układ podwójny czarnych dziur można podzielić na [trzy różne etapy](#) (patrz rys. 4): pierwszy to „spiralowanie” (ang. inspiral), gdy czarne dziury wciąż tworzą układ podwójny i krążą wokół wspólnego środka masy; następny to „łączenie się” (koalescencja, ang. merger), gdy dwie czarne dziury zderzają się ze sobą; końcowym etapem jest „podzwonne” (ang. ringdown), kiedy powstała czarna dziura podobnie do dzwonu, zanim przyjmie ostateczny stabilny stan (szybko rotującej czarnej dziury Kerr’a).

Jak wspomniano wcześniej, sygnały z układów podwójnych czarnych dziur obserwowalne w danych LIGO-Virgo mają różne długości i osiągają wartości szczytowe o różnej częstotliwości, w zależności od mas składników. Detektory są czułe na różne części sygnału fali grawitacyjnej, w zależności od masy układu podwójnego. Sygnały z czarnych dziur o mniejszej masie są wyraźniej obserwowane podczas ostatnich orbit układu i łączenia się składników. Znacznie większe masy czarnych dziur w przypadku GW190521 dają nam najlepszą jak dotąd możliwość badania późnej fazy łączenia się oraz „podzwonnego” fali grawitacyjnej.



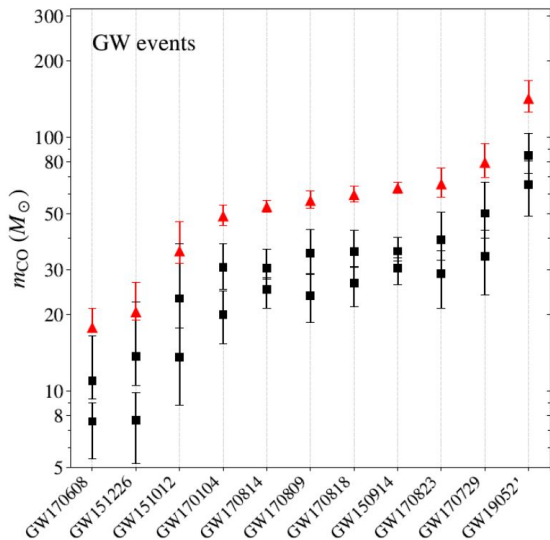
**Rysunek 4.** Ilustracja trzech głównych etapów ewolucji sygnału fali grawitacyjnej emitowanej przez układ podwójny czarnych dziur.

Podobnie jak w przypadku innych zarejestrowanych do tej pory sygnałów, sygnał GW190521 okazał się niesprzeczny z przewidywaniami ogólnej teorii względności. Jeden z testów polegał na przeanalizowaniu sygnału podzwonnego i sprawdzeniu, czy jest on spójny z częściami sygnału opisującymi etapy spiralowania i łączenia się. Przeprowadzono również poszukiwanie dodatkowych (względem teorii względności) cech sygnału, przewidywanych przez alternatywne teorie grawitacji, oraz przetestowano alternatywne hipotezy pochodzenia sygnału (inne niż układ podwójny czarnych dziur). Żaden z tych testów nie zdołał obalić interpretacji, że sygnał GW190521 powstał w wyniku połączenia dwóch czarnych dziur zgodnych z fizyką opisaną w teorii względności.

## PODSUMOWANIE

GW190521 jest pierwszą w swoim rodzaju, „rekordową” obserwacją fali grawitacyjnej, która przesuwa granice naszej wiedzy o tym, jak tworzą się czarne dziury oraz umożliwia nowy sposób badania grawitacji podczas najbardziej ekstremalnych zjawisk. Sygnał sugeruje istnienie populacji układów podwójnych czarnych dziur o dużych masach emitujących fale, które mogą być rejestrowane podczas nadchodzących [kampanii obserwacyjnych LIGO-Virgo](#).

Badanie górnego przedziału mas populacji czarnych dziur o masach gwiazdowych pomoże nam lepiej opisać proces powstawania czarnych dziur oraz środowisk, w których występują. GW190521 jest obecnie przykładem najbliższej pary czarnych dziur, ale jej wyjątkowy status może się zmienić w bliskiej przyszłości. LIGO i Virgo będą nadal poszukiwać fal grawitacyjnych z jeszcze lepszą czułością, a detektory będą bardziej wydajne zwłaszcza przy niskich częstotliwościach, gdzie powinno się ukrywać o wiele więcej układów podwójnych ciężkich czarnych dziur. Planowane w przyszłości detektory to między innymi [Teleskop Einsteina](#) i [Cosmic Explorer](#) oraz kosmiczny detektor [LISA](#). Rekordy są po to, by je bić!



**Rysunek 3.** Wykres przedstawiający masy składników (przedstawione jako czarne kwadraty) czarnych dziur GW190521 w porównaniu z masami innych zdarzeń czarnych dziur wykrytych podczas [pierwszej i drugiej kampanii obserwacyjnych LIGO i Virgo, O1 i O2](#). Dla każdego zdarzenia masa finalnej czarnej dziury jest pokazana w postaci czerwonego trójkąta. We wszystkich przypadkach długość pionowego paska wskazuje na zakres niepewności szacowania masy. Rekordowe masy GW190521 są wyraźnie widoczne na tym wykresie (zaadaptowane z rys. 10 naszej pracy o [astrofizycznych konsekwencjach wynikających z detekcji GW190521](#)).

## DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

Odwiedź nasze strony w internecie: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

Przeczytaj materiały prasowe LIGO i Virgo o odkryciu sygnału GW190521:

[www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf](http://www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf)  
<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

Przeczytaj publicznie dostępny artykuł naukowy na temat odkrycia GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Przeczytaj naukowy artykuł towarzyszący opisujący astrofizyczne konsekwencje detekcji sygnału GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

Dane związane z GW190521 są dostępne w [Centrum Otwartych Danych Fal Grawitacyjnych](#).